TEXTE
63/2020

Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Abschlussbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 63/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 242 0
FB000171

Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

von

Dr. Richard Beisecker, Frederike Dießelberg, Theresa Seith

Ingenieurbüro für Ökologie und Landwirtschaft (IfÖL) GmbH, Kassel

Florian Senoner, Elisabeth Zettl

Ramboll Environment & Health GmbH, München

Alexander Strom, Dr. Stephan Hannappel

HYDOR Consult GmbH, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Ingenieurbüro für Ökologie und Landwirtschaft (IfÖL) GmbH, Kassel
Ramboll Environment & Health GmbH, München
HYDOR Consult GmbH, Berlin

Abschlussdatum:
Juli 2019

Redaktion:
Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Dr. Frank Glante

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, zunächst einen Überblick zum aktuellen Stand der Forschung der durch Nutzung und Bewirtschaftung veränderbaren Einflussfaktoren auf die Wasserinfiltration in den Boden zu erarbeiten. Dabei standen besonders die landwirtschaftlichen Anbauverfahren, Bodenbearbeitungssysteme und pflanzenbaulichen Maßnahmen im Fokus der Untersuchungen. Darauf aufbauend wurde geprüft, inwieweit die aktuellen landwirtschaftlichen Fördermaßnahmen geeignet sind, die Infiltrationsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Flächen zu verbessern, um damit auch im Falle von extremen Niederschlagsereignissen Wassererosion und Überflutungen entgegenzuwirken. Ein weiteres Ziel war die Zusammenstellung und Auswertung der bestehenden rechtlichen Vorgaben (Gesetze, Verordnungen, Richtlinien etc.) und ihre Umsetzung in der sog. „guten fachlichen Praxis“ (gfP) im Hinblick auf die Verbesserung der Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden. Sowohl für die aktuellen Förderprogramme als auch die bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden nach einer Defizitanalyse gezielte Verbesserungsvorschläge und Maßnahmenempfehlungen zur Weiterentwicklung der Fördermaßnahmen und gesetzlichen Vorgaben abgeleitet.

Für vier ausgewählte Stark- oder Dauerregenereignisse, die zu markanten Schäden geführt haben, wurde anhand regionaler Analysen herausgearbeitet, warum es zu den erheblichen Auswirkungen gekommen ist und welche Zusammenhänge zwischen der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den Überflutungen bestehen. Aufbauend auf diesen Fallbeispielen wurden in Verbindung mit den Ergebnissen der Literaturrecherche und der Analyse der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Förderprogramme Vorschläge für zukünftige Risikoabschätzungen und möglicher Gegenmaßnahmen erarbeitet sowie Handlungs- und Forschungsbedarf abgeleitet.

Abstract

The aim of the research project was, firstly, to provide an overview of the current state of research on the influencing factors on water infiltration into the soil that can change through use and cultivation. The focus of the investigations was on agricultural cultivation methods, tillage systems and plant cultivation measures. Building on this, it was examined to what extent the current agricultural support measures are suitable for improving the infiltration capacity of agricultural land in order to counteract water erosion and flooding even in the event of extreme rainfall events. A further objective was the compilation and evaluation of the existing legal requirements (laws, ordinances, guidelines etc.) and their implementation in the so-called "good agricultural practice" in view of improving the water infiltration of agricultural soils. Following a deficit analysis, targeted suggestions for improvement and recommendations for measures for the further development of support measures and legal requirements were derived for both the current support programmes and the existing legal framework conditions.

For four selected heavy or persistent rain events that led to significant damage, regional analyses were used to determine why the considerable impacts occurred and what connections exist between agricultural land use and flooding. Based on these case studies, proposals for future risk assessments and possible countermeasures were developed in connection with the results of the literature research and the analysis of the legal framework conditions and the support programmes, and the need for action and research was derived.

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Teilnehmenden der Fragebogenaktion, der Interviews und des Fachgesprächs für die übermittelten Informationen und die Anregungen, die zum Erfolg des Projektes beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 12
Tabellenverzeichnis 15
Abkürzungsverzeichnis 16
Zusammenfassung 19
Summary 28
1 Hintergrund und Zielsetzung 36
1.1 Hintergrund 36
1.2 Zielsetzung 37
2 Methodisches Vorgehen zur Informationsermittlung 39
2.1 Internet- und Literaturrecherche 39
2.2 Experten-Befragung 39
3 Literaturüberblick zur Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden 41
3.1 Extremwetterereignisse 42
3.2 Oberflächenabfluss und Infiltration 45
3.3 Einflussfaktoren auf das Wasseraufnahmevermögen landwirtschaftlicher Böden 46
3.3.1 Nutzung 47
3.3.2 Oberflächenverschlämmung und Bodenbedeckung 49
3.3.3 Makroporen 51
3.3.4 Bodenbearbeitung 53
3.3.5 Bodenverdichtung 57
3.3.6 Anbauverfahren 59
3.3.7 Humusgehalt und Hydrophobie 62
3.4 Schlussfolgerungen für Maßnahmenempfehlungen und Risikovorsorge 65
3.4.1 Feld- / Schlagebene 68
3.4.2 Einzugsgebietsebene 71
4 Analyse der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasserinfiltration und zur Vermeidung von Bodenabtrag 74
4.1 Identifikation relevanter rechtlicher Grundlagen 74
4.1.1 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) 75
4.1.2 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) 78
4.1.3 Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz (AgrarZahlVerpflG) 79
4.1.4 Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung (AgrarZahlVerpflV) 79
4.1.5 Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV) 80

4.1.6 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) 81
4.1.7 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) 82
4.1.8 Flurbereinigungsgesetz (FlurbG) 83
4.2 Bewertung der wichtigsten Gesetze und Verordnungen 84
4.2.1 Vorgehensweise bei der Bewertung der Gesetze und Verordnungen 84
4.2.2 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) 84
4.2.3 Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) 85
4.2.4 Cross-Compliance gemäß AgrarZahlVerpflG und AgrarZahlVerpflV 86
4.2.5 Greening-Maßnahmen gemäß DirektZahlDurchfV 88
4.2.6 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) 88
4.2.7 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) 89
4.2.8 Flurbereinigungsgesetz (FlurbG) 90
4.2.9 Schlussfolgerung 90
4.3 Handlungsoptionen 91
4.3.1 Anpassung bzw. Erweiterung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und der Bundes-Bodenschutzverordnung 91
4.3.1.1 Konkretisierung der guten fachlichen Praxis in § 17 BBodSchG 92
4.3.1.2 Ergänzung des § 17 Abs. 2 BBodSchG 92
4.3.1.3 Ergänzung des § 17 Abs. 3 BBodSchG 93
4.3.1.4 Konkretisierung des § 8 BBodSchV auf Länderebene 93
4.3.2 Verschärfung der Cross-Compliance und Ausweitung des Greening 94
4.3.2.1 Anpassung der GLÖZ-Mindestanforderungen 94
4.3.2.2 Anpassung des Greenings 94
4.3.3 Anpassungen im Wasserrecht 95
4.3.3.1 Anpassung des § 78d zu Hochwasserentstehungsgebieten 95
4.3.4 Weitere Handlungsoptionen 96
4.3.4.1 Flurbereinigungsgesetz 96
4.4 Fazit 97
5 Bewertung des Förderinstrumentariums zur Verbesserung der Wasserinfiltration und zur Vermeidung von Bodenabtrag 98
5.1 Vorgehensweise und Inhalte der Recherche von Agrarfördermaßnahmen 98
5.2 Vorstellung der projektrelevanten Maßnahmen 99
5.2.1 Maßnahmen mit direkter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss 99
5.2.2 Maßnahmen mit indirekter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss 102
5.2.3 Maßnahmen mit fraglicher Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss 103

5.2.4 Maßnahmen zum Hochwasserschutz 104
5.2.5 Gesamtübersicht über die projektrelevanten Maßnahmen 104
5.3 Bewertung der Maßnahmeneffektivität 105
5.3.1 Breitenwirkung der ausgewählten Maßnahmen 106
5.3.2 Bewertung der Wirksamkeit 106
5.4 Defizitanalyse 109
5.4.1 Defizite der einzelnen Maßnahmen 109
5.4.2 Defizite der Förderprogramme bzw. der politischen Umsetzung 110
5.5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 111
5.5.1 Vorschläge zur Verbesserung bestehender Agrarfördermaßnahmen 111
5.5.2 Vorschläge zur Implementierung neuer Agrarfördermaßnahmen 113
5.5.3 Vorschläge für Wirkungsindikatoren 113
5.5.4 Vorschläge zur Umsetzung bestehender Agarfördermaßnahmen 114
6 Regionale Analysen vergangener Hochwasserereignisse und Bewertung des Einflusses der landwirtschaftlichen Flächennutzung 116
6.1 Einführung und Zielstellung 116
6.2 Methoden und Datengrundlagen 117
6.2.1 Definition Direktabfluss 117
6.2.2 Modifiziertes Curve-Number Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989) 117
6.2.3 Bedeutung der Vorfeuchte und der Hangneigung im Verfahren 118
6.2.4 Datengrundlagen und -verarbeitung 121
6.2.4.1 Niederschlag 123
6.2.4.2 Digitale Geländemodelle 123
6.2.4.3 Curve-Numbers: Literaturrecherche und Qualitätssicherung 123
6.2.4.4 Landnutzung 126
6.2.4.5 Versiegelungsgrad 126
6.2.4.6 Bestimmung der hydrologischen Bodenklassen 127
6.2.4.7 Bodenparameter 128
6.2.4.8 Modellgeometrie und Qualitätssicherung 130
6.2.4.9 Verarbeitung von Rasterinformation in Vektorobjekten 131
6.2.5 Grenzen des Verfahrens 131
6.3 Standortfaktoren und Eingangsparameter der Gebiete (Fallbeispiele) 132
6.3.1 Geographische Einordnung und Relief 132
6.3.2 Landnutzung und Zuordnung der Curve-Number 134
6.3.3 Böden und hydrologische Bodenklassen 136

6.3.4 Extreme Niederschlagsereignisse und Vorfeuchteverhältnisse ... 138
6.4 Modellergebnisse ... 140
6.4.1 Fallspezifische Betrachtung ... 140
6.4.2 Fallübergreifende Auswertung ... 148
6.5 Untersuchung abflussmindernder Flächenbewirtschaftung ... 151
6.5.1 Variation der Flächenbewirtschaftung ... 151
6.5.2 Variation der Niederschlagsintensität ... 158
6.6 Schlussfolgerungen ... 162
6.6.1 Ergebnisse aus den Gebietsanalysen ... 162
6.6.2 Variantenuntersuchungen zur Abflussminderung ... 162
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Forschungsbedarf ... 164
7.1 Gefährdungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen bei Sturzflutereignissen ... 164
7.2 Anpassungen des Förderinstrumentariums und der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten ... 166
7.3 Ausblick und Forschungsbedarf ... 169
8 Quellenverzeichnisse ... 171
8.1 Literaturverzeichnis ... 171
8.2 Gesetzesverzeichnis ... 178
9 Anlagen ... 184
9.1 Anlage 9.1 Kartenmaterial zu regionalen Analysen ... 184
9.1.1 Fall 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach ... 184
9.1.1.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell 184
9.1.1.2 Hangneigung 184
9.1.1.3 Niederschlagsverteilung 184
9.1.1.4 Vorfeuchteverhältnisse 184
9.1.1.5 Landnutzung 184
9.1.1.6 Bodentypen BFD50 RP und BK50 NW 184
9.1.1.7 Hydrologische Bodenklassen 184
9.1.1.8 Verteilung der Curve-Numbers 184
9.1.1.9 Kumulierte Abflusshöhen 184
9.1.1.10 Abflussbeiwerte 184
9.1.1.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung 184
9.1.1.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung 184
9.1.1.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat 184
9.1.2 Fall 2: Engebach/Hod ... 198

9.1.2.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell 198
9.1.2.2 Hangneigung 198
9.1.2.3 Niederschlagsverteilung 198
9.1.2.4 Vorfeuchteverhältnisse 198
9.1.2.5 Landnutzung 198
9.1.2.6 Bodenkundliche Einheiten BK50 BW 198
9.1.2.7 Hydrologische Bodenklassen 198
9.1.2.8 Verteilung der Curve-Numbers 198
9.1.2.9 Kumulierte Abflusshöhen 198
9.1.2.10 Abflussbeiwerte 198
9.1.2.11 Variante 1 – Zwischenbegrünung (Rebflächen) 198
9.1.3 Fall 3: Simbach 210
9.1.3.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell 210
9.1.3.2 Hangneigung 210
9.1.3.3 Niederschlagsverteilung 210
9.1.3.4 Vorfeuchteverhältnisse 210
9.1.3.5 Landnutzung 210
9.1.3.6 Bodenarten ÜBK25 210
9.1.3.7 Hydrologische Bodenklassen 210
9.1.3.8 Verteilung der Curve-Numbers 210
9.1.3.9 Kumulierte Abflusshöhen 210
9.1.3.10 Abflussbeiwerte 210
9.1.3.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung 210
9.1.3.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung 210
9.1.3.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat 210
9.1.4 Fall 4: Wolfsbach/Aichbach 224
9.1.4.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell 224
9.1.4.2 Hangneigung 224
9.1.4.3 Niederschlagsverteilung 224
9.1.4.4 Vorfeuchteverhältnisse 224
9.1.4.5 Landnutzung 224
9.1.4.6 Bodenarten ÜBK25 224
9.1.4.7 Hydrologische Bodenklassen 224
9.1.4.8 Verteilung der Curve-Numbers 224
9.1.4.9 Kumulierte Abflusshöhen 224

9.1.4.10 Abflussbeiwerte 224
9.1.4.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung 224
9.1.4.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung 224
9.1.4.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat 224
9.2 Anlage 9.2 Fragebogen 238
9.3 Anlage 9.3 Fragen für Experteninterviews 251

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungsgefüge der projektrelevanten Fachbegriffe 41

Abbildung 2: Relevante Gliederungspunkte zur Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden 42

Abbildung 3: Trends der Regenerosivität im Sommer für die Zeiträume 1937-2007 [A oben] und 1973-2007 [A unten]; Saisonalität des monatlichen Niederschlags [B oben] und der Regenerosivität [B unten] jeweils für die Zeiträume 1937-2007 und 1993-2007 43

Abbildung 4: Abflussprozesse am Hang 45

Abbildung 5: Wasserinfiltrationsrate in Abhängigkeit der Landnutzung 47

Abbildung 6: Einfluss von Landnutzung, Bodenbearbeitung und Bodenfeuchte 48

Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Oberflächenabfluss und Anteil der Ackerfläche im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße 49

Abbildung 8: Prozess der Oberflächenverschlämmung [A]; Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Bodenbedeckung [B] 50

Abbildung 9: Relativer Bodenabtrag in Abhängigkeit der Bodenbedeckung [A]; Bodenbedeckung während der Entwicklung bedeutender Ackerkulturen [B] 51

Abbildung 10: Zwei Schemata zu den Arten der Makroporen 52

Abbildung 11: Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen 52

Abbildung 12: Einfluss der Makroporen auf die Infiltration 53

Abbildung 13: Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodeneigenschaften 54

Abbildung 14: Einfluss des Bodenbearbeitungssystems auf die Wasserinfiltration . 55

Abbildung 15: Einfluss der Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet auf die Abflussgangliniennach einem konvektiven [A] und einem advektiven [B] Niederschlagsereignis 56

Abbildung 16: Volumen des Oberflächenabflusses und Abflussrate in Abhängigkeit der Zeit nach der wendenden Bodenbearbeitung 57

Abbildung 17: Auswirkungen einer Bodenverformung auf die Anordnung der Bodenpartikel im Boden [A]; Oberflächenabfluss in Fahrspuren und Ackerrandfurchen [B] 58

Abbildung 18: Oberflächenabfluss und Bodenabtragsmenge in Fahrspuren in Zuckerrüben 59

Abbildung 19: C-Faktoren für verschiedene Fruchtfolgen und Varianten der Bodenbearbeitung 60

Abbildung 20: Oberflächenabfluss in % der Niederschlagsmenge in 6-minütigen Intervallen während 60-minütigen Beregnungsversuchen für verschiedene Bewirtschaftungsweisen 61

Abbildung 21: Oberflächenabfluss und Infiltrationsrate auf ökologisch und konventionell bewirtschafteten Grünland- und Ackerflächen 62

Abbildung 22: Abflussvolumen [A] und Abflussrate [B] bei unterschiedlichen Gehalten an organischer Substanz in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge sowie modelliertes Abflussvolumen [C] bei unterschiedlichen Niederschlagsmengen in Abhängigkeit der Gehalte an organischer Substanz 63

Abbildung 23: Wasserinfiltration in einen Boden mit hydrophobem Oberboden [A]; Wasserinfiltration in einen Boden mit hydrophober Zwischenschicht [B] 64

Abbildung 24: Wasserfluss und Verteilung des Wassers im Boden durch lokal hydrophobe Bedingungen im Boden [A]; Oberflächenabfluss auf einem hydrophoben und einem benetzbaren Boden [B] 64

Abbildung 25: Einfluss des Abflussvolumens und der Scheitelanstiegszeit auf die Abflussganglinien 67

Abbildung 26: Beispiel-Maßnahmensteckbrief zur Mulchsaat aus KliStaR-Projekt .. 69

Abbildung 27: Luftbildaufnahme nach einem Starkregenereignis in Osthessen im Mai 2018 72

Abbildung 28: § 17 BBodSchG – Die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft 77

Abbildung 29: Übersicht über die projektrelevanten Agrarfördermaßnahmen und deren Verteilung 105

Abbildung 30: Matrix zur Gesamtbewertung der Akzeptanz und Reichweite sowie der Risiken und Wirksamkeit von Agrarfördermaßnahmen 108

Abbildung 31: Einfluss der Vorregenindizes nach Kleeberg & Overland (1989) auf die bodenfeuchteabhängige Curve-Number 120

Abbildung 32: Gebietsfaktor in Abhängigkeit des Gebietsgefälles und des Gewichtungsparameters K 121

Abbildung 33: Fließschema: von den Eingangsdaten zum parametrisierten Modell 122

Abbildung 34: Zuordnung von Versiegelungsgrad zu CN_{II}-Wert 127

Abbildung 35: Zuordnung der hydrologischen Bodenklasse anhand der Bodenparameter Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität (nFK) . 128

Abbildung 36: Prinzip der Verarbeitung von Rasterinformation in Polygonmittelwerte 131

Abbildung 37: Übersichtskarte zur geographischen Lage der Fallbeispiele 132

Abbildung 38: Verteilung der Landbedeckung bzw. –nutzung 134

Abbildung 39: Abflusshöhe und Abflussbeiwerte für das Untersuchungsgebiet Ahr /Swistbach/Arzdorfer Bach 141

Abbildung 40: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach 142

Abbildung 41: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Engebach/Hod 143

Abbildung 42: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Engebach/Hod 144

Abbildung 43: Vergleich der Abflussbeiwerte für das Untersuchungsgebiet Engebach/Hod zwischen vorliegender Studie und des LUBW..... 145

Abbildung 44: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Simbach 146

Abbildung 45: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Simbach 146

Abbildung 46: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach 148

Abbildung 47: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Wolfsbach/Aichbach 148

Abbildung 48: Gesamtabflussanteile bezogen auf den Flächenanteil verschiedener Landnutzungen der untersuchten Fallbeispiele..... 150

Abbildung 49: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 1 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen 153

Abbildung 50: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 2 und die Variante 2 (a) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen 154

Abbildung 51: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 3 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen 155

Abbildung 52: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 4 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen 157

Abbildung 53: Abflussminderung auf (a) Einzelschlägen der Reihenkulturen mit (b) Auswirkung auf das gesamte Einzugsgebiet für die Fallbeispiele 1, 3 und 4..... 158

Abbildung 54: Verminderung des Direktabflusses verschiedener Bewirtschaftungsvarianten (Variante 1 bzw. 2: Mulchsaat mit bzw. ohne Saatbettbereitung, Variante 3: Direktsaat) unter Variation der Niederschlagsintensität für die Fallbeispiele 1-4..... 160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Warnkriterien des Deutschen Wetterdienstes für Starkregen 43

Tabelle 2: Warnkriterien des Deutschen Wetterdienstes für Dauerregen 44

Tabelle 3: Sichtbare Bioporen (ø >1 mm) in 10 und 40 cm Bodentiefe einer Tschernosem-Parabraunerde 53

Tabelle 4: Maßnahmen zum Rückhalt von Boden und Wasser in Außenbereichen 70

Tabelle 5: Abflussgeschwindigkeit in Gerinnen der landwirtschaftlichen Flur ... 72

Tabelle 6: Relevante Rechtsbereiche und dazugehörige rechtliche Grundlagen 75

Tabelle 7: Zusammenfassung und wichtige Eigenschaften der Datengrundlagen 122

Tabelle 8: Liste ausgewählter Curve-Number-Werte 125

Tabelle 9: Zuordnung von Bodenartenspektren der ÜBK25 BY zu hydrologischen Bodenklassen 130

Tabelle 10: Übersicht zur Modellgeometrie 131

Tabelle 11: Übersicht zu den Einzugsgebietsflächen und dem durchschnittlichen Gebietsgefälle 133

Tabelle 12: Übersicht zu Kenngrößen bezüglich der Niederschlagsereignisse ... 138

Tabelle 13: Niederschlagsintensitäten (Dauer 1 h) für die Wiederkehrintervalle 20, 50 und 100 Jahre 159

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AgrarZahlVerpflG	Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz
AgrarZahlVerpflV	Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung
AUKM	Agrarumwelt- und Klimamaßnahme
AUM	Agrarumweltmaßnahme
BB	Brandenburg
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutzverordnung
BF	Bodenfeuchte
BFD 50	Bodenflächendaten 1:50.000
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BK 50	Bodenkarte 1:50.000
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BÜK 200	Bodenübersichtskarte 1:200.000
BVB	Bundesverband Boden
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CC	Cross-Compliance
CN	Curve-Number
C_{org}	Organischer Kohlenstoff im Boden
DirektZahlDurchfV	Direktzahlungen-Durchführungsverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Europäische Gemeinschaft
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EU	Europäische Union
EZG	Einzugsgebiet
FlurbG	Flurbereinigungsgesetz
GAB	Grundanforderungen an die Betriebsführung
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik (der Europäischen Union)
GD NRW	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen

gfP	gute fachliche Praxis (i.S. des § 17 BBodSchG)
GLÖZ	Guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand
HE	Hessen
HOF	Horton´scher Oberflächenabfluss
HRU	Hydrologic Response Unit
HSG	Hydrologic Soil Group
I	Infiltration [mm]
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAWA	Bund-/Ländergemeinschaft Wasser
LfL BY	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU BY	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGB RP	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LGRB BW	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
LK	Luftkapazität des Bodens [Vol.-%]
LUBW	Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg
LWK NW	Landwirtschaftskammer NRW
MV	Mecklenburg-Vorpommern
MWVLW RP	Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz
N	Niederschlag [mm]
nFK	Nutzbare Feldkapazität des Bodens [Vol.-%]
NI	Niedersachsen
NN	Normal-Null
NRCS	Natural Resource Conservation Service
NW	Nordrhein-Westfalen
OFA	Oberflächenabfluss
ÖLB	Ökologischer Landbau
RP	Rheinland-Pfalz
RADOLAN	Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb für Deutschland
SächsWG	Sächsisches Wassergesetz
SCS	Soil Conservation Services
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland

SN	Sachsen
SOF	Sättigungsoberflächenabfluss
ST	Sachsen-Anhalt
TEZG	(morphologisches) Teileinzugsgebiet
TH	Thüringen
UBA	Umweltbundesamt
WG	Wassergesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Zusammenfassung

Im Zuge des Klimawandels ist neben einem Anstieg der mittleren Jahrestemperatur auch von einer Zunahme von Starkregen sowie langanhaltender Trockenperioden im Sommer auszugehen. Für die Entstehung von Sturzfluten und Überschwemmungen spielt die Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Flächen im Einzugsgebiet eine entscheidende Rolle. In diesem Vorhaben sollte deshalb der Einfluss der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf das Wasseraufnahmevermögen landwirtschaftlicher Böden und den Oberflächenabfluss im Hinblick auf Extremwetterereignisse, wie Stark- und Dauerregenereignisse, untersucht werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, zunächst einen Überblick zum aktuellen Stand der Forschung der durch Nutzung und Bewirtschaftung veränderbaren Einflussfaktoren auf die Wasserinfiltration zu erarbeiten. Dabei standen besonders die landwirtschaftlichen Anbauverfahren, Bodenbearbeitungssysteme und pflanzenbaulichen Maßnahmen im Fokus der Untersuchungen. Darauf aufbauend wurde geprüft, inwieweit die aktuellen landwirtschaftlichen Fördermaßnahmen geeignet sind, die Infiltrationsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Flächen zu verbessern. Ein weiteres Ziel war die darauf ausgerichtete Zusammenstellung und Auswertung der bestehenden rechtlichen Vorgaben (Gesetze, Verordnungen, Richtlinien etc.) und ihre Umsetzung in der sog. „guten fachlichen Praxis“ (gfP). Sowohl für die aktuellen Förderprogramme als auch die bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden nach einer Defizitanalyse gezielte Verbesserungsvorschläge und Maßnahmenempfehlungen zur Weiterentwicklung von Fördermaßnahmen und gesetzlichen Vorgaben abgeleitet.

Für vier ausgewählte Stark- oder Dauerregenereignisse wurde anhand regionaler Analysen herausgearbeitet, warum es dabei zu markanten Schäden gekommen ist und inwieweit Zusammenhänge zwischen der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den Überflutungen bestehen. In Verbindung mit den Ergebnissen der Literaturrecherche und der Analyse der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Förderprogramme wurden Vorschläge für Risikoabschätzungen und Gegenmaßnahmen erarbeitet.

Ergebnisse des Literaturüberblicks zur Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden

Die Bildung von Oberflächenabfluss hängt neben Art und Charakteristikum des Extremereignisses auch von den unterschiedlichen Standorteigenschaften sowie der Nutzung und Bewirtschaftung der Flächen ab. Der für die Entstehung von Sturzfluten und Überschwemmungen entscheidende Direktabfluss beinhaltet den HORTON´schen Oberflächenabfluss und den Sättigungsoberflächenabfluss (zusammengefasst auch Oberflächenabfluss genannt) sowie den schnellen Zwischenabfluss. Bei den konvektiven Starkregenereignissen kommt es durch kurzzeitig hohe Niederschlagsintensitäten zu singulären bzw. spontanen Abflussbildungen mit oftmals hohen Fließgeschwindigkeiten. Ist die Niederschlagsintensität (erheblich) größer als die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix, kommt es vor allem zum HORTON´schen Oberflächenabfluss. Dabei spielen besonders die Bodenbedeckung und Verschlämmung der Bodenoberfläche eine wichtige Rolle für die Infiltration und die Abflussbildung. Auch bei Dauerregenereignissen mit langanhaltenden advektiven Niederschlägen kann es zu Überschwemmungen und Hochwasser kommen, da je nach Ausgangswassergehalt der Boden mehr oder weniger schnell gesättigt ist. Es kommt zum Sättigungsoberflächenabfluss, wenn die Niederschlagintensität größer als die Infiltrationskapazität der gesättigten Bodenmatrix ist. Bei hohen Niederschlagintensitäten ist der Abfluss dann nahezu unabhängig von den Bodeneigenschaften und der Landnutzung; entscheidend für die Abflussbildung und die Abflusskonzentration sind Topographie und Relief.

Die Wasserinfiltration in den Boden wird von vielen Parametern beeinflusst. Neben den standörtlich bedingten und in der Regel nicht veränderbaren Bodeneigenschaften (Bodenart, Humusgehalt, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, hydraulische Wasserleitfähigkeit) sind dies vor allem die Nutzung und die Bewirtschaftung der Flächen.

Die Landnutzungsform hat einen bedeutenden Einfluss auf die Wasserinfiltration, die von Wald- über Grünland- zur Ackernutzung abnimmt. Dabei spielen besonders die Bodenbedeckung und Verschlämmung der Bodenoberfläche eine wichtige Rolle für die Infiltration und die Abflussbildung. Daher ist das Nutzungsverhältnis im Einzugsgebiet eine entscheidende Rolle für die Abflussbildung: je höher der Ackeranteil, desto größer der Direktabfluss und desto höher das Risiko für Sturzfluten und Überschwemmungen. Ebenso sollte die Fruchtfolge bzw. die Anbaukultur zum Zeitpunkt des Extremereignisses für aussagefähige Untersuchungen möglichst detailliert bekannt sein. Gegenwärtig bieten hierzu die sog. „InVeKoS"-Daten eine verlässliche Datengrundlage. Aus datenschutzrechtlichen Gründen bestehen jedoch in der realen Verwaltungspraxis in einzelnen deutschen Bundesländern dazu oft unverhältnismäßige Hemmnisse hinsichtlich der freien und unentgeltlichen Datenzugänglichkeit, die abgebaut werden sollten.

Auch die Bodennutzung und die Bewirtschaftung haben einen erheblichen Einfluss. Die Bodenbedeckung kann wesentlich zur Verbesserung der Infiltration und Reduzierung von Oberflächenabfluss auf der Einzelschlagebene beitragen. Allerdings sind dafür Bedeckungsgrade von ca. 30 % und mehr erforderlich, um die Oberflächenstabilität des Bodens wirksam zu schützen. Makroporen können bei konvektiven Niederschlagsereignissen (Starkregen) einen wichtigen Beitrag zur Wasserinfiltration auf Punkt- und Feldebene leisten. Wichtig ist dabei die Porenkontinuität und Durchgängigkeit bis zur Bodenoberfläche. Bei advektiven Regenereignissen (Dauerregen) spielen Makroporen nur eine vernachlässigbare Rolle, entscheidend ist hier das Sättigungsdefizit des Bodens. Der Einfluss der Makroporen auf Einzugsgebietsebene ist deshalb unsicher, da hier für die Abflussbildung noch andere Faktoren und Prozesse, wie z. B. der Sättigungsabfluss und der schnelle Zwischenabfluss, bedeutsam sind.

Langjährig reduzierte, nicht wendende Bodenbearbeitung erhöht die Infiltrationsleistung auf Feldebene durch einen höheren Gehalt an organischer Substanz an der Bodenoberfläche, mehr und kontinuierlichere Makroporen sowie eine geringere Verschlämmungsneigung des Bodens. Bei Starkregenereignissen ist die Wirkung auf Einzugsgebietsebene auch von anderen Faktoren abhängig. Reduzierte Bodenbearbeitung kann allerdings dazu beitragen, die Abflussspitzen deutlich zu dämpfen. Verdichtete Böden zeigen eine geringere Infiltration in den Oberboden. Böden mit höherer Lagerungsdichte weisen ein niedrigeres Porenvolumen und ein geringeres Wasserspeichervermögen auf. Für die Abflussbildung sind vor allem verdichtete Fahrspuren und Ackerrandstreifen bedeutsam, da es in diesen Bereichen durch die verminderte Infiltration zu erhöhtem Oberflächenabfluss kommt.

Im Ökologischen Landbau wird durch vielfältigere Fruchtfolgen mit mehrjährigem Futterbau und die Förderung des Bodenlebens indirekt auch die Infiltrationsleistung des Bodens verbessert. Allerdings kann es auch beim Ökologischen Landbau auf Feldebene – insbesondere beim Anbau von Hackfrüchten – zu Verschlämmung und Bodenabtrag kommen. Die Wirkung auf den Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen ist – wie bei konservierender Bodenbearbeitung – auch von anderen Faktoren und Prozessen im Einzugsgebiet abhängig. Eine Abschätzung der Auswirkungen im Einzugsgebiet hängt daher vom konkreten Regenereignis, dem Nutzungsverhältnis und insbesondere dem Kulturartenverhältnis ab. Auf Einzugsgebietsebene wird dem Ökologische Landbau durch die vielfältigeren Fruchtfolgen mit mehrjährigem Futterbau in Erosionsmodellen durch die Verringerung des Bedeckungsfaktors (C-Faktor) der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) eine Verminderung der Bodenerosion zugesprochen.

Auch der Humusgehalt des Bodens beeinflusst die Infiltration und die Abflussbildung. Zwar gibt es nur wenige vergleichende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Humusgehalte auf das Infiltrationsvermögen des Bodens. Dennoch ist die positive Wirkung höherer Humusgehalte auf die Bodenstruktur und das Bodenleben und damit auf das Infiltrationsvermögen des Bodens unbestritten. Allerdings kann es durch die organische Substanz auch zur Hydrophobie der Bodenoberfläche kommen,

was insbesondere bei Waldböden mit Humusauflage und humosen Sandböden nach längeren Trockenperioden zu beobachten ist. Niederschlagswasser fließt dann überwiegend oberflächig ab, dringt nicht in die Bodenmatrix ein, sondern versickert in bevorzugten Fließwegen, z. B. in alten Wurzelgängen. Die Ausprägung der Hydrophobie ist stark abhängig vom Gehalt an organischer Substanz im Oberboden und vom Ausgangswassergehalt. Bei Starkregenereignissen spielt die Hydrophobie vor allem bei humosen Sandböden nach langen Trockenperioden eine größere Rolle für die Wasserinfiltration.

Zur Verminderung und zur Risikovorsorge gegenüber Oberflächenabfluss und Sturzfluten sind sowohl Maßnahmen auf der Feld- bzw. Schlagebene als auch Maßnahmen zur Abflussverzögerung und gezielter Abflusslenkung auf Einzugsgebietsebene erforderlich. Auf der Feldebene sind generell alle Maßnahmen hilfreich, welche die Infiltrationsleistung des Bodens verbessern und den Oberflächenabfluss reduzieren. Gezielte Maßnahmen auf Feld-bzw. Schlagebene sollen dabei vor allem eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (≥30 %) sicherstellen, die Aggregatstabilität verbessern sowie Verdichtungen und Verschlämmungen der Bodenoberfläche vermeiden. Welche Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen im konkreten Einzelfall sinnvoll und zielführend sind, hängt dabei von den jeweiligen Standort-, Bewirtschaftungs- und Witterungsverhältnissen ab. Der Landwirt sollte aus diesem „Werkzeugkasten“ die für ihn geeignetsten Maßnahmen auswählen.

Neben der Verbesserung der Infiltrationsleistung der landwirtschaftlich genutzten Böden ist es auch sehr wichtig, die Fließwege des Abflusses zu verlängern und die Fließgeschwindigkeiten zu reduzieren, um das Risiko von Sturzfluten möglichst gering zu halten. Auf Einzugsgebietsebene sind alle Maßnahmen hilfreich, welche den Abfluss verzögern und die Scheitelanstiegszeit verringern. Dazu gehören z. B. die gezielte Beeinflussung des Kulturartenverhältnisse im Einzugsgebiet (geringer Anteil Sommerungen), das Begrünen der bevorzugten Abflussbahnen, das Anlegen und Pflegen von Hecken und Gräben, das Begrünen der Fahrspuren, die Anlage von Rückhaltemulden und Verwallungen sowie die Optimierung der Wasserführung und des Abflussregimes.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich folgende Empfehlungen an Politik und Verwaltung zur Verbesserung der Wasserinfiltration ableiten:

- Erarbeitung eines „Werkzeugkastens“ von Maßnahmen auf Schlagebene für Landwirte.
- Formulierung von konkreten Werten für Fördermaßnahmen oder Rechtsvorgaben, wie beispielsweise Bedeckungsgrade >30 % bei Mulch- und Direktsaatverfahren.
- Erarbeitung von Kombinationen für Maßnahmen auf Feld-/Schlagebene sowie auf Einzugsgebietsebene.
- Möglichst standortangepasste Flächennutzung und vielfältiges Kulturartenverhältnis.
- Optimierung der Wasserführung und des Abflussregimes am Standort und im Einzugsgebiet (Gräben, Sickermulden, Verwallungen etc.).

Analyse der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten

Die Analyse der bestehenden rechtlichen Regelungen auf Bundes- und Landesebene hat ergeben, dass neben dem Bodenschutzrecht (Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV)) auch die rechtlichen Vorschriften zur Gewährung der flächengebundenen Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Agrarzahlungen-Verplfichtungengesetz (AgrarZahlVpflG), Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung (AgrarZahlVerpflV), Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV)) durch die Verknüpfung dieser Direktzahlung an die Einhaltung bestimmter ökologischer Vorgaben (CrossCompliance) Regelungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und Wasserspeicherkapazität landwirtschaftlich genutzter Flächen beinhalten.

Von zentralem Interesse für die vorliegende Studie ist § 17 BBodSchG über die gfP in der Landwirtschaft, der die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als

natürliche Ressource sicherstellen soll. Die BBodSchV dient der Konkretisierung des BBodSchG bezüglich der Untersuchung und der Bewertung von Flächen mit dem Verdacht auf Bodenkontamination, Altlasten und schädliche Bodenveränderungen und enthält die Ermächtigungsgrundlage, auf Landesebene beim Vorliegen von schädlichen Bodenveränderungen Maßnahmen zur Vorsorge und Gefahrenabwehr zu ergreifen. Damit enthält das Bodenschutzrecht zwar Regelungen, durch welche die Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden verbessert und damit die Vermeidung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten unterstützt werden könnte, diese sind aufgrund des bestehenden Umsetzungsdefizits bisher nur wenig wirksam. Neben dem Subsidiaritätsprinzip liegt dies insbesondere an den zu wenig konkreten und verbindlichen Festlegungen der gfP in der Landwirtschaft. Zudem fehlen im BBodSchG ordnungsrechtliche Anordnungen bei Missachtung der Vorgaben zur guten fachlichen Praxis, sodass Umsetzungsdefizite kaum justiziabel nachweisbar und verfolgbar sind. Außerdem sind im Bodenschutzrecht bezüglich der Vermeidung von nichtstofflichen schädlichen Bodenveränderungen keine bodenschutzrechtlichen Kontrollinstrumente verankert. Die Konkretisierung der gfP mit verbindlich anzuwendenden Leitfäden sowie rechtswirksame Vorgaben zur Gefahrenabwehr und den Vorsorgeanforderungen gegen das Entstehen von schädlichen Bodenveränderungen stellen wichtige Handlungsoptionen zur Verbesserung der Wasserinfiltration und Vermeidung von Sturzfluten dar.

Die rechtlichen Regelungen zur Gewährung der Agrarzahlungen beinhalten Grundanforderungen an die Betriebsführung (GAB) sowie zum Erhalt von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ), die allerdings aus ökologischer Sicht nicht weitreichend genug sind. Aufgrund der weiterhin bestehenden Direktzahlungen ohne weitergehende Kopplungen an die Einhaltung ökologischer Standards (z. B. durch Weiterentwicklung des Greenings, s.u.) finden ökologisch wertvolle Maßnahmen nach wie vor eine zu geringe Berücksichtigung. Grundsätzlich bildet eine Verknüpfung der Gewährung von Flächenprämien (EU-Direktzahlungen) an die Einhaltung dieser Auflagen und die Erbringung von konkreten Leistungen für den Klima- und Umweltschutz durch die sogenannte „Greening-Prämie“ eine gute Möglichkeit für Verbesserungen in den genannten Bereichen, da sich daraus eine hohe finanzielle Wirksamkeit gegenüber den landwirtschaftlichen Betrieben ergibt. Hierfür sind allerdings eine Weiterentwicklung und Konkretisierung dieser Regelungen auf EU-Ebene notwendig. Über eine Verschärfung der sogenannten Mindestanforderungen für den Erhalt von Direktzahlungen (Cross-Compliance) sowie eine Erweiterung des Greenings um strengere, effizientere oder auch multifunktionale Maßnahmen könnten die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden gezielt gefördert werden. Verbesserungen könnten im Zuge der kommenden GAP-Reform auf den Weg gebracht und umgesetzt werden.

Daneben gibt es auch im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Vorgaben zur landwirtschaftlichen Bodennutzung und insbesondere die Möglichkeit, Hochwasserentstehungsgebiete (§ 78d WHG) auszuweisen und dort gezielte Maßnahmen zur Verbesserung des Versickerungs- und Wasserrückhaltevermögens der Böden anzuordnen. Bisher wurden allerdings nur in Sachsen Hochwasserentstehungsgebiete ausgewiesen. Die Gründe hierfür liegen im hohen bürokratischen Aufwand für die Identifizierung und Ausweisung der Hochwasserentstehungsgebiete und der Scheu vor Konfrontationen mit möglichen betroffenen Flächeneigentümern. Durch eine bundesweite Erfassung von Hochwasserentstehungsgebieten und die Verankerung einer Umsetzungspflicht durch die Länderregierungen im § 78d WHG gibt es auch im Wasserrecht gute Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Vorsorge gegen Sturzfluten bei Extremwetterereignissen.

Auch das Flurbereinigungsgesetz (FlurbG) bietet grundsätzlich die Möglichkeit, im Rahmen der Flurneuordnung Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserinfiltration und Vermeidung von Bodenerosion durchzusetzen, auch wenn diese Möglichkeit in der Praxis bisher kaum genutzt wurde. Bislang stand bei Flurbereinigungsverfahren vor allem die Verbesserung der Agrarstruktur im Vordergrund, was sich meist kontraproduktiv auf die Wasserinfiltration und Entstehung von Sturzfluten auswirkt. Auch aufgrund von langen Umsetzungsdauern und häufig auftretenden Interessenskonflikten wird dieses

rechtliche Instrument insgesamt als weniger geeignet für die Verbesserung der Wasserinfiltration eingeschätzt.

Aus der Analyse ergeben sich folgende Empfehlungen an politische und Verwaltungsinstitutionen zur Verbesserung der Wasserinfiltration:

- Bundesweite Erfassung von Hochwasserentstehungsgebieten und Verankerung einer Umsetzungspflicht durch die Länderregierungen im § 78d WHG.
- Konkretisierung der gfP gemäß § 17 BBodSchG mit Hilfe verbindlich anzuwendender Leitfäden.
- Ergänzung des § 17 Abs. 2 BBodSchG um einen Punkt, der die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität konkret benennt, um diese Aspekte dadurch stärker in den Fokus der landwirtschaftlichen Offizialberatung rückt.
- Ergänzung von § 17 Abs. 3 BBodSchG um einen zusätzlichen Absatz, der die Anordnung von Maßnahmen erlaubt, welche der Entstehung von Bodenerosion und Sturzfluten entgegenwirken.
- Anpassung der Mindestanforderungen für den Erhalt von Direktzahlungen (Cross-Compliance) sowie eine Erweiterung des Greenings um zusätzliche bzw. multifunktionale Maßnahmen, welche die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden fördern.

Bewertung des Förderinstrumentariums

Für die Analyse der Agrarfördermaßnahmen wurden die Verwaltungsvorschriften bzw. Richtlinien zu den Agrarumweltmaßnahmen (AUM) aller Bundesländer mit Ausnahme der Stadtstaaten recherchiert. Der berücksichtigte Zeitraum war dabei die aktuelle (2014–2020) sowie die vergangene (2007–2013) Förderperiode. Ergänzend zu den AUM-Förderrichtlinien wurde nach Programmen zum Vertragsnaturschutz und zum Hochwasserschutz gesucht und die Recherche mit weiteren relevanten Programmen z. B. zur Fließgewässerentwicklung oder zur Anlage von Hecken und Feldgehölzen erweitert und unter dem Begriff „Agrarfördermaßnahmen“ zusammengefasst. Dabei wurden folgende Maßnahmen berücksichtigt, bei denen ein positiver Effekt auf die Wasserinfiltration angenommen wurde:

- Erosionsschutzmaßnahmen
- bodenschonende Maßnahmen
- bodenbedeckende Maßnahmen
- Moorschutzmaßnahmen
- Nutzungsextensivierung
- Ökologischer Landbau
- Vielfalt der Kulturen

Die Maßnahmen wurden im Hinblick auf die Projektziele in drei Wirkungsgruppen eingeteilt:

- Maßnahmen mit direkter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss
- Maßnahmen mit indirekter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss
- Maßnahmen mit fraglicher Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss

Zu den Maßnahmen mit direkter Wirkung zählen die Winterbegrünung mit Zwischenfrüchten bzw. Untersaaten, die Anlage von Gewässer- und Erosionsschutzstreifen sowie mehrjähriger Blüh-, Ackerrand- und Schonstreifen, die Einführung von Mulch- oder Direktsaat sowie die Umwandlung von Ackerland in (extensives) Grünland. Weiterhin wird mehrjährigen Flächenstilllegungen, der reduzierten Bodenbearbeitung mit Strip-Till, der Anlage ortsfester Brach- oder Grünstreifen auf Ackerland sowie der naturschutzgerechten Bewirtschaftung von Mooren und Feuchtgrünland eine direkte positive Wirkung zugesprochen.

Eine indirekte Wirkung (außerhalb des Zieles der Fördermaßnahme) auf die Verbesserung der Wasserinfiltration wird dem Ökologischen Landbau, der Anlage von Struktur- und Landschaftselementen und dem Anbau vielfältiger Kulturen im Ackerbau zugesprochen.

Bei den Agrarfördermaßnahmen wie der jährlichen Neuanlage von Blühstreifen sowie Ackerrand- und Schonstreifen, der extensiven Grünlandbewirtschaftung, dem Verzicht auf Bodenbearbeitung nach Mais bzw. Raps und überwinternder Stoppel sowie dem Anlegen von Brach- und Altgrasstreifen im Grünland ist die Wirkung auf die Wasserinfiltration und den Oberflächenabfluss nach fachgutachterlicher Einschätzung fraglich.

Aus allen als projektrelevant eingestuften Maßnahmen wurden diese anhand der Kriterien Reichweite, Akzeptanz, Wirksamkeit und Stärke der Förderkriterien bewertet. Anschließend wurde ein Maßnahmenindex für eine Gesamtbewertung abgeleitet. Als besonders wirksam wurden die Maßnahmenprogramme zur Anlage mehrjähriger Erosionsschutzstreifen, Winterbegrünung, Umwandlung von Ackerland zu Grünland, moorschonende Bewirtschaftung und mehrjähriger Flächenstilllegungen identifiziert. Aus einer Defizitanalyse wurden gezielte Vorschläge für die Verbesserung der Maßnahmen und Förderprogrammen abgeleitet.

Zur Verbesserung des Förderinstrumentariums im Hinblick auf die Projektziele müssen in den jeweiligen Förderprogrammen konkrete Ziele zur Verbesserung der Wasserinfiltration bzw. Minderung des Abflusses von landwirtschaftlichen Flächen definiert werden. Die bisherigen Agrarfördermaßnahmen haben Potenzial, um auch infiltrationsfördernde bzw. abflussmindernde Wirkungen zu entfalten; sie werden allerdings aufgrund fehlender Zielwerte und zum Teil weicher Kriterien nicht bestmöglich umgesetzt. Die meisten Landwirte setzen bei den Fördermaßnahmen nur das um, wie sie zur Erfüllung der Förderkriterien umsetzen müssen, und nicht so viel, wie sie könnten, um „best practice“ zu erreichen. Um diese Diskrepanz zu überwinden, müssen verbindliche Ziel- und Schwellenwerte in den Maßnahmenkatalogen festgehalten werden, die von den Landwirten einzuhalten sind, z. B. mindestens die Einhaltung von ca. 30 % Bodenbedeckung bei Mulch- und Direktsaatverfahren.

Zur Verbesserung der Förderwirkung werden in Ergänzung zu den bisherigen Wirk- und Ergebnisindikatoren, die vor allem auf Berechnungen und Modellierungen (z. B. Simulation des Bodenabtrags mit und ohne Mulchsaat) beruhen, schlagspezifische Messungen bei den Vor-Ort-Kontrollen empfohlen.

Daneben erscheint auch eine Anpassung der Förderziele bei einzelnen Maßnahmen sinnvoll, sodass neben dem ursprünglichen Zweck eine Komponente zur Infiltrationsverbesserung bzw. Abflussminderung hinzukommt. So könnte es eine spezielle Förderung für Linienelemente (mehrjährige Blühstreifen, Hecken, Ackerrandstreifen etc.) geben, die quer zur Hangrichtung oder in Tiefenlinien angelegt werden, sodass sie neben der Biotopfunktion auch eine abflussbremsende Wirkung entfalten. Am besten wäre eine gezielte Fokussierung auf besonders abflussrelevante Flächen innerhalb der Einzugsgebiete. Die Eingrenzung der Förderkulissen auf bestimmte gefährdete Gebiete wird als entscheidend für die gezielte Ausrichtung und Umsetzung der Fördermaßnahmen sowie deren Wirkung und Akzeptanz angesehen.

Aus der Analyse ergeben sich folgende notwendige Schritte zur Verbesserung der Agrarfördermaßnahmen im Hinblick auf den Bodenschutz:

- Definition konkreter Bodenschutz-Ziele in den Agrarförderprogrammen.
- Ableitung und Definition konkreter Gefährdungsgebiete als Förderkulissen.
- Gezielte Verbesserung und Weiterentwicklung des bestehenden Förderinstrumentariums der AUM im Hinblick auf die Projektziele (vor allem sinnvolle Kombinationen geeigneter Maßnahmen).
- Vorgabe konkreter Zielwerte in den Maßnahmen und sinnvoller Wirkindikatoren zur Bewertung.

- Effektive, möglichst automatisierte flächenrepräsentative Kontrolle der Maßnahmenumsetzung und Zielerreichung.

Regionale Analysen vergangener Hochwasserereignisse

Anhand von vier ausgewählten Fallbeispielen in West- und Süddeutschland wurden Ursachenanalysen zur Identifikation abflusserzeugender Flächen und Bewirtschaftungsverfahren durchgeführt. Diese erfolgten mittels eines modifizierten Curve-Number-Verfahrens nach Kleeberg & Overland (1989) zur Modellierung der Abflussbildung auf Schlag- bzw. Flurstücksebene. Aufbauend auf den Modellergebnissen wurde geprüft, ob signifikante Unterschiede bezüglich der Abflussmengen zwischen verschiedenen Landnutzungs- und Bewirtschaftungsformen, insbesondere bei Ackerflächen, vorliegen. Auf die Ursachenanalyse folgten Variantenrechnungen mit alternativen Bewirtschaftungsformen und variierenden Niederschlagsszenarien, um Lösungsansätze zur Reduktion der Direktabflussmengen und der Stärkung des Wasserrückhalts auf Einzugsgebietsebene zu entwickeln sowie deren Wirkungspotential abzuschätzen.

Für die Analysen wurden terminbezogene Stark- und Dauerregenereignisse von vier Untersuchungsgebieten in vier Bundesländern als regionale Fallbeispiele ausgewählt:

- Ereignis Juni 2016: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (Gemeinde Grafschaft, RP/NW)
- Ereignis Juni 2015: Engebach/Hod (Bad Bellingen, BW)
- Ereignis Mai/Juni 2016: Simbach (BY)
- Ereignis Mai 2016: Wolfsbach/Aichbach (BY)

Abflussarme Flächen zeichnen sich durch relativ geringe Abflussbeiwerte aus und dadurch, dass ihr Beitrag zum Gesamtabfluss deutlich unter ihrem Flächenanteil liegt. In der vorliegenden Studie handelt es sich dabei um Wald, Grünland und Obstanlagen. Abflussfördernde Flächen besitzen hingegen gegenteilige Eigenschaften, d. h. hohe Abflussbeiwerte und Gesamtabflussanteile, die deutlich über dem Maß ihres Flächenanteils liegen. In den hier untersuchten Fallbeispielen sind dies siedlungsgeprägte Flächen und Ackerland (Reihenkulturen, geschlossene Bestände und unspezifischer Ackerbau).

Folglich wurden in den Fallbeispielen einerseits Siedlungsflächen mit hohen Versiegelungsgraden und andererseits Ackerflächen im Allgemeinen, insbesondere Reihenkulturen (vorwiegend Maisflächen), als abflussfördernde Flächen ausgewiesen. Die entscheidenden Parameter zur Steuerung der Abflussbildung sind hierbei der Versiegelungsgrad und die spezifische Flächenbewirtschaftung. Bei Ackerland hängt letztere von diversen Faktoren ab, z. B. Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bodenbearbeitung.

Es wurden flächendifferenzierte Abflusshöhen (Direktabfluss) für vier reale Niederschlagsereignisse, die in den Jahren 2015 und 2016 jeweils im Frühsommer zwischen Ende Mai und Anfang Juni stattfanden, modelliert. Anhand der Modellergebnisse wurden die Ackerflächen eindeutig als primär abflussliefernde Flächengruppen identifiziert. Die Differenzen der Abflussbeiwerte zwischen Ackerland und abflussärmeren Flächen, z. B. Wald oder Grünland, lagen bei durchschnittlichen Vorfeuchten bei 20 bis 35 %. Bei extremer Vorfeuchte erreichten die Differenzen der Mediane bis zu 70 %. Durch die Differenzierung der abflussfördernden Flächen in geschlossene Bestände und Reihenkulturen konnte hinsichtlich der Abflussbeiwerte eine Differenz von 8 bis 15 % festgestellt werden, wobei Reihenkulturen ausnahmslos die höchsten Direktabflüsse erzeugten.

Da der Ackerflächenanteil in den vier Untersuchungsgebieten mit 28 bis 44 % sehr hoch war, führten die hohen Abflussbeiwerte der Flächen zu entsprechend hohen Volumenanteilen an Gesamtabfluss. In drei von vier Fallbeispielen stellte das Ackerland die höchsten Abflussanteile von 55 bis 60 % bereit. Dies entspricht etwa dem 1,5-fachen ihres Flächenanteils. Die vorliegenden Modellergebnisse lassen,

bezogen auf die Abflussmengen und ungeachtet der Abflusskonzentration, den Schluss eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen den durch Ackerflächen erzeugten Direktabflussmengen und der Intensität der Sturzflut- bzw. Hochwasserereignisse zu. Infolgedessen führen hohe Ackerflächenanteile im Allgemeinen, insbesondere bei Reihenkulturen mit später Aussaat, zu einer Verschärfung der Hochwasser- und Sturzflutproblematik in Einzugsgebieten.

Anschließend wurden für die vier Fallbeispiele Varianten berechnet, um den Einfluss der Bewirtschaftung auf die Abflussbildung und mögliche Abflussminderungspotenziale zu ermitteln. Das Ziel der Variantenbetrachtungen ist die Untersuchung der Abflussbildung unter veränderten Bedingungen

- der Flächenbewirtschaftung (z. B. nicht-wendende Bodenbearbeitung, Ökolandbau etc.) oder
- der Niederschlagsintensität.

Die Vorfeuchteverhältnisse, die bodenhydraulischen Parameter und die Hangneigung bleiben hierbei unverändert, lediglich die Flächenbewirtschaftung bzw. die Niederschläge werden variiert, wobei folgende Varianten betrachtet wurden:

- Variante 1: Mulchsaatverfahren mit Saatbettbereitung (Bedeckungsgrad <20 %),
- Variante 2: Direktsaat bzw. Mulchsaatverfahren ohne Saatbettbereitung (Bedeckung >20 %),
- Variante 3: Variante 2 zzgl. 50 Jahre Direktsaat ohne Bodenbearbeitung bei Mais und Rüben.

Die Ergebnisse zeigen, dass beim Mulchsaatverfahren die Saatbettbereitung maßgeblichen Einfluss auf das Wasserrückhaltevermögen landwirtschaftlicher Flächen hat. Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung führt zu keiner nennenswerten Verminderung des Abflusses, während dieser bei Mulchsaat ohne Saatbettbereitung auf Schlagebene um bis zu 20 % verringert werden kann. Dies macht sich auf Einzugsgebietsebene durch verminderte Abflussvolumina von bis zu 7 % bemerkbar. Noch stärkere Effekte lassen sich mit langjähriger Direktsaat erreichen.

Für die simulierten Bewirtschaftungsvarianten konnten weiterhin Schwellenwerte ermittelt werden, die Auskunft darüber geben, bei welcher Niederschlagsintensität bzw. -dauer eine Erschöpfung des Abflussminderungspotentials einer Flächengruppe oder eines Einzugsgebietes eintritt. In der oben genannten Variante der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung wird eine Abflussminderung von 5 % bei einer Niederschlagsintensität von ca. 40 bis 50 mm/h und mehr unterschritten. Selbst beim Best-Case-Szenario einer langjährigen Direktsaat sinkt das Abflussminderungspotential bei einer Niederschlagsintensität von etwa 100 mm/h auf nur noch ca. 5 %. Folglich haben alle Maßnahmen auf Feldebene im Hinblick auf die Abflussminderung bei entsprechend hoher Niederschlagsintensität ihre Grenzen, auch wenn durch die bei Mulch- und Direktsaat bewirkten zeitlichen Verzögerungen des Abflusses die Abflussspitzen vermindert werden.

Je nach Gefährdungsgrad bzw. Anfälligkeit gegenüber der Direktabflussbildung kann in Gebieten mit hohen Abflussanteilen ein flächenspezifischer Handlungsbedarf zur Abflussminderung ermittelt werden. Darauf aufbauend können entsprechender Maßnahmen sowie Schwellenwerte zur Bemessung des Wirksamkeitspotentials für Einzelflächen und die Wirkung auf das gesamte Einzugsgebiet ermittelt werden. Diese Größen dienen der Maßnahmenbewertung und können als zusätzliches Planungsinstrument die mögliche Umsetzung von Maßnahmen auf Feldebene zur hydrologischen Optimierung landwirtschaftlicher Flächen im gesamten Einzugsgebiet begleiten.

Schlussfolgernd aus den regionalen Analysen von Hochwasserereignissen konnte abgeleitet werden, dass hohe bodenbürtige Abflussbeiwerte auf Ackerland zu hohen Direktabflüssen im Einzugsgebiet führen und Sturzflut- und daraus ggf. resultierende Hochwassersituationen fördern. Der potentielle Wasserrückhalt auf Ackerflächen lässt sich durch unterschiedliche Bewirtschaftungsformen signifikant beeinflussen. Mulchsaat ohne Saatbettbereitung und langjährige Direktsaat führen zu effizienter

Abflussminderung auf Einzelschlägen mit Auswirkung auf das komplette Einzugsgebiet bei einem Mindestbedeckungsgrad des Bodens von ≥20 % zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses. Potentielle Abflussminderungen durch Maßnahmen auf Schlagebene nehmen bei Starkregenereignissen mit Jährlichkeiten >100 a deutlich ab.

Summary

In the wake of climate change, an increase in heavy rainfall and long periods of drought in summer are expected in addition to an increase in the average annual temperature. The water infiltration of agricultural land in the catchment area plays a decisive role in the development of floods, including flash floods. In this project, the influence of land use on the water absorption capacity of arable land and surface runoff should therefore be investigated with regard to extreme weather events such as heavy and persistent rainfall.

The aim of the research project was, firstly, to provide an overview of the current state of research on the influencing factors on water infiltration into the soil that can change through use and cultivation. The focus of the investigations was on agricultural cultivation methods, tillage systems and plant cultivation measures. Building on this, it was examined to what extent the current agricultural support measures are suitable for improving the infiltration capacity of agricultural land in order to counteract water erosion and flooding even in the event of extreme rainfall events. A further objective was the compilation and evaluation of the existing legal requirements (laws, ordinances, guidelines etc.) and their implementation in the so-called "good agricultural practice" in view of improving the water infiltration of agricultural areas. Following a deficit analysis, targeted suggestions for improvement and recommendations for measures for the further development of support measures and legal requirements were derived for both the current support programmes and the existing legal framework conditions.

For four selected heavy or persistent rain events that led to significant damage, regional analyses were used to determine why the considerable impacts occurred and what connections exist between agricultural land use and flooding. Proposals for risk assessments and countermeasures were developed in connection with the results of the literature research and the analysis of the legal framework and the support programmes.

Results of the literature review on the water absorption capacity of arable land

In addition to the type and characteristics of the extreme event, the formation of surface runoff also depends on the different site characteristics as well as the use and management of the land. The direct runoff, which is decisive for the occurrence of flash floods and floods in general, includes the Horton overland flow and the saturation excess overland flow (also referred to as overland flow), as well as the rapid interflow. In convective heavy rainfall events, short-term high precipitation intensities lead to unique or spontaneous runoff formation, often with high flow velocities. If the precipitation intensity is (considerably) greater than the infiltration capacity of the soil matrix, surface runoff occurs mainly as Horton overland flow. Especially soil cover and soil capping play an important role for infiltration and runoff formation. Floods can also occur during continuous rainfall events with prolonged advective precipitation, as the soil is saturated more or less quickly, depending on the initial water content. Saturation excess overland flow occurs when the precipitation intensity is greater than the infiltration capacity of the saturated soil matrix. At high precipitation intensities, runoff is then almost independent of soil properties and land use; topography and relief are decisive for runoff formation and intensity.

Water infiltration into the soil is influenced by many parameters. In addition to the soil properties (soil type, humus content, storage density, pore size distribution, hydraulic water conductivity), which are determined by the location and usually cannot be changed, these include above all the land use and land management.

The form of land use has a significant influence on water infiltration, which decreases from forest to grassland to arable land uses. Particularly, soil cover and surface capping play an important role in infiltration and runoff formation. Therefore, the ratio of use in the catchment area plays a decisive role for runoff formation: the higher the proportion of arable land, the greater the direct runoff and the higher the risk of flash floods and flooding. Likewise, the cultivated crop or crop rotation status at the time of the extreme weather event should be known in as much detail as possible for meaningful investigations. At present, the so-called "IACS" data provide a reliable data basis. For reasons of data protection, however, in individual German federal states there are often disproportionate obstacles in real administrative practice related to free access to data, which should be removed.

Land use and management also have a significant impact. Land cover can make a significant contribution to improving infiltration and reducing surface runoff at the individual impact level. However, a degree of coverage of approx. 30 % and more is required to effectively protect the surface stability of the soil. Macropores can make an important contribution to water infiltration at point and field level during convective precipitation events (heavy rainfall). The pore continuity and patency up to the surface are important in this case. In advective rain events (persistent rain), macropores play only a negligible role; the saturation deficit of the soil is decisive in this case. The influence of macropores at catchment level is therefore uncertain, as other factors and processes, such as saturation excess overland flow and rapid interflow, are important for runoff formation.

Long-term reduced, non-turning tillage increases infiltration performance at field level due to a higher content of organic matter on the soil surface, more and more continuous macropores and a lower tendency of the soil to silt up. In the case of heavy rainfall events, the effect at the catchment level also depends on other factors. However, reduced soil tillage can contribute to significantly dampen peak drainage. Compacted soils show less infiltration into the topsoil. Soils with a higher storage density have a lower pore volume and a lower water storage capacity. Compacted lanes and field edge strips are particularly important for runoff formation, as reduced infiltration leads to increased surface runoff in these areas.

In organic farming, the infiltration performance of the soil is indirectly improved by more diverse crop rotations with perennial forage production and the promotion of soil life. However, organic farming at the field level - especially the cultivation of root crops - can also lead to soil capping and erosion. The effect on surface runoff during strong rainfall events - as in conservation tillage - also depends on other factors and processes in the catchment area. An estimation of the impacts in the catchment area therefore depends on the specific rainfall event, the utilization ratio and, in particular, the crop species ratio. At the level of the catchment area, organic farming is expected to reduce soil erosion through more diverse crop rotations with perennial forage production in erosion models by reducing the coverage factor (C-factor) of the Universal Soil Loss Equation (USLE).

The humus content of the soil also influences infiltration and runoff formation. There are only a few comparative studies on the influence of different humus contents on the infiltration capacity of the soil. Nevertheless, the positive effect of higher humus contents on soil structure and soil life and thus on soil infiltration capacity is undisputed. However, the organic substance can also cause hydrophobicity of the soil surface, which can be observed especially in forest soils with humus deposits and humus sandy soils after prolonged dry periods. Precipitation water then mainly flows away on the surface, does not penetrate the soil matrix but seeps away in preferred flow paths, e.g. in old root passages. The severity of hydrophobicity is strongly dependent on the content of organic matter in the topsoil and the initial water content. In heavy rainfall events, hydrophobicity plays a greater role for water infiltration, especially in humus sandy soils after long periods of drought.

In order to reduce and prevent risks from surface runoff and flash floods, measures are required both at the field level and at the individual impact level as well as measures to delay runoff and to control

runoff in a targeted manner at the catchment area level. At the field level, all measures that improve soil infiltration performance and reduce surface runoff are generally helpful. Targeted measures at field or impact levels are intended, above all, to ensure year-round soil cover (≥30 %), improve aggregate stability and avoid compaction and capping of the soil surface. Which measures and combinations of measures are sensible and effective in a specific individual case depends on the respective site, cultivation and weather conditions. Farmers should select the most suitable measures from this "toolbox".

In addition to improving the infiltration performance of arable land, it is also very important to extend the runoff flow paths and reduce flow rates in order to minimise the risk of flash floods. At the catchment area level, all measures that delay runoff and reduce peak rise time are helpful. These include, for example, the targeted influencing of the crop species ratio in the catchment area (small proportion of summer crops), the greening of the preferred drainage channels, creating and maintaining hedges and ditches, planting of lanes, creating retention pits and entrenchments, as well as optimising the water supply and drainage regime.

From the knowledge gained, the following recommendations can be made to policymakers and administrations to improve water infiltration:

- Development of a "toolkit" of measures at the individual impact level for farmers.
- Formulation of specific values for support measures or legal requirements, such as coverage levels >30 % for mulching and direct sowing methods.
- Development of combinations for measures at field / individual impact level and at catchment area level.
- Location-adapted land use and diverse crop species ratio.
- Optimization of the water supply and the drainage regime at the site and in the catchment area (ditches, seepage troughs, ramparts, etc.).

Analysis of legal control options

The analysis of the existing legal regulations at federal and state level has shown that, in addition to the soil protection law (Federal Soil Protection Act (BBodSchG, in German), Federal Soil Protection Ordinance (BBodSchV, in German)), the legal regulations for granting direct payments to agriculture (Agricultural Payments Obligations Act (Agrar-ZahlVpflG, in German), Agricultural Payment Obligation Ordinance (AgrarZahlVerpflV, in German), Direct Payments Implementation Ordinance (DirektZahlDurchfV, in German)), contain regulatory options for improving the water absorption capacity and water storage capacity of arable lands by linking this direct payment to compliance with certain ecological requirements (Cross Compliance).

Of central interest for the present study is § 17of the BBodSchG on good agricultural practice, which is intended to ensure the sustainable safeguarding of soil fertility and soil performance as a natural resource. The BBodSchV serves to concretise the BBodSchG with regards to the investigation and assessment of areas suspected of soil contamination, contaminated sites and harmful soil changes, and contains the basis for authorisation to take precautionary and averting measures at a national level in the event of harmful soil changes. Therefore, the soil protection law contains regulations which could improve the water infiltration of arable land and thus support the avoidance of surface runoff and flash floods, but so far these have had little effect due to the existing implementation deficit. In addition to the subsidiarity principle, this is due, particularly, to the lack of concrete and binding provisions of good agricultural practice in agriculture. In addition, the BBodSchG lacks regulatory provisions in the event of failure to comply with the requirements of good agricultural practice, so that implementation deficits are hardly legally verifiable and traceable. In addition, the Soil Protection Law does not include any control instruments with regard to the avoidance of harmful non-material soil changes. The specification of good agricultural practices with binding guidelines to be applied as well as legally effective

requirements for averting hazards and precautionary measures against the occurrence of harmful soil changes are important options for improving water infiltration and avoiding flash floods.

The legal regulations for granting agricultural payments contain basic statutory management requirements as well as for maintaining land in good agricultural and ecological condition (GAEC), which, however, are not far-reaching enough from an ecological point of view. Since direct payments continue to exist without further links to compliance with ecological standards (e.g. through further development of greening, see below), ecologically valuable measures are still not sufficiently taken into account. In principle, linking the granting of area payments (EU direct payments) to compliance with these requirements and the provision of concrete services for climate and environmental protection through the so-called "greening prizes" represents a good opportunity for improvements in the areas mentioned, as this results in a high level of financial effectiveness vis-à-vis agricultural holdings. For this, however, further development and concretization of these regulations at the EU level are necessary. By tightening the so-called minimum requirements for the receipt of direct payments (cross compliance) and extending greening to include stricter, more efficient or even multifunctional measures, the water absorption and storage capacity of soils could be specifically promoted. Improvements could be initiated and implemented as part of the forthcoming CAP reform.

In addition, the Water Resources Act (WHG, in German) also contains provisions on agricultural land use and, in particular, the possibility of identifying flood-emergence-areas (§ 78d WHG) and to arrange targeted measures to improve the infiltration and water retention capacity of soils. So far, however, only flood-emergence-areas in Saxony have been evaluated. The reasons for this lie in the high bureaucratic effort for the identification and designation of flood-emergence-areas and the fear of confrontations with possible affected land owners. Through a nationwide registration of flood-emergence-areas and the anchoring of an implementation obligation by the federal state governments in § 78d WHG, there are also good possibilities in water law for the further development and improvement of precautions against flash floods in extreme weather events.

In principle, the Land Consolidation Act (FlurbG, in German) also offers the possibility of implementing measures to improve water infiltration and avoid soil erosion in the context of land consolidation, even though this option has hardly been used in practice. So far, improvement of the agricultural structure has been the main focus of land consolidation procedures, which has a counterproductive effect on water infiltration and the development of flash floods. Also, due to long implementation periods and frequent conflicts of interest, this legal instrument is generally considered to be less suitable for improving water infiltration.

From the analysis, the following recommendations are made to political and administrative institutions to improve water infiltration:

- Nationwide registration of flood-emergence-areas and anchoring of a duty of implementation by the federal state governments in § 78d of the WHG.
- Specification of good agricultural practices according to § 17 of the BBodSchG with the help of binding guidelines.
- Supplementing § 17 paragraph 2 of the BBodSchG with one point, which specifically identifies the water absorption capacity and storage capacity, in order to bring these aspects into the focus of the agricultural official consultation.
- Supplementing § 17 paragraph 3 of the BBodSchG with an additional paragraph that allows the arrangement of measures that counteract the development of soil erosion and flash floods.
- Adaptation of the minimum requirements for the receipt of direct payments (cross compliance) as well as an extension of greening by additional or multifunctional measures, which promote the water absorption capacity and storage capacity of the land.

Evaluation of policy tools

For the analysis of the agricultural funding measures, the administrative regulations and guidelines for the agri-environmental measures (AEM) of all federal states with the exception of the city states were researched. The period considered was the current (2014-2020) and the past (2007-2013) funding period. In addition to the AEM support guidelines, programs for contract nature protection and flood protection were searched for. The search was expanded to include other relevant programs such as river development programs or programs to plant hedges and field crops and was summarized under the term "agricultural support measures". The following measures were taken into account where a positive effect on water infiltration was assumed:

- erosion control measures
- soil conservation measures
- soil covering measures
- moor protection measures
- extension of use
- organic farming
- crop diversification

The measures were divided into three impact groups with regard to the project objectives:

- Measures with direct effect on infiltration and / or run off
- Measures with indirect effect on infiltration and / or run off
- Measures with questionable effect on infiltration and / or run off

The measures with direct effect include winter planting with catch crops or under-sowing, the creation of water and erosion protection strips as well as perennial flowering, field-edge and protective strips, the introduction of mulch or direct sowing and the conversion of farmland into (extensive) grassland. Furthermore, set-aside for several years, reduced tillage with strip-till, the installation of permanent fallow or green strips on arable land as well as the conservation-friendly management of moors and wet grassland are said to have a direct positive effect.

An indirect effect (outside the objective of the support measure) on the improvement of water infiltration is attributed to organic farming, the creation of structural and landscape elements and the cultivation of diverse crops.

The impact on water infiltration and surface runoff of agricultural support measures such as the annual creation of flowering strips and field-edge and protective strips, extensive grassland management, the absence of tillage after maize or rapeseed and overwintering stubble as well as the creation of fallow and grass strips in grasslands are questionable according to expert opinion.

From all measures classified as relevant to the project, these were assessed on the basis of the criteria of scope, acceptance, effectiveness and strength of the eligibility criteria. A measure index was then derived for an overall evaluation. The programs for the creation of erosion control strips lasting several years, winter greening, conversion of arable land to grassland, moor-conserving cultivation and set-aside measures lasting several years were identified as particularly effective. Based on a deficit analysis, specific proposals for improving the measures and support programmes were derived.

In order to improve the support instruments with regard to the project objectives, concrete objectives for improving water infiltration and reducing runoff from agricultural land must be defined in the respective support programmes. Previous agricultural support measures have the potential to develop infiltration-promoting or runoff-reducing effects; however, they are not implemented in the best possible way due to a lack of target values and, in some cases, soft criteria. Most farmers only implement

the support measures that they must implement in order to fulfil the funding criteria and not as much as they could in order to achieve best practice. In order to overcome this discrepancy, binding targets and threshold values must be set out in the catalogues of measures to be complied with by farmers, such as, for example, at least 30 % of land cover in mulch and no-till systems.

In order to improve the conveying action, in addition to the existing impact and result indicators, which are mainly based on calculations and modelling (e.g. simulation of soil erosion with and without mulch sowing), field-specific measurements during on-site inspections are recommended.

In addition, an adjustment of the support targets for individual measures seems to make sense, so that a component for improving infiltration or reducing runoff is added to the original purpose. In this way, there could be special support for line elements (perennial flowering strips, hedges, field-edge strips, etc.) that are laid out transversely to the slope direction or in deep lines, so that in addition to the biotope function they also have a flow-blocking effect. It would be best to focus specifically on areas within the catchment areas that are particularly relevant for runoff. The limitation of the support backdrops to certain endangered areas is regarded as decisive for the targeted orientation and implementation of the support measures as well as their impact and acceptance.

The analysis shows the following necessary steps to improve agricultural support measures with regard to soil protection:

- Definition of concrete soil protection objectives in the agricultural support programs.
- Derivation and definition of concrete hazard areas as support backdrops.
- Targeted improvement and further development of the existing support instruments of the AEM with regard to the project objectives (above all, sensible combinations of suitable measures).
- Specification of concrete target values in the measures and meaningful impact indicators for evaluation.
- Effective, preferably automated, area-representative monitoring of the implementation of measures and achievement of objectives.

Regional analyses of past flood events

On the basis of four selected case studies in West and South Germany, cause-analyses were carried out to identify runoff-producing areas and farming methods. These were carried out using a modified Kleeberg & Overland (1989) Curve Number method to model runoff formation at a field or parcel level. Based on the model results, it was examined whether there were significant differences in runoff volumes between different forms of land use and cultivation, especially for arable land. The initial analysis was followed by variant calculations with alternative cultivation farms and varying precipitation scenarios in order to develop approaches for reducing direct runoff and strengthening water retention at the catchment level and to estimate their potential impact.

For the analyses, time-related heavy and continuous rainfall events from four investigation sites in four federal states were selected as regional case studies:

- Event June 2016: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (municipality of Grafschaft, RP/NW)
- Event June 2015: Engebach/Hod (Bad Bellingen, BW)
- May/June 2016 Event: Simbach (BY)
- Event May 2016: Wolfsbach/Aichbach (BY)

Areas with low runoff are characterised by relatively low runoff coefficients and by the fact that their contribution to the total runoff is significantly lower than their area share. The present study deals

with forests, grassland and orchards. Runoff-promoting areas, on the other hand, have opposite properties, i.e. high runoff coefficients and total runoff percentages that are significantly higher than their proportion. In the case studies examined here, these are settlement areas and arable land (row crops, closed stock and nonspecific agriculture).

Consequently, in the case studies, settlement areas with a high degree of sealing on the one hand and arable land in general, in particular row crops (predominantly maize), on the other hand, were designated as runoff-promoting areas. The decisive parameters for controlling runoff formation in this case are the degree of sealing and the specific area management. In the case of arable land, the latter depends on various factors such as the crop grown, the degree of coverage, and tillage.

Area-differentiated runoff rates (direct runoff) were modelled for four real rainfall events, which took place in the years 2015 and 2016 in the early summer between the end of May and the beginning of June. On the basis of the model results, the arable land was clearly identified as a primary surface runoff land group. The differences in the runoff coefficients between arable land and areas with a lower runoff, e. g. forest or grassland, were 20 to 35 % for average soil moisture. At extreme soil moisture, the differences of the medians reached up to 70 %. By differentiating the runoff-promoting areas into closed stands and row crops, a difference of 8 to 15 % could be determined with regard to the runoff coefficients, with row crops producing the highest direct runoffs without exception.

As the arable land share in the four study areas was very high at 28 to 44 %, the high runoff coefficients of the areas led to correspondingly high volume fractions of total runoff. In three out of four case studies, arable land provided the highest runoff rates of 55 to 60 %. This corresponds to about 1.5 times their area share. Based on the runoff rates and irrespective of the runoff concentration, the present model results allow the conclusion of a causal relationship between the direct runoff quantities generated by arable land and the intensity of the flash flood or flood events. As a result, high arable land shares in general, especially in row crops with later sowing, aggravate the flash flood and flood problems in catchment areas.

Subsequently, variants were calculated for the four case studies in order to determine the influence of management on runoff formation and possible runoff reduction potentials. The aim of the variant considerations is to investigate the runoff formation under changed conditions

- of land management (e.g. non-turning tillage, organic farming, etc.) or
- of the precipitation intensity.

The soil moisture conditions, the soil hydraulic parameters and the slope inclination remain unchanged, only the area management and the precipitation are varied, whereby the following variants were considered:

- Variant 1: Mulch sowing method with seedbed preparation (degree of coverage <20 %),
- Variant 2: Direct sowing or mulch sowing method without seedbed preparation (coverage >20 %),
- Variant 3: Variant 2 plus 50 years direct sowing without tillage for maize and beet.

The results show that in the mulch sowing method, seedbed preparation has a significant influence on the water retention capacity of arable land. Mulch sowing with seedbed preparation does not significantly reduce runoff, whereas mulch sowing without seedbed preparation can reduce runoff at the field level by up to 20 %. This is reflected at the catchment area level by reduced runoff volumes of up to 7 %. Even stronger effects can be achieved with several years of direct sowing.

Furthermore, threshold values could be determined for the simulated cultivation variants which provide information on the precipitation intensity or duration at which the runoff reduction potential of

an area group or a catchment area is exhausted. In the above-mentioned variant of mulch sowing without seedbed preparation, a runoff reduction of 5 % is achieved with a precipitation intensity of approx. 40 to 50 mm/h and more. Even in the best-case scenario of long-term direct sowing, the runoff reduction potential drops to only approx. 5 % with a precipitation intensity of approx. 100 mm/h. Consequently, all measures at the field level have limits with regard to runoff reduction with correspondingly high precipitation intensity, even if the runoff peaks are reduced by the delays in runoff caused by mulch and direct sowing.

Depending on the risk degree or susceptibility to direct runoff formation, an area-specific need for action to reduce runoff can be determined in areas with high runoff shares. On this basis, appropriate measures and threshold values can be determined to measure the effectiveness potential for individual areas and the effect on the entire catchment area. These values serve to evaluate measures and can be used as additional planning instruments to accompany the possible implementation of measures at the field level for the hydrological optimization of agricultural areas in the entire catchment area.

Based on the regional analyses of flood events, it was concluded that high soil-borne runoff coefficients on arable land lead to high direct runoff in the catchment area and promote flash flood and any resulting flood situations. The potential water retention on arable land can be significantly influenced by different forms of cultivation. Mulch sowing without seedbed preparation and long-term direct sowing lead to an efficient runoff reduction on single fields with an effect on the entire catchment area with a minimum soil cover of ≥20 % at the time of the heavy rainfall event. Potential runoff reductions through measures at the individual impact level decrease significantly during heavy rain-fall events with >100-year occurrences.

1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1 Hintergrund

Neue Klimasimulationen für Deutschland, unter anderem entwickelt im Zuge des ReKliEs-Projektes, zeigen, dass bei gleichbleibend ansteigenden Treibhausgasemissionen der Klimawandel unverändert fortschreiten wird (UBA, 2017). Dies führt neben einem Anstieg der mittleren Jahrestemperatur vermutlich auch zu einer Zunahme von Starkregenereignissen, zu langanhaltenden Trockenperioden im Sommer sowie einer verstärkten Intensität der jeweiligen Ereignisse (Becker et al., 2016; LABO, 2017). Ebenso wird eine Zunahme der Erosivität der Starkregen erwartet, insbesondere in den Monaten Mai bis September (Fiener et al., 2013b). Um dadurch verursachte negative Folgen für Mensch, Infrastruktur und die Umwelt entgegenzusteuern, sind vielfältige Anpassungsmaßnahmen notwendig.

Extremereignisse kommen meist lokal vor und es gibt gebietsspezifisch unterschiedliche Auftrittswahrscheinlichkeiten, woraus besondere Gefahrenzonen abgeleitet werden können. Von besonderer Relevanz für die Entstehung von Sturzfluten sind konvektive Starkregenereignisse, die zudem Bodenabträge (Erosion) zur Folge haben können. Advektive Dauerregenereignisse können ab einer Dauer von 12 Stunden zu Überschwemmungen und Hochwasser führen. In beiden Fällen hat die Vorfeuchte großen Einfluss darauf, welche Folgen aus einem Extremwetterereignis entstehen (Kleeberg & Overland 1989). Bei hoher Vorfeuchte kann aufgrund der schnell eintretenden Sättigung kaum Wasser in den Boden infiltrieren. Nach anhaltenden Trockenperioden hingegen kann es vor allem bei konvektiven Regenereignissen aufgrund von Verschlämmung und Hydrophobie zu erhöhtem Abfluss mit entsprechenden Folgeschäden kommen (Diamantopoulos et al., 2013; Ganz et al., 2013) Bekannt ist zudem, dass es bezüglich des Einfluss der Wasserinfiltration auf die Entstehung von Sturzfluten zu großen regionalen Unterschieden kommt und es dazu in Deutschland wenige vergleichende Studien gibt. Dieses Defizit zu vermindern, ist Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen.

Landwirtschaftliche Flächen erfüllen mit ihrer Fähigkeit, Niederschlagswasser aufzunehmen, eine wichtige Funktion zum Schutz vor Sturzfluten, da der Prozess der Wasserinfiltration in den Boden eng mit dem Abflussgeschehen verbunden ist (Jankiewicz et al.; 2005, Niehoff, 2001; Bronstert, 2005; Bronstert et al., 2001). Neben den Substrateigenschaften (Bodenart, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, etc.) bestimmen allen voran die aktuelle Nutzung, der Anfangswassergehalt, die Bodenbedeckung, das landwirtschaftliche Bodenbearbeitungssystem sowie das Bewirtschaftungsverfahren die Wasserinfiltration und den Oberflächenabfluss. Diese Bewirtschaftungseinflüsse können sich auch auf die Bildung von Makroporen auswirken und bestimmen - zusammen mit dem Humusgehalt - direkt oder indirekt den Grad der Bodenverdichtung, teilweise nehmen sie auch Einfluss auf die Hydrophobie der Bodenoberfläche.

Hinsichtlich der Nutzung leistet der Wald den größten Beitrag zur Prävention von Sturzfluten, gefolgt von Grün- und Ackerland (Abu-Hashim, 2011; Alhassoun, 2009). Bodenbedeckung trägt ab einem Bedeckungsgrad von 30 % wesentlich zur Verbesserung der Infiltration und Reduzierung von Oberflächenabfluss auf der Schlagebene bei, da hierbei weniger Verschlämmung auftritt (Möller & Volk, 2010; Nciizah & Wakindiki, 2015). Makroporen leisten speziell bei konvektiven Niederschlagsereignissen einen Beitrag zu einer verbesserten Wasserinfiltration auf Punkt- und Feldebene, sofern deren Kontinuität und Durchgängigkeit bis zur Bodenoberfläche gegeben ist (Bronstert, 2005; Weiß, 2009).

Gefördert werden können Makroporen durch konservierende Bodenbearbeitung (Beisecker, 1994), den Erhalt der organischen Substanz und generell auch über den sog. „ökologischen Landbau“. Die konservierende Bodenbearbeitung führt zudem zu einer Anreicherung an organischer Substanz im Oberboden und hat großen Einfluss auf die Erosivität des Bodens, wobei sich die Direktsaat besonders positiv auf die Wasserinfiltration auswirkt (bspw. Frede et al., 1994; Crittenden et al., 2015; Martínez

et al., 2016; Deumelandt et al., 2014). Im ökologischen Landbau werden Anbaumethoden, die eine positive Wirkung auf die Wasserinfiltration in den Boden haben, häufiger angewandt (Haas, 2010). Dazu zählen die vielfältigeren Fruchtfolgen, die wiederkehrende Bodenruhe, die häufiger praktizierte Untersaat, der höhere Anteil an Zwischenfrüchten, der höhere Unkrautbesatz verbunden mit einer höheren Bodenbedeckung und die kleiner strukturierten Anbaueinheiten mit verschiedenen Kulturarten.

Um generell die Umweltleistungen der Landwirtschaft zu steigern und entsprechend zu honorieren, gibt es vor allem auf europäischer, nationaler und Länderebene (ökonomische) Maßnahmenprogramme (Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM)), die direkt oder indirekt auch die Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens zum Ziel haben. Ergänzend zu den AUKM-Förderrichtlinien bestehen Programme zum Vertragsnaturschutz und Hochwasserschutz, z. B. zur Fließgewässerentwicklung oder zur Anlage von Hecken und Feldgehölzen. Basierend auf diesen Förderrichtlinien können landwirtschaftliche Betriebe verschiedene Maßnahmen mit Bezug zu Klima- und Umweltschutz umsetzen und dafür Fördergelder beantragen. Dabei gibt es zwischen den einzelnen Bundesländern Unterschiede bei den angebotenen Fördermaßnahmen, den spezifischen Auflagen sowie den jeweiligen Prämien. Dazu fehlt jedoch bisher ein umfassender Überblick, der im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erstmals erstellt und durch Befragungen der betroffenen Behördenvertreter ergänzt und abgerundet wurde.

Generell bergen die bisherigen Agrarfördermaßnahmen großes Potenzial, um auch infiltrationsfördernde bzw. abflussmindernde Wirkungen zu entfalten, doch gibt es aufgrund fehlender, verbindlicher Zielwerte und wegen zum Teil weicher Kriterien erhebliche Defizite in der Umsetzung. Außerdem sind die Aspekte Infiltrationsleistung bzw. Abflussminderung bisher kaum explizit adressiert und berücksichtigt.

Neben den Förderprogrammen wird die landwirtschaftliche Praxis auch von rechtlichen Vorgaben auf unterschiedlichen Ebenen beeinflusst. Von zentraler Bedeutung ist hier § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), welcher die gute fachliche Praxis definiert. Deren Vorgaben werden von der landwirtschaftlichen Offizialberatung vermittelt und müssen schließlich von den Landwirten verbindlich umgesetzt werden. Zusätzlich beinhalten das Agrarrecht und die Gemeinsame Agrarpolitik, welche auf Europäischer Ebene erarbeitet werden, Vorgaben für die Erhaltung von Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (sog. GLÖZ), an deren Einhaltung die Auszahlung der Agrarprämien (Direktzahlungen gemäß Cross-Compliance) geknüpft ist. Diese wurden im Zuge der letzten Agrarreform 2013 um das sog. „Greening“ erweitert, wonach 30 % der Prämien erst bei Umsetzung konkreter, zusätzlicher Umweltleistungen ausbezahlt werden. Weitere Aspekte, die für die Entstehung bzw. Prävention von Sturzfluten relevant sind, finden sich im Wasserrecht (WHG) und im Naturschutzrecht (BNatSchG). All diese rechtlichen Vorgaben haben gemein, dass die Wasserinfiltration bisher kaum explizit benannt wird, aber häufig mitbeeinflusst wird, wodurch deren Wirksamkeit im Hinblick auf die Entstehung von Sturzfluten aufgrund von Starkregenereignissen vielfach unklar ist.

1.2 Zielsetzung

Mit dieser Studie sollte der Einfluss der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf das Wasserinfiltrationsvermögen landwirtschaftlicher Böden und den Oberflächenabfluss im Hinblick auf zukünftig häufiger und stärker auftretende Extremwetterereignisse, wie Stark- und Dauerregenereignisse, aber auch länger anhaltende Trockenperioden, herausgearbeitet werden. Dabei standen besonders die landwirtschaftlichen Anbauverfahren, Bodenbearbeitungssysteme und pflanzenbaulichen Maßnahmen im Fokus. Darauf aufbauend sollte geprüft werden, inwieweit die aktuellen Fördermaßnahmen geeignet sind, die Infiltrationsfähigkeit zu verbessern, um damit auch im Falle von extremen Niederschlagsereignissen der Wassererosion und Überflutungen entgegenzuwirken. Ein weiteres Ziel war die Zusam-

menstellung und Auswertung der bestehenden rechtlichen Vorgaben (Gesetze, Verordnungen, Richtlinien etc.) und ihre Umsetzung in der guten fachlichen Praxis (gfP) im Hinblick auf die Förderung der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlichen Böden. Sowohl für die aktuellen Förderprogramme als auch die bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden nach einer Defizitanalyse gezielte Verbesserungsvorschläge und Maßnahmenempfehlungen zur Weiterentwicklung der Fördermaßnahmen und gesetzlichen Vorgaben abgeleitet.

Für mehrere ausgewählte Stark- oder Dauerregenereignisse, die zu markanten Schäden geführt haben, sollte anhand einer regionalen Analyse heraus gearbeitet werden, warum es zu den erheblichen Auswirkungen gekommen ist und welche Zusammenhänge mit der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den Überflutungen bestehen. Aufbauend auf diesen Fallbeispielen wurden Vorschläge für zukünftige Risikoabschätzungen und möglicher Gegenmaßnahmen erarbeitet.

Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen bestand darin, die Bedeutung und den Beitrag landwirtschaftlicher Bodennutzung für die Wasserinfiltration besser beurteilen zu können und damit zu einer stärkeren Beachtung der technischen und ökonomischen Handlungsmöglichkeiten beizutragen. Dazu zählen die Förderung bestimmter Bewirtschaftungsformen zur Optimierung des Wasseraufnahmevermögens, die Schaffung von Anreizen zum Einsatz geeigneter Verfahren zur Förderung der Bodenstabilität (Bodenschutz und Hochwasserschutz) sowie die Gewährung von Kompensationsleistungen als Ausgleich für den Verlust von Wasserspeichervermögen infolge von Bebauung.

Der Schwerpunkt der vorgenommenen regionalen Ursachenanalysen lag in der Identifikation abflusserzeugender Flächen und deren Charakteristika. Diese sollten mittels einer Abflussmodellierung auf lokaler, einzugsgebietsbezogener Schlag- bzw. Flurstücksebene erfolgen. Anhand der Modellergebnisse sollte überprüft werden, ob signifikante Unterschiede bezüglich der Abflussmengen zwischen verschiedenen Landnutzungsformen, insbesondere bei Ackerflächen, nachweisbar sind.

2 Methodisches Vorgehen zur Informationsermittlung

Um die in Kapitel 1.2 beschriebenen Ziele zu erreichen, wurden im Rahmen des Projektes folgende Schritte zur Informationsgewinnung durchgeführt:

- Umfangreiche Internet- und Literaturrecherchen,
- Befragung von relevanten Behördenfachleuten mittels Fragebögen,
- Diskussion spezifischer Fragestellungen in vier bilateralen Expertengesprächen,
- Diskussion und Validierung der Ergebnisse in einem Workshop mit Behördenvertretern und weiteren Experten aus Forschung und Entwicklung.

Im ersten Schritt wurde der Stand der Forschung zur Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden recherchiert. Darauf aufbauend wurden Fördermaßnahmen sowie rechtliche Grundlagen identifiziert, die einen direkten oder indirekten Bezug zur Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden haben. Die gewonnenen Informationen wurden mit Experten diskutiert und evaluiert.

Sie dienten als Ausgangsbasis für Vorschläge von Fördermaßnahmen und rechtlichen Möglichkeiten, um die Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden gezielt zu verbessern und so auch im Falle von extremen Niederschlagsereignissen der Wassererosion und Überflutungen entgegenzuwirken.

Zur Archivierung der relevanten Veröffentlichungen, Förderprogrammen und rechtlichen Grundlagen wurde eine Literaturdatenbank in dem Literaturverwaltungsprogramm Citavi 6, welches Endnote-kompatibel ist, aufgebaut. In diesem wurden vier Kategorien vergeben:

- Fachliteratur
- Förderprogramme
- Gesetze
- Fallbeispiele

Neben der Vergabe von projektrelevanten Schlagwörtern wurde jede Quelle bewertet, zusammengefasst und wichtige Zitate festgehalten. Die Datenbank enthält die Zusammenfassungen der relevanten Quellen, auf denen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens basieren. Die Datenbank ist neben diesem Bericht ein eigenes Projektergebnis, welches dem UBA für die Bearbeitung weiterer Fragestellungen zum Thema Wasserinfiltration zur Verfügung gestellt wird.

2.1 Internet- und Literaturrecherche

Im Rahmen von systematischen Internet- und Literaturrecherchen wurden zahlreiche Publikationen, Fördermaßnahmen und rechtliche Grundlagen identifiziert. Der Schwerpunkt lag auf Deutschland. Aber auch relevante europäische und internationale Publikationen und rechtliche Grundlagen wurden herangezogen, soweit diese für die Projektziele als relevant erschienen. Die identifizierten Informationsquellen wurden auf ihre Bedeutsamkeit geprüft und anschließend ausgewertet. Eine genauere Beschreibung der Vorgehensweise befindet sich jeweils am Anfang der nächsten Kapitel.

Die Literaturrecherche wurde über den gesamten Projektzeitraum fortgesetzt.

2.2 Experten-Befragung

Die Expertenbefragung erfolgte mittels Fragebögen an die für Bodenschutz zuständigen Landesbehörden und anhand von Telefoninterviews mit vier ausgewählten Experten.

Fragebögen

Um das Wissen zu den aktuell und vormalig durchgeführten Fördermaßnahmen und den relevanten rechtlichen Grundlagen zu erweitern und Experteneinschätzungen auf Bundeslandebene zu erhalten, wurden die für das Projekt relevanten Länderbehörden in das Projekt mit einbezogen. Dazu wurde ein Fragebogen entwickelt (s. Anlage 9.2) und zunächst an alle Mitglieder des Ausschusses „*Vorsorgender Bodenschutz*" (BOVA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) gesandt. In den meisten Bundesländern wurden die Landwirtschaftsbehörden bei der Beantwortung miteinbezogen. In manchen Fällen wurden diese auch zusätzlich direkt vom Projektteam kontaktiert. Der Fragebogen beinhaltete bereits vom Projektteam identifizierte und als relevant eingestufte länderspezifische Fördermaßnahmen und gesetzliche Grundlagen, die durch die Behörden zu korrigieren bzw. zu ergänzen waren. Hierzu wurden die Fragebögen länderspezifisch angepasst.

Insgesamt beteiligten sich die Landesbehörden aus allen Bundesländern (die drei Stadtstaaten ausgenommen) an der Fragebogenaktion.

Experteninterviews

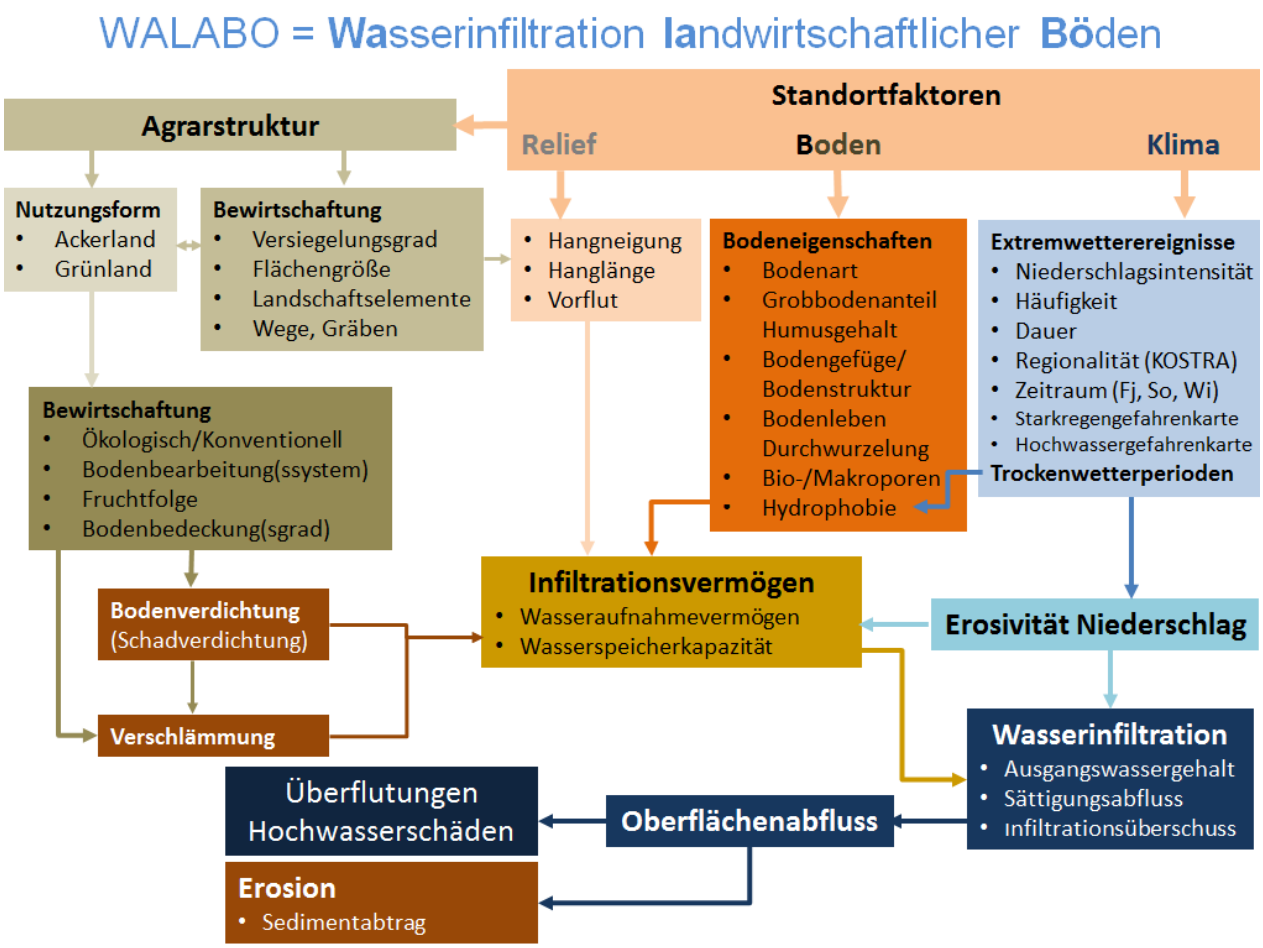
Zusätzlich zu der Fragebogenaktion wurden in einem fortgeschrittenen Verlauf des Projekts vier Telefoninterviews mit ausgewählten Experten aus der Forschung und von Behörden zu spezifischen Fragestellungen (s. Anlage 9.3) durchgeführt. Die Experten sowie die spezifischen Fragen für das Interview wurden vorab mit dem Umweltbundesamt abgestimmt. In den Interviews konnten bereits gewonnene Erkenntnisse geprüft und weiter entwickelt werden. Die durch die Interviews zusätzlich erhaltenen Informationen stellen einen großen Mehrwert für die Projektergebnisse dar. Die Kernaussagen wurden in Protokollen zusammengefasst und fanden Eingang in die weitere Projektbearbeitung.

Nach der Erarbeitung der ersten Ergebnisse wurden relevante Behördenvertreter, Akteure aus Forschung und Entwicklung sowie Mitarbeiter von Behörden aus den Bereichen Bodenschutz und Landwirtschaft zu einem Fachgespräch eingeladen. In dem Fachgespräch wurden die bislang erarbeiten Inhalte des Projekts vorgestellt und zu jedem Projektschwerpunkt im Projektverlauf herausgearbeitete, entscheidende und problematische Punkte diskutiert. Die Ergebnisse des Fachgesprächs sind in den Endbericht mit eingeflossen.

3 Literaturüberblick zur Wasseraufnahmefähigkeit landwirtschaftlicher Böden

Um den aktuellen Wissenstand für die Fragestellung der Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Flächen bei Extremwetterereignissen zu erarbeiten, wurde ein Wirkungsgefüge entwickelt (s. Abbildung 1). Dieses beinhaltet die wichtigsten Begriffe des Projektkontexts sowie die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren und verdeutlicht die wechselseitigen Abhängigkeiten der ablaufenden Prozesse.

Abbildung 1: Wirkungsgefüge der projektrelevanten Fachbegriffe



Quelle: eigene Darstellung, IfÖL GmbH

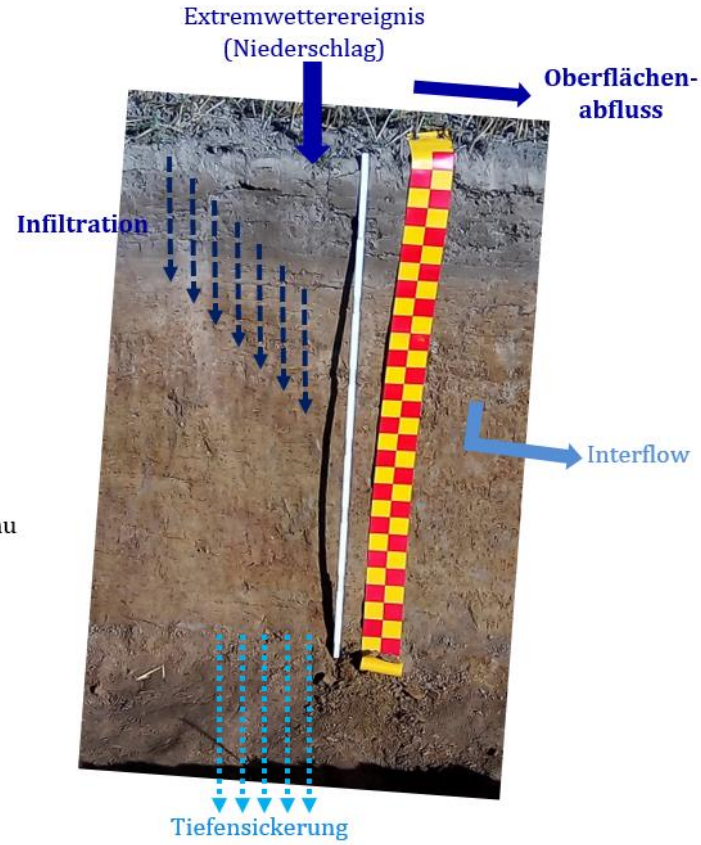
Dieses Schema zeigt einerseits deutlich die Wechselwirkungen der Wasserinfiltration in den Boden mit dem Abflussgeschehen und andererseits hebt es die Komplexität des Themas hervor. Gleichzeitig dienten die Begriffe dieses Schemas als Stichworte für die Literaturrecherche.

Da das Themenfeld der Wasserinfiltration sehr umfangreich ist, würde die Betrachtung, Erläuterung und Verknüpfung aller Begriffe des Wirkungsgefüges an dieser Stelle zu weit führen, deshalb wird nachfolgend nur auf die im Kontext dieses Vorhabens relevanten Aspekte eingegangen.

Aus dem Wirkungsgefüge und den Ergebnissen der Literaturrecherche kristallisierten sich die in Abbildung 2 dargestellten Stichworte und Themenbereiche als besonders relevant für die Fragestellungen dieses Vorhabens heraus. Diese werden in den nächsten Kapiteln behandelt.

Abbildung 2: Relevante Gliederungspunkte zur Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden

1. Extremwetterereignisse
   a) Starkregen
   b) Dauerregen
   c) Trockenwetterperioden
2. Oberflächenabfluss und Infiltration
   a) Abflussbildung
   b) Einflussfaktoren auf Infiltration
      (1) Nutzung
      (2) Verschlämmung, Bodenbedeckung
      (3) Makroporen
      (4) Bodenbearbeitung
      (5) Verdichtung
      (6) Ökolandbau - konventioneller Landbau
      (7) Humusgehalt und Hydrophobie
3. Fazit und vorläufige Schlussfolgerungen (Maßnahmen, Risikovorsorge)
   a) Feld-/Schlagebene
   b) Einzugsgebietsebene



Quelle: eigene Darstellung, IfÖL GmbH

3.1 Extremwetterereignisse

Hauptsächlich werden in diesem Vorhaben die Auswirkungen von Stark- und Dauerregenereignissen auf die Wasserinfiltration betrachtet. Allerdings sind auch Trockenperioden in diesem Zusammenhang bedeutsam, da sie die hydrophoben Eigenschaften von Böden erhöhen und somit die Wasserinfiltration reduzieren können (s. Kapitel 3.3.7). Somit können die negativen Auswirkungen von Starkregenereignissen besonders nach längerer Trockenheit heftiger als bei feuchten Böden ausfallen.

Starkregenereignisse sind geprägt von kurzzeitig hohen Niederschlagsintensitäten, einer geringen Vorwarnzeit, oftmals hohen Fließgeschwindigkeiten und singulären bzw. spontanen Wirkungen (Brandhuber et al., 2017; Bronstert et al., 2017; Borga et al., 2014; Vogel et al., 2017). Dabei handelt es sich um konvektive Niederschlagsereignisse, wie Gewitterregen oder heftige Schauer. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert für Starkregenereignisse drei Warnstufen (s. Tabelle 1):

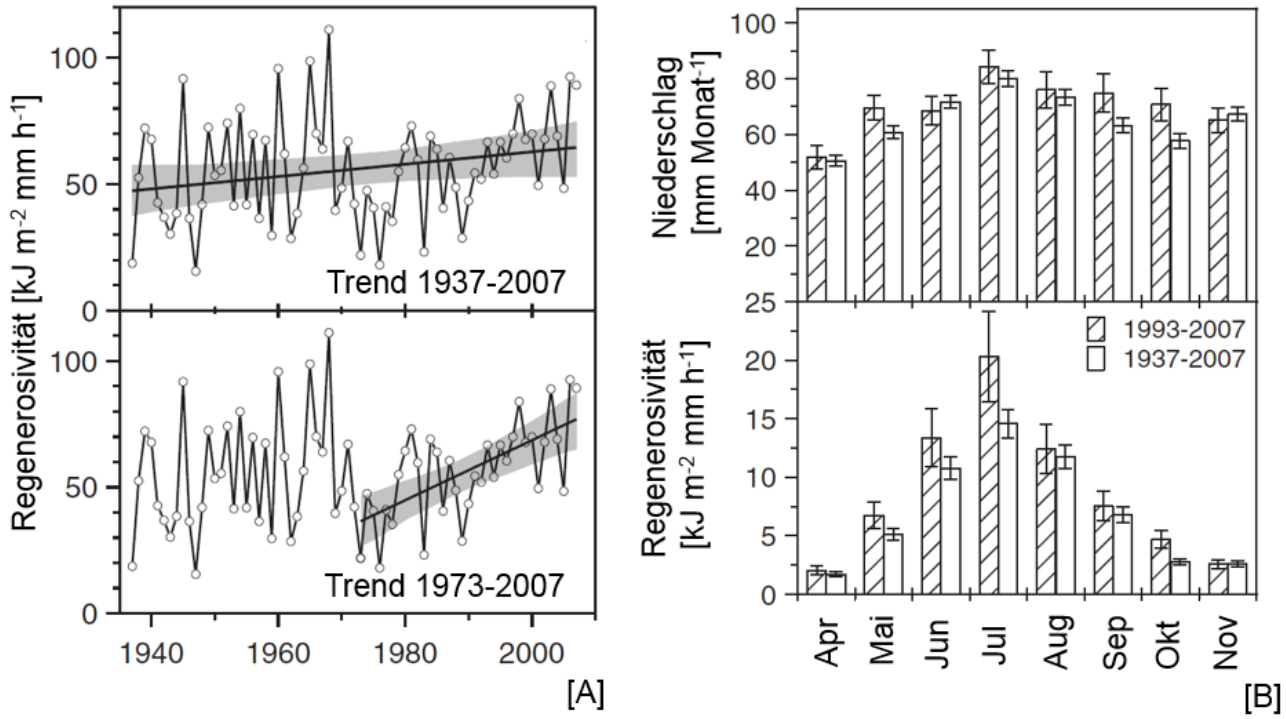
Tabelle 1: Warnkriterien des Deutschen Wetterdienstes für Starkregen

Stufe	Warnereignis	Schwellenwert
2	Starkregen	15 bis 25 l/m² in 1 Stunde 20 bis 35 l/m² in 6 Stunde
3	Heftiger Starkregen	25-40 l/m² in 1 Stunde 35-60 l/m² in 6 Stunden
4	Extrem heftiger Starkregen	>40 l/m² in 1 Stunde >60 l/m² in 6 Stunden

Quelle: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html

Im Zuge des Klimawandels wird eine Zunahme von Starkregenereignissen in den letzten Jahrzehnten verzeichnet (s. Abbildung 3[A]) und zukünftig werden häufigere und heftigere Starkregenereignisse erwartet (beispielsweise Becker et al., 2016; Fiener et al., 2013b; LABO, 2017; Müller & Pfister, 2011; Rippel, 2007; Wurbs & Steiniger, 2011). Auch wird eine Zunahme der Erosivität der Regenereignisse statistisch nachgewiesen, insbesondere in den Monaten Mai bis September (s. Abbildung 3[B]).

Abbildung 3: Trends der Regenerosivität im Sommer für die Zeiträume 1937-2007 [A oben] und 1973-2007 [A unten]; Saisonalität des monatlichen Niederschlags [B oben] und der Regenerosivität [B unten] jeweils für die Zeiträume 1937-2007 und 1993-2007



Quellen: aus Fiener et al. (2013b)

Dauerregenereignisse sind langanhaltende (advektive) Niederschläge mit einer Dauer von mindestens sechs Stunden und einer stündlichen Niederschlagsmenge von mindestens 0,5 mm, auch bekannt als Landregen. Nicht in jedem Fall ist Dauerregen ein Unwetter, erst ab einer Dauer von 12 Stunden definiert der DWD drei Warnstufen. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Warnkriterien des Deutschen Wetterdienstes für Dauerregen

Stufe	Warnereignis	Schwellenwert
2	Dauerregen	25 bis 40 l/m² in 12 Stunden 30 bis 50 l/m² in 24 Stunden 40 bis 60 l/m² in 48 Stunden 60 bis 90 l/m² in 72 Stunden
3	Ergiebiger Dauerregen	40-70 l/m² in 12 Stunden 50-80 l/m² in 24 Stunden 60-90 l/m² in 48 Stunden 90-120 l/m² in 72 Stunden
4	Extrem ergiebiger Dauerregen	>70 l/m² in 12 Stunden >80 l/m² in 24 Stunden >90 l/m² in 48 Stunden >120 l/m² in 72 Stunden

Quelle: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html

In Folge von sehr langandauerndem Regen und hohen Regenmengen können Überschwemmungen und Hochwasser auftreten.

Trockenperioden sind besonders relevant, wenn ein Starkregenereignis nach einer langen Trockenphase eintritt. Sie wirken sich dabei vor allem in Form von zunehmenden Trockenrissen (s. Kapitel 3.3.3) und einer Zunahme der Hydrophobie (s. Kapitel 3.3.7) der Oberböden aus. Der Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg[1] definiert einen Trockenheitsindex als die Anzahl von Tagen mit einer geringen Füllung des Bodenwasserspeichers (<30 % nutzbare Feldkapazität). Beispielsweise liegt das Mittel der Jahre 1951 bis 2010 für die südlichen Bundesländer BW, BY, RP, HE bei 52 Tagen mit einer Spanne von 43 bis 76 Tagen pro Jahr.

Die Vorfeuchte hat einen großen Einfluss darauf, wie die Folgen von Extremwetterereignissen sind. So kann bei einer hohen Vorfeuchte sowohl bei einem konvektiven als auch bei einem advektiven Niederschlagsereignis kaum Wasser in den Boden infiltrieren. Bei einer geringen Vorfeuchte können vor allem die konvektiven Regenereignisse mit großen Folgeschäden verbunden sein.

Vom DWD gibt es eine umfangreiche, freiverfügbare Datenbasis um Analysen und Gefährdungsabschätzungen von Starkregen und Überflutungsrisiken durchzuführen. Mit den KOSTRA-Daten[2](**Ko**ordinierte **St**arkniederschlags**r**egionalisierung und –**a**uswertung, Junghänel et al. 2017) können die Jährlichkeiten (1 bis 100 a) für Niederschlagsereignisse verschiedener Dauerstufen (5 min bis 72 h) für ein bestimmtes Gebiet ermittelt werden. Das RADOLAN-Verfahren des DWD (Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb für Deutschland) liefert flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste quantitative Niederschlagsdaten für Echtzeitanalysen. Damit können vergangene Niederschlagsereignisse ausgewertet werden. Des Weiteren gibt es flächendeckende Karten zur Erosivität der Niederschläge wie den R-Faktor der ABAG (Allgemeine Bodenabtragsgleichung)

[1] WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Umweltministerium Baden-Württemberg und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Stuttgart, Karlsruhe

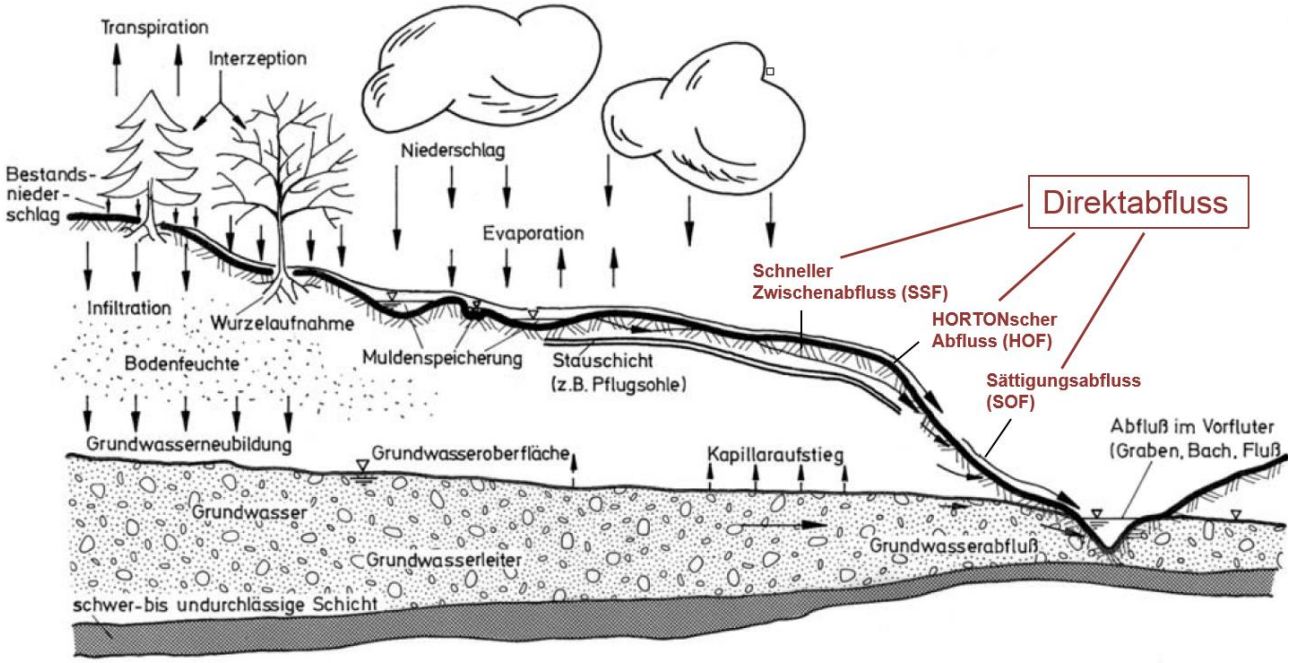
[2] https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html (Aufgerufen am 24.04.2019)

(BGR, 2014) oder Starkregengefahrenkarten, die schon für einige Kommunen erarbeitet wurden, wie beispielsweise für Unna oder Wuppertal[3].

3.2 Oberflächenabfluss und Infiltration

Der Prozess der Wasserinfiltration in den Boden ist eng verbunden mit dem Abflussgeschehen (Jankiewicz et al.; 2005, Niehoff, 2001; Bronstert, 2005; Bronstert et al., 2001). Die ablaufenden Prozesse und Vorgänge sind ausreichend in hydrologischen Lehrbüchern erläutert und sollen deshalb an dieser Stelle nicht wiederholt werden. Für das weitere Prozessverständnis werden an dieser Stelle nur die drei für die Entstehung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten wichtigsten Abflusskomponenten aufgeführt und deren Auswirkungen auf die Wasserinfiltration erläutert (s. Abbildung 4).

Abbildung 4: Abflussprozesse am Hang



Quelle: verändert nach Bronstert (2005)

Diese drei Abflusskomponenten bilden den Direktabfluss nach DWA (2018) und sind durch eine kurze Antwortzeit im Vorfluter gekennzeichnet. Auf die daraus resultierende Abflussbildung und deren regionale Bedeutung wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Der Direktabfluss setzt sich insgesamt zusammen aus den Horton´schen Oberflächenabfluss (HOF), dem Sättigungsabfluss (SOF) und dem schnellen Zwischenabfluss (SSF) (vgl. Abb. 4).

HORTONscher Oberflächenabfluss (HOF):

Die Niederschlagsintensität ist größer als die aktuelle Infiltrationsrate, somit tritt Oberflächenabfluss auch bei nicht vollständig gesättigtem Bodenwasserspeicher auf. Die Landnutzung spielt nur bei hohen Niederschlagsintensitäten eine Rolle.

[3] https://starkgegenstarkregen.de/starkregenkarte/ (Aufgerufen am25.03.2019).
https://www.wsw-online.de/wsw-energie-wasser/privatkunden/produkte/dienstleistungen/abwasser/starkregen/ (Aufgerufen am 25.03.2019).

Sättigungsoberflächenabfluss (SOF):

Bei gesättigtem Bodenwasserspeicher kann nur so viel Wasser in den Boden infiltrieren, wie dem Matrixfluss bei wassergesättigtem Porenraum entspricht. Diese wird entscheidend von der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) der Bodenmatrix und der Anzahl und Durchgängigkeit von Makroporen bestimmt. Ist die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationskapazität des Bodens, kommt es zu Oberflächenabfluss. Bei sehr hohen Niederschlagsintensitäten ist der Abfluss nahezu unabhängig von der Infiltration. Die Landnutzung spielt dann eine untergeordnete Rolle, da Topographie und Relief die entscheidenden Einflussgrößen sind.

Schneller Zwischenabfluss (SSF):

Beim schnellen Zwischenabfluss (engl. return flow) handelt es sich um Wiederaustritt von Wasser am Hang (Interflow). Somit haben hier die Reliefstruktur und oberflächennah anstehende wenig durchlässige Schichten den stärksten Einfluss auf die Bildung des Zwischenabflusses.

In diesem Zusammenhang gilt es zu berücksichtigen, dass Oberflächenabfluss nicht mit Erosion gleichzusetzen ist. Gerade beim Zusammenhang zwischen der Art des Niederschlagsereignisses und dem Bodenbedeckungsgrad gibt es deutliche Unterschiede darin, wie hoch der Bodenabtrag durch den Oberflächenabfluss tatsächlich ist.

3.3 Einflussfaktoren auf das Wasseraufnahmevermögen landwirtschaftlicher Böden

Die Prozesse der Wasserinfiltration und des Oberflächenabflusses werden von vielen Parametern (s. Wirkungsgefüge in Abbildung 1) beeinflusst. Neben den standörtlich bedingten und in der Regel nicht veränderbaren Bodeneigenschaften (Bodenart, Humusgehalt, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, hydraulische Wasserleitfähigkeit) beeinflussen vor allem die Nutzung und Bewirtschaftung die Wasserinfiltration der Böden.

Die folgenden durch die Bewirtschaftung beeinflussbaren Parameter stellten sich als besonders bedeutsam heraus, die hier nach ihrer Bedeutung für die Wasserinfiltration gelistet sind:

- Nutzung
- Bodenbedeckung und Oberflächenverschlämmung
- Bodenbearbeitungs(systeme)
- Anbauverfahren (ökologisch, konventionell)
- Makro-, Bioporen
- Bodenverdichtung
- Humusgehalt
- Hydrophobie

Entsprechend den Fragestellungen dieses Vorhabens wird auf die standörtlichen Bodenparameter (Bodenart, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und -kontinuität, hydraulische Leitfähigkeit sowie Aggregatstabilität) und deren Einfluss auf die Wasserinfiltration an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da es sich hierbei um Lehrbuchwissen handelt, das als bekannt vorausgesetzt wird. Das Gleiche gilt auch für den Einfluss des Anfangswassergehalts, da dieser hauptsächlich von vorangegangenen Niederschlägen abhängt und nutzungsbedingt relativ wenig beeinflusst werden kann.

Nachfolgend wird zu den wesentlichen nutzungsbedingten Einflussfaktoren, die sich aus der Literaturrecherche für die in diesem Vorhaben vorherrschende Fragestellung als besonders relevant herausgestellt haben, jeweils zu Beginn des Unterkapitels eine Kernaussage hinsichtlich der Auswirkungen auf die Wasserinfiltration formuliert, diese ist fett hervorgehoben. Anschließend werden diese Kernaussagen mit den wichtigsten Literaturstellen belegt, erläutert und diskutiert.

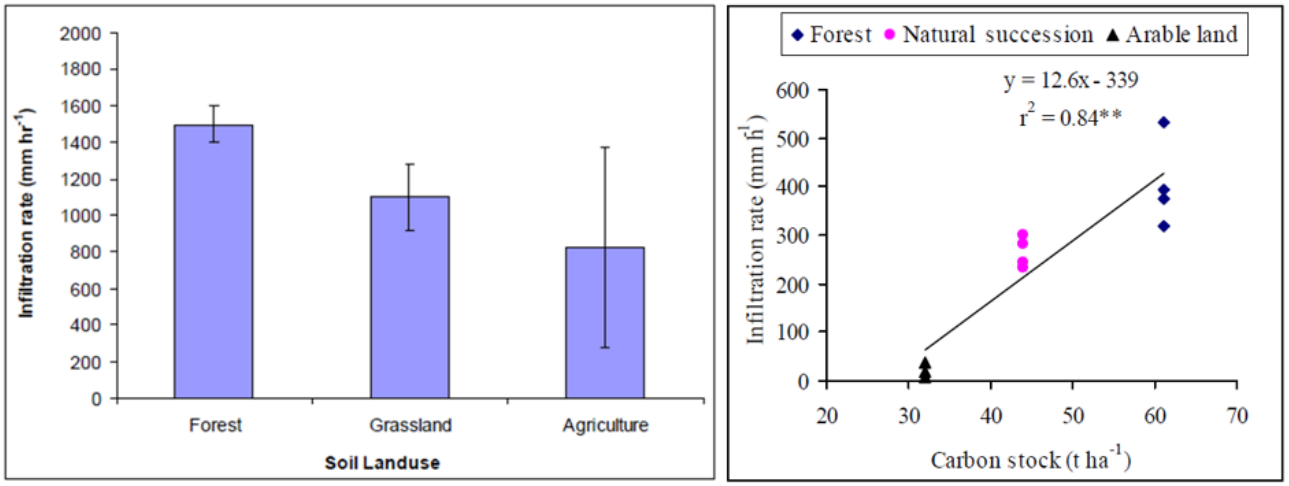
3.3.1 Nutzung

Die Landnutzungsform hat einen bedeutenden Einfluss auf die Wasserinfiltration, die von Wald- über Grünland- zur Ackernutzung abnimmt.

Ergebnisse aus Feldmessungen:

Punktmessungen auf Einzelschlägen mit Haubeninfiltrometern, welche die hydraulische Leitfähigkeit bei nahezu wassergesättigtem Porenraum messen, zeigen, dass die Wasserinfiltration in Waldböden am höchsten ist, gefolgt von Grünland und Ackerland (bspw. Abu-Hashim, 2011 Alhassoun, 2009) (s. Abbildung 5). Allerdings weisen die Ackerstandorte bei Abu-Hashim (2011) die größten Schwankungen der Infiltrationsrate auf, wohingegen bei Alhassoun (2009) die Waldstandorte mit den größten Kohlenstoffvorräten die weitesten Spannen zeigen (s. Kapitel 3.3.7). Auch liegen die gemessenen Infiltrationsraten bei Alhassoun (2009) um den Faktor 4 niedriger als bei Abu-Hashim (2011). Diese Unterschiede sind vermutlich auf die verschiedenen standörtlichen Bedingungen zurückzuführen, können aber auch messtechnisch bedingt sein.

Abbildung 5: Wasserinfiltrationsrate in Abhängigkeit der Landnutzung ermittelt in Punktmessungen mit Haubeninfiltrometern



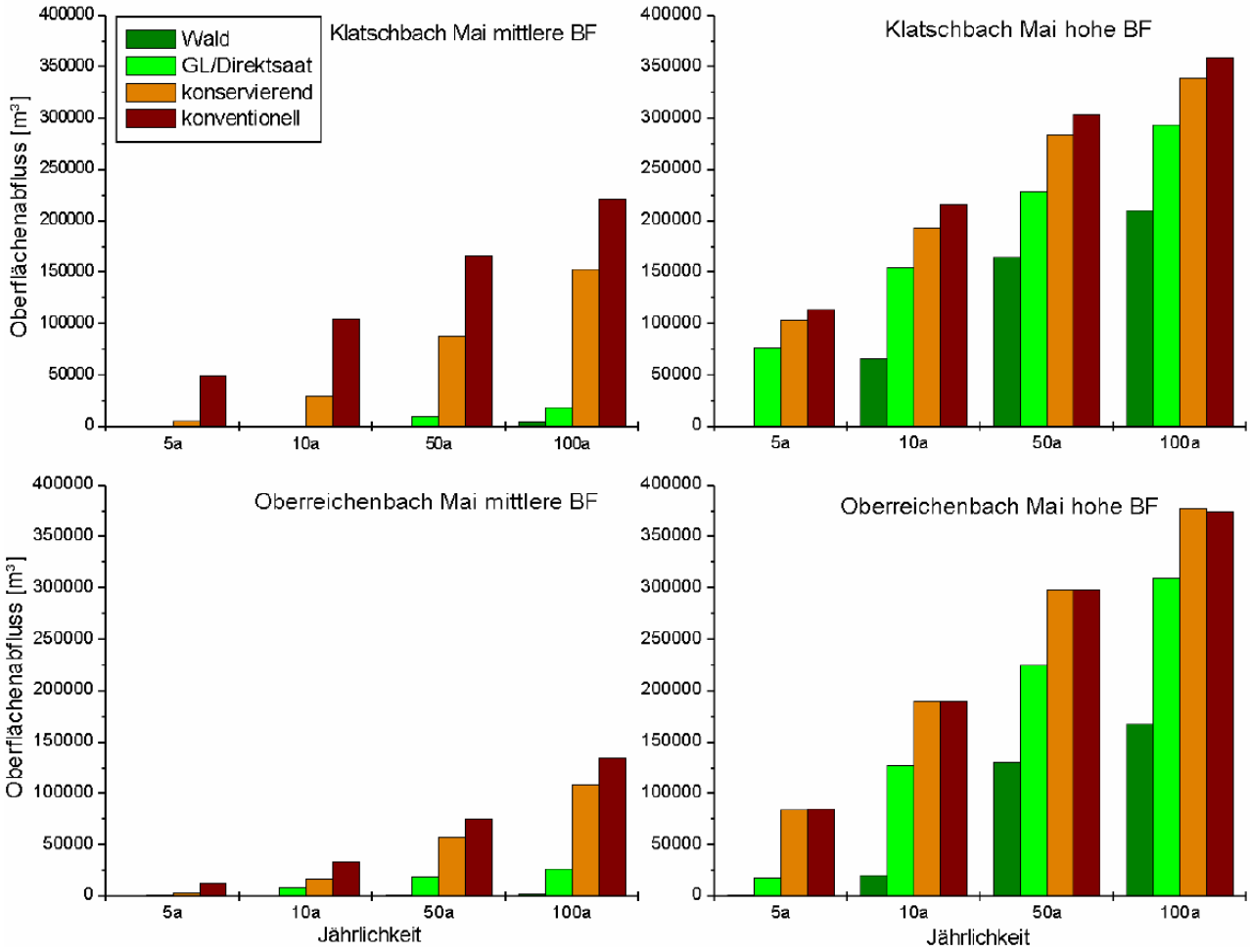
Quellen: aus Abu-Hashim (2011) [A] und Alhassoun (2009) [B]

Ergebnisse aus Modellrechnungen:

Ergebnisse mit Simulationsmodellen wie beispielsweise von Seidel (2008) mit EROSION 3D[4] zeigen für Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Jährlichkeiten auf Einzugsgebietsebene den höchsten Oberflächenabfluss bei Ackernutzung, gefolgt von Grünland und die geringsten Werte bei Waldnutzung (s. Abbildung 6). Dabei handelt es sich um Einzugsgebiete des Fließgewässers Striegis in Sachsen. Bei den Eingangsparametern gingen auch unterschiedliche Anfangswassergehalte des Bodens (wird hier nicht weiter betrachtet) und unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme (wird in Kapitel 3.3.4 weiter ausgeführt) mit ein.

[4] EROSION 3D ist ein rasterbasiertes, physikalisch begründetes und computergestütztes Modell zur Simulation von Bodenerosion, das an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt wurde. Abfluss und Infiltration werden im sog. Infiltrationsmodell ermittelt.

Abbildung 6: Einfluss von Landnutzung, Bodenbearbeitung und Bodenfeuchte (BF) auf den Oberflächenabfluss bei mittlerer und hoher Ausgangsbodenfeuchte sowie für verschiedene Jährlichkeiten in Einzugsgebieten des Fließgewässers Striegis in Sachsen

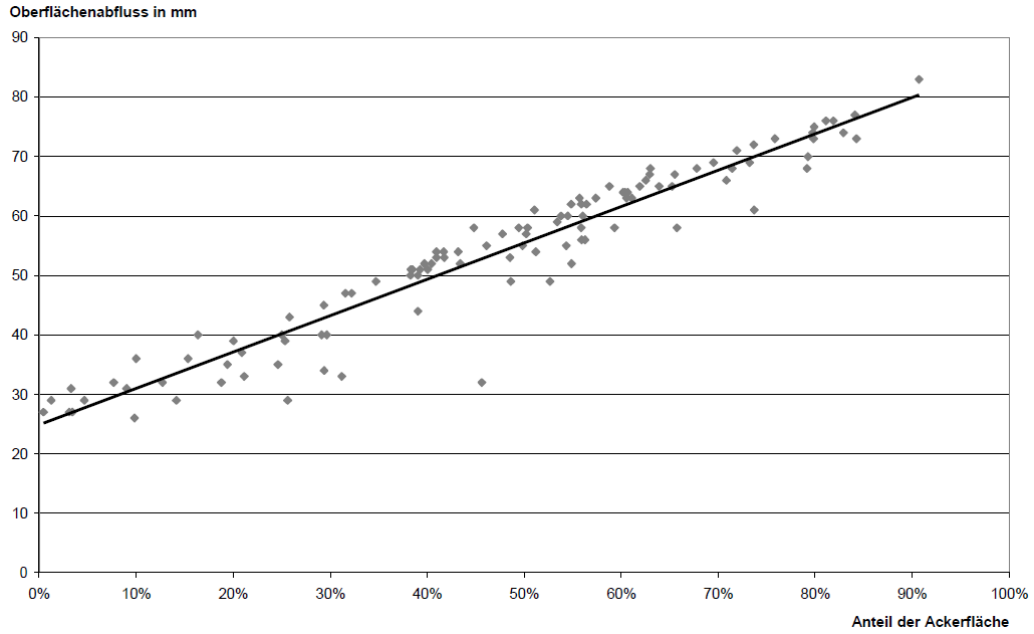


Quelle: aus Seidel, 2008

In der Arbeit von Sieker (2002) wurde das Abflussgeschehen mit dem Simulationsmodell NASIM[5] im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Sachsen) modelliert. Hier ist der Anteil der Ackerflächen im Gesamtgebiet der dominierende Faktor für den Oberflächenabfluss mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,96 – vor den Parametern Waldanteil und Gefälle. Abbildung 7 zeigt eine deutliche Zunahme des Oberflächenabflusses in diesem Einzugsgebiet mit der Erhöhung des Anteils der Ackerfläche.

[5] Niederschlag-Abfluss-Modell zur Abbildung hydrologischer Prozesse.

Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Oberflächenabfluss und Anteil der Ackerfläche im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße



Quelle: aus Sieker (2002)

Auerswald et al. (2019) ermittelten durch anthropogen bedingte Veränderungen der Landnutzung und Begradigung der natürlichen Fließgewässer in den letzten 125 Jahren einen Anstieg des Oberflächenabflusses von 300 % für ein Teileinzugsgebiet des Lechs. Für die landwirtschaftlich genutzten Flächen sind es mehr als 200 % Zunahme des Oberflächenabflusses seit 1875 aufgrund der veränderten Flurgestaltung (größere Schläge, Entfernung von Hecken, Gebüschen, Wegenetz etc.).

Allerdings muss bei der Interpretation von Modellierungsergebnissen generell beachtet werden, dass die Modellannahmen und Parametrisierung der Eingangsvariablen – wie hier die Landnutzung – die Ergebnisse maßgeblich mitbeeinflussen.

Dieser Zusammenhang wird in der Diskussion und den Schlussfolgerungen (s. Kapitel 3.4.2) nochmals aufgegriffen.

3.3.2 Oberflächenverschlämmung und Bodenbedeckung

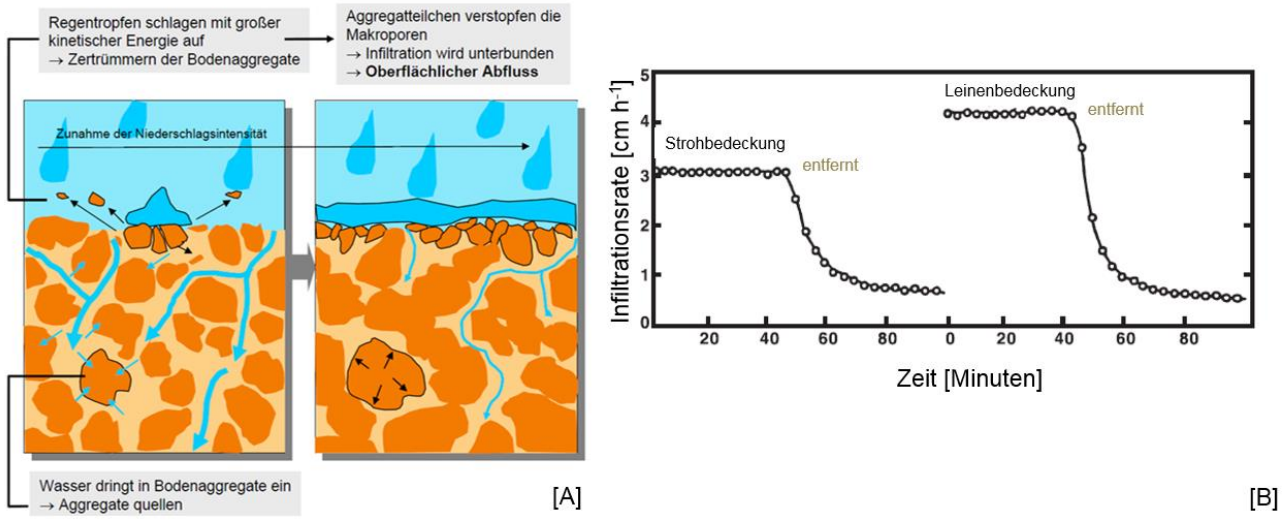
Verschlämmte Böden weisen eine deutlich verringerte Wasserinfiltration und somit einen höheren Oberflächenabfluss auf. Bodenbedeckung kann wesentlich zur Verbesserung der Infiltration und Reduzierung von Oberflächenabfluss auf der Einzelschlagebene beitragen. Allerdings sind dafür Bedeckungsgrade von ca. 30 % und mehr erforderlich.

Während eines Anbaujahrs (Nutzungszyklus) ändert sich die Infiltrationsleistung eines Bodens (Auerswald & Schröder, 2001). Die Verschlämmung der Bodenoberfläche wird maßgeblich davon beeinflusst, ob und wie der Boden bedeckt ist. Der Prozess der Oberflächenverschlämmung läuft folgendermaßen ab (s. Abbildung 8 (A)): Durch die kinetische Energie, mit der Regentropfen auf den unbedeckten Boden aufschlagen, werden die Aggregate an der Bodenoberfläche zertrümmert. Gleichzeitig infiltriert auch Wasser in den Boden, wo die Bodenaggregate aufquellen und die Wassersättigung in den Aggregaten ansteigt. Die zerkleinerten Bodenaggregate an der Oberfläche verteilen sich und verschließen die Grob- und Makroporen. Damit sinkt die Infiltrationsleistung des Bodens erheblich und es kommt zu Oberflächenabfluss auf der verschlämmten Bodenoberfläche (Möller & Volk, 2010; Nciizah

& Wakindiki, 2015). Dabei sind die Stabilität der Aggregate an der Bodenoberfläche und das Mikrorelief wesentlich für die Verschlämmung und Abflussbildung. (Helming, 1992; Roth, 1992) und wird neben der Bodenart vor allem durch den Humusgehalt und die mikrobielle Aktivität (Lebendverbauung) beeinflusst.

Ist hingegen der Ackerboden mit organischer Substanz bedeckt, wird die kinetische Energie der Regentropfen abgebremst und die Bodenaggregate bleiben weitestgehend intakt. Abbildung 8 (B) zeigt die typische Kurve des zeitlichen Verlaufs der Wasserinfiltration für einen zunächst mit Stroh und einen mit Leinentuch bedeckten Boden. Nach der Entfernung der Bedeckung nimmt die Wasserinfiltration durch die Verschlämmung der Oberfläche rasch ab (Green et al., 2003).

Abbildung 8: Prozess der Oberflächenverschlämmung [A]; Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Bodenbedeckung [B]



Quellen: aus Möller & Volk (2010) [A] und verändert nach Green et al. (2003) [B]

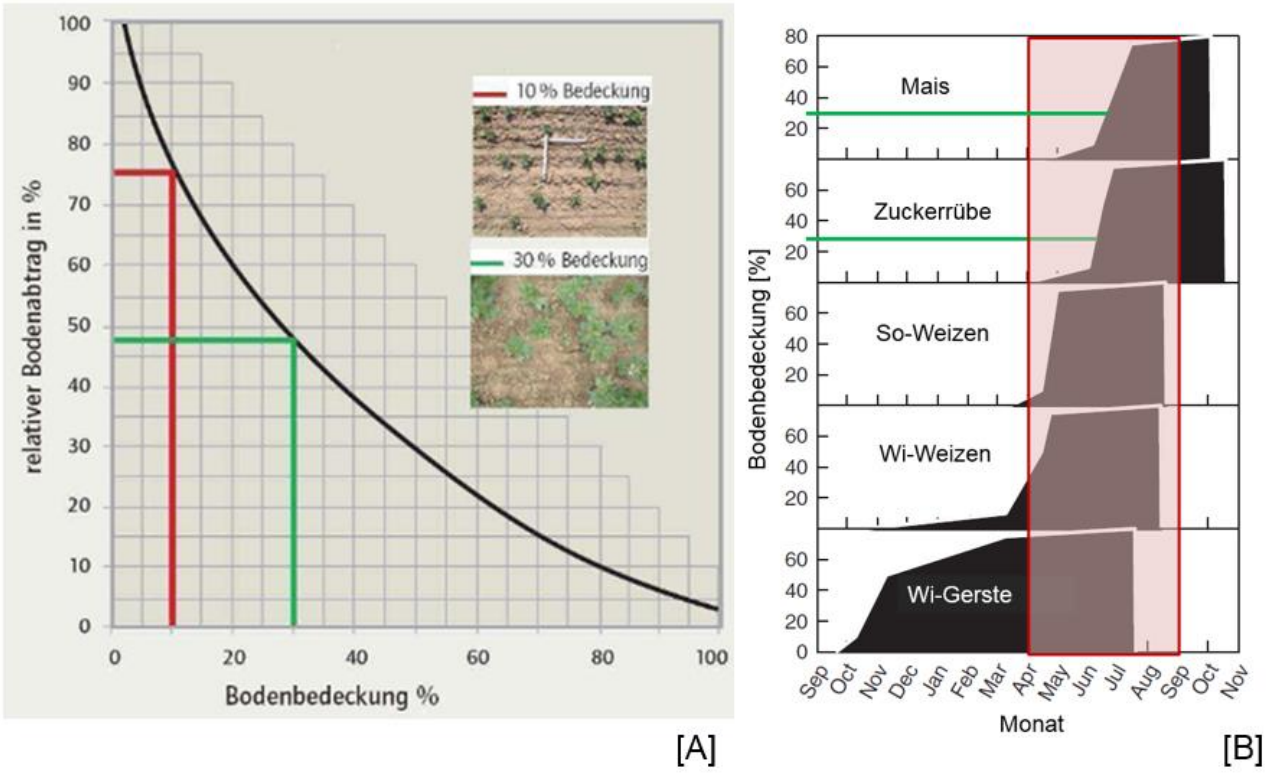
Beregnungsversuche mit 60 mm/h über verschiedene Zeiträume von zwei bis 14 Minuten zeigen für verschiedene Bodenartengruppen, dass die Mächtigkeit der Schlämmschicht mit der Beregnungsdauer kontinuierlich zunimmt. Bis zu einer Dauer von 14 Minuten entstehen Schlämmschichten von 1,75 bis 5,4 mm (Armenise et al., 2018). Es zeigt sich, dass Bodenart und der Gehalt an organischer Substanz eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Verschlämmungen auf der Bodenoberfläche spielen. Auf den Böden mit gröberen Partikeln und geringerem Gehalt an organischer Substanz sind die entstandenen Krusten mächtiger ausgeprägt. Die mächtigste verschlämmte Schicht entsteht auf einem sandigen Lehm mit geringem Gehalt an organischer Substanz, während die Versiegelungen auf dem sandig schluffigen Lehm mit höherem Gehalt an organischer Substanz weniger mächtig sind.

Wie sich die Bodenbedeckung auf den Bodenabtrag auswirkt, zeigen die Ergebnisse von Hiller et al. (2007). Mit zunehmender Bodenbedeckung nimmt der relative Bodenabtrag exponentiell ab (s. Abbildung 9 (A)). Aus der Abbildung folgt, dass ein Bedeckungsgrad von etwa 30 % nötig ist, um den Bodenabtrag zu halbieren.

Im Hinblick auf die Bodenbedeckung zum Schutz des Bodens vor Starkregen ist neben dem Nacherntemanagement (Anbau- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen nach Ernte der Hauptfrucht) der Anbau von Hackfrüchten wie Mais oder Zuckerrüben besonders problematisch (Eisenkrämer, 2014; Fiener et al., 2011). Durch die späte Aussaat von Mais ab Mitte April und dem späten Reihenschluss ist der Bo-

den in den Monaten Mai und Juni mit sehr häufig auftretenden Starkregenereignissen weitgehend ungeschützt. Es dauert in der Regel bis Ende Juni/Anfang Juli, bis Hackfruchtbestände die notwendigen 30 % Bodenbedeckung zum Schutzvor Oberflächenabfluss und Erosion erreichen (s. Abbildung 9 (B).

Abbildung 9: Relativer Bodenabtrag in Abhängigkeit der Bodenbedeckung [A]; Bodenbedeckung während der Entwicklung bedeutender Ackerkulturen [B]



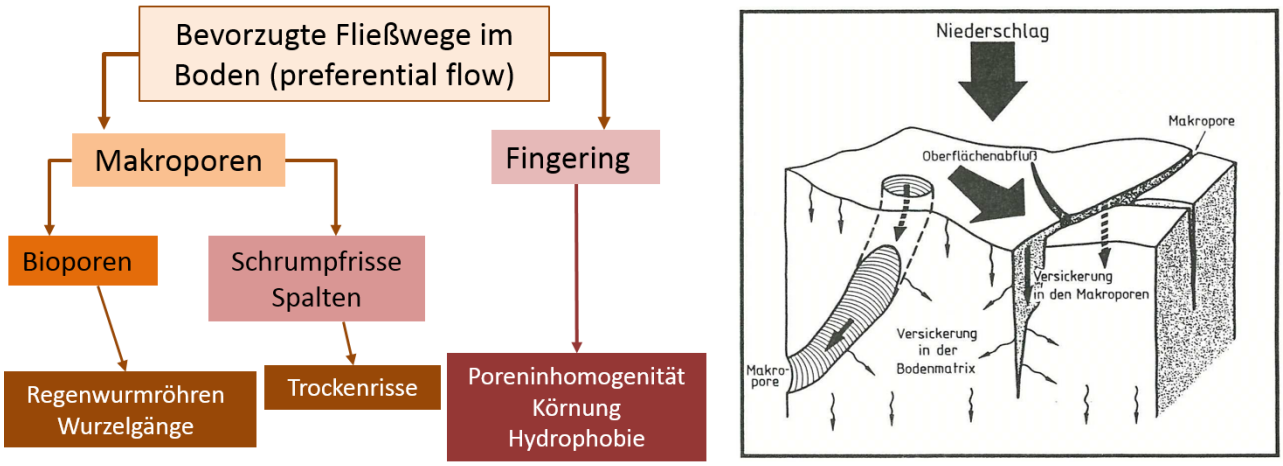
Quellen: aus Hiller et al. (2007) [A] und verändert nach Fiener et al. (2011) [B]

3.3.3 Makroporen

Makroporen können bei konvektiven Niederschlagsereignissen (Starkregen) einen wichtigen Beitrag zur Wasserinfiltration auf Punkt- und Feldebene (plot-scale) leisten. Wichtig ist dabei die Porenkontinuität und Durchgängigkeit bis zur Bodenoberfläche. Bei advektiven Regenereignissen (Dauerregen) spielen Makroporen nur eine vernachlässigbare Rolle, entscheidend ist hier das Sättigungsdefizit des Bodens. Makroporen werden vor allem durch konservierende Bodenbearbeitung und Ökologischen Landbau sowie organische Substanz an der Bodenoberfläche gefördert. Der Einfluss der Makroporen auf Einzugsgebietsebene ist unsicher, da hier für die Abflussbildung noch andere Faktoren und Prozesse, wie z. B. der Sättigungsabfluss und der schnelle Zwischenabfluss bedeutsam sind.

Wasser infiltriert neben dem Matrixfluss auch zu einem großen Teil über präferenzielle Fließwege in den Boden (s. Abbildung 10). Als Makroporen werden dabei alle Sekundärporen bezeichnet, die durch Bioporen oder Schrumpfrisse und Spalten entstanden sind. Dabei spielen die Makroporen vor allem bei hohen Niederschlagsintensitäten eine bedeutende Rolle, bei denen zwischen Bioporen (Regenwurm- und Wurzelgänge), Schrumpfrissen und Spalten zu unterscheiden ist.

Abbildung 10: Zwei Schemata zu den Arten der Makroporen

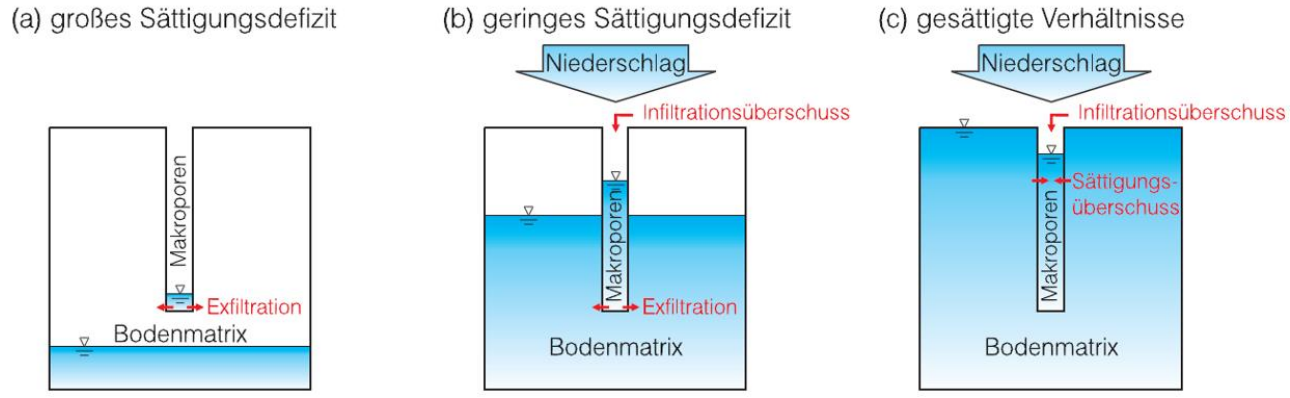


Quellen: eigene Darstellung, IfÖL GmbH [A] und aus Beisecker (1994, nach Germann, 1981) [B]

Schrumpfrisse und Spalten sind stark abhängig vom Tongehalt und dem Quellungs- und Schrumpfungsverhalten der Böden und haben eine ähnliche hydraulische Wirkung wie Bioporen. Nach längeren Trockenperioden sind vor allem die entstehenden Trockenrisse für die Wasserinfiltration bedeutsam.

Makroporen tragen zur Wasserspeicherkapazität des Bodens bei. Sie stehen in Austausch mit der Bodenmatrix und im besten Falle zur Bodenoberfläche (s. Abbildung 11). Regnet es, werden Makroporen bei geringem Sättigungsdefizit des Bodens durch den Infiltrationsüberschuss gefüllt (b) und bei gesättigten Bodenwasserverhältnissen auch über den Sättigungsüberschuss aus der umliegenden Bodenmatrix (c). Bei einem großen Sättigungsdefizit des Bodens können die Makroporen auch Wasser in die Bodenmatrix abgeben (a) (Bronstert et al., 2001).

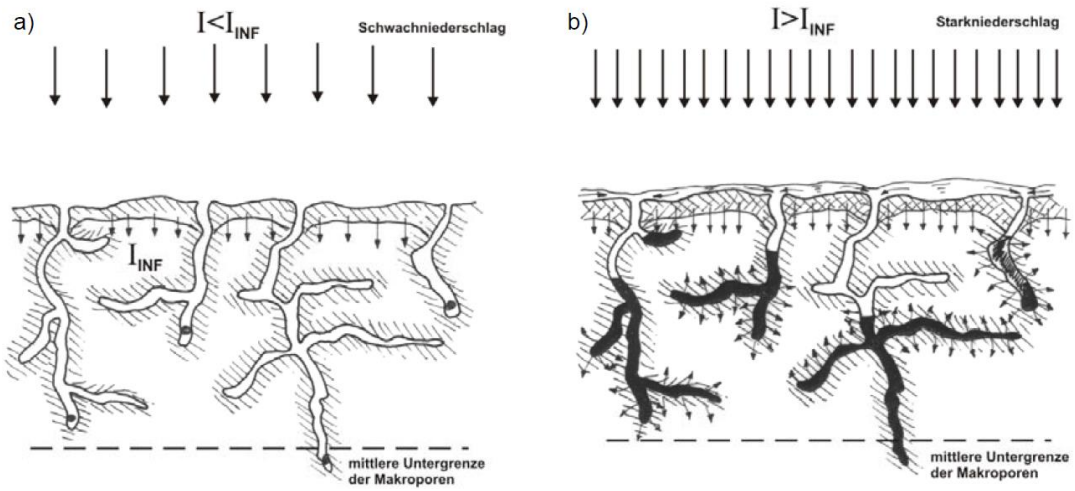
Abbildung 11: Modellkonzept für die Wirkungsweise von Makroporen



Quelle: aus Bronstert et al. (2001)

Den Einfluss von Makroporen auf die Wasserinfiltration in Abhängigkeit des Niederschlagsereignisses verdeutlicht Abbildung 12. Ist der Niederschlag (hier I) geringer als die Infiltrationskapazität (hier I_{INF}) erfolgt die Infiltration hauptsächlich über die Bodenmatrix (a)). Ist der Niederschlag I höher als die Infiltrationskapazität I_{INF}, findet die Wasseraufnahme des Bodens zunächst vor allem über die Makroporen statt (b)) (Bronstert, 2005; Weiß, 2009), bis die Bodenmatrix gesättigt ist.

Abbildung 12: Einfluss der Makroporen auf die Infiltration



Quelle: aus Bronstert, 2005

Die Makroporosität des Bodens wird durch die Bodenbearbeitung (s. Kapitel 3.3.4) und die Anbauverfahren (s. Kapitel 3.3.6) mitbestimmt. So wies Beisecker (1994) im Vergleich von Pflug und Direktsaat in einer Tschernosem-Parabraunerde sowohl im Oberboden, aber vor allem im Unterboden deutlich mehr Bioporen und eine stark erhöhte Bioporosität in der Direktsaat-Variante nach (s. Tabelle 3) Vergleichbare Ergebnisse wurden auch bei einer Sand-Braunerde erzielt.

Tabelle 3: Sichtbare Bioporen (ø >1 mm) in 10 und 40 cm Bodentiefe einer Tschernosem-Parabraunerde

Tiefe [cm]	Anzahl Bioporen [ ]		Summe Bioporenfläche [mm2]		Anteil der Bioporenfläche an der Aufnahmefläche [%]	
	Pflug	Direktsaat	Pflug	Direktsaat	Pflug	Direktsaat
10	50[a]	**58a**	268,9	**1.110,6**	0,22	**0,89**
40	48[a]	**135b**	287,9	**1.956,6**	0,23	**1,58**

Quelle: nach Beisecker (1994)

3.3.4 Bodenbearbeitung

Langjährig reduzierte, nicht wendende Bodenbearbeitung erhöht die Infiltrationsleistung auf Feldebene durch einen höheren Gehalt an organischer Substanz im Oberboden sowie mehr und kontinuierlichere Makroporen. Bei Starkregenereignissen ist die Wirkung auf Einzugsgebietsebene auch von anderen Faktoren abhängig. Reduzierte Bodenbearbeitung kann allerdings die Abflussspitzen dämpfen.

Hinsichtlich der Eingriffsintensität in den Boden wird unterschieden zwischen:

- **konventioneller Bodenbearbeitung:** wendende Bodenbearbeitung mit Pflug und krumentiefer Lockerung
- **konservierender Bodenbearbeitung**: nichtwendende Bodenbearbeitung mit reduzierter Eingriffsintensität und Mulchsaatverfahren
- **Direktsaat:** ohne Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung wirkt sich auch auf die standörtlichen Bodeneigenschaften aus, welche auch die Wasserinfiltration beeinflussen: Über die Dichtlagerung des Bodens, die Porengrößenverteilung, die Porenkontinuität und die Aggregatstabilität werden das Bodengefüge und die Bodenstruktur beeinflusst, was die Neigung zur Verschlämmung mitbestimmt. Des Weiteren kann durch die Bodenbearbeitung der Bodenwassergehalt im Profil maßgeblich verändert werden. Auch der Makro- und Bioporenanteil sowie die Regenwurmabundanz und -biomasse (generelle Aktivität des Bodenlebens) werden von der Bodenbearbeitung mitgesteuert. Somit werden die Prozesse von Infiltration, Oberflächenabfluss und ggfs. Erosion auf Schlagebene wesentlich von der Wahl des Bodenbearbeitungssystems mitbestimmt (bspw. Frede et al., 1994; Beisecker, 1994; Tebrügge & Düring, 1999; Nitzsche et al., 2002; Buczko et al., 2003; Kornmann et al., 2006; Weiß, 2009; Alhassoun, 2009; Flaig & Schickler, 2012; Winter, 2013; Crittenden et al., 2015; Martínez et al., 2016).

Ergebnisse aus Feldmessungen:

Sieker (2002) wies in Beregnungsversuchen mit Farbtracern bei mehrjähriger konservierender Bodenbearbeitung eine signifikant höhere Infiltration sowie ein Versickern des Wassers in tiefere Bodenschichten als bei konventioneller Bearbeitung nach.

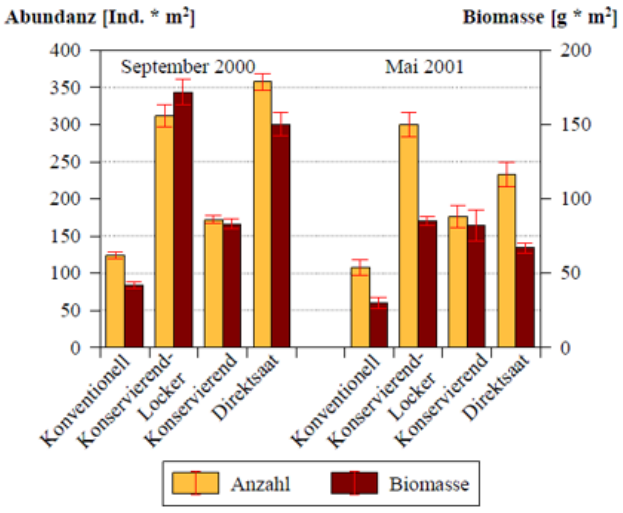
Die Ergebnisse von Beregnungsversuchen nach acht Jahren mit unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen zeigen deutlich eine höhere Infiltrationsleistung sowie stark verminderten Abfluss und Bodenabtrag – insbesondere im Vergleich von konventioneller Bodenbearbeitung zur Direktsaat mit einem Bedeckungsgrad von 70 % (s. Abbildung 13[A]) (Deumelandt, 2014).

Je geringer die Bearbeitungsintensität des Bodens, desto mehr Makroporen sind vorhanden, die großen Einfluss auf die Wasserinfiltration haben (s. Kapitel 3.3.3). So zeigt sich, dass bei Direktsaat oder konservierender Bodenbearbeitung Regenwürmer in höherer Masse und Anzahl vorkommen (Nitzsche et al., 2002; Abbildung 13 [B] oder Alhassoun, 2009).

Abbildung 13: Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodeneigenschaften, Infiltration und Abfluss [A] sowie auf die Regenwurmabundanz und -biomasse [B]

	Bodenbearbeitung		
	konventionell	Konservierend mit Mulchsaat	Direktsaat
Bedeckungsgrad [%]	1	30	70
Humusgehalt [%]	2	2,6	2,5
Aggregatstabilität [%]	30,1	43,1	48,7
Infiltrationsrate [%]	49,4	70,9	92,4
Abfluss [l/m²]	21,2	12,2	3,2
Bodenabtrag [g/m²]	317,6	137,5	33,7

[A]



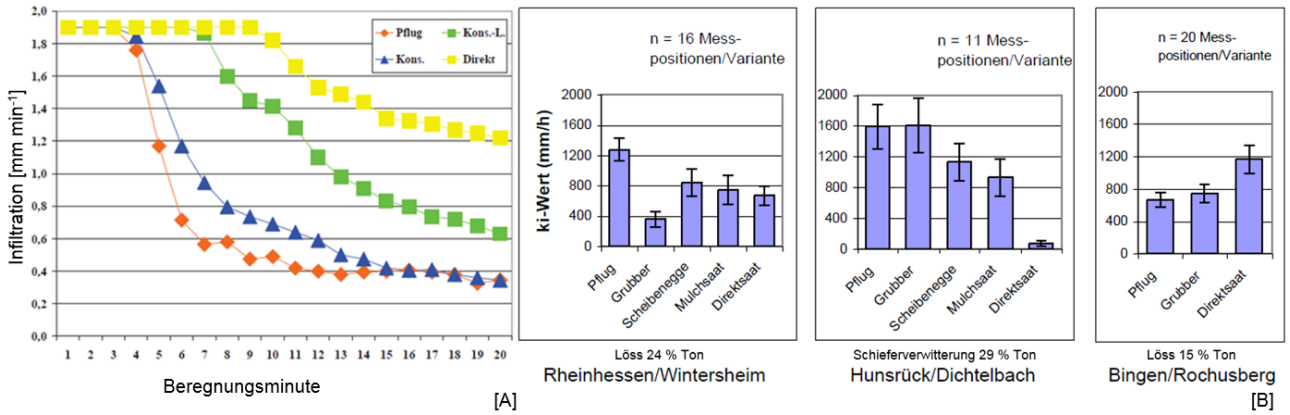
[B]

Quellen: aus Deumelandt et al. (2014) [A] und Nitzsche et al. (2002) [B]

Weitere Niederschlagssimulationen auf Feldebene im Sächsischen Lösshügelland (bspw. Nitzsche et al. (2002) belegen ebenfalls eine Verbesserung der Infiltrationsleistung bei langjährig reduzierter Bodenbearbeitung (s. Abbildung 14 [A]).

Messungen der Wasserinfiltration mit dem Doppelring-Infiltrometer in Reinland-Pfalz auf mehreren Standorten mit langjährig verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen zeigen unterschiedliche Resultate (Appel, 2012). So wurde auf Lössböden eine höhere Wasserinfiltration bei der Pflugvariante beobachtet (s. Abbildung 14[B] links). Die Böden mit sehr hohem Tonanteil zeigen bei der Direktsaat-Variante aufgrund der höheren Dichtlagerung allerdings eine geringere Infiltrationsleistung verglichen mit den eingriffsintensiveren Varianten (s. Abbildung 14[B] Mitte). Hingegen wurde auf den Lössböden mit mittlerem Tonanteil die erwartete Steigerung der Wasserinfiltration mit abnehmender Bearbeitungsintensität gemessen (s. Abbildung 14[B] rechts). Offenbar ist die Differenzierung des Porensystems bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung auch abhängig vom Bodentyp (Bodenentwicklung) und vor allem der Bodenart. Insbesondere lockerungsbedürftige Sand- und Tonböden sind für Direktsaatverfahren weniger geeignet.

Abbildung 14: Einfluss des Bodenbearbeitungssystems auf die Wasserinfiltration auf verschiedenen Standorten



Quellen: aus Nitzsche et al. (2002) [A] und Appel (2012) [B]

Als Zwischenfazit kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass durch reduzierte Bodenbearbeitung die Wasserinfiltration gefördert werden kann. Die Wahl des geeigneten Bodenbearbeitungssystems hängt allerdings von den standörtlichen Gegebenheiten ab, weshalb die Infiltrationsleistung flächenbezogen sehr unterschiedlich sein kann. Beim Einsatz des Direktsaatverfahrens ist zu beachten, dass dabei nach wie vor die Anwendung von Totalherbiziden (z. B. Glyphosat) erforderlich ist, was gesellschaftspolitisch sehr umstritten ist.

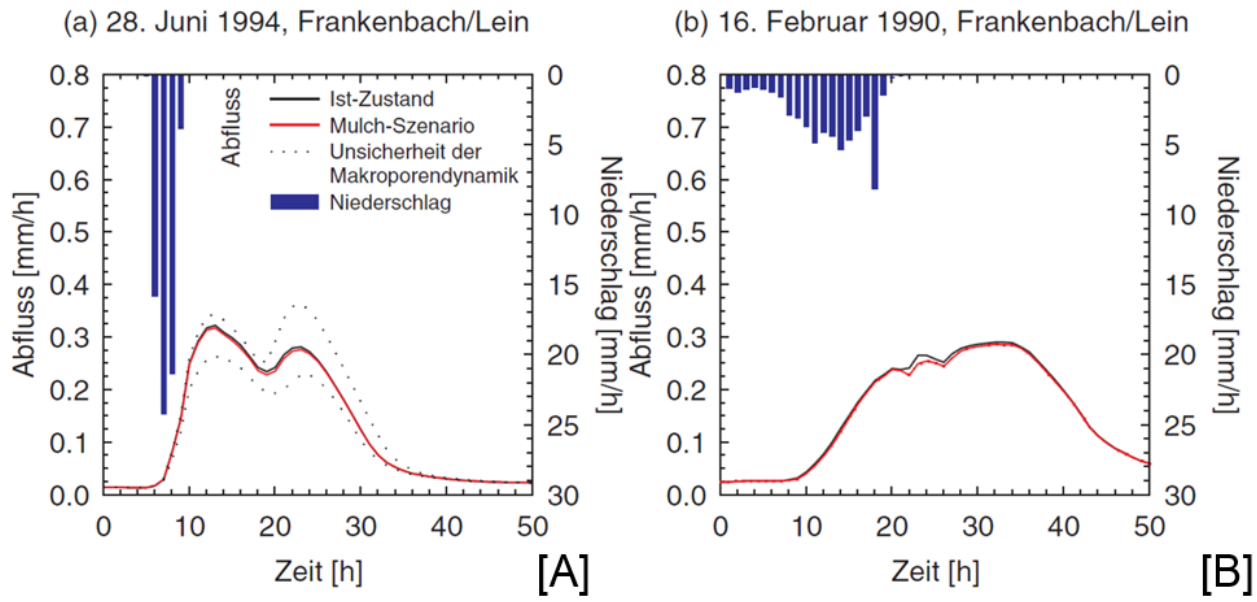
Ergebnisse aus Modellrechnungen:

Diese Ergebnisse aus Punktmessungen (plot-scale) sind nicht direkt auf die Einzugsgebietsebene übertragbar. Bei Arbeiten, die in Modellsimulationen den positiven Effekt der konservierenden Bodenbearbeitung auf die Wasserinfiltration in der Modellparametrisierung zugrunde legen, bestätigen die Rechenergebnisse auch niedrigere Oberflächenabfluss- und Erosionsraten. Sieker (2002) modellierte das Niederschlag-Abfluss-Geschehen für Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße für den damaligen Ist-Zustand sowie für Szenarien mit 25 % konservierender Bodenbearbeitung, 50 % konservierender Bodenbearbeitung und 100 % konservierender Bodenbearbeitung. Im gesamten Einzugsgebiet wurde für die Szenarien mit 25 und 50 % konservierender Bodenbearbeitung eine Verminderung des Oberflächenabflusses von 55 bis 60 % berechnet. Auch die Arbeit von Seidel (2008)

(s. Abbildung 6) mit EROSION 3D zeigt reduzierte Abflüsse bei reduzierter Bodenbearbeitung in Übereinstimmung mit der jeweiligen Parametrisierung der Bearbeitungsvarianten. Auch Wurbs & Steininger (2011) empfehlen aufgrund von Modellbetrachtungen zur ABAG den verstärkten Einsatz reduzierter Bodenbearbeitungssysteme, um die Auswirkungen der durch den Klimawandel zunehmenden Starkregenereignisse auf den Bodenabtrag zu vermindern.

Bronstert et al. (2001) modellierten mit WASIM-ETH[6] ein Mulchsaatszenario mit 23 % Hackfruchtanbau in Mulchsaat für ein Einzugsgebiet nahe Heilbronn (BW). Für das Mulchsaatszenario ergibt sich kein Unterschied der Abflussganglinien nach einem konvektiven Regenereignis (s. Abbildung 15[A]). Betrachtet man allerdings hier die Kurve der Unsicherheit der Makroporendynamik, so zeigt sich, dass zunächst die erste Welle des Abflusses reduziert wird, eine zweite Welle bringt allerdings auch einen erhöhten Abfluss. Dagegen zeigt ein advektives Niederschlagsereignis, dass hier die durch die Mulchsaat geförderten Makroporen keinen Einfluss auf das Abflussgeschehen nehmen (s. Abbildung 15[B]). Hieraus wird deutlich, dass das Regenereignis selbst den Gebietsabfluss wesentlich mitbestimmt.

Abbildung 15: Einfluss der Bodenbearbeitung im Einzugsgebiet auf die Abflussganglinien nach einem konvektiven [A] und einem advektiven [B] Niederschlagsereignis für ein Einzugsgebiet nahe Heilbronn



Quelle: aus Bronstert et al. (2001)

Es muss hier festgehalten werden, dass auf Einzugsgebietsebene die Bodenbearbeitung einen Einfluss auf das Infiltrations-Abfluss-Geschehen haben kann, aber noch weitere Faktoren auf die Abflussprozesse einwirken und das Ausmaß von Abfluss und möglichen Folgeschäden bestimmen. Modellsimulationen sind immer von den jeweiligen Modellannahmen und deren Parametrisierung abhängig.

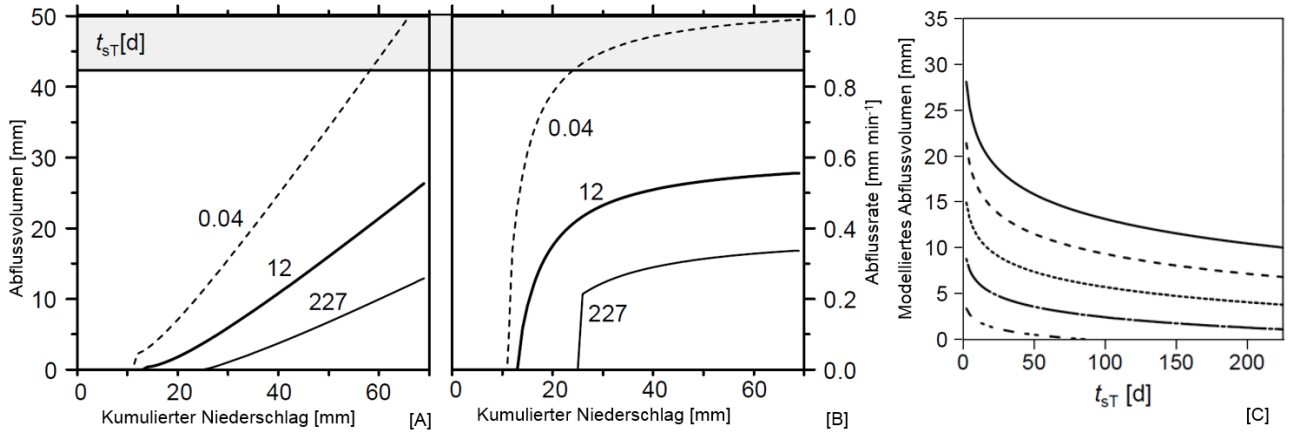
Zeitpunkt der Bodenbearbeitung

[6] WaSiM-ETH ist ein deterministisches, flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell zur Simulation des Wasserkreislaufes über und unter der Landoberfläche, das von der ETH Zürich entwickelt wurde. Quelle: http://www.wasim.ch/de/the_model/concept.htm (Aufgerufen am 15.01.2019).

Auch der zeitliche Abstand des Regenereignisses nach der Bodenbearbeitung hat wesentlichen Einfluss auf das Auftreten und die Menge des Oberflächenabflusses.

Fiener et al. (2013a) führten in einer Metaanalyse statistische Auswertungen von über 300 Beregnungsversuchen auf 209 Böden in Mitteleuropa durch (knapp 15.000 Versuchsläufe). Daraus wird ersichtlich, dass ergiebige Niederschläge direkt nach der wendenden Bodenbearbeitung viel früher und zu deutlich höherem Oberflächenabfluss führen; die Kurven der Abflussrate zeigen einen plötzlich starken Anstieg, vor allem bei einem Regenereignis 1 Stunde nach der Bodenbearbeitung (s. Abbildung 16[A] und [B]). Basierend auf den ausgewerteten Daten wurde ein hydrologisches Modell konzipiert, um Abflüsse bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen und Voraussetzungen vorherzusagen (s. Abbildung 16[C]). Entscheiden für den Bodenabtrag ist demnach die Zeitspanne nach der letzten Bodenbearbeitung, je länger diese ist, desto geringer die Erosion.

Abbildung 16: Volumen des Oberflächenabflusses und Abflussrate in Abhängigkeit der Zeit nach der wendenden Bodenbearbeitung



Quelle: nach Fiener et al. (2013a); Kurve 0.0.4 entspricht 1 h nach Bodenbearbeitung; Kurve 12 entspricht 12 d nach Bodenbearbeitung und Kurve 227 entsprechend 277 d nach Bodenbearbeitung

Durch die wendende Bodenbearbeitung wird auch der Anfangswassergehalt im Bereich der Bodenoberfläche verändert. In Beregnungsversuchen konnten Auerswald et al. (1994) zeigen, dass langjährig pfluglos bearbeitete Böden einen höheren Wassergehalt haben, wodurch die Erosion um bis zu 30 % verringert werden kann.

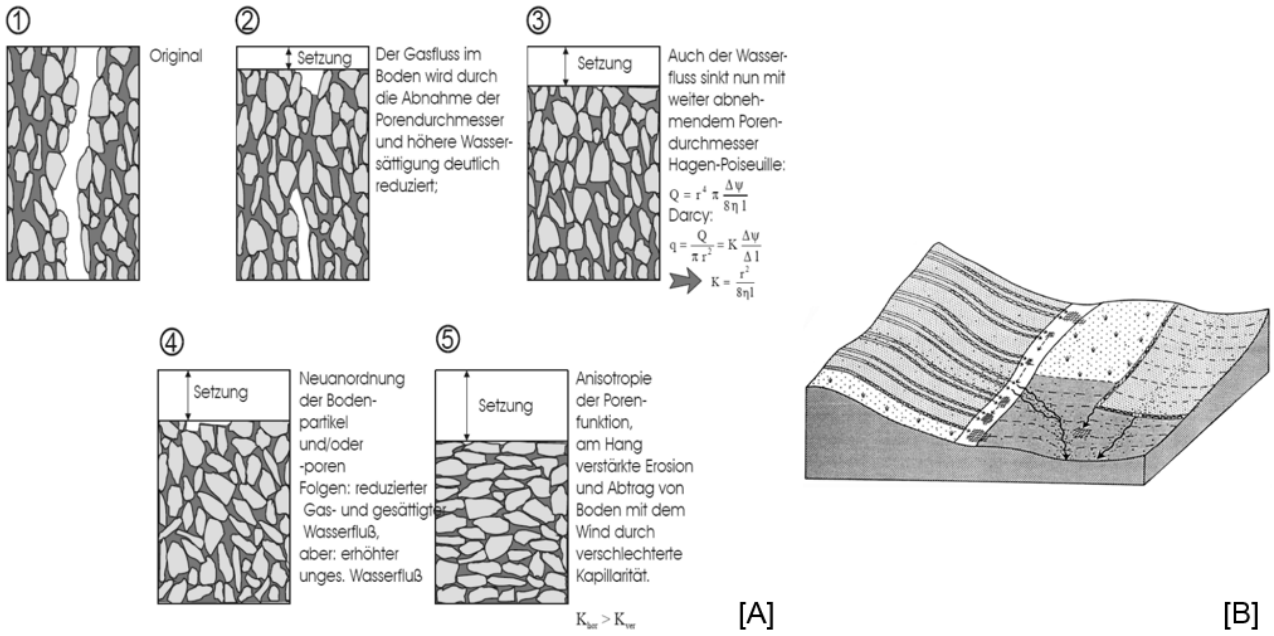
3.3.5 Bodenverdichtung

Böden mit höherer Lagerungsdichte weisen ein niedrigeres Porenvolumen und ein geringeres Wasserspeichervermögen auf. Verdichtete Böden zeigen eine geringere Infiltration in den Oberboden. Für die Abflussbildung sind vor allem verdichtete Fahrspuren und Ackerrandstreifen bedeutsam.

Das Befahren landwirtschaftlicher Flächen mit schweren Maschinen – insbesondere bei ungünstigen Boden- und Witterungsbedingungen – führt dazu, dass der Boden mehr und mehr verdichtet und das Gesamtporenvolumen abnimmt (z. B. Nawaz et al., 2013). Für die Pflanzen bedeutet das eine Verschlechterung der Wasser- und Sauerstoffversorgung und ein erschwertes Wurzelwachstum. Somit wirkt sich Verdichtung auch negativ auf die Bioaktivität und die Makroporosität aus. Folglich führen Schadverdichtungen der Böden zu einem Rückgang der Wasserinfiltrationsleistung, der Wasserleitfähigkeit und der Wasserspeicherkapazität. Abbildung 17 zeigt schematisch, wie es durch die schwere Auflast zur Setzung, Verschluss der Makroporen, Reduktion des Wasserflusses, Neuanordnung der Partikel der Bodenmatrix und letztendlich zur Bodenschadverdichtung kommt. Dadurch entstehen

Funktionsstörungen des Bodens durch die Verschiebung der Porenverhältnisse (Abnahme der für die Wasser- und Lufthaushalt wichtigen Mittelporen und Zunahme der Feinporen, sog. Inneraggregatverdichtung) und die Abnahme des Gesamtporenvolumens (Friedrich & Franken, 2003).

Abbildung 17: Auswirkungen einer Bodenverformung auf die Anordnung der Bodenpartikel im Boden [A]; Oberflächenabfluss in Fahrspuren und Ackerrandfurchen [B]



Quelle: aus Weiß (2009) [A] und [B]

Gerade dort, wo es punktuell vermehrt zu starker Auflast durch schwere Maschinen kommt, wie in den Fahrspuren, sind die Bodenverdichtungen besonders problematisch. Nach Mosimann et al. (2007) kann durch das häufige Befahren die Wasserinfiltration in den Fahrspuren stark vermindert sein und der dort entstehende Oberflächenabfluss zusammenfließen und in diesen Abflussbahnen sehr schnell hangabwärts transportiert werden (s. Abbildung 17 [B]), was die Bildung von Abflussspitzen und Überflutungen begünstigt.

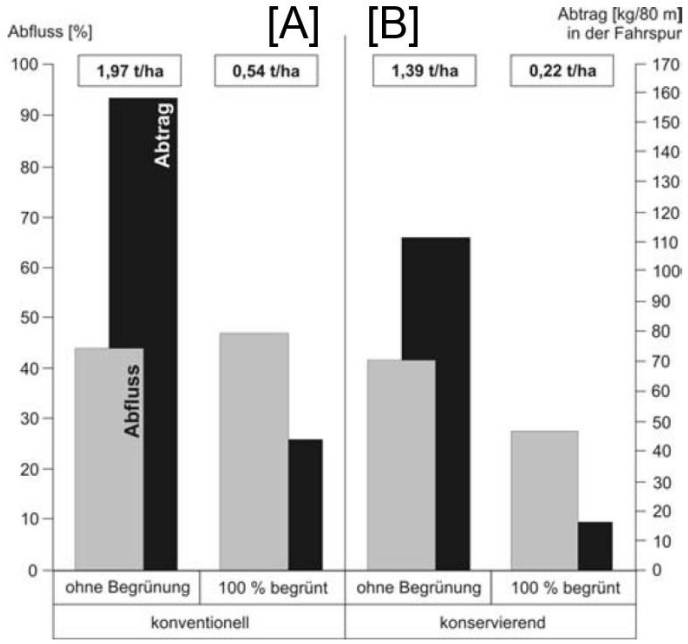
Bei der wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug kann es im Bereich der Pflugsohle auch zu Bodenverdichtungen („Krumenbasisverdichtung“) kommen. Diese wirkt sich vor allem auf die Prozesse der Infiltration in den Unterboden und das Auftreten von Zwischenabfluss aus. Unterbodenverdichtungen sind im Gegensatz zu Krumenverdichtungen in der Regel irreversibel, so dass hier der Gefahrenabwehr und Vorsorge besondere Bedeutung zukommt.

Um den Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in unbegrünten Fahrspuren zu quantifizieren, führten Mosimann et al. (2007) dreijährige Messungen mit simuliertem Abfluss in betriebsüblich bestellten Getreide- und Zuckerrübenbeständen bei konservierender und wendender Bodenbearbeitung mit Voll- und Intervallbegrünung[7] der Fahrgassen durch. Im Getreide mit Intervallbegrünung ist der Abfluss in den Fahrgassen mit einer Spanne von 25-80 % vermindert und in Zuckerrüben mit Vollbegrünung im Mittel um 80 %. Auf den vollbegrünten Fahrspuren ist der Bodenabtrag beiden Variante deut-

[7] Pro 100 m Fahrspurabschnitt sind mindestens zwei 10 m Abschnitte begrünt.

lich reduziert und der Abfluss ist in der konservierend bewirtschaftet vollbegrünten Variante am geringsten (s. Abbildung 18). Generell zeigen die konservierend bestellten Flächen geringere Bodenabträge und Oberflächenabflüsse als diejenigen mit konventioneller Bodenbearbeitung.

Abbildung 18: Oberflächenabfluss und Bodenabtragsmenge in Fahrspuren in Zuckerrüben bei konventioneller [A] und konservierender [B] Bodenbearbeitung



Quelle: aus Mosimann et al. (2007)

3.3.6 Anbauverfahren

Im Ökologischen Landbau (ÖLB) wird durch die vielfältigeren Fruchtfolgen mit mehrjährigem Futterbau und die Förderung des Bodenlebens indirekt auch die Infiltrationsleistung des Bodens verbessert. Allerdings kann es beim ÖLB auf Feldebene – insbesondere beim Anbau von Hackfrüchten – vermehrt auch zu Verschlämmung und Bodenabtrag kommen. Auf Einzugsgebietsebene führt der ÖLB zu einer Verringerung des C-Faktors der ABAG und somit zur Verminderung der Bodenerosion. Die Wirkung auf Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen ist – wie bei konservierender Bodenbearbeitung – auch von anderen Faktoren und Prozessen im Einzugsgebiet abhängig. Eine Abschätzung der Auswirkungen im Einzugsgebiet hängt vom konkreten Regenereignis, dem Nutzungsverhältnis und insbesondere dem Kulturartenverhältnis ab.

Im ÖLB werden häufiger Anbaumethoden praktiziert, die eine positive Wirkung auf die Wasserinfiltration in den Boden haben (Haas, 2010). Dazu zählen:

- die oftmals vielfältigeren Fruchtfolgen mit vielen verschiedenen Kulturarten und Kombinationsmöglichkeiten,
- die wiederkehrende Bodenruhe (meist unter Kleegras),
- die häufiger praktizierte Untersaat,
- der höhere Anteil an Zwischenfrüchten, weil auch häufiger Sommerungen angebaut werden,
- der höhere (tolerierte) Unkrautbesatz verbunden mit einer höheren Bodenbedeckung und
- die kleiner strukturierten Anbaueinheiten mit verschiedenen Kulturarten.

Mit den im ÖLB angebauten Feldfrüchten sollen auch die Bodeneigenschaften, wie Humusgehalt, ein gesundes Bodenleben oder Aggregatstabilität gefördert werden. Daher wirken sich die ökologischen Fruchtfolgen auch im Hinblick auf Wasserinfiltration, Oberflächenabfluss und Erosion positiv aus, was sich in geringeren C-Faktoren[8] der ABAG widerspiegelt. Der C-Faktor bewertet den Bodenbedeckungsgrad und die Bodenbearbeitung in der Furchtfolge (Schwertmann et al., 1990). Dabei variiert der C-Faktor in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Zeitpunkt der Grundbodenbearbeitung und Bodenbearbeitungssystem. Je geringer der C-Faktor, desto erosionsanfälliger ist die Anbauvariante. Beispielsweise ist die grün markierte Fruchtfolge (s. Abbildung 19[A]) mit den geringsten C-Faktoren relativ typisch für ökologischen Landbau (Deumelandt et al., 2014).

Abbildung 19: C-Faktoren für verschiedene Fruchtfolgen und Varianten der Bodenbearbeitung , grüne Markierung: eine für den ökologischen Landbau typische Fruchtfolge [A]; Bodenparameter bei konventioneller und ökologischer Bewirtschaftung [B]

		Grundbodenbearbeitung Herbst			Grundbodenbearbeitung Frühjahr			mit Zwischenfrucht		
Nr.	Fruchtfolge	wendend	nichtwendend (geringe BB)	nichtwendend (hohe BB)	wendend	nichtwendend (geringe BB)	nichtwendend (hohe BB)	wendend	nichtwendend (geringe BB)	nichtwendend (hohe BB)
1	Zuckerrübe-Winterweizen-Wintergerste	0,17	0,06	0,04	0,14	0,05	0,03	0,14	0,05	0,03
2	Winterraps-Winterweizen-Wintergerste	0,11	0,05	0,03						
3	Mais-Winterweizen-Wintergerste	0,19	0,06	0,04	0,16	0,05	0,03	0,16	0,05	0,03
4	Kartoffel-Winterweizen-Wintergerste-Mais	0,21	0,1	0,07	0,19	0,09	0,06	0,18	0,09	0,06
5	Zuckerrübe-Sommergerste-Winterweizen-Erbsen-Winterweizen	0,15	0,06	0,04	0,11	0,05	0,03	0,08	0,05	0,03
6	Erbse-Wintertriticale-Winterroggen-Mais	0,16	0,06	0,04	0,15	0,05	0,03	0,12	0,05	0,03
7	Leguminosen-Winterroggen-Winterroggen	0,11	0,05	0,03	0,09	0,05	0,03	0,09	0,05	0,03
8	Mais-Winterweizen-Wintergerste-Winterraps	0,16	0,05	0,03	0,13	0,05	0,03	0,13	0,05	0,03
9	Mais	0,35	0,08	0,05	0,35	0,08	0,05	0,23	0,06	0,04

BB…Bodenbedeckung

Anmerkung: geringe BB: 10 % Bodenbedeckung
hohe BB: 30 % Bodenbedeckung

[A]

Parameter	konventionell	ökologisch
Infiltration* [%]	100	208
Regenwürmer* [%]	100	142
Humusgehalt [%]	3,3	2,8
Tongehalt [%]	39	41
Bodenart	Tu2/Tu3	Tu2/Tu3
Lagerungsdichte	1,69	1,72

Mittlere Werte aus 5 Vergleichspaaren (unveröffentlicht)
* Die konventionelle Bewirtschaftung wurde als 100 % gesetzt

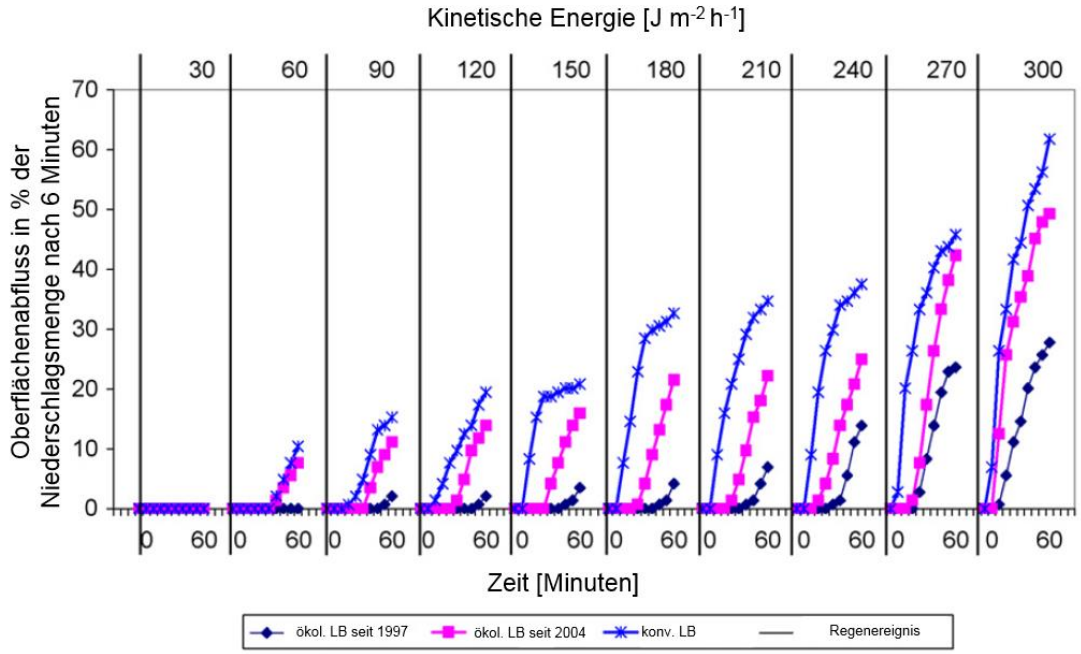
[B]

Quellen: aus Deumelandt et al. (2014) [A] und Lilienthal & Schnug (2008) [B]

Des Weiteren wirkt sich auch die Zeit nach der Umstellung auf die ökologische Bewirtschaftung auf die Wasserinfiltration und den Oberflächenabfluss aus. In Beregnungsversuchen bei Zeiger & Fohrer (2009) hat die konventionell bewirtschaftete Fläche den höchsten Oberflächenabfluss, gefolgt von den kürzer ökologisch bewirtschafteten Flächen. Den geringsten Abfluss zeigen die seit langer Zeit ökologisch bewirtschafteten Flächen (s. Abbildung 20).

[8] Nach Auerswald (2002) gibt der C-Faktor den Bodenabtrag relativ zum Abtrag unter langjähriger Schwarzbrache an, d. h. er ist eine Relativzahl zwischen 0 und 1.

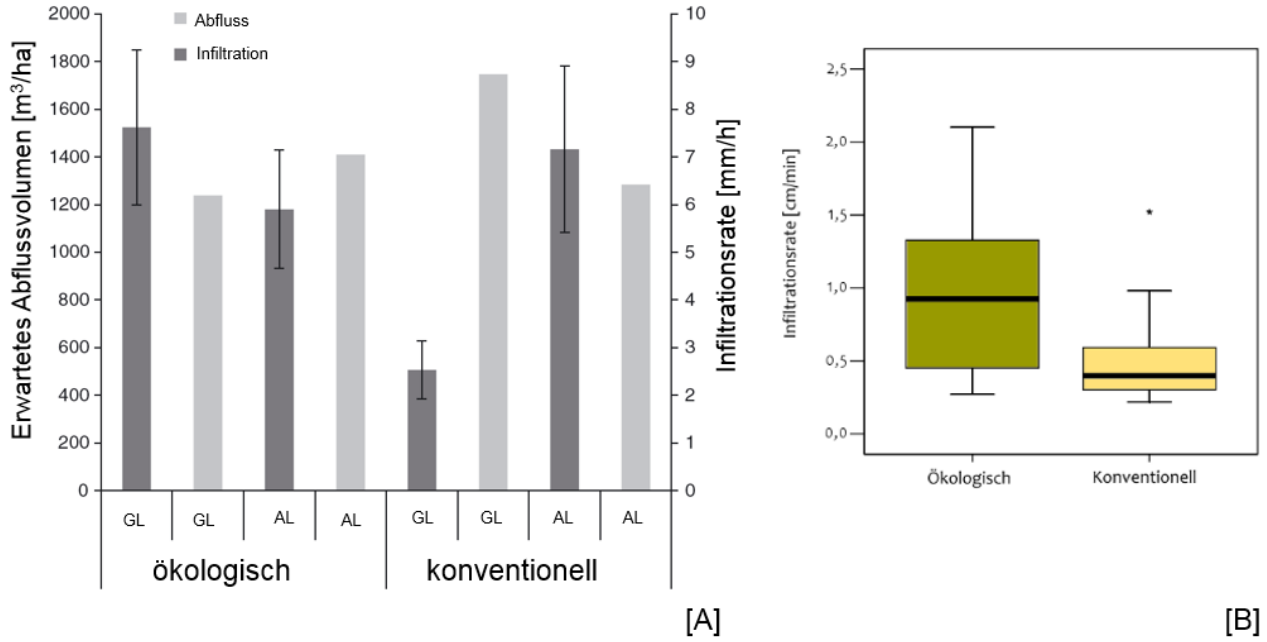
Abbildung 20: Oberflächenabfluss in % der Niederschlagsmenge in 6-minütigen Intervallen während 60-minütigen Beregnungsversuchen für verschiedene Bewirtschaftungsweisen



Quelle: nach Zeiger & Fohrer (2009)

Beregnungsversuche auf ökologisch und konventionell bewirtschafteten Flächen mit Grünland- und Ackernutzung von Hathaway-Jenkins et al. (2011) zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen ökologisch und konventionell bewirtschaftetem Grünland. Dies könnte auf ein besseres Bodenleben im Ökolandbau zurückzuführen sein. Allerdings ist in dieser Untersuchung kein Unterschied bei ökologisch und konventionell bewirtschaftetem Ackerland festzustellen (s. Abbildung 21[A]). Im Gegensatz dazu wiesen Hartmann et al. (2009) durch Messungen mit Haubeninfiltrometern auf Vergleichsflächen, die ökologisch bewirtschaftet wurden, eine fast doppelt so hohe Infiltrationsrate nach (s. Abbildung 21[B]). Allerdings sind diese Ergebnisse nicht eindeutig, da auch die Bodenbearbeitung (mit und ohne Pflug) bei den Varianten unterschiedlich war. Deshalb kann die unterschiedliche Wasserinfiltrationsleistung neben dem Anbausystem auch durch das unterschiedliche Bodenbearbeitungssystem verursacht sein.

Abbildung 21: Oberflächenabfluss und Infiltrationsrate auf ökologisch und konventionell bewirtschafteten Grünland- und Ackerflächen [A]; Infiltrationsrate im Verglich ökologisch und konventionell bewirtschafteter Flächen gemessen mit Haubeninfiltrometern [B]



Quellen: verändert nach Hathaway-Jenkins et al. (2011) [A] und aus Hartmann et al. (2009) [B]

Es gibt wenige Arbeiten, die konkrete Werte angeben, wie sich Infiltration und Oberflächenabfluss auswirken, wenn ein gesamtes Einzugsgebiet ökologisch bewirtschaftet wird. Statistische Auswertungen bayerischer Anbaustatistiken zeigen, dass der ÖLB im Verhältnis mehr erosionsgefährdete Flächen bewirtschaftet als konventioneller Anbau (Auerswald et al., 2003). Trotzdem wurde im ÖLB eine um 15 % geringere Erosion als im konventionellen Landbau verzeichnet.

3.3.7 Humusgehalt und Hydrophobie

Unter Humus versteht man die organische Substanz im Boden (engl.: soil organic carbon, SOC). Hydrophobie bezeichnet die Benetzungshemmung der organischen Substanz im Boden (engl.: soil water repellency, SWR). Die hydrophoben Eigenschaften eines Bodens werden stark durch den Humusgehalt mitbestimmt. Daher werden die beiden Einflussfaktoren auf die Wasserinfiltration in diesem Abschnitt gemeinsam behandelt.

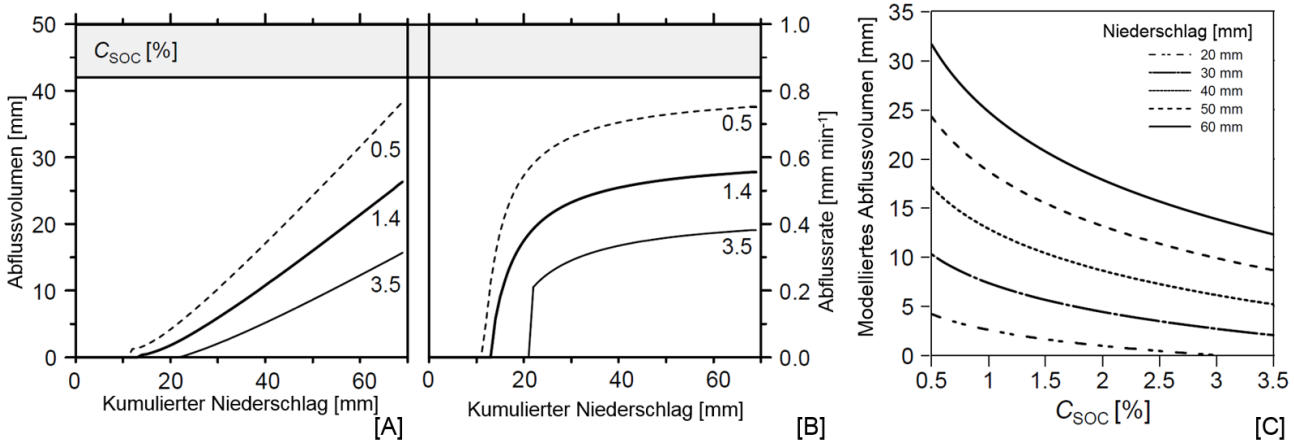
Humusgehalt

Es gibt nur wenige Veröffentlichungen zur direkten Beziehung von Humusgehalt und Wasserinfiltration. Pfluglose Bodenbearbeitung, Nutzung als Grasland und ökologische Bewirtschaftung erhöhen den Humusgehalt. Diese Maßnahmen tragen zu einer Erhöhung der Wasserinfiltration bei und bewirken somit eine Verringerung des Oberflächenabflusses.

Alhassoun (2009) stellt einen Zusammenhang zwischen der Wasserinfiltration in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kohlenstoffvorräte der Landnutzungsarten her (s. Abbildung 5[B]). Allerdings muss dies kritisch betrachtet werden. Dabei handelt es sich um eine Scheinregression, denn die Landnutzungsarten unterscheiden sich zwar deutlich im Kohlenstoffgehalt, dies ist aber nicht der Grund für die Dimension der jeweiligen Wasserinfiltrationsrate.

In einer Metaanalyse werteten Fiener et al. (2013a) 317 Beregnungsversuche auf 209 Böden in Mitteleuropa (insgesamt über 14.000 Versuchsläufe) statistisch aus. Dabei stellten sie fest, dass Oberflächenabfluss auf Böden mit höherem Humusgehalt verzögert eintritt und die Abflussmenge reduziert ist, entsprechend verhält sich die Abflussrate (s. Abbildung 22[A] und [B]). Das aus den ausgewerteten Daten entwickelte hydrologisches Modell zeigt in Abbildung 22 [C] modellierte Kurven für den Abfluss in Abhängigkeit von Humusgehalt bei verschiedenen Niederschlägen.

Abbildung 22: Abflussvolumen [A] und Abflussrate [B] bei unterschiedlichen Gehalten an organischer Substanz in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge sowie modelliertes Abflussvolumen [C] bei unterschiedlichen Niederschlagsmengen in Abhängigkeit der Gehalte an organischer Substanz



Quelle: nach Fiener et al. (2013a)

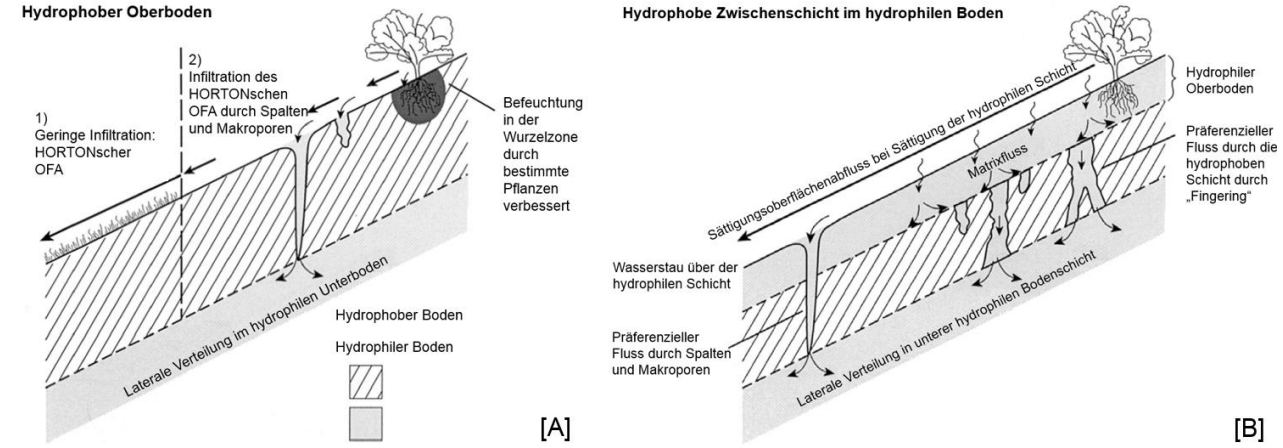
Generell kann davon ausgegangen werden, dass ackerbauliche Maßnahmen, welche den Humusgehalt erhöhen, auch zur Verbesserung der Wasserinfiltration beitragen, da die Zufuhr von organischer Substanz die Bildung von stabilen Ton-Humuskomplexen und die Lebendverbauung fördert und damit die Aggregatstabilität erhöht. Allerdings kann die Anreicherung organischer Substanz an der Oberfläche humoser Sandböden bei langen Trockenperioden die Ausprägung von Hydrophobie fördern und damit einen negativen Effekt auf die Wasserinfiltration bewirken.

Hydrophobie

Hydrophobe Böden können große Auswirkungen auf die Infiltration durch das sog. Fingering (bevorzugte Fließwege) bspw. in alten Wurzelgängen haben. Die Ausprägung der Hydrophobie ist abhängig vom Humusgehalt des Bodens und vom Ausgangswassergehalt. Daher spielt die Hydrophobie vor allem bei Starkregenereignissen nach langen Trockenperioden eine Rolle für die Wasserinfiltrationsleistung eines Bodens.

Die lokalen hydrophoben Bedingungen bestimmen den Oberflächenabfluss, die Wasserinfiltration in den Boden und den Wasserfluss im Boden über präferenzielle Fließwege. Somit haben Makroporen, Spalten und das „Fingering“ in hydrophoben Böden in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung. In einen hydrophoben Boden (s. Abbildung 23[A]) infiltriert das Wasser bei Niederschlag fast ausschließlich durch Makroporen und es entsteht HORTONscher Oberflächenabfluss (OFA). Ist hingegen der Oberboden hydrophil, infiltriert das Wasser relativ gleichmäßig über die Bodenmatrix in den Boden. Bei Vorliegen einer hydrophoben Zwischenschicht wird der Matrixfluss begrenzt und das Wasser kann in untere Bodenschichten wieder nur über präferenzielle Fließwege tiefer infiltrieren (s. Abbildung 23[B]).

Abbildung 23: Wasserinfiltration in einen Boden mit hydrophobem Oberboden [A]; Wasserinfiltration in einen Boden mit hydrophober Zwischenschicht [B]

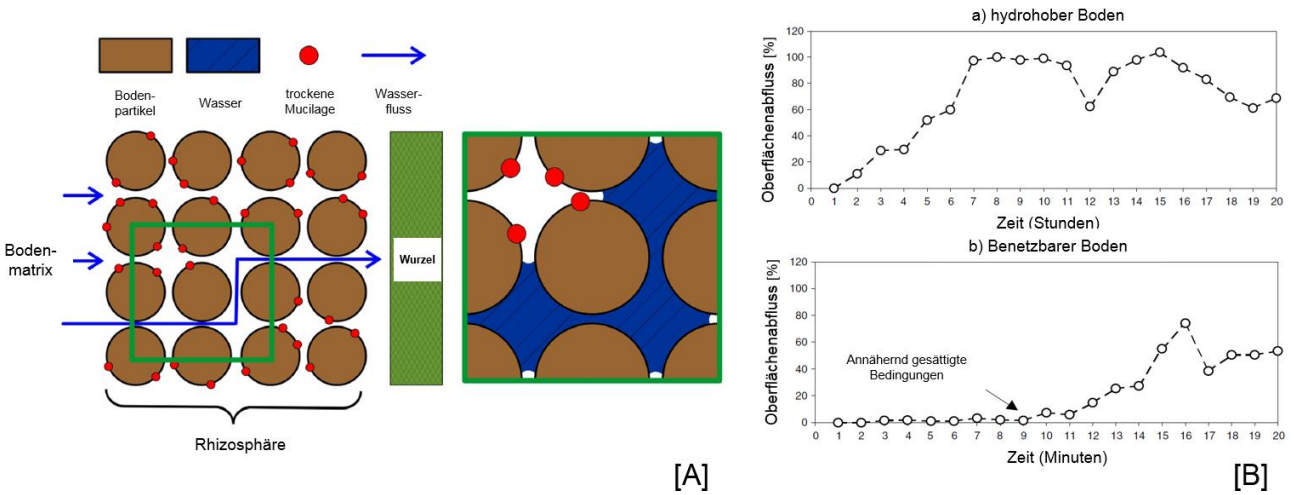


Quelle: verändert nach Doerr et al. (2000)

Die hydrophoben Bodeneigenschaften sind vor allem bei Waldböden mit Humusauflage und humosen Sandböden ausgeprägt, da Wurzelexsudate und Schleimstoffe die Poren verstopfen können und somit die Fließwege im Boden und die Verteilung des Bodenwassers vorgeben (s. Abbildung 24[A]).

Die Arbeitsgruppe um Doerr beschäftigt sich seit den 2000er Jahren mit den Mechanismen der Wasserinfiltration in hydrophobe Böden. Dabei zeigen Niederschlagssimulationen auf Versuchsflächen für einen hydrophoben Boden einen deutlich schneller entstehenden und höheren Oberflächenabfluss für einen hydrophoben als für einen benetzbaren Boden (s. Abbildung 24[B]).

Abbildung 24: Wasserfluss und Verteilung des Wassers im Boden durch lokal hydrophobe Bedingungen im Boden [A]; Oberflächenabfluss auf einem hydrophoben und einem benetzbaren Boden [B]



Quellen: verändert nach Ahmed et al. (2015) [A] und verändert nach Doerr et al. (2003) [B]

Eine Metaanalyse von Göbel et al. (2011) zeigt, dass geringe Bodenwassergehalte vor allem in Verbindung mit einer erhöhten Bodentemperatur die hydrophoben Eigenschaften eines Bodens fördern. Dieser Umstand bekommt besonders im Hinblick auf den Klimawandel mit einer Zunahme von Extrem-

wettereignissen wie Trockenperioden (s. Kapitel 3.1) eine größere Bedeutung. Somit kann ein Starkregenereignis nach langer Trockenheit auf einem hydrophoben Boden schneller zu Oberflächenabflüssen und Sturzfluten führen.

Hinsichtlich des Zusammenhangs von Bodenart und Hydrophobie zeigen die Untersuchungen von Armenise et al. 2018 einen schnelleren Anstieg der Hydrophobie in Trockenperioden für eher kleinere Korngrößen. Allerdings gibt es hierfür auch andere Ergebnisse, wonach eher die grobkörnigeren Böden zu einer schnelleren Ausbildung der Hydrophobie neigen (beispielsweise DeBano, 1981). Insgesamt gibt es bezüglich des Einflusses der Hydrophobie auf die Entstehung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten noch erheblichen Forschungsbedarf.

3.4 Schlussfolgerungen für Maßnahmenempfehlungen und Risikovorsorge

Die Literaturrecherche sowie die Zusammenstellung deren wesentlichen Ergebnisse in Kapitel 3.3 verdeutlichen, dass verallgemeinerbare Maßnahmenempfehlungen zur Verbesserung der Wasserinfiltration in landwirtschaftlich genutzte Böden nicht pauschal getroffen werden können. Aus der Vielzahl an Anpassungsmöglichkeiten müssen je nach Standort, betrieblicher Ausstattung und Voraussetzungen für die Bewirtschaftung sowie Rahmenbedingungen jeweils spezifische Maßnahmen ausgewählt werden. Durch die Verbesserung der Infiltration können die Risiken für Sturzfluten bei Starkregenereignissen und Hochwasser bei Dauerregen allerding erheblich minimiert werden, denn die Wassermenge, die schon auf der Fläche infiltriert, reduziert den Oberflächenabfluss und damit auch den Bodenabtrag.

Nach Auerswald (2018) ist dabei klarzustellen, dass Oberflächenabfluss nicht mit Erosion gleichzusetzen ist. Oberflächenabfluss kann auch ohne Sedimenttransport stattfinden (z. B. von Grünlandflächen), wohingegen Wassererosion immer Abfluss zum Sedimenttransport benötigt. Die Prozesse des Bodenabtrags und dem weiteren Transport der Bodenpartikel sind eng mit dem Oberflächenabfluss verknüpft. Somit reduzieren Maßnahmen, die den Oberflächenabfluss verringern, auch die Erosion. Zahlreiche Versuche und Studien in den vergangenen Dekaden haben gezeigt, dass sich Erosion recht leicht durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung minimieren lässt. Zwar treten sowohl bei Oberflächenabfluss als auch bei Erosion on- und off-site-Schäden auf, allerdings ist deren jeweilige Gewichtung unterschiedlich. Bei Erosion ist der Schaden primär auf der Fläche, während beim Abfluss vermehrt off-site Schaden entsteht.

Die Art des Oberflächenabflusses ist einerseits vom Niederschlagsereignis abhängig: konvektive Ereignisse (Starkregen) führen zu HORTONschem Oberflächenabfluss wohingegen advektive Niederschlagsereignisse (Dauerregen) eher zu Sättigungsoberflächenabfluss führen. Andererseits wird das Abflussgeschehen im Einzugsgebiet dadurch gesteuert, wie viele Flächen Abfluss liefern und wie schnell das Wasser in die Vorflut abtransportiert wird (Abflussbeschleunigung; Entstehung von Abflussspitzen).

Besonders problematisch sind vor allem die im Zuge des Klimawandels immer heftiger und häufiger auftretenden Extremwetterereignisse:

- **Starkregenereignis mit geringer Vorfeuchte:** Der Einfluss der Landnutzung auf der Fläche ist relativ groß. Neben dem Runoff (Abfluss) auf der Abflussbildungsfläche kommt es dabei auch zu Runon, d. h. Fremdwasserzutritt, auf benachbarte Flächen, der dort dann wieder versickern kann.
- **Starkregenereignis bei hoher Vorfeuchte** oder **Dauerregen**: Der Einfluss der Landnutzung auf der Fläche ist relativ gering. Alle Flächen im Einzugsgebiet liefern Abfluss. Entscheidend sind die Abflussverzögerung und das Brechen der Abflussspitzen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass in Gebieten mit tiefgründigen, gut durchlässigen Böden der Einfluss der Landnutzung und Bewirtschaftung höher ist als in Gebieten mit flachgründigen, gering

durchlässigen Böden. Dementsprechend müssen die Empfehlungen an die Standortverhältnisse angepasst werden und es muss differenziert werden, ob der Fokus der Maßnahmen auf Feld- oder auf Einzugsgebietsebene zu legen ist.

Neben der Verbesserung der Infiltrationsleistung der landwirtschaftlich genutzten Böden ist es auch sehr wichtig, die Fließwege des Abflusses zu verlängern und die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren, um das Risiko von Sturzfluten möglichst gering zu halten.

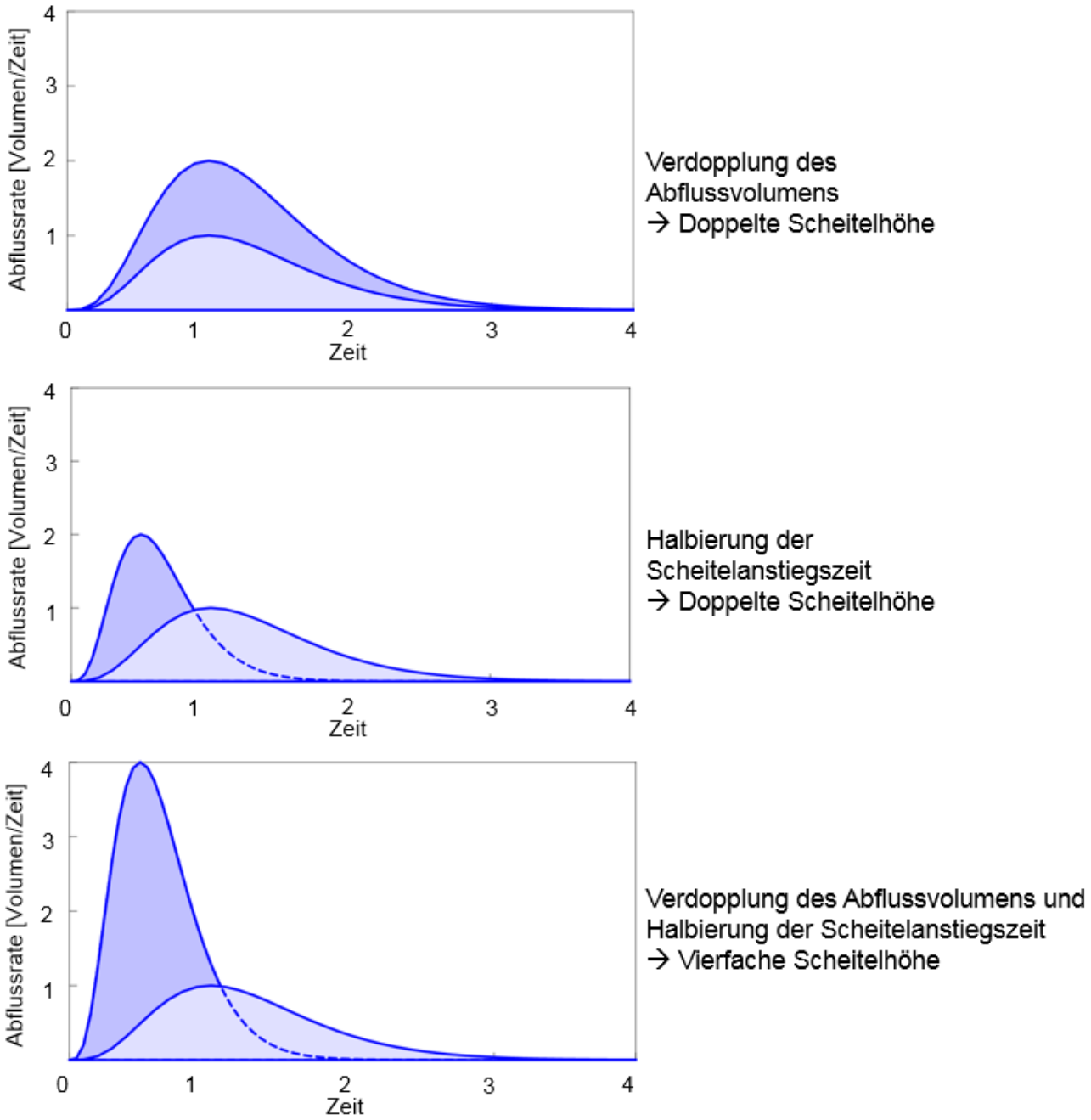
Um das Abflussgeschehen zu steuern, spielt die Landschaftsstruktur, das Relief sowie das Nutzungs- und Fruchtartenverhältnis im Einzugsgebiet eine entscheidende Rolle.

Für die Abflussbildung sowie die Entstehung von Sturzfluten und Hochwasser sind entscheidend:

- zum einen die Abflussmenge und der Hochwasserscheitel mit der Anstiegszeit und
- zum anderen die Fließlänge und die Fließgeschwindigkeit im Einzugsgebiet.

Abbildung 25 (Auerswald, 2018) verdeutlicht schematisch, wie sich die Verdopplung der Abflussmenge bei gleicher Zeit zur Erreichung des Abflußscheitels (oben) auf das Abflussgeschehen (Verdopplung des Hochwasserscheitels) auswirkt und wie wichtig es ist, die Abflussmenge zu reduzieren. Aus der mittleren Abbildung wird ersichtlich, dass die Halbierung der Scheitelanstiegszeit trotz gleicher Abflussmenge ebenfalls zu einer Verdopplung des Hochwasserscheitels führt und ein großes Risiko für Sturzfluten bedeutet. In diesem Fall kann durch eine Umgestaltung der Landnutzung am meisten hinsichtlich einer Sturzflutminderung bewirkt werden. Das größte Problem entsteht, wenn sich das Abflussvolumen bei gleichzeitiger Halbierung der Scheitelanstiegszeit verdoppelt. Hier vervierfacht sich der Hochwasserscheitel (s. Abbildung 25 unten).

Abbildung 25: Einfluss des Abflussvolumens und der Scheitelanstiegszeit auf die Abflussganglinien



Quelle: persönliche Mitteilung Auerswald (2018), unveröffentlicht

Aus diesen grundsätzlichen Zusammenhängen wird klar, dass zur Verminderung und Risikovorsorge gegenüber Oberflächenabfluss und Sturzfluten sowohl Maßnahmen auf der Feld- bzw. Schlagebene als auch Maßnahmen zur Abflussverzögerung und gezielten Abflusslenkung auf Einzugsgebietsebene erforderlich sind. Nachfolgend werden beispielhaft einige Maßnahmen für die Feld-/Schlagebene und die Einzugsgebietsebene vorgestellt und erläutert.

3.4.1 Feld- / Schlagebene

In Abhängigkeit von Nutzung und Bewirtschaftung zeigt sich, dass sogar wenige einzelne Flächen im schlimmsten Fall für die Entstehung von Oberflächenabfluss und sogar Sturzfluten verantwortlich sein können. Dabei trägt jede einzelne Fläche einen bestimmten Anteil zum Gesamtabfluss eines Einzugsgebietes bei.

Auerswald et al. (2018) wiesen in Auswertungen von 8.100 Luftbildaufnahmen landwirtschaftlicher Schläge nach, dass die Bewirtschafter keine wirksamen Erosionsschutzmaßnahmen (beispielsweise Änderung der Fruchtfolge, Schlagverkleinerung oder Ackerrandstreifen) durchführen, obwohl ihnen die Erosionsgefährdung ihrer Flächen bekannt ist. Die Landwirte haben zwar selbst ein Interesse daran, möglichst wenig Oberflächenabfluss und Bodenerosion auf ihren Feldern zu haben, sie handeln jedoch nicht danach und passen ihre Anbau- und Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht entsprechend an. Daraus folgern die Autoren, dass freiwillige Erosionsschutzmaßnahmen wenig zielführend sind und kaum umgesetzt werden und daher eine stärkere staatliche Förderung und Kontrolle nötig ist.

Zunächst sind auf Feldebene generell alle Maßnahmen hilfreich, welche die Infiltrationsleistung des Bodens verbessern und den Oberflächenabfluss reduzieren. Dafür sind die Ergebnisse aus der Erosionsforschung und die daraus abgeleiteten Empfehlung sehr gut geeignet. Gezielte Maßnahmen auf Feld-/Schlagebene sollen

- möglichst ganzjährig den Boden (≥30 %) bedecken,
- die Aggregatstabilität verbessern,
- Verdichtungen vermeiden und
- Oberflächenverschlämmungen vermeiden.

Dies lässt sich z. B. mit folgenden Bewirtschaftungsmethoden/Maßnahmen erreichen:

- Reduzierte Bodenbearbeitung (Mulch- oder Direktsaat, Streifenbearbeitung)
- Mehrjähriger Futterbau
- Zwischenfrüchte
- Untersaaten
- Erosionsschutzstreifen im Feld
- Ökologischer Landbau
- Verringerung der Feldgröße bis ≤2 ha
- Umwandlung von Acker- in Grünland

Beispielsweise gibt es aus Baden-Württemberg im Rahmen des KliStaR-Projekts einen Katalog von Maßnahmen (Werkzeugkasten), die für die Verbesserung des Boden- und Wasserrückhaltes auf der Fläche empfohlen werden (Billen et al., 2017). Für jedes Verfahren gibt es einen Steckbrief mit Informationen zu Wirkung, Realisierung, Vorteile, Nachteile, Kosten und eine Bewertung (s. Abbildung 26). Diese in der Erosionsforschung erarbeiteten „Werkzeugkästen“ sind auch eine gute Vorlage für die gezielte Maßnahmenumsetzung auf Feldebene zur Vermeidung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten. Eine abschließende Bewertung der Maßnahmen enthält die Übersicht in Tabelle 4.

Abbildung 26: Beispiel-Maßnahmensteckbrief zur Mulchsaat aus KliStaR-Projekt

Mulchsaat

KliStaR

Mulchsaat bedeutet die Einsaat der Hauptfrucht in die Ernterreste der Vorfrucht, der Zwischenfrucht oder der Untersaat mit einer Bodenbedeckung von mindestens 30 %. Die Bodenbearbeitung erfolgt möglichst zeitnah zur Aussaat in der Regel pfluglos und nur bis zur Saattiefe. Noch wirkungsvoller ist die Direktsaat, bei der keine Bodenbearbeitung stattfindet und direkt in den Vorfruchtmulch gesät wird (s. DWA-Merkblatt 910).

Wirkung

Die Wirkung beruht u. a. auf der Dämpfung verschlämmungswirksamer Regentropfen, der erhöhten Regenwurmdichte gekoppelt mit versickerungswirksamen Wurmröhren oder der Vermehrung von Bodenleben und Humus in der obersten Bodenschicht und dadurch erhöhte Bodenkrümelstabilität mit verbesserter Tragfähigkeit, also verminderter Verdichtungsgefahr des Bodens.
So flossen bei Versuchen mit ca. 65 l/m² Beregnungswasser auf Lößböden von Zuckerrübenfeldern bei alleiniger Bodenbewirtschaftung mit Saatkreiselegge im Durchschnitt rund 80 % weniger Boden und 40 % weniger Wasser ab gegenüber der Pflugbewirtschaftung mit z. T. verdichteten Böden (siehe Grafik).
Je nach Standort können die Abweichungen allerdings bis zu 100 % oder mehr betragen.

Realisierung

Bei der Realisierung können die besten Effekte in schluffreichen und tonarmen (< 20 % Ton) sowie humusarmen (< 2 % Humus) Böden erwartet werden. Die Pflanzenreste sollten weitmöglichst an der Oberfläche belassen oder nur oberflächlich eingearbeitet werden. Ein grobes Saatbett ergänzt die Schutzwirkung des Mulches. Erste Erfahrungen mit Mulchsaat können am besten im Maisanbau gesammelt werden. Die Auswahl neuer Maschinen geschieht am besten mit Hilfe von erfahrenen Berufskollegen, weil es eine große Vielfalt an speziellen Mulchsaatmaschinen für verschiedene Kulturen und Böden gibt.

Vorteile

Vorteile sind z. B. die Zeitersparnis, weil das zeitaufwändige Pflügen entfällt oder verringerter Wasserstress in trockenen Jahren und Regionen sowie auf sandig/leichten Böden.

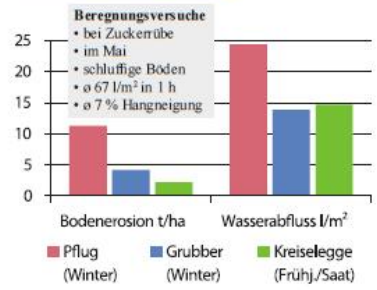
Nachteile

Von Nachteil kann die verzögerte Aussaat wegen langsamerer Abtrocknung sein, besonders auf schweren Böden (> 25 % Ton) oder der erhöhte Pflanzenschutzmittelaufwand.

Kosten

Es treten variable Mehrkosten von 11 €/ha bis 19 €/ha auf in der Einführungsphase von Mulchsaat. Zusätzlich fallen jährliche Mehrkosten durch Investitionen in Höhe von ca. 8 €/ha bis 43 €/ha an, z. B. für mulchsaatfähige Sämaschinen. Bei längerfristiger, konsequenter Durchführung der Mulchsaat sind laut Expertenmeinung auch Kosteneinsparungen möglich.

Bewertung



Infos: z.B. „Standpunkt zur Pfluglosen Bodenbewirtschaftung“ der TLL Jena (2006)

Quelle: aus Billen et al. (2018)

Tabelle 4: Maßnahmen zum Rückhalt von Boden und Wasser in Außenbereichen in Abhängigkeit wesentlicher Handlungsfelder mit dreistufiger Kurzbewertung

Quelle: aus Billen et al. (2018)

Welche Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen im konkreten Einzelfall sinnvoll und zielführend sind, hängt dabei von den jeweiligen Standort-, Bewirtschaftungs- und Witterungsverhältnissen ab. Der Landwirt oder Berater kann jedoch aus diesem „Werkzeugkasten“ die für ihn geeignetsten Maßnahmen auswählen.

3.4.2 Einzugsgebietsebene

Ein Einzugsgebiet kann man sich als ein Mosaik von Einzel-Flächen vorstellen. Es wird angenommen, dass eine heterogene Landschaft weniger Abfluss produziert als eine homogene, allerdings gibt es dazu wenige konkrete Daten bzw. Veröffentlichungen.

Fließt der Abfluss einer Fläche auf eine Nachbarfläche (Runon), deren Infiltrationsvermögen noch nicht ausgeschöpft ist, kann dort Abfluss versickern und der Gesamtabfluss im Einzugsgebiet ist geringer als die Summe der Abflüsse der Einzelflächen. Bei sehr heftigen Ereignissen, bei denen Sturzfluten auftreten, und alle Flächen liefern, spielt die Runon-Infiltration keine Rolle mehr, da die Nachbarfläche selbst Abfluss spendet.

Zwar sind die Nutzungsverhältnisse von Acker- und Grünland wichtig für das Abflussgeschehen im Einzugsgebiet, viel wichtiger ist jedoch, wo sich das Grünland befindet (Auerswald, 2018). Die Abflussmenge kann nicht immer beeinflusst werden, jedoch der Abflussweg. So sollte vor allem hydraulisch raues Grünland (beispielsweise ein begrünter Abflussweg) dort sein, wo das Wasser auch tatsächlich fließt. Dies ist ein wichtiger Zusammenhang für den gesamte Abflussprozess, der im Rahmen von Einzugsgebietssimulationen, die mit Ergebnissen aus Punkt- bzw. Plot-Messungen parametrisiertet werden, häufig vernachlässigt wird.

Auf den Flächen in einem Einzugsgebiet ändert sich die Infiltrationsleistung im Jahreslauf durch Bewirtschaftung und die damit verbundene Bodenbearbeitung. Daher sollte ein Einzugsbiet möglichst heterogen genutzt sein, um mehr Variation der potentiell abflussproduzierenden Flächen zu haben (Auerswald & Schröder, 2001). Dabei muss die Einzugsgebietsebene stets räumlich und zeitlich differenziert betrachtet werden. Besonders relevant ist die Lage abflussbildender Teilflächen im Einzugsgebiet, da diese maßgeblich zum Gesamtabfluss beitragen. Auch kann es trotz eines insgesamt geringen Gesamtabflusses lokal zu hohen Oberflächenabflüssen kommen.

Eindrucksvoll wird das Abflussgeschehen nach einem Starkregenereignis im Mai 2018 in Osthessen von einer Luftbildaufnahme verdeutlicht (s. Abbildung 27). Gut ersichtlich sind die unbegrünten (Mais-) Flächen, auf denen es durch das Starkregenereignis mit 80 mm innerhalb einer halben Stunde zu Oberflächenabfluss und Erosion kommt. Weiterhin ist klar erkennbar, welche Flächen von off-site Schäden betroffen sind und über welche Flächen das Wasser aus dem Gebiet abtransportiert wird. Des Weiteren wird auch deutlich, wie wichtig eine heterogene Anbaustruktur im Gebiet wäre und welche Rolle Landschaftselemente spielen. Die Hecken bremsen den Abfluss, während die Wege – je nach Fließrichtung des Wassers – den Abfluss beschleunigen.

Abbildung 27: Luftbildaufnahme nach einem Starkregenereignis in Osthessen im Mai 2018 (über 80 mm innerhalb von weniger als drei Stunden) mit Erosionsschäden (on- und off-site)

Quelle: eigene Aufnahme Beisecker (2018)

Auf Einzugsgebietsebene sind alle Maßnahmen hilfreich, welche den Abfluss verzögern und die Scheitelanstiegszeit verringern. Häufig werden die Abflüsse am Feldrand in Rohren und Gräben zusammengeführt, dadurch steigt der hydraulische Radius stark an und die Abflussgeschwindigkeit erhöht sich (Brandhuber et al., 2017). Bei gleicher Abflussmenge spielt folglich die Grabenform und die Rauigkeit des Grabens eine entscheidende Rolle (s. Tabelle 5). So beträgt die Fließgeschwindigkeit einer breiten begrünten Mulde beispielsweise nur noch ein Viertel der Geschwindigkeit in einem geräumten Graben bei gleichem Wasservolumen.

Tabelle 5: Abflussgeschwindigkeit in Gerinnen der landwirtschaftlichen Flur, jeweils für eine Sohlneigung von 1 % und gleiche Abflussmenge pro Zeiteinheit (32 m³/min)

	geräumter Graben	begrünter Graben	begrünte Mulde	begrünte Mulde
Form	Trapez	Trapez	Parabolisch	Parabolisch
Sohlbreite (m)	0,6	0,6		
Wasserspiegelbreite (m)	1,54	2,1	2	10
Fließtiefe (m)	0,47	0,75	0,38	0,14
R (m)	0,26	0,37	0,23	0,09
k_{GMS}	59	29	29	29
v (m/s)	2,4	1,5	1,1	0,6
$T_{5\,km}$ (min)	35	56	78	144
Relativ (%)	100	62	44	24

Quelle: aus: Brandhuber et al. (2017)
Abkürzungen: R = hydraulischer Radius; k_{GMS} = Gauckler-Manning-Strickler-Beiwert, v = Fließgeschwindigkeit, T = Fließdauer für 5 km

Um den Abfluss in einem gesamten Einzugsgebiet zu reduzieren, muss auch die Regelung des Abflussregimes optimiert werden. So können z. B. die Anlage von begrünten Tiefenlinien und kleineren Rückhaltebecken (Fiener & Auerswald, 2003; Kistler et al., 2013) sowie bewirtschaftungsintegrierten Verwallungen (Seidel et al., 2015) zur Abflussbremsung und spürbaren Entschärfung von Sturzfluten beitragen. Das bedeutet, dass die Wasserführung im Einzugsgebiet funktionsfähig bleiben muss, indem Gräben so angelegt werden, dass sie in die Vorflut entwässern. Des Weiteren müssen diese regelmäßig unterhalten und gepflegt werden.

Je nach den standörtlichen Voraussetzungen haben sich die folgenden Maßnahmen als abflussmindernd und daher zielführend herausgestellt:

- Anlegen von Ackerrand- und Grünstreifen
- Begrünung der Abflussrinnen (Tiefenlinien)
- Veränderung der Gräben und Vorfluter (flache, hydraulische raue Abflussbahnen)
- möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (mind. 30 %)
- gezielte Beeinflussung des Nutzungsverhältnisses von Acker- Grünland und Wald in Starkregengefährdungsgebieten
- gezielte Beeinflussung des Kulturartenverhältnisses hin zu mehr abflussmindernden Kulturen (ausgewogenes Verhältnis von Sommerungen zu Winterungen, weniger Sommerkulturen wie Mais, Zuckerrüben, Körnerleguminosen, Soja, Gemüse)
- Fahrspuren und Wege begrünen (auch im Wald)
- Erhöhung der Rauigkeit der Bodenoberfläche
- Muldenrückhalt, Anlage von kleinen Rückhaltebecken oder Verwallungen auf der Fläche (100-300 m^2)

Diese Ergebnisse der Literaturrecherche dienten im weiteren Projektverlauf als Grundlage für die Bewertung der der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten und der Maßnahmeneffizienz des Förderinstrumentariums sowie die daraus abgeleiteten Empfehlungen.

Empfehlungen an Politik und Verwaltung zur Verbesserung der Wasserinfiltration

1. Erarbeitung eines „Werkzeugkastens“ von Maßnahmen auf Schlagebene für Landwirte.
2. Formulierung von konkreten Werten für Fördermaßnahmen oder Rechtsvorgaben, wie beispielsweise Bedeckungsgrade >30 % bei Mulch- und Direktsaatverfahren.
3. Erarbeitung von Kombinationen für Maßnahmen auf Feld-/Schlagebene sowie auf Einzugsgebietsebene.
4. Möglichst standortangepasste Flächennutzung und vielfältiges Kulturartenverhältnis.
5. Optimierung der Wasserführung und des Abflussregimes am Standort und im Einzugsgebiet (Gräben, Sickermulden, Verwallungen etc.).

4 Analyse der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasserinfiltration und zur Vermeidung von Bodenabtrag

In einer Vielzahl von rechtlichen Bestimmungen werden die Themenbereiche Boden-, Wasser- und Naturschutz sowie Landwirtschaft adressiert. Im Projektverlauf wurden diese rechtlichen Grundlagen identifiziert und auf deren Eignung, Anwendung und Wirksamkeit hinsichtlich einer direkten oder indirekten verbesserten Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden untersucht. Darauf aufbauend wurden Handlungsoptionen abgeleitet, wie anhand der vorliegenden Gesetze bzw. durch welche Anpassungen die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Flächen in der Praxis verbessert werden könnten.

4.1 Identifikation relevanter rechtlicher Grundlagen

Anhand einer umfangreichen Internet- und Literaturrecherche wurden die relevanten rechtlichen Grundlagen, die direkten oder indirekten Einfluss auf den Boden-, Wasser- oder Naturschutz und die landwirtschaftliche Praxis sowie im Besonderen auf die Wasseraufnahmefähigkeit und die -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden haben können, identifiziert.

Die Recherche bezog sich auf die rechtlichen Bestimmungen der folgenden Regelungsebenen:

- internationale Regelungen,
- EU-Richtlinien und Verordnungen,
- Bundesgesetze und Verordnungen und
- Ländergesetze, -verordnungen und Erlasse.

Eine wichtige Informationsquelle stellte die Website „Umwelt-Online[9]“ dar. Ergänzend zur Internet- und Literaturrecherche wurden Fachleute der zuständigen Länderbehörden aus den Fachbereichen Landwirtschaft, Boden-, Natur- und Gewässerschutz in ihrer Funktion als Experten kontaktiert (s. Kapitel 2.2) und um die Ergänzung relevanter rechtlicher Grundlagen, insbesondere für ihr Bundesland, gebeten.

Basierend auf dieser Recherche wurden vier internationale Konventionen, fünf europäischen Richtlinien und Verordnungen, 14 Gesetze und Verordnungen auf Bundesebene und 38 weitere auf Länderebene aus den Bereichen Bodenschutz, Erosionsvorsorge und Hochwasserschutz identifiziert. Eine vollständige Übersicht hierzu findet sich in Kapitel 8.2.

Diese wurden schließlich im Detail in Bezug auf deren Relevanz für die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden und insbesondere hinsichtlich deren möglicher Auswirkungen auf die Entstehung von Sturzfluten durch Stark- und Dauerregenereignisse, basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche (s. Kapitel 3), untersucht. Dabei wurden auch die unterschiedlichen Hierarchien (insbesondere Umsetzung von gesetzlichen Grundlagen auf EU-Ebene in Bundesrecht) berücksichtigt.

Im Zuge dieser zweiten, vertieften Untersuchung haben sich schließlich acht rechtliche Regelungen als besonders relevant herausgestellt (inklusive der darauf basierenden Ländergesetze). Diese wurden in den Expertengesprächen (s. Kapitel 2.2) bestätigt.

[9] https://www.umwelt-online.de/

Eine Übersicht dieser rechtlichen Regelungen und der jeweiligen Rechtsbereichen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Relevante Rechtsbereiche und dazugehörige rechtliche Grundlagen

Bodenschutzrecht	Agrarrecht	Wasserrecht	Naturschutz und Flurbereinigung
Bundes-Bodenschutzgesetz	Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung	Wasserhaushaltsgesetz	Bundesnaturschutzgesetz
Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung	Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz	Wassergesetze der Bundesländer	Flurbereinigungsgesetz
Bodenschutzregelungen der Bundesländer	Direktzahlungen-Durchführungsverordnung		
Erosionsschutzverordnungen der Bundesländer			

Quelle: eigene Darstellung, Ramboll Environment & Health GmbH

Nachfolgend werden die genannten Gesetze und Verordnungen beschrieben und anschließend bezüglich deren möglichen Auswirkungen auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden bewertet.

4.1.1 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)

Das BBodSchG regelt gemäß § 1

> *„…nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen“.*

Der gesetzliche Schutz zielt dabei gemäß § 2 BBodSchG auf alle Bodenfunktionen, inklusive jener als Lebensgrundlage für Mensch und Tier, als Rohstofflagerstätte, als Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung und als Bestandteil des Naturhaushalts. Das BBodSchG kommt subsidiär zur Anwendung, d. h., nur wenn Einwirkungen auf den Boden nicht bereits durch folgende andere Gesetze und Rechtsvorschriften geregelt sind:

1. Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes über das Aufbringen von Abfällen zur Verwertung als Düngemittel im Sinne des § 2 des Düngegesetzes und der hierzu auf Grund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und des bis zum 1. Juni 2012 geltenden Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes erlassenen Rechtsverordnungen,
2. Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes über die Zulassung und den Betrieb von Abfallbeseitigungsanlagen zur Beseitigung von Abfällen sowie über die Stilllegung von Deponien,
3. Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter,
4. Vorschriften des Düngemittel- und Pflanzenschutzrechts,
5. Vorschriften des Gentechnikgesetzes,
6. Vorschriften des zweiten Kapitels des Bundeswaldgesetzes und der Forst- und Waldgesetze der Länder,

7. Vorschriften des Flurbereinigungsgesetzes über das Flurbereinigungsgebiet, auch in Verbindung mit dem Landwirtschaftsanpassungsgesetz,
8. Vorschriften über Bau, Änderung, Unterhaltung und Betrieb von Verkehrswegen oder Vorschriften, die den Verkehr regeln,
9. Vorschriften des Bauplanungs- und Bauordnungsrechts,
10. Vorschriften des Bundesberggesetzes und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen über die Errichtung, Führung oder Einstellung eines Betriebes sowie
11. Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen über die Errichtung und den Betrieb von Anlagen unter Berücksichtigung von § 3 Absatz 3 BBodSchG.

Von zentralem Interesse für die vorliegende Studie ist § 17 BBodSchG über die gute fachliche Praxis (gfP) in der Landwirtschaft, der die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource sicherstellen soll. In Abbildung 28 sind die Inhalte des § 17 zur gfP in der Landwirtschaft dargestellt.

Abbildung 28: § 17 BBodSchG – Die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft

§ 17 Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft

(1) Bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung wird die Vorsorgepflicht nach § 7 durch die gute fachliche Praxis erfüllt. Die nach Landesrecht zuständigen landwirtschaftlichen Beratungsstellen sollen bei ihrer Beratungstätigkeit die Grundsätze der guten fachlichen Praxis nach Absatz 2 vermitteln.

(2) Grundsätze der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung sind die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürlicher Ressource. Zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis gehört insbesondere, dass

1. die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen hat,
2. die Bodenstruktur erhalten oder verbessert wird,
3. Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden,
4. Bodenabträge durch eine standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung, möglichst vermieden werden,
5. die naturbetonten Strukturelemente der Feldflur, insbesondere Hecken, Feldgehölze, Feldraine und Ackerterrassen, die zum Schutz des Bodens notwendig sind, erhalten werden,
6. die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung erhalten oder gefördert wird und
7. der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird.

(3) Die Pflichten nach § 4 werden durch die Einhaltung der in § 3 Abs. 1 genannten Vorschriften erfüllt; enthalten diese keine Anforderungen an die Gefahrenabwehr und ergeben sich solche auch nicht aus den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis nach Absatz 2, so gelten die übrigen Bestimmungen dieses Gesetzes.

Quelle: aus Bundes-Bodenschutzgesetz

Grundsätzlich sind alle Punkte der gfP für die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden relevant, auch wenn diese zwei Aspekte in keinem Punkt explizit adressiert werden. Unter anderem beeinflussen die Bodenbearbeitung, der Erhalt der Bodenstruktur wie auch die biologische Aktivität des Bodens dessen Wasseraufnahmefähigkeit sowie dessen Speicherkapazität. Die Vermittlung der gfP erfolgt durch die landwirtschaftlichen Beratungsstellen (Offizialberatung der Landwirtschaftsbehörden), die im BBodSchG als klar zuständig für diese Tätigkeit benannt werden (§17 Absatz 1 BBodSchG). Ein Verstoß gegen § 17 BBodSchG stellt allerdings keine Ordnungswidrigkeit dar (s. § 26 BBodSchG).

In § 21 (1) BBodSchG „Landesrechtliche Regelungen“ werden die Bundesländer zum Erlass ergänzender Verfahrensregelungen zur Ausführung des Zweiten und Dritten Teils des BBodSchG ermächtigt. Dies schließt gemäß § 21 Absatz 3 BBodSchG unter anderem die Möglichkeit zur Ausweisung von Gebieten ein, in denen flächenhaft schädliche Bodenveränderungen auftreten oder zu erwarten sind, inklusive der Bestimmung zu ergreifender Regelungen und gebietsbezogener Maßnahmen des Bodenschutzes. Außerdem können die Länderbehörden gebietsbezogene Maßnahmen zum Bodenschutz

treffen und sind verantwortlich für die Einrichtung von Bodeninformationssystemen, die wichtig für die Erfassung des Bodenzustandes und etwaiger negativer Veränderungen sind (Absatz 4).

In den 16 Bodenschutzgesetzen auf Länderebene finden sich ergänzende Vorschriften im Falle eines Verdachts auf schädliche Bodenveränderungen und im Umgang mit Altlasten. Die Zuständigkeit für Gefahrenabwehr ist in der Regel bei den oberen Bodenschutzbehörden angesiedelt, Vorsorgemaßnahmen und Überwachung bei den unteren Bodenschutzbehörden. In allen Bundesländern liegt die Zuständigkeit für die Vermittlung der guten fachlichen Praxis bei den Landwirtschaftsbehörden.

4.1.2 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)

Die BBodSchV dient der Konkretisierung des BBodSchG bezüglich der Untersuchung und der Bewertung von Flächen mit dem Verdacht von Bodenkontamination, Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen und benennt Anforderungen an die Probennahme, Analytik und Qualitätssicherung. Die Verordnung dient weiterhin der Festlegung von Prüf-, Maßnahmen- und Vorsorgewerten einschließlich der zulässigen Zusatzbelastung und der Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen nach Artikel 7 des BBodSchG.

Zunächst wird im Zuge einer Gefährdungsabschätzung bestimmt, ob eine schädliche Bodenveränderung droht oder vorliegt. Gibt es bei der zuständigen Behörde Anhaltspunkte, dass eine schädliche Bodenveränderung oder konkrete Hinweise auf erhebliche Bodenabträge und -ablagerungen durch Wasser gemäß § 3 Abs. 2 BBodSchV vorliegen, so sollen im Sinne der orientierenden Untersuchung geeignete Maßnahmen für die Ermittlung des Sachverhalts ergriffen werden. Anhaltspunkte ergeben sich nach § 8 Abs. 2 BBodSchV insbesondere, wenn Bereiche, die außerhalb einer vermeintlichen Erosionsfläche liegen, durch abgeschwemmtes Bodenmaterial befrachtet wurden. Hierbei ist nach § 8 Abs. 3 BBodSchV zu untersuchen, auf welche Erosionsfläche die Bodenabschwemmung zurückzuführen ist. Im Zuge der Detailuntersuchung ist schließlich festzustellen, ob weitere Bodenabträge von erheblichem Bodenmaterial auf der Erosionsfläche zu erwarten sind. Dies ist der Fall, wenn in den vergangenen zehn Jahre vergleichbare Erosionsereignisse aufgetreten- oder zu erwarten sind.

Wird die Erosionsfläche landwirtschaftlich genutzt, werden die lokalen Beratungsstellen der Landwirtschaftsbehörden gemäß § 17 BBodSchG dazu ermächtigt, im Rahmen der Beratung bei einem sich bestätigenden Verdacht auf schädliche Bodenveränderungen (also nach Eintritt eines Schadens) aufgrund von Bodenerosion durch Wasser geeignete erosionsmindernde Maßnahmen vorzuschlagen, die schließlich im Einverständnis mit der zuständigen landwirtschaftlichen Fachbehörde gegenüber dem Bewirtschafter angeordnet werden können.

Des Weiteren werden in der BBodSchV Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien in den Boden definiert, welche die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität beeinflussen können. Zur Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht dürfen laut § 12 Abs. 1 BBodSchV in und auf Böden nur Bodenmaterial und Baggergut nach DIN 19731 (Ausgabe 5/98) und Gemische von Bodenmaterial mit solchen Abfällen, die die stofflichen Qualitätsanforderungen der nach § 11 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und § 8 des bis zum 1. Juni 2012 geltenden Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes erlassenen Verordnungen erfüllen, auf- und eingebracht werden. Außerdem sollen laut § 12 Abs. 9 BBodSchV beim Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden Verdichtungen, Vernässungen und sonstige nachteilige Bodenveränderungen durch geeignete technische Maßnahmen sowie durch Berücksichtigung der Menge und des Zeitpunktes des Aufbringens vermieden werden.

In Sachsen-Anhalt ist seit September im Jahr 2012 der „*Erlass zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen*“ in Kraft. Dieser definiert das Vorgehen im Falle von Bekanntwerden schädlicher Bodenveränderungen

bei Bodenerosion durch Wasser. Konkret wird darin zunächst das Vorgehen zur Datenerfassung inklusive Mitteilungspflicht beschrieben. Außerdem wird die Sachverhaltsermittlung im Rahmen einer orientierenden Untersuchung definiert, ebenso wie die sich daraus ergebende Gefahrenabwehr. Dieser Erlass wird allerdings erst wirksam, wenn schädliche Bodenveränderungen bereits aufgetreten sind und unterstützt dann die Wiederherstellung der ursprünglichen Bodenfunktionen, sofern dies möglich ist.

4.1.3 Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz (AgrarZahlVerpflG)

Das AgrarZahlVerpflG dient der Durchführung des Titels VI der Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Finanzierung, die Verwaltung und das Kontrollsystem der Gemeinsamen Agrarpolitik. Das Gesetz verpflichtet Begünstigte zur Einhaltung der Grundanforderungen an die Betriebsführung (GAB) sowie zum Erhalt von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ), wobei Fachüberwachungsbehörden Ausnahmen genehmigen können.

Die GAB beinhalten die wichtigsten Regelungen für Landwirte aus insgesamt 13 einschlägigen europäischen Rechtsakten aus den Bereichen Umweltschutz, Lebens- und Futtermittelsicherheit, Kennzeichnung und Registrierung von Tieren, Tierseuchenbekämpfung, Pflanzenschutzmitteleinsatz sowie Tierschutz. Obwohl diese bereits als Fachrecht unabhängig von Prinzip der Cross-Compliance (CC) basierend auf der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) gültig sind, werden sie durch die CC-Bestimmungen zusätzlich gezielt mit den Flächenprämien (EU-Direktzahlungen) verknüpft.

Die GLÖZ beinhalten Standards für die Erhaltung von Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand:

- Einhaltung der Genehmigungsverfahren für die Verwendung von Wasser zur Bewässerung
- Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung
- Mindestanforderungen an die Bodenbedeckung
- Mindestpraktiken der Bodenbearbeitung zur Begrenzung von Erosion
- Erhaltung des Anteils der organischen Substanz im Boden
- Keine Beseitigung von Landschaftselementen

Zusätzlich besagt § 3 AgrarZahlVerpflG, dass der Anteil an Grünland bezogen auf das Referenzjahr 2003 nicht erheblich abnehmen soll.

Gemeinsam mit der Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung (s. 4.1.4) werden mit diesem Gesetz die CC Auflagen der EU-Agrarpolitik auf Bundesebene umgesetzt. Die Einhaltung der Auflagen wird von den zuständigen Behörden oder Zahlstellen vor Ort stichprobenartig pro Jahr bei etwa einem Prozent der Zahlungsempfänger kontrolliert. Hinzu kommen Kontrollen aufgrund konkreter Anlässe in einzelnen Betrieben. Festgestellte Verstöße werden nach Schwere, Ausmaß und Dauer bewertet und die Zahlungen entsprechend gekürzt, wobei im Regelfall eine Kürzung um drei Prozent verhängt wird (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2017).

4.1.4 Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung (AgrarZahlVerpflV)

Die AgrarZahlVerpflV dient der Umsetzung der Verordnungen (EU) Nr. 1306/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Finanzierung, die Verwaltung und das Kontrollsystem der Gemeinsamen Agrarpolitik. Sie regelt die Voraussetzungen für den Erhalt der Direktzahlungen und definiert hierfür die Anforderungen an die Erhaltung von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ) sowie die Einzelheiten zur Kontrolle und Sanktionierung der Anforderungen

und Standards. Somit gilt sie nur für jene Landwirte, die Agrarförderungen beantragen. Konkret für das vorliegende Forschungsvorhaben sind vor allem die folgenden Paragrafen relevant:

- **§ 5 Mindestanforderungen an die Bodenbedeckung:** Ackerland, welches als im Umweltinteresse genutzte Fläche ausgewiesen ist sowie brachliegendes und stillgelegtes Ackerland, ist der Selbstbegrünung zu überlassen oder durch eine Ansaat zu begrünen, soweit keine landwirtschaftliche Erzeugung stattfindet oder soweit nur eine Beweidung oder Schnittnutzung zugelassen ist. Ebenso wird verfügt, dass Zwischenfrüchte und Gründecken bis zum Ablauf des 15. Februar des auf das Antragsjahr folgenden Jahres auf der Fläche zu belassen sind (Ausnahmen durch Landesregierungen sind möglich).
- **§ 6 Mindestpraktiken der Bodenbearbeitung zur Begrenzung von Erosion**: Festlegung von Mindestanforderungen an die Bodenbearbeitung nach dem Grad der Wasser- und Winderosionsgefährdung der landwirtschaftlichen Flächen. Hierzu teilen die Länder die landwirtschaftlichen Flächen je nach Grad der Wasser- und Winderosionsgefährdung bestimmten Klassen zu. Dies geschieht in den jeweiligen „*Verordnungen zur Einteilung von landwirtschaftlichen Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung durch Wasser und Wind*“, innerhalb welcher es zu Unterschieden kommen kann.
- **§ 7 Erhaltung des Anteils der organischen Substanz im Boden:** Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern.
- **§ 8 Keine Beseitigung von Landschaftselementen:** Definition von Landschaftselementen, welche nicht beseitigt werden dürfen.

In § 6 AgrarZahlVerpflV werden Landesregierungen zudem verpflichtet, landwirtschaftliche Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung einzuteilen. Dies wird von den Bundesländern in den jeweiligen Erosionsschutzverordnungen oder alternativ in Verordnungen zur Einteilung von landwirtschaftlichen Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung umgesetzt, wobei es hier bundesländerspezifische Unterschiede gibt. Außerdem sind abweichende Anforderungen bezüglich der AgrarZahlVerpflV zum Schutz des Bodens vor Erosion möglich, was dazu führt, dass sich die landwirtschaftlichen Praktiken im Sinne des Erosionsschutzes in den Bundesländern unterscheiden können. Abweichende Anforderungen können dabei von den Landesregierungen über Rechtsverordnungen festlegen werden, um besonderen regionalen Gegebenheiten Rechnung zu tragen.

4.1.5 Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV)

Die DirektZahlDurchfV dient der Durchführung der Verordnung (EU) Nr. 1307/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 mit Vorschriften über Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik. Die DirektZahlDurchfV verknüpft Direktzahlungen an die Erbringung von konkreten Leistungen für den Klima- und Umweltschutz durch die sogenannte Greening-Prämie. Das Greening beinhaltet folgende Maßnahmen:

a) **Anbaudiversifizierung:** Festlegung von Mindestanforderungen bezüglich der Anzahl und der maximal zulässigen Anteile einzelner landwirtschaftlicher Kulturen am gesamten Ackerland eines Betriebs. Ausgenommen vom Greening sind Betriebe, die unter die sog. Kleinlandwirteregelung fallen und Betriebe des Ökologischen Landbaus. Nicht betroffen sind außerdem Betriebe mit ausschließlich Dauerkulturen (z. B. Wein, Obst und Hopfen). Darüber hinaus gibt es weitere Sonderregelungen für kleinere Betriebe und Betriebe mit hohem Grünlandanteil.
b) **Erhalt von Dauergrünland:** Umwandlungs- und Pflugverbot für als umweltsensibel definiertes Dauergrünland sowie Genehmigungspflicht für die Umwandlung in andere Nutzungsformen für darin

nicht eingeschlossenes Dauergrünland. Genehmigungen werden nicht mehr erteilt, wenn auf regionaler Ebene der Dauergrünlandanteil um mehr als 5 % gegenüber dem Referenzanteil abgenommen hat.

c) **Ausweisung ökologischer Vorrangflächen:** Verpflichtung von Betriebsinhabern, deren Ackerland mehr als 15 ha beträgt, grundsätzlich 5 % des Ackerlandes als ökologische Vorrangfläche bereitzustellen. Potentielle Vorrangflächen sind: brachliegende Flächen, Terrassen, Landschaftselemente einschließlich Feldränder, Pufferstreifen, Streifen von beihilfefähigen Flächen an Waldrändern, Agroforstflächen, Flächen mit Niederwald mit Kurzumtrieb, Aufforstungsflächen, Flächen mit Zwischenfruchtanbau oder Gründecke und Flächen mit stickstoffbindenden Pflanzen.

Die Umsetzung dieser Umweltauflagen ist für landwirtschaftliche Betriebe ab einer Größe von 10 Hektar Ackerflächen verpflichtend, sofern Direktzahlungen beantragt werden. Ausnahmen bestehen für Betriebe, die an der Kleinerzeugerregelung teilnehmen (maximal 1.250 € Direktzahlungen) sowie anerkannte Betriebe oder Betriebsteile bzw. Produktionseinheiten des ökologischen oder biologischen Landbaus (Bescheinigung gemäß § 29 Absatz 1 Verordnung (EG) Nr. 834/2007). Zusätzlich gibt es spezifische Ausnahmeregelungen für die einzelnen Maßnahmen. Deren Auswahl bleibt dabei den Landwirten überlassen.

4.1.6 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das WHG regelt allgemein den Schutz und die Nutzung von Oberflächengewässern und des Grundwassers und enthält Vorschriften über den Ausbau von Gewässern, die wasserwirtschaftliche Planung und den Hochwasserschutz. Zweck dieses Gesetzes ist es, durch eine nachhaltige Bewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen.

Das WHG enthält unter anderem Vorgaben zur landwirtschaftlichen Bodennutzung. Es wird darin zum Beispiel die landwirtschaftliche Nutzung von Gewässerrandstreifen (§ 38 WHG) eingeschränkt und die Ausweisung (§ 51 WHG Kap. 3 Abs. 1) und Nutzung (§ 52 WHG Kap. 3 Abs. 1) von Wasserschutzgebieten geregelt. Ebenso finden sich Regelungen zu Überschwemmungs- und Hochwasserentstehungsgebieten (§ 78 WHG Kap. 3 Abs. 6) sowie zum Wasserabfluss und zur Abwasserbeseitigung, die im Kontext dieser Studie jeweils als relevant einzuordnen sind.

§ 37 WHG Abs. 1 besagt, dass der natürliche Ablauf wild abfließenden Wassers auf ein tiefer liegendes Grundstück nicht zum Nachteil eines höher liegenden Grundstücks behindert werden darf. Ebenso darf dieser nicht zum Nachteil eines tiefer gelegenen Grundstücks verstärkt oder auf andere Weise verändert werden. Treten solche Hindernisse dennoch auf, ist deren Beseitigung oder Veränderung durch die Eigentümer sowie Nutzungsberechtigten der benachteiligten Grundstücke zu dulden (§ 37 WHG Abs. 2). Dabei gilt § 37 WHG Abs. 1 nur, soweit die zur Duldung Verpflichteten die Behinderung, Verstärkung oder sonstige Veränderung des Wasserabflusses nicht zu vertreten haben und die Beseitigung vorher angekündigt wurde. Außerdem steht es dem Eigentümer des Grundstücks zu, auf dem das Hindernis oder die Veränderung entstanden ist, das Hindernis oder die eingetretene Veränderung auf seine Kosten selbst zu beseitigen. Gemäß § 37 WHG Abs. 3 kann die zuständige Behörde aus Gründen des Wohls der Allgemeinheit Abweichungen von den § 37 WHG Abs. 1 und 2 zulassen. Falls es dabei zu einer unzumutbaren Beschränkung des Eigentums kommt, steht dem Besitzer eine Entschädigung zu.

§ 54 WHG definiert Abwasser unter anderem durch landwirtschaftlichen Gebrauch in seinen Eigenschaften verändertes Wasser (Abs. 1 Satz 1 Nr. 1) sowie Niederschlagswasser (Abs. 1 Satz 1 Nr. 2). Gemäß § 55 WHG ist Abwasser so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird (Absatz 1). Zudem soll Niederschlagswasser ortsnah versickert, verrieselt oder direkt über die

Kanalisation ohne Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden (Absatz 2). Bei Überflutungen infolge von Starkregenereignissen ist das sogenannte wild abfließende Wasser oder Außengebietswasser, solange es nicht gesammelt oder gefasst wird und in eine Kanalisation eintritt, allerdings kein Abwasser gemäß § 54 WHG (Bund-/Ländergemeinschaft Wasser (LAWA), 2018).

§ 78d Abs. 2 Satz 1 WHG ermächtigt die Bundesländer dazu, Kriterien für Hochwasserentstehungsgebiete festzulegen, auf deren Grundlage Landesregierungen schließlich Hochwasserentstehungsgebiete durch eine Rechtsverordnung festsetzen können. Nach Abs. 2 sind bei der Definition der Kriterien „*im Rahmen der hydrologischen und topographischen Gegebenheiten insbesondere das Verhältnis Niederschlag zu Abfluss, die Bodeneigenschaften, die Hangneigung, die Siedlungsstruktur und die Landnutzung zu berücksichtigen.*“ Innerhalb dieser Hochwasserentstehungsgebiete besteht die Möglichkeit, Maßnahmen vorzuschreiben, die dem Erhalt und der Verbesserung des natürlichen Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögens dienen, um damit die Hochwassergefahr zu minimieren. Einige Maßnahmen sind im WHG bereits vorgegeben, wie z. B. die Entsiegelung von Böden oder die nachhaltige Aufforstung. Diese Maßnahmen werden in Sachsen, das von § 78d Abs. 2 Satz 1 WHG als bisher einziges Bundesland Gebrauch macht, umgesetzt. Außerdem sind laut § 78d Abs. 4 WHG in Hochwasserentstehungsgebieten Genehmigungsverfahren durch die Behörde für bestimmte Eingriffe vorgesehen, die das Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögen beeinflussen. Bei negativer Bewertung muss die Verschlechterung über Ausgleichsmaßnahmen kompensiert werden (§ 78d Abs. 5, Satz 2 WHG). Diese beinhalten in Sachsen technische Lösungen, Aufforstung, Umwandlung von Ackerland in Grünland, verpflichtende konservierende Bodenbearbeitung und die Wandlung von intensiv genutztem Grünland in extensiv genutztes Grünland.

Das WHG wird in den einzelnen Bundesländern mit den jeweiligen Landeswassergesetzen umgesetzt und konkretisiert. Dies ermöglicht den Landesregierungen, den rechtlichen Rahmen an die spezifischen lokalen Gegebenheiten anzupassen. Hiervon betroffen sind unter anderem Vorgaben zu Gewässerrandstreifen, zur Umwandlung von Grün- zu Ackerland, zu Risikoflächen und Wasserschutzgebieten sowie bezüglich der Hochwasservorsorge und -prävention, die sich in den Bundesländern teilweise unterscheiden.

Vorgaben zur Hochwasservorsorge und Prävention werden in den Wassergesetzen in Bayern und in Sachsen aufgeführt. In Bayern sollen der Staat und die Gemeinden zur Minderung von Hochwasser- und Dürregefahren im Rahmen ihrer Aufgaben auf den Erhalt oder die Wiederherstellung der Versickerungsfähigkeit von Böden, eine dezentrale Versickerung von Niederschlagswasser sowie Maßnahmen zur natürlichen Wasserrückhaltung und zur Wasserspeicherung hinwirken (§ 44 Abs. 6 BayWG). In Sachsen sind zuständige Behörden dazu aufgerufen, im Interesse des Hochwasserschutzes bei der Planung und der Ausführung bestimmter Vorhaben Möglichkeiten zum Erhalt bzw. zur Verbesserung des natürlichen Rückhaltevermögens zu berücksichtigen (§ 70 SächsWG). Außerdem sollen in Überschwemmungsgebieten die Versickerung verbessert und der Abfluss des Niederschlagswassers vermindert werden (§ 70 SächsWG).

Außerdem enthalten die Wassergesetze einiger Bundesländer (Bayern, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) spezifische Inhalte zu Überschwemmungsgebieten. Neben Nutzungsbeschränkungen werden teils auch spezifische Maßnahmen insbesondere zur Verminderung von Bodenabschwemmungen bzw. von Erosion genannt.

4.1.7 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)

Das BNatSchG definiert die Ziele und Grundsätze des Naturschutzes und der Landschaftspflege auf Bundesebene und stellt den Zusammenhang zum europäischen Naturschutzprogramm „Natura 2000“

her. In § 2 BNatSchG werden die Bürger aufgefordert, nach den jeweiligen *„[…] Möglichkeiten zur Verwirklichung der Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege bei(zu)tragen und sich so (zu) verhalten, dass Natur und Landschaft nicht mehr als nach den Umständen unvermeidbar beeinträchtigt werden*“

Relevant für die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden sind insbesondere Abschnitte des § 5 BNatSchG Abs. 2. Diese besagen unter anderem, dass bei landwirtschaftlicher Nutzung neben den Anforderungen, die sich aus den für die Landwirtschaft geltenden Vorschriften und aus dem BBodSchG ergeben, die folgenden Grundsätze analog zur gfP des BBodSchG zu beachten sind:

d) Grundsatz 1 BNatSchG: die Bewirtschaftung muss standortangepasst erfolgen und die nachhaltige Bodenfruchtbarkeit und langfristige Nutzbarkeit der Flächen muss gewährleistet werden;
e) Grundsatz 5 BNatSchG: auf erosionsgefährdeten Hängen, in Überschwemmungsgebieten, auf Standorten mit hohem Grundwasserstand sowie auf Moorstandorten ist ein Grünlandumbruch zu unterlassen.

4.1.8 Flurbereinigungsgesetz (FlurbG)

Konkrete Möglichkeiten zur Minimierung des Hochwasserrisikos bieten sich zusätzlich über Verfahren zur Flurbereinigung, die im FlurbG festgelegt sind. Der Zweck eines solchen Verfahrens liegt hierbei üblicherweise in einer Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft sowie in der Förderung einer allgemeinen Landeskultur und der Landentwicklung. Außerdem kann ein Verfahren zur Flurbereinigung die Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen, Aufforstung, Ausgleichsmaßnahmen oder anderweitige Nutzung von Stilllegungsflächen zum Ziel haben. Im Saarland zum Beispiel stehen laut Landesamt für Vermessung, Geoinformatik und Landentwicklung die Ziele des Natur- und Umweltschutzes gleichrangig neben den Zielen der Verbesserung der Arbeits- und Produktionsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft (Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung, 2018). Gemäß FlurbG liegt die Zuständigkeit zur Durchführung eines Flurbereinigungsverfahrens bei den zuständigen unteren Flurbereinigungsbehörden der Landkreise.

Die Flurbereinigung wird in einem behördlich geleiteten Verfahren innerhalb eines bestimmten Gebietes (Flurbereinigungsgebiet) unter Mitwirkung der Gesamtheit der beteiligten Grundeigentümer und der Träger öffentlicher Belange sowie der landwirtschaftlichen Berufsvertretung durchgeführt (§ 109 FlurbG).

Flurneuordnungen können in unterschiedlichen Arten durchgeführt werden:

- **Regelflurbereinigung**: Standardfall einer Flurneuordnung, worin umfassende Lösungen und Hilfen bei der Erhaltung, Gestaltung und Entwicklung der Wirtschafts-, Wohn- und Erholungsfunktion der ländlichen Räume gesucht werden. Realisierbare Maßnahmen stellen unter anderem jene der Wasserwirtschaft, des Boden- und Naturschutzes dar. Der Vorteil liegt in der zeitlichen und räumlichen Konzentration aller Maßnahmen zur Erreichung agrar-, umwelt- und raumordnungspolitischer Ziele.
- **Unternehmensflurneuordnung**: Unternehmensflurneuordnungen werden angeordnet, wenn durch Großbaumaßnahmen ländliche Grundstücke in großem Umfang in Anspruch genommen werden.

- **Vereinfachte Flurbereinigung:** Vereinfachte Flurneuordnungsverfahren werden angeordnet, um Maßnahmen der Landentwicklung, insbesondere Maßnahmen der Agrarstrukturverbesserung, des Umweltschutzes, der naturnahen Entwicklung von Gewässern, des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu ermöglichen oder auszuführen. Die Vereinfachung liegt darin, dass von der Aufstellung eines Planes über die gemeinschaftlichen und öffentlichen Anlagen abgesehen werden kann.
- **Beschleunigte Zusammenlegungen:** Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur raschen Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft oder zur Durchführung notwendiger Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege, ohne dass größere Maßnahmen im Rahmen der ländlichen Entwicklung erforderlich sind. Die Zusammenlegung erfolgt nach Möglichkeit durch Tausch ganzer Grundstücke und wird in der Regel vereinbart.
- **Freiwilliger Landtausch:** Beim freiwilligen Landtausch werden Grundstücke zwischen Grundstückseigentümern freiwillig getauscht. Meist wird dieses Verfahren angewandt, um eine Besitzzersplitterung zu beheben.

4.2 Bewertung der wichtigsten Gesetze und Verordnungen

4.2.1 Vorgehensweise bei der Bewertung der Gesetze und Verordnungen

Für die Bewertung der Gesetze und Verordnungen wurden insbesondere der spezifische Themenbezug, das Vorhandensein von Ermächtigungsgrundlagen und Anordnungsbefugnissen, die Umsetzung in der Praxis sowie Möglichkeiten zur Sanktionierung geprüft.

Dazu wurden relevante Publikationen und Literaturstellen ausgewertet und Experten aus Behörden und Wissenschaft um deren Einschätzung zur Wirksamkeit der genannten rechtlichen Grundlagen gebeten, woraus zusätzliche Erkenntnisse generiert werden konnten (s. Fragebogenaktion und Experteninterviews).

Bei der Bewertung der rechtlichen Grundlagen wurde zwischen:

- **informatorischer Wirksamkeit** (Verankerung des Vermittlungsauftrags),
- **regulatorischer Wirksamkeit** (ordnungsrechtliche Folgen bei Nicht-Einhaltung), sowie
- **finanzieller Wirksamkeit** (Sanktionen oder Geldbußen bei Nicht-Einhaltung) unterschieden.

Die relevanten Gesetze und Verordnungen werden in der Folge im Einzelnen analysiert.

4.2.2 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)

Beim BBodSchG ist zunächst das Subsidiaritätsprinzip hervorzuheben, welches dazu führt, dass es in vielen Fällen nicht zur Anwendung kommt und dadurch dessen Wirksamkeit einschränkt.

Generell hat die Umsetzung der Vorgaben der gfP konkrete Auswirkungen auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden. Allerdings werden diese Aspekte bislang nicht explizit im Gesetzestext benannt, was die direkte Berücksichtigung dieser zwei Aspekte in der Beratung einschränkt. Außerdem sind die Vorgaben der gfP recht unspezifisch, was auch von vielen Fachexperten im Zuge der durchgeführten Umfrage sowie den Experteninterviews bemängelt wurde. Dies ist allerdings auch darauf zurückzuführen, dass es sich hier um ein Bundesgesetz handelt, welches die unterschiedlichen Gegebenheiten in den einzelnen Bundesländern und Gebieten nicht berücksichtigen kann. Um gezielt die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher

Flächen zu verbessern, müssten standortspezifische Aspekte mitberücksichtigt werden, die nicht auf Bundesebene festgelegt werden können.

Für eine fachliche Unterlegung der gfP sowie des Bodenschutzrechtes im Allgemeinen gibt es bereits mehrere Papiere, Arbeitshilfen und Leitfäden auf unterschiedlichen Ebenen, die allerdings in den meisten Bundesländern nicht bindend sind. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat speziell eine Broschüre erarbeitet, welche die gfP konkretisiert, wobei es auch in diesem Fall den zuständigen Behörden überlassen ist, deren Vorgaben an die Landwirte zu vermitteln. Da die Vorgaben in diesen Publikationen nicht rechtlich bindend sind, wird deren Wirksamkeit als limitiert erachtet. In solchen Broschüren bestünde die Möglichkeit, auch länder- und standortspezifische Aspekte mitaufzunehmen und zu berücksichtigen, um so konkretere Maßnahmen zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden vorzugeben.

Bezüglich Anordnungen zur Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen ist hervorzuheben, dass diese erst getroffen werden dürfen, wenn Anforderungen in einer Rechtsverordnung nach § 8 Abs. 2 BBodSchG festgelegt sind, was bislang nur das Überschreiten von Schadstoffgehalten, Stoffeinträgen und deren Richtwerte betrifft, nicht aber das Vorliegen einer sonstigen schädlichen Bodenveränderung. Wären solche Anforderungen festgelegt und widerspräche ein Vorgehen der guten fachlichen Praxis nach § 17 BBodSchG, stünde einer Durchsetzung von Anforderungen allerdings nichts entgegen. Daraus ergäbe sich eine wichtige Ermächtigungsgrundlage, die jedoch momentan nicht angewendet wird.

Die Öffnungsklausel in § 21 BBodSchG zum Erlass ergänzender Verfahrensregelungen durch die Bundesländer beschränkt sich auf Anpassungen zur Ausführung des Zweiten und Dritten Teils des BBodSchG, womit die gfP (Vierter Teil) davon ausgenommen ist. Dadurch haben die Bundesländer nicht direkt die Möglichkeit Vorgaben der gfP anzupassen.

Generell fehlen im BBodSchG ordnungsrechtliche Absicherungen bei Missachtung der Vorgaben zur guten fachlichen Praxis, sodass Umsetzungsdefizite kaum justiziabel nachweisbar und verfolgbar sind. Außerdem sind im Bundesgesetz keine bodenschutzrechtlichen Kontrollinstrumente verankert. Allerdings wird mittlerweile bei durch Wassererosion entstandenen off-site Schäden geprüft, ob Flächenbewirtschafter die Grundsätze der guten fachlichen Praxis eingehalten haben.

Die Wirkung des BBodSchG beschränkt sich in seiner momentanen Anwendung auf eine informatorische Wirksamkeit, die sich aus dem Vermittlungsauftrag für die nach Landesrecht zuständigen landwirtschaftlichen Beratungsstellen ergibt. Dadurch soll die Erfüllung des Vorsorgeprinzips nach § 7 BBodSchG gewährleistet werden.

Die Wirksamkeit des BBodSchG kann über relativ geringe Anpassungen bzw. Erweiterungen, die in den Handlungsoptionen beschrieben werden, erhöht werden.

4.2.3 Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV)

Über die Ermächtigung in § 8 BBodSchV können die lokalen Beratungsstellen der Landwirtschaftsbehörden geeignete erosionsmindernde Maßnahmen für landwirtschaftliche Erosionsflächen vorschlagen, die dann mittels Anordnung verpflichtend umzusetzen sind. Hieraus ergibt sich eine klare regulatorische Wirksamkeit.

Dabei steht im Gegensatz zu den durch Schadstoffe verursachten schädlichen Bodenveränderungen nicht eine frühere Belastung mit anschließender Sanierung im Vordergrund, sondern die Prognose eines Wiederholungsrisikos sowie die Abwehr der daraus entstehenden Gefahr für das Eintreten einer schädlichen Bodenveränderung. Hieraus ergibt sich, dass nicht ausschließlich zurückliegende Ereignisse (wie im Fall von Altlasten) entscheidend dafür sind, ob zukünftig Maßnahmen ergriffen werden

können. Es bietet sich die Möglichkeit gemäß § 4 Abs. 2 BBodSchG auch Maßnahmen zur Abwehr von drohenden schädlichen Bodenveränderungen anzuordnen. Dadurch wird der Einfluss von der Nachsorge bei ausreichendem Verdacht auch auf die Vorsorge erweitert, wodurch sich die Wirksamkeit der BBodSchV zur Erosionsvermeidung erhöht. Somit können auch vor dem Auftreten schädlicher Bodenveränderungen Maßnahmen angeordnet werden, um den Bodenschutz in bestimmten Gebieten zu verbessern (Tenholtern & Feldwisch, 2019).

Zur Gefährdungsabschätzung und Gefahrenabwehr im Zusammenhang mit Bodenerosion durch Wasser hat der Bundesverband Boden (BVB) e.V. in Zusammenarbeit mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) das Merkblatt „*Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion*[10]“ veröffentlicht. Die LABO sieht das Merkblatt als eine fachlich geeignete Grundlage für den Vollzug des Bodenschutzrechts im Bereich der Gefahrenabwehr bei schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Wassererosion an. Das Merkblatt wird in Schleswig-Holstein zur Anwendung empfohlen (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2006).

Ein Defizit der BBodSchV ist die Beschränkung des § 8 BBodSchV auf die Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser. Die weiteren Vorgaben zu schädlichen Bodenveränderungen (§ 9 BBodSchV) beziehen sich auf Schadstoffgehalte im Boden und entsprechende Anreicherungen; § 17 BBodSchG ist davon unberührt.

4.2.4 Cross-Compliance gemäß AgrarZahlVerpflG und AgrarZahlVerpflV

Durch die Einführung der Cross Compliance wurde die Möglichkeit geschaffen, im Fall der Missachtung oder unzureichender Umsetzung europäischer Bestimmungen zur Reglementierung der landwirtschaftlichen Produktion Geldstrafen gegen die Mitgliedsstaaten zu verhängen. Gleichzeitig wurden die Exekutivkompetenzen der EU in den Mitgliedsstaaten ausgedehnt, denn bis dahin waren die Überwachungs- und Sanktionsmöglichkeiten der EU-Kommission auf Berichtspflichten und aufwendige Vertragsverletzungsverfahren beschränkt. Daraus ergibt sich, dass Cross Compliance im Allgemeinen hauptsächlich an die Behörden der einzelnen Mitgliedsstaaten gerichtet ist und weniger an die Landwirte selbst. Eine Bewertung der Effizienz und Effektivität der Cross Compliance ist laut Henschke (2011)[11] allerdings schwierig, da Kontrollen nicht erfasst werden, Kontrollstatistiken unvollständig sind (da sie nur die Ergebnisse der systematischen Kontrollen enthalten, nicht aber die der anlassbezogenen Kontrollen) und Wiederholungsverstöße nicht ausgewiesen werden.

Grundsätzlich bietet das Agrarrecht gute Möglichkeiten für eine Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden, insbesondere durch die Anpassung der GLÖZ-Mindestanforderungen bzw. der sogenannten Konditionalität. Basierend auf dem oben beschriebenen Konzept der Cross Compliance wird hierbei der Erhalt von flächenbezogenen Direktzahlungen an die Umsetzung gewisser Mindestanforderungen bezüglich der Betriebsführung und den Erhalt von Flächen in gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand gebunden. Die aktuellen, wie auch die für die kommende Periode bisher vorgesehenen Maßnahmen sind allerdings nicht weitreichend genug und reichen nicht an die Vorgaben aus der gfP heran. Beispielhaft zeigt dies die Anforderung an den Erhalt der organischen Substanz im Boden, welche momentan mit dem Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern als erfüllt gilt. Dies ist jedoch keine Gewähr für den Erhalt der organischen Sub-

[10] https://www.bvboden.de/publikationen/bvb-merkblatt

[11] https://www.kritischer-agrarbericht.de/fileadmin/Daten-KAB/KAB-2011/Henschke.pdf

stanz im Boden und entspricht auch in keiner Weise der landwirtschaftlichen Praxis. Es fehlen konkrete Vorgaben, um eine Verschlechterung des Gehalts an organischer Substanz, auch in Bezug auf die Wasseraufnahmefähigkeit, zu verhindern ist.

Generell könnten hier konkretere Maßnahmen zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden aufgenommen werden. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche würden sich Maßnahmen eignen, welche die Bodenbedeckung, das Bodenleben (Entstehung von Makroporen) und den Erhalt an organischer Substanz fördern.

Unabhängig von der Bewertung der GLÖZ ergibt sich durch die Verbindung von Umweltauflagen mit Ausgleichszahlungen eine finanzielle Wirksamkeit, die nicht zuletzt aufgrund der strukturellen Entwicklungen in der Landwirtschaft einen wichtigen Hebel darstellt. Die generelle Umsetzung dieser Vorgaben in der Praxis wurde von den befragten Experten als gut eingeschätzt, wobei es sich bei diesen wie oben erwähnt nur um Mindestanforderungen handelt. Die betrieblichen CC-Kontrollen stellen ein probates Mittel für die Prüfung der Umsetzung dar, sind allerdings nicht flächendeckend auf allen Betrieben in jährlichen Zyklen möglich. Auch die bestehenden Sanktionen (bei fahrlässigen Verstößen 1-5 % Kürzung der Direktzahlungen und der Zahlungen für flächen- und tierbezogene Fördermaßnahmen; bei vorsätzlichen Verstößen Kürzung von 20 % bis zu 100 % der Förderungen), üben einen gewissen Druck auf die Landwirte aus, sodass die Umsetzung dadurch forciert werden kann. Allerdings müssten dazu die Kontrolle erheblich ausgedehnt und nicht nur auf die formale Erfüllung der Dokumentationspflichten, sondern stärker auf die Kontrollen im Feld ausgedehnt werden.

Grundsätzlich steht die Gemeinsame Agrarpolitik bei unterschiedlichen Institutionen immer wieder in der Kritik. Der BUND schreibt auf seiner Website im gleichnamigen Artikel unter anderem über „*Lasche Mindestanforderungen und Förderung nach Flächenstärke*“. Zwischen 2014 und 2020 fließen 6,1 Milliarden Euro an Fördergeldern nach Deutschland (rund 40 % des Gesamtbudgets), wobei die flächengebundenen Direktzahlungen mit rund 4,8 Milliarden Euro den größten Anteil ausmachen. Dadurch profitieren besonders Großbetriebe, wohingegen Landwirte mit weniger Fläche immer häufiger dem Konkurrenzkampf, forciert durch eben jene stark subventionierten Großbetriebe, zum Opfer fallen (BUND, 2019). Über die Verschiebung der Mittel in die Zweite Säule könnten Beiträge stärker mit ökologischen Anforderungen verknüpft werden, unter anderem auch im Bereich der Wasseraufnahmefähigkeit und Speicherkapazität. Aufgrund unzureichender Vorgaben können nämlich hingegen indirekte Kosten entstehen (z. B. durch erhöhte Nitratgehalte im Grundwasser, Bodenverlusten etc.), die letztlich wieder dem Steuerzahler zur Last fallen.

In einem Positionspapier des Deutschen Naturschutzringes (DNR) zum EU-Budget nach 2020 wird auf die Pflicht verwiesen, im Rahmen der mehrjährigen Finanzplanung 2021 die Chance zu nutzen, zielbewusst und zukunftsorientiert die finanziellen Weichen für eine nachhaltige Entwicklung zu stellen. Konkret wird eine genaue Prüfung der Ausgaben hinsichtlich der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen und den Verpflichtungen des Klimaschutzabkommens von Paris gefordert. Daraus ergibt sich nicht zuletzt, dass die Förderung von Maßnahmen, die der Umwelt, der Gesundheit sowie dem Klima schaden, eingestellt werden muss. Dafür braucht der EU-Haushalt wiederum eine an seine Auswirkungen orientierte umfassende Evaluierung (DNR, 2017). Auch in diesem Kontext könnte das Thema der Wasseraufnahmefähigkeit stärkere Berücksichtigung finden als dies bisher der Fall ist.

Aus einer von der Europäischen Kommission beauftragten Studie über „Relevanz, Effektivität, Effizienz, Kohärenz und EU-weiten Nutzwert der Klimaschutzaktivitäten wesentlicher GAP-Maßnahmen“ geht hervor, dass die Landwirtschaft dank der Unterstützung durch die GAP ihre Betriebsweise angepasst und es geschafft hat, einerseits das europäische Modell des bäuerlichen Familienbetriebs zu erhalten und potenziell schädliche Flächenstilllegungen in ländlichen Gebieten zu verhindern. Unabhängig von den dort dokumentierten Erfolgen wird jedoch die Stärkung des Klimaschutzgedankens in der GAP weiterhin empfohlen (Alliance Environment, 2018).

Da die GAP der Europäischen Union weitgehend auf EU-Ebene erarbeitet wird, ist die Einflussnahme des Bundes und der Länder auf die Ausgestaltung dieser Regelungen nur über die Vertretungen in den EU-Institutionen möglich. Möglich wäre dies über die sogenannten Strategiepläne, welche in Zukunft von den Mitgliedsstaaten jährlich erarbeitet werden müssen. Außerdem sind Überarbeitungen der GAP jeweils nur in den vorgesehenen Zyklen möglich (alle 5–7Jahre).

4.2.5 Greening-Maßnahmen gemäß DirektZahlDurchfV

Das Konzept des Greenings ist grundsätzlich als effektives Instrument für die stärkere Integration von Umweltbelangen in der Landwirtschaft zu bewerten, da auch hier über finanzielle Anreize eine Erfüllung von Zusatzleistungen für Natur und Umwelt erreicht wird. Da jeder Antragsteller für Direktzahlungen sich dem Greening verpflichten muss, werden die Maßnahmen weitreichend umgesetzt. In diesem Fall handelt es sich um eine weitreichende finanzielle Wirksamkeit.

Allerdings liegt der Fokus der bestehenden Auflagen primär auf der Verbesserung der Biodiversität, wodurch die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden nur begrenzt und vor allem nicht gezielt beeinflusst wird. Der Fokus auf die Bodenbedeckung wirkt sich hingegen positiv auf die projektrelevanten Aspekte aus. Betroffen sind von den Auflagen nur Betriebe mit einer Ackerfläche ab 15 ha, innerhalb derer wiederum lediglich 5 % der Gesamtfläche für die Umsetzung der Maßnahmen vorgehalten werden müssen. In jedem Fall beschränkt sich die Wirkung auf die Feldebene, da die Maßnahmen sowie deren Einordnung auf den betrieblichen Flächen von den Landwirten individuell umgesetzt werden und momentan keine Koordination zwischen den Landwirten eines Einzugsgebietes stattfindet.

Bezüglich der einzelnen Maßnahmen ist die Stilllegung (Brache) ökologisch besonders hochwertig eingestuft (Landwirtschaftskammer NRW, 2018), allerdings ist die Wirkung auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität des Bodens eher begrenzt. In der Praxis ist es sinnvoll, unwirtschaftliche Flächen stillzulegen, die im Betriebsdurchschnitt geringere Qualitäten aufweisen oder deren Zuschnitt nachteilig ist. Eine Begrünung mit Zwischenfrüchten trägt zur Bodenverbesserung und zum Bodenschutz bei, da die Bodenbedeckung erhöht wird. Dies ist auch bezüglich der Hochwasserprävention und Erosionsminderung als positiv zu bewerten.

Analog zur CC ist auch in diesem Fall die Einflussnahme des Bundes und der Länder auf eine Anpassung der ökologischen Zusatzleistungen aufgrund der Tatsache, dass es sich hier um EU-Vorgaben handelt, nur über die politischen Vertreter in Brüssel möglich.

4.2.6 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Über die Ermächtigungsgrundlage in § 37 WHG Abs. 3 kann vor dem Hintergrund möglicher Fremdwasserzuflüsse von landwirtschaftlichen Flächen theoretisch der Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet beeinflusst werden. Momentan wird über Kanalisierungen und eine gebündelte Ableitung des Abflusses, insbesondere über geräumte Wegseitengräben und Rohre, überschüssiges Wasser möglichst schnell abgeleitet. Dadurch wird die Versickerung auf der Fläche reduziert und die Abflussproblematik an anderer Stelle (auf darunterliegenden Flächen) u. U. sogar verschärft. In Abhängigkeit der betroffenen Flächen könnte es sich hier um öffentliches Interesse handeln; falls dies zutrifft steht mit § 37 WHG ein wirksames regulatorisches Instrument zur Verfügung, das es ermöglicht, kritische Abflüsse über die Beseitigung von Hindernissen oder weiteren Veränderungen zu beeinflussen. Laut Expertenaussagen wird davon bislang allerdings kaum Gebrauch gemacht.

§ 78d WHG bietet theoretisch eine wichtige rechtliche Grundlage für die Hochwasserprävention, da auf ausgewiesenen landwirtschaftlichen Flächen innerhalb von Hochwasserentstehungsgebieten das

natürliche Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögen von Böden mit gezielten Maßnahmen erhalten oder verbessert werden kann. Dies ermöglicht die Fokussierung auf besonders betroffene Gebiete. Insbesondere sind auch Maßnahmen wie Entsiegelung und Aufforstung vorgesehen, welche die Verbesserung der Wasserinfiltration und so die Vermeidung der Hochwasserentstehung positiv beeinflussen. In der jetzigen Form sind in § 78d WHG allerdings noch keine einheitlichen Kriterien zur Ermittlung der Hochwassergefahr definiert. Zudem ist es den Bundesländern überlassen, Nutzungsauflagen bzw. Einschränkungen zu bestimmen. Dazu können, wie zum Beispiel in Sachsen, Genehmigungsverfahren für bestimmte Vorhaben (Landnutzungsänderungen, Bautätigkeit gemäß § 76 SächsWG) innerhalb der betroffenen Gebiete gesetzlich vorgeschrieben werden. Demnach darf eine Genehmigung oder sonstige Zulassung nur erteilt werden, wenn nachgewiesen wird, dass das Wasserversickerungs- oder das Wasserrückhaltevermögen durch das Vorhaben nicht beeinträchtigt oder die Beeinträchtigung im Zuge des Vorhabens durch Maßnahmen wie das Anlegen von Wald, der Errichtung technischer Rückhalteeinrichtungen sowie der Einführung konservierender Bodenbearbeitung (Kompensationsmaßnahmen) im von dem Vorhaben betroffenen Hochwasserentstehungsgebiet angemessen ausgeglichen wird.

Aufgrund der Korrelation mit den Schutzzwecken aus dem Bereich Naturschutz muss es zu keinen Zielkonflikten im Fall von Gebietsüberschneidungen, z. B. mit Naturschutzgebieten kommen.

Bisher wurden allerdings nur in Sachsen Hochwasserentstehungsgebiete ausgewiesen und dabei Genehmigungsverfahren und Kompensationsmaßnahmen (Anlegen von Wald oder Errichtung technischer Rückhalteeinrichtungen) zum Erhalt des Wasserversickerungs- und Wasserrückhaltevermögen von Böden auferlegt. Die Gründe hierfür liegen laut Expertenaussagen im hohen bürokratischen Aufwand für die Identifizierung und Ausweisung der Hochwasserentstehungsgebiete und der Scheu vor Konfrontationen mit möglichen betroffenen Flächenbesitzern. Grundsätzlich gäbe es hier die Möglichkeit, in solchen Hochwasserentstehungsgebieten konkrete Maßnahmen zur verbesserten Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden vorzuschreiben.

Zwei Bundesländer (Bayern und Sachsen) haben in den Wassergesetzen zusätzliche Vorgaben zur Hochwasservorsorge und Prävention aufgeführt und die Länderbehörden dazu aufgefordert, diese Vorgaben hinsichtlich der Hochwasservorsorge zu berücksichtigen. Dies könnte analog auch in den Wassergesetzen der anderen Bundesländer aufgenommen werden. Allerdings beinhalten diese Vorgaben keine konkreten Pflichten, sondern nur eine allgemeine Aufforderung auf bestimmte Aspekte der Vorsorge zum Gewässerschutz hinzuwirken oder diese zu berücksichtigen. Dazu wäre ein Appell des Bundes an die Länder notwendig und die Bundesländer müssten von dem Sinn der Aufnahme bestimmter Vorgaben in ihren Wassergesetzen überzeugt werden. Andererseits könnte der Bund die Länder auffordern, bestimmte Kriterien zu erstellen, die zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität der Böden in Hochwasserentstehungsgebieten beitragen. Dies wird im Rahmen der Anpassung des § 78d WHG diskutiert.

4.2.7 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)

Das BNatSchG hat in der Praxis nur begrenzte Wirkung auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden, da sich dessen Einfluss auf geschützte Flächen beschränkt und dort die landwirtschaftliche Tätigkeit ohnehin eingeschränkt ist. Allerdings wirkt sich das Verbot des Grünlandumbruchs auf erosionsgefährdeten Hängen, in Überschwemmungsgebieten, auf Standorten mit hohem Grundwasserstand sowie auf Moorstandorten positiv auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität aus, woraus sich eine regulatorische Wirksamkeit ergibt.

4.2.8 Flurbereinigungsgesetz (FlurbG)

Innerhalb der Durchführung einer Flurbereinigung kann der Abfluss auf Einzugsgebietsebene über die Zuordnung der Felder zueinander, den gezielten Einsatz von Strukturelementen sowie die Einführung von Schlagobergrenzen beeinflusst werden. Außerdem ist eine gezielte Fokussierung auf besonders betroffene Gebiete möglich.

Eine Flurbereinigung wird von der Flurbereinigungsbehörde angeordnet, wobei der Erlass des Anordnungsbeschlusses einen Verwaltungsakt darstellt. Im Anordnungsbeschluss sind u. a. die vom Flurbereinigungsverfahren betroffenen Flurstücke, die Gründe und die Ziele des Verfahrens sowie die Stelle, bei der Widerspruch gegen die Anordnung des Flurbereinigungsverfahrens eingelegt werden kann, anzugeben. In Abhängigkeit von den Gründen für die Anordnung und den Zielen des jeweiligen Flurbereinigungsverfahrens können unterschiedliche Maßnahmen der ländlichen Entwicklung durchgeführt werden. Eine Flurbereinigung ist gemäß FlurbG dann erforderlich, wenn Verbesserungen der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft oder die Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen herbeizuführen sind. Außerdem muss das Interesse der Beteiligten gegeben sein (§ 4 FlurbG). Obwohl ein Antrag auf Flurbereinigung für die Anordnung ohne Belang ist, sollte aus Akzeptanzgründen ein solcher bei der zuständigen Oberen Flurbereinigungsbehörde gestellt werden (Partschefeld, 2019). Hierzu ist ein Flurbereinigungsausschuss aus Vertretern der Teilnehmergemeinschaft (Eigentümer und Beteiligte) zu gründen. Die Anforderungen müssen darauf von den zuständigen Behörden festgelegt und vom Flurbereinigungsgericht angenommen werden. Innerhalb dieser Anforderungen könnten gezielt Maßnahmen zur Steigerung der Infiltrationsleitung der Böden vorgegeben werden.

Bislang wurde die Flurbereinigung zumeist für eine Verbesserung der Agrarstruktur genutzt. Im Zuge der „Modernisierung der Agrarstruktur“ wurden unter anderem in Deutschland Strukturelemente entfernt und Schläge vergrößert, um eine flächeneffiziente Landnutzung zu ermöglichen. Dies hatte oftmals negative Auswirkungen auf den Wasserhaushalt (Entstehung von konzentrierteren Abflüssen), die Biodiversität und die Resilienz einer Landschaft zur Folge. Die Flurbereinigung könnte aber wie unter anderem von Dr. Uwe Lüs in seinem Vortrag „*Bodenschutzvollzug oder Bodenentzug*“ im Zuge der Jahrestagung des Bundesverbandes Boden 2018 (Lüs, 2018) beschrieben auch zur Verbesserung des Wasserhaushalts und der Erosionsvermeidung eingesetzt werden.

Das Flurbereinigungsgesetz bietet somit theoretisch ein Werkzeug, um den Hochwasserschutz auf Feld- und Einzugsgebietsebene zu verbessern. In der bisherigen Anwendung ist die Wirksamkeit allerdings mit Blick auf eine verbesserte Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität zur Hochwasserprävention landwirtschaftlicher Böden begrenzt und oftmals kontraproduktiv. Nachteilig bei Flurbereinigungsverfahren ist, dass diese erfahrungsgemäß sehr lange, oftmals mehrere Jahrzehnte, dauern und aufgrund zahlreicher Interessenkonflikte innerhalt der Teilnehmergemeinschaft nur bedingt gezielte Maßnahmen zum Umwelt- und Naturschutz beinhalten. Zudem sind solche Verfahren mit hohen Kosten verbunden.

4.2.9 Schlussfolgerung

Auf Europäischer Ebene werden mit der Gemeinsamen Agrarpolitik die Rahmenbedingungen für die Landwirte in den einzelnen Mitgliedsstaaten vorgegeben. Durch die Verknüpfung von verbindlichen Vorgaben mit finanziellen Hebeln entsteht dabei eine gewisse Wirksamkeit bezüglich ökologischer Belange. Allerdings sind die Gelder nur teilweise an Vorgaben geknüpft (GLÖZ sowie Greening), die zudem nicht weitreichend genug sind, auch wenn Aspekte, welche die Wasseraufnahmefähigkeit und -

speicherkapazität indirekt beeinflussen, angesprochen werden. Allgemein wird von vielen Seiten Kritik an den flächengebundenen Direktzahlungen für Landwirten geübt, weil dadurch Geld für gezielte Förderung an anderer Stelle fehlt.

Über deutschlandweite Regelungen in den beschriebenen Rechtsbereichen bezüglich der Vorsorge wie auch der Gefahrenabwehr kann die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität der Böden nur eingeschränkt verbessert werden, was unter anderem an den unterschiedlichen landwirtschaftlichen und klimatischen Gegebenheiten innerhalb Deutschlands liegt, die jeweils Berücksichtigung finden müssen.

Generell bieten die vorhandenen deutschen wie auch europäischen rechtlichen Grundlagen bereits einige Möglichkeiten zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden, die aber teils zu unpräzise sind, in ihrer momentanen Auslegung nicht umgesetzt werden oder nicht kontrollierbar sind. Außerdem sind nicht in allen Fällen ordnungsrechtliche Befugnisse verankert, was die Anordnung von Maßnahmen für die zuständigen Behörden erschwert. Sanktionen sind nur in wenigen Fällen vorgesehen. So gibt es im BBodSchG zwar Vorgaben, die auch die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität beeinflussen, allerdings wird dieser Aspekt nicht direkt angesprochen. Andere Parameter sind sehr variabel und hängen teils auch von abiotischen Faktoren ab (z. B. Humusgehalt), sodass einheitliche Zielsetzungen und Kontrollen nicht möglich sind.

Von der Möglichkeit, Anordnungen zu erlassen, wird derzeit in der Praxis kaum Gebrauch gemacht. Schädliche Bodenveränderungen gemäß BBodSchV werden hauptsächlich über Vereinbarungen mit der zuständigen Landwirtschaftsbehörde geregelt. Die Vereinbarungen enthalten klare Vorgaben darüber, was im Sinne der Gefahrenabwehr auf bestimmten Flächen zu tun ist, wobei die Nachsorge stärker im Fokus steht als die Vorsorge. Deshalb wird Nachuntersuchungen eine größere Bedeutung zugesprochen als vorsorgenden Maßnahmen, die über die bisherige gfP hinausgehen.

Bei der Festlegung von Maßnahmen, die zur Gefahrenabwehr an bestimmten Standorten durchgeführt werden sollen, müssen diese exakt bestimmt werden, um die größtmögliche Wirksamkeit und Sicherheit zu erreichen, da sich nach Durchführen der angeordneten Maßnahmen der Schaden nicht wiederholen sollte.

Zusätzlich zur verbesserten Verankerung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität der Böden in den gesetzlichen Grundlagen wurde im Rahmen der Expertengespräche und des Fachgesprächs erwähnt, dass das Problembewusstsein bezüglich Bodenschutz und Sturzfluten bei der Bevölkerung sowie der Interessensaustausch der wichtigsten Interessensvertreter erhöht werden sollte.

Grundsätzlich kommt der landwirtschaftlichen Offizialberatung eine große Bedeutung zu, da diese zuständig für die Vermittlung der gfP ist und damit auch für die Einhaltung des Vorsorgeprinzips verantwortlich ist. Dabei ging aus den Expertenbefragungen hervor, dass konkrete Anschauungsbeispiele das Verständnis der Landwirte gegenüber komplexen Themen verbessern könnte.

4.3 Handlungsoptionen

Aus der Bewertung der relevanten rechtlichen Grundlagen lassen sich einige Handlungsoptionen ableiten. Diese sind nachfolgend aufgeführt.

4.3.1 Anpassung bzw. Erweiterung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und der Bundes-Bodenschutzverordnung

Innerhalb des Bodenschutzrechts konnten im Zuge dieser Studie mehrere Handlungsoptionen abgeleitet werden, die in der Folge beschrieben werden.

4.3.1.1 Konkretisierung der guten fachlichen Praxis in § 17 BBodSchG

Eine Option zur Verbesserung der Infiltrationsleistung landwirtschaftlicher Böden ist die Konkretisierung der gfP im BBodSchG. Da für eine gezielte Verbesserung der Infiltrationsleistung länder- und standortspezifische Aspekte eine große Rolle spielen, wird allerdings von einer Konkretisierung der einzelnen Punkte der gfP auf Bundesebene im BBodSchG abgeraten.

Vielmehr wird empfohlen, die Umsetzung der gfP in einem Länder-übergreifenden Leitfaden oder Länder-spezifischen Leitfäden zu konkretisieren. Dieser sollte spezifische Vorgaben für unterschiedliche Standorte, Kulturen und Klimata enthalten, die mit jeweils geeigneten Maßnahmen verknüpft werden könnten. Dadurch würde einerseits das Thema der Prävention von Sturzfluten aufgrund von Starkregenereignissen stärker in der Beratung verankert und es können Kriterien festgelegt werden, anhand derer die Einhaltung der gfP oder weiterer Vorgaben besser kontrolliert werden können. Der Bund könnte den Bundesländern den Auftrag geben, die Kriterien der gfP unter Berücksichtigung der Standortspezifika zu konkretisieren. Dies kann in Form eines verbindlichen Leitfadens erfolgen, da dieser die beste Möglichkeit bietet, Standortspezifika mit aufzunehmen. Der Auftrag des Bundes an die Bundesländer kann in § 17 Abs.1 BBodSchG formuliert werden, was ggf. mit einer Anpassung des § 21 (1) BBodSchG einhergehen würde.

Zur Umsetzung dieser Option müssten der Bund und die Bundesländer aktiv werden, da es sich bei dem BBodSchG um ein Bundesgesetz handelt, die Bundesländer ihre Landesgesetze aber auch anpassen müssten. Zusätzlich müssen bestehende Leitfäden überprüft und aktualisiert werden.

Zudem sollten bereits auf Bundesebene im BBodSchG oder der BBodSchV die Ermächtigungsgrundlage für die Länder enthalten sein, Verstöße gegen die gfP entsprechend sanktionieren zu können. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass Sanktionierungen nur sinnvoll sind, sofern klare, bestenfalls quantifizierbare Vorgaben im Gesetz verankert sind. Nur dann kann eine Nicht-Einhaltung auch entsprechend nachgewiesen und somit sanktioniert werden.

4.3.1.2 Ergänzung des § 17 Abs. 2 BBodSchG

Eine andere Option besteht in der Aufnahme von Zielformulierungen hinsichtlich der Wasseraufnahmefähigkeit und der Speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden in § 17 BBodSchG.

Hierzu könnte § 17 Abs. 2 BBodSchG um einen Punkt Nr. 8 wie folgt ergänzt werden:

> *„(2) … Zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis [der landwirtschaftlichen Bodennutzung] gehört insbesondere, dass*
>
> *…*
>
> *8. die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität des Bodens erhalten oder mit gezielten Maßnahmen verbessert wird.“*

Durch diese Ergänzung finden diese Aspekte gezielteren Eingang in die Vermittlung der gfP durch die landwirtschaftliche Offizialberatung, wodurch sie auch bei den Landwirten verstärkt berücksichtigt werden. Somit würde sich die informatorische Wirksamkeit der gfP erhöhen. Ordnungsrechtlich hätte diese Anpassung nur Auswirkungen, wenn sie bei Nichteinhaltung entsprechend sanktioniert werden kann.

Zuständig für die Umsetzung dieser Option wäre der Bund, da es sich beim BBodSchG um ein Bundesgesetz handelt.

4.3.1.3 Ergänzung des § 17 Abs. 3 BBodSchG

Wie in der Beschreibung des Bodenschutzrechtes bereits erwähnt, sind Vorsorgeanordnungen unzulässig, da solche nach § 7 Satz 4 BBodSchG nur getroffen werden können soweit Anforderungen in einer Rechtsverordnung nach § 8 Abs. 2 BBodSchG festgelegt sind, was bislang nicht der Fall ist.

Eine Möglichkeit dies zu ändern bestünde darin, im Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung ausdrücklich die Anordnung von Vorsorgemaßnahmen zum Hochwasserschutz für zulässig zu erklären. Eine entsprechende Ergänzung könnte in § 17 BBodSchG erfolgen, indem als neuer § 17 Abs. 4 folgender Absatz aufgenommen würde:

> *„(4) Maßnahmen, die der Entstehung von Bodenerosion und Sturzfluten entgegenwirken, können unter der Voraussetzung des § 7 Satz 4 angeordnet werden.“*

Mit dieser Ergänzung hätten die zuständigen Behörden die Möglichkeit, Vorsorgemaßnahmen anzuordnen. Dadurch würde eine Grundlage geschaffen, Verbesserungen in der Prävention von Sturzfluten herbeizuführen. Dies wäre vor allem für besonders betroffene Gebiete (u. a. Hochwasserentstehungsgebiete und Starkregengefährdungsgebiete) sinnvoll.

Die Umsetzung dieser Ergänzung würde eine Gesetzesänderung auf Bundesebene voraussetzen.

4.3.1.4 Konkretisierung des § 8 BBodSchV auf Länderebene

Eine weitere Option, die auch zur verbesserten Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden beitragen kann, ist die Einführung des BVB-Merkblattes Band 1 „Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion“[12] per Erlass auf Länderebene. Das BVB-Merkblatt untersetzt § 8 BBodSchV zur Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser. Es enthält Informationen zur Vorgehensweise bei der Felduntersuchung (Erfassung von Anhaltspunkten, Feststellung der Erosionsfläche, Beurteilung von Onsite- und Offsite-Schäden), zur Bestimmung der aktuellen Erosionsgefährdung und zur Ableitung geeigneter Maßnahmen der Gefahrenabwehr. Das BVB-Merkblatt bietet den zuständigen Bodenschutzbehörden und landwirtschaftlichen Beratungsstellen Informationen und Handlungsoptionen, die neben einem verbesserten Erosionsschutz auch zur verbesserten Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität und landwirtschaftlicher Böden beitragen können. In den Bundesländern Sachsen und Schleswig-Holstein ist es bereits per Erlass eingeführt worden. In den restlichen Bundesländern hat dieses Merkblatt in der jetzigen Form keine Rechtswirksamkeit.

Anhand der Beispiele aus Sachsen und Schleswig-Holstein könnten andere Bundesländer analog dazu das BVB-Merkblatt zur Gefahrenabwehr per Erlass einführen.

Zusätzlich könnte in der Neufassung der BBodSchV im Rahmen der Mantelverordnung[13], welche sich momentan in Ausarbeitung befindet, auf die 2017 überarbeitete DIN 19708:2005-02 („*Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG*“)[14] Bezug genommen werden. Diese trägt zu einer vereinheitlichten Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden

---

[12] Das BVB-Merkblatt kann beim Bundesverband Boden e.V. (www.bvboden.de) bezogen werden.

[13] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, derzeit als Referentenentwurf vorliegend unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/mantelv_vorblatt_begruendung.pdf (09.04.2019)

[14] Zu erhalten über den Beuth Verlag (https://www.beuth.de/de/norm/din-19708/76824121)

bei, wodurch das Verfahren auch optimiert werden kann. Dabei wird festgehalten, dass diese Maßnahmen nicht primär auf verbesserte Wasseraufnahmevermögen und -speicherkapazität und abzielen, durchaus aber dazu beitragen, diese zu verbessern.

Für die Umsetzung dieser Option müsste der Gesetzgeber auf Bundesebene aktiv werden.

4.3.2 Verschärfung der Cross-Compliance und Ausweitung des Greening

4.3.2.1 Anpassung der GLÖZ-Mindestanforderungen

Eine weitere Anpassungsmöglichkeit für die Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität bietet sich bei der Ausgestaltung und nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik, unter anderem durch eine Überarbeitung der GLÖZ-Mindestanforderungen. Damit könnten konkretere und weitreichendere Vorgaben für Landwirte verpflichtend umsetzbar gemacht werden.

Die Erarbeitung der Mindestanforderungen war bislang primär der EU-Kommission überlassen. Zwar konnten Interessenverbände, Mitgliedsstaaten und zuletzt auch Privatpersonen im Zuge einer öffentlichen Konsultierung Vorschläge unterbreiten, letztlich lag die Entscheidungshoheit doch bei der EU-Kommission.

Im Zuge der GAP-Reform 2020 wurde nun allerdings der Vorschlag gemacht, von jedem Mitgliedstaat die Erarbeitung und Vorlage eines GAP-Strategieplans für beide Säulen zu verlangen. Die EU-Kommission will viele Festlegungen über Maßnahmen, Kontrollen und Sanktionen nicht mehr auf EU-Ebene im Detail treffen, sondern dies zukünftig den Mitgliedstaaten überlassen. Die EU-Kommission schlägt basierend auf drei allgemeinen Zielen je drei wirtschaftliche, ökologische und soziale Ziele vor. Die Mitgliedsstaaten sollen darauf aufbauend neun Ziele verfolgen, wobei für den Bodenschutz das Ziel „*Förderung der nachhaltigen Entwicklung und der effizienten Ressourcen wie Wasser, Böden und Luft*“ unmittelbaren Bezug zum Bodenschutz nimmt. Zwei weitere Ziele – „*Beitrag zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel*“ und „*Beitrag zum Schutz der Biodiversität, Verbesserung von Ökosystemleistungen und Erhaltung von Lebensräumen und Landschaften*“ – lassen einen mittelbaren Bezug zum Bodenschutz erkennen. Jedem GAP-Strategieplan geht eine Bedürfnis- und SWOT-Analyse voraus (BUND, 2019). Dies würde die Einflussmöglichkeiten des Bundes und der Länder auf die Mitgestaltung der Vorgaben im Vergleich zur jetzigen Situation deutlich erhöhen.

Durch die finanzielle Wirksamkeit der GAP auf die Landwirte wäre der Einfluss hier sehr bedeutend. Durch die Vorschläge zu den Strategieplänen und föderalen Gestaltungsmöglichkeiten kann auch die Einflussnahme erhöht werden. Dadurch liegt es an der Bundesregierung bzw. dem Landwirtschaftsministerium, in diesem Bereich verstärkt aktiv zu werden. Nicht zuletzt deshalb wird diesem Bereich hohes Potential für eine Verbesserung der Vorsorge gegen Bodenerosion und Sturzfluten gesehen.

4.3.2.2 Anpassung des Greenings

Die Anpassung des Greenings bietet ebenso eine valide Option, um die Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden innerhalb der Europäischen Agrarpolitik stärker zu berücksichtigen.

Dafür müsste allerdings der momentane starke Fokus auf Biodiversität gelockert werden. Konkret bieten sich zwei Möglichkeiten:

- Ergänzung von Maßnahmen, welche die Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden direkt forcieren.
- Einführung multifunktionaler Maßnahmen

Eine Ergänzung von Maßnahmen setzt voraus, dass man sich innerhalb der diversen Gremien auf EU-Ebene einigt, welche konkreten Maßnahmen die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden am effektivsten verbessern und zudem relativ einfach umsetzbar sind. Hier böte die Integration der wirksamsten AUKM wie in Kapitel 5 beschrieben eine Möglichkeit. Da hierdurch Fördergelder für die Landwirte verloren gingen, dürfte die Akzeptanz für einen solchen Schritt allerdings gering sein.

Über die Einführung multifunktionaler Maßnahmen könnten Ziele beispielsweise sowohl aus Sicht des Bodenschutzes und der Vermeidung von Sturzfluten als auch bezüglich des Erhalts der Biodiversität mit ein und derselben Maßnahmen erreicht werden. Dies könnte zum Beispiel konkret mit Vorgaben zur Ausrichtung und Positionierung von Blühstreifen oder Brachflächen bzw. einer generell besseren Abstimmung der einzelnen Maßnahmen zwischen den Betrieben erreicht werden. Der Aufwand hierfür wäre vermutlich geringer als vollkommen neue Auflagen zu definieren und zu verabschieden, allerdings ist dies mit einem gewissen Planungsaufwand verbunden und müsste schließlich auch kontrolliert werden. Grundsätzlich könnte über solche multifunktionalen Maßnahmen eine Erweiterung der Betrachtung von der Feldebene auf die Einzugsgebietsebene, und damit einige Verbesserungen insbesondere bezüglich des Abflusses, erreicht werden. Dies gilt für das gesamte Förderinstrumentarium, welches in Kapitel 5 beleuchtet wird.

Durch eine Erhöhung des Anteils an ökologischen Vorrangflächen in Bezug auf die Gesamtbetriebsfläche könnten größere Flächen für Schutzmaßnahmen genutzt und dadurch deren Wirksamkeit erhöht werden. Ebenso könnten die Maßnahmen auch für kleinere Betriebe verpflichtend gemacht werden.

Allgemein wäre hinsichtlich der effektiveren Umsetzung von Leistungen für Umwelt- und Klimaschutz eine stärkere Kopplung der Subventionen an den Erhalt des ökologisch guten Zustandes notwendig, da momentan ein großer Teil in Form von rein flächenbezogenen Direktzahlungen ausgeschüttet wird. Durch eine Beschränkung dieser rein flächenbezogenen Direktzahlungen bliebe mehr Budget für die Schaffung von Anreizen zur vermehrten Umsetzung von Umweltauflagen in der zweiten Säule der GAP.

Vorstellbar wäre zudem die Umsetzung auf EU-Ebene des in den Legislativvorschlägen vorgestellte „Delivery-Modells“ (Umsetzungsmodell), das verglichen mit der derzeitigen Situation eine Kompetenzverlagerung von der EU hin zu den einzelnen Mitgliedsstaaten vorsieht. Dadurch läge der Fokus für die EU auf der Formulierung von Zielen und der Definition der Rahmenbedingungen. Die Ausgestaltung der konkreten Maßnahmen könnten hingegen den Mitgliedsstaaten überlassen werden. Die erhofften Verbesserungen fänden sich in einer Vereinfachung der GAP sowie einer stärkeren Ergebnisorientierung und einer Steigerung von Wirksamkeit und Effizienz hinsichtlich der Ziele der GAP (Birkenstock & Röder, 2018).

4.3.3 Anpassungen im Wasserrecht

4.3.3.1 Anpassung des § 78d zu Hochwasserentstehungsgebieten

Um die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität in besonders betroffenen Gebieten zu verbessern, eignet sich § 78d WHG, der es den Bundesländern ermöglicht, Hochwasserentstehungsgebiete auszuweisen. Eine Option besteht darin, Abs. 2 § 78d WHG abzuändern, so dass die Bundesländer, die derzeit laut Abs. 2 Kriterien für das Vorliegen von Hochwasserentstehungsgebieten festlegen können, diese in Zukunft festlegen und die ermittelten Hochwasserentstehungsgebiete ausweisen *müssen*. Sachsen hat diesbezüglich einen Ansatz wie auch Kriterien zur Festsetzung von Hochwasserentstehungsgebieten definiert, mit deren Hilfe sich die Abflussbereitschaft über die folgenden Parameter berechnen lässt: Boden, Geologie, Hangneigung, Landnutzung, Gewässernetz, Höhenlage, und Häufigkeit von Starkniederschlägen, die Abflussbereitschaft (Landesdirektion Sachsen, 2014).

Methodisch könnte die Festsetzung der sogenannten Gebietskulisse erfolgen, indem die Gesamtheit der Einflussfaktoren in einem Wert je Flächeneinheit (100 x 100 m) ausgedrückt wird. Bei Überschreitung eines Schwellenwertes wird die betroffene Fläche als Hochwasserentstehungsgebiet klassifiziert, woraus sich eine Sammlung geometrischer Flächen ergibt. Die Abgrenzung des konkreten Hochwasserschutzgebietes erfolgt dann in Anpassung an die Flurstücke unter Beachtung fachlicher und rechtlicher Gesichtspunkte. Abweichungen von ±10 % von der Gebietskulisse wären hierbei tolerierbar (Seidler & Kändler, 2012).

Alternativ könnten die Kriterien zur Ermittlung von Hochwasserentstehungsgebieten im WHG vorgeschrieben werden. Allerdings wird hier laut Expertenaussagen mit einer geringeren Akzeptanz der Länderbehörden aufgrund der föderalen Struktur in Deutschland gerechnet. Basierend auf der Ermittlung der Hochwasserentstehungsgebiete ergäbe sich eine bundesweite Karte von potentiell hochwassergefährdeten Gebieten, welche durch die zuständigen Länderregierungen verpflichtend ausgewiesen werden müssten.

Innerhalb der ausgewiesenen Gebiete müssten die Länderregierungen schließlich in ihrem Ermessen Auflagen und Maßnahmen festlegen, mit denen die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden verbessert wird. Neben Genehmigungsverfahren inklusive Kompensationsmaßnahmen für bestimmte Vorhaben, welche die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität tendenziell verschlechtern könnten, wurden im Zuge der Expertenbefragungen folgende Maßnahmen genannt:

- Schlaggrößenobergrenzen
- Bodenbearbeitung nur bei geeigneter Bodenfeuchte
- Erhalt von Strukturelementen
- Anpassung der Schlagformen in Abhängigkeit der Abflussbahnen
- Mehrjährige Kulturen besonders in Hanglagen
- Umwandlung von Ackerland in Grünland

Da die zuständigen Länderregierungen bisher nur sehr begrenzt aktiv geworden sind, stellt die Anpassung des WHG hin zu einer verpflichtenden bundesweiten Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten eine Option bzw. Grundlage für eine verbesserte Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden dar. Die genaue Festsetzung der Kriterien und Maßnahmen sollten den Länderregierungen überlassen werden. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu erhöhen, könnten entsprechende Sanktionen bei Nichteinhaltung bzw. Nichtumsetzung der Vorgaben vorgesehen werden. Allerdings bedarf dies im besten Fall quantitativer Zielvorgaben, die bei einem so komplexen Thema teilweise nur schwer zu definieren sind.

4.3.4 Weitere Handlungsoptionen

4.3.4.1 Flurbereinigungsgesetz

Das Flurbereinigungsgesetz bietet in seiner jetzigen Form die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Flächen. Die oberen Flurbehörden müssten dazu Anordnungen zur Flurbereinigung bestimmen und geeignete Anforderungen festlegen, die gezielt Maßnahmen zur Verbesserung Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität enthalten.

Damit kann der Wasserabfluss auf Ebene des Einzugsgebietes geregelt werden, was aus Sicht des Hochwasserschutzes eine wichtige Ergänzung zu Maßnahmen auf der Feldebene bedeutet.

4.4 Fazit

Basierend auf der Beschreibung und anschließender Bewertung der wichtigsten rechtlichen Grundlagen im Bereich Bodenschutz und im Besonderen bezüglich der Prävention von Sturzfluten konnten mit den Handlungsoptionen Verbesserungen der jetzigen Situation präsentiert werden. Teilweise sind die notwendigen Ermächtigungsgrundlagen bereits vorhanden und müssen nur besser umgesetzt werden (Erosionsschutz über BBodSchV, Einführung von Hochwasserentstehungsgebieten gemäß § 78d WHG sowie Flurbereinigungen gemäß FlurbG). In anderen Fällen sind kleinere Anpassungen notwendig, um die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden zu verbessern (gute fachliche Praxis gemäß § 17 BBodSchG, bzw. Agrarrecht inklusive Cross-Compliance und Konditionalität). Alle vorgeschlagenen Optionen haben einen Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität landwirtschaftlicher Böden, wobei nicht bei allen Vorschlägen diese Faktoren auch primär im Fokus stehen. Manche der Optionen könnten gleichzeitig umgesetzt werden, wobei sich die Einflüsse insbesondere in bestimmten Gebieten überschneiden könnten. Die Empfehlungen des Projektteams werden in der nachfolgenden Übersicht zusammengefasst.

Empfehlungen an politische und Verwaltungsinstitutionen zur Verbesserung der Wasserinfiltration

1. Bundesweite Erfassung von Hochwasserentstehungsgebieten und Verankerung einer Umsetzungspflicht durch die Länderregierungen im § 78d WHG.
2. Konkretisierung der gfP gemäß § 17 BBodSchG mit Hilfe verbindlich anzuwendender Leitfäden.
3. Ergänzung des § 17 Abs. 2 BBodSchG um einen Punkt, der die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität konkret benennt, um diese Aspekte dadurch stärker in den Fokus der landwirtschaftlichen Offizialberatung rückt.
4. Ergänzung von § 17 Abs. 3 BBodSchG um einen zusätzlichen Absatz, der die Anordnung von Maßnahmen erlaubt, welche der Entstehung von Bodenerosion und Sturzfluten entgegenwirken.
5. Anpassung der Mindestanforderungen für den Erhalt von Direktzahlungen (Cross-Compliance) sowie eine Erweiterung des Greenings um zusätzliche bzw. multifunktionale Maßnahmen, welche die Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität von Böden fördern.

5 Bewertung des Förderinstrumentariums zur Verbesserung der Wasserinfiltration und zur Vermeidung von Bodenabtrag

5.1 Vorgehensweise und Inhalte der Recherche von Agrarfördermaßnahmen

Um Maßnahmen zu fördern, die über die gute fachliche Praxis und die Anforderungen des Greenings hinausgehen, haben alle Bundesländer Agrarförderprogramme (Agrarumweltprogramme) aufgelegt. Diese verfolgen in der Regel Natur- und Umweltschutzziele und gewähren Antragstellern eine meist flächenbezogene Zuwendung, wenn sie die vorgegebenen Auflagen erfüllen. Für die Auswertung der Agrarfördermaßnahmen wurden die Verwaltungsvorschriften bzw. Richtlinien zu den Agrarumweltmaßnahmen (AUM) aller Bundesländer mit Ausnahme der Stadtstaaten (Hamburg und Berlin; Bremen wird immer zusammen mit Niedersachsen betrachtet) recherchiert. Der berücksichtigte Zeitraum war dabei die aktuelle (2014–2020) sowie die vergangene (2007–2013) Förderperiode. In Fällen, in denen die Richtlinien für die vergangene Förderperiode nicht mehr verfügbar waren, wurde auf eine Auswertung von Thomas et al. (2009) für das Bundesamt für Naturschutz (BfN) zurückgegriffen, welche die damaligen Agrarumweltprogramme der Länder analysiert. Zusätzlich wurden teilweise noch die Maßnahmensteckbriefe aus Übersichten der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE 2010 und 2017) verwendet. Ergänzend zu den AUM-Förderrichtlinien wurde nach Programmen zum Vertragsnaturschutz und Hochwasserschutz gesucht und die Recherche mit weiteren relevanten Förderprogrammen z. B. zur Fließgewässerentwicklung oder zur Anlage von Hecken und Feldgehölzen erweitert. Im Folgenden werden die angebotenen flächenbezogenen Maßnahmen aus den verschiedenen Richtlinien unter dem Begriff „Agrarfördermaßnahmen“ zusammengefasst. Nicht in diese Kategorie fallen Projektförderungen ohne definierte Maßnahmen, wie sie vor allem in Hochwasserschutzprogrammen häufig sind.

Bei der Suche nach projektrelevanten Agrarfördermaßnahmen wurden nachfolgende Maßnahmen berücksichtigt, bei denen davon auszugehen ist, dass diese einen positiven Effekt auf die Wasserinfiltration und Vermeidung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag haben:

- Erosionsschutzmaßnahmen
- bodenschonende Maßnahmen
- bodenbedeckende Maßnahmen
- Moorschutzmaßnahmen
- Nutzungsextensivierung
- Ökologischer Landbau
- Vielfalt der Kulturen

Anschließend erfolgte eine Einzelüberprüfung, ob die maßnahmen- und bundeslandspezifischen Förderbedingungen eine positive Wirkung der Maßnahme auf Wasserinfiltration und/oder Oberflächenabfluss erwarten lassen. Für jede als projektrelevant eingestufte Maßnahme wurden in einer Excel-Übersicht die Inhalte sowie allgemeine und maßnahmenspezifische Fördervoraussetzungen und die Höhe der Zuwendung erfasst. Abschließend erfolgte mithilfe der Erkenntnisse aus Kapitel 4 eine Bewertung der Maßnahmen im Hinblick auf die Projektziele und eine Einteilung in drei Wirkungsgruppen:

- Maßnahmen mit direkter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss
- Maßnahmen mit indirekter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss
- Maßnahmen mit fraglicher Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss

Nachfolgend werden die projektrelevanten Agrarfördermaßnahmen mit ihren jeweiligen Wirkungen auf die Infiltration und / oder den Abfluss vorgestellt und bewertet.

5.2 Vorstellung der projektrelevanten Maßnahmen

Es wurden insgesamt 18 projektrelevante Agrarfördermaßnahmen identifiziert[15]. Davon haben zehn eine direkte, drei eine indirekte und fünf eine fragliche Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss. Diese werden im folgenden Kapitel einzeln mit ihren Inhalten, der Verbreitung in den Bundesländern sowie den Förderzeiträumen vorgestellt. Als Jahresdaten sind die Eckdaten der jeweiligen Förderperioden (vergangene Förderperiode 2007–2013 und aktuelle Förderperiode 2014–2020) angegeben. Dadurch entsteht eine bessere Übersichtlichkeit, da die Programme der Bundesländer innerhalb der Förderperioden zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Kraft getreten sind (z. B. traten die Programme der Förderperiode 2014–2020 zwischen 2015 und 2017 in Kraft) und die Maßnahmen in der Regel mindestens fünf Jahre verpflichtend durchgeführt werden müssen.

5.2.1 Maßnahmen mit direkter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss

Die folgenden Agrarfördermaßnahmen haben nach fachgutachterlicher Einschätzung und den Ergebnissen der Literaturrecherche aus Kapitel 1 eine direkte positive Wirkung auf die Wasserinfiltration und/oder den Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich genutzten Flächen:

Winterbegrünung mit Zwischenfrüchten bzw. Untersaaten

Inhalte: Begrünung der Fläche mit Zwischenfruchtmischung nach Ernte der Hauptfrucht (in Niedersachsen/Bremen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen auch Untersaat in die Haupt-frucht möglich). Beibehalten des Aufwuchses je nach Land bis 15.1., 31.1., 15.2 oder 1.3. Keine Düngung oder Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erlaubt. Teilweise Beschränkung auf bestimmte Förderkulissen (z. B. WRRL- oder Trinkwassergewinnungsgebiete).

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Bodengefüges und der Wasserinfiltration

Bundesländer:

- 2007–2013: Brandenburg.
- seit 2007: Bayern, Hessen, Niedersachsen/Bremen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen
- seit 2014: Baden-Württemberg (vorher nur Herbstbegrünung bis mindestens 31.11.), Mecklenburg-Vorpommern (vorher nur in Kombination mit Mulch-/Direktsaat)

Gewässerschutzstreifen

Inhalte: 5–30 m breiter Grünstreifen entlang von Oberflächengewässern am Feldblockrand. Meist begrenzt auf bestimmte Förderkulisse. Nutzung zulässig oder Förderbedingung. Düngen verboten. Fläche muss über gesamte Förderperiode erhalten bleiben.

15 Für Thüringen wurde die Maßnahme „betrieblicher Erosionsschutz“, welche die Einzelmaßnahmen gewässerschonende, optimierte Fruchtfolge bzw. Anbauverlagerung; Zwischenfruchtanbau bzw. Untersaaten; Mulchsaat; Strip-Tillage; Direktsaat; Maisengsaat; Schlagteilungen (Hanglängenverkürzung, Feldblock-Teilung); Grünstreifen quer zum Hang (Hanglängenverkürzung); Begrünung von Tiefenlinien und Gewässerrandstreifen enthält, auf die einzelnen Maßnahmen aufgeteilt.

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Bodengefüges und der Wasserinfiltration, Abflussbremsung

Bundesländer:

- seit 2007: Bayern, Niedersachsen/Bremen (seit 2007 Fließgewässerentwicklung, seit 2014 im Agrarumweltprogramm), Nordrhein-Westfalen, Thüringen
- seit 2014: Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz

Erosionsschutzstreifen

Inhalte: 5–30 m breiter Grünstreifen quer zur Hangneigung sowie in Tiefenlinien am Rand eines Feldblocks oder diesen teilend. Meist begrenzt auf bestimmte Förderkulisse. Nutzung zulässig oder Förderbedingung. Düngung verboten. Fläche muss über gesamte Förderperiode erhalten bleiben.

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Bodengefüges und der Wasserinfiltration, Abflussbremsung

Bundesländer:

- seit 2007: Bayern, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen
- seit 2014: Hessen, Niedersachsen/Bremen, Thüringen

Mulch- oder Direktsaat

Inhalte: Saat der Hauptkultur direkt in den Mulch oder Bestand der Vor- bzw. Zwischenfrucht. Keine wendende Bodenbearbeitung. Förderung teilweise nur in bestimmten Kulissen z. B. Überschwemmungsgebiete, erosionsgefährdete Flächen [CC1 und CC2]).

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Bodengefüges und der Wasserinfiltration

Bundesländer:

- 2007–2013: Baden-Württemberg (jetzt Strip-Till), Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen/Bremen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland
- seit 2007: Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen

Umwandlung von Ackerland in (extensives) Grünland

Inhalte: Nutzung von Ackerland als extensives Grünland (ohne Pflanzenschutzmittel, oft eingeschränkte Düngung) durch Einsaat von standorttypischen Grünlandmischungen. Erhalt des Grünlandes min. für fünf Jahre (Verpflichtungszeitraum), in dieser Zeit keine wendende Bodenbearbeitung. Teilweise nur in bestimmten Gebietskulissen (z. B. an Gewässer angrenzende Flächen, Überschwemmungsgebiete) möglich.

Bewertung: Erosionsschutz, Ausbildung eines stabilen Bodengefüges, Abflussbremsung

Bundesländer:

- 2007–2013: Niedersachsen/Bremen, Sachsen, Sachsen-Anhalt
- seit 2007: Bayern, Rheinland-Pfalz, Thüringen
- seit 2014: Baden-Württemberg (Landschaftspflegerichtlinie), Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen (Vertragsnaturschutz)

Mehrjährige Blühstreifen und -flächen sowie Ackerrand- und Schonstreifen

Inhalte: Ansaat von Blüh-, Ackerrand- oder Schonstreifen bzw. Blühflächen auf Ackerflächen mit vorgegebenen Saatgutmischungen (bis Mitte Mai des ersten Verpflichtungsjahres). Streifenbreite meist zwischen 5 und 30 m; max. Flächengröße pro Betrieb oder Schlag vorgegeben (min. 0,1 bis max. 2 ha pro Schlag bzw. bis max. 10 ha pro Betrieb). Keine Düngung oder Pflanzenschutzmittel erlaubt. Erhalt für fünf Jahre auf derselben Fläche. Nutzung oder Mulchen nur teilweise erlaubt.

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Bodengefüges und der Wasserinfiltration, Abflussbremsung

Bundesländer:

- 2007–2013: Schleswig-Holstein
- seit 2007: Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen/Bremen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt, Thüringen
- seit 2014: Brandenburg (Vertragsnaturschutz), Saarland, Sachsen

Naturschutzgerechte Bewirtschaftung von Mooren und Feuchtgrünland bzw. hohe Stauhaltung auf Moorflächen

Inhalte: Minimierung der Bodenverdichtung durch extensive, moorschonende Bewirtschaftung und Anwendung bodenschonender Verfahren. Duldung zeitweiser Überflutung. Brandenburg: hohe Stauhaltung (Wasserstand ganzjährig min. 1 dm unter Flur).

Bewertung: Erhalt des Bodengefüges, hohe Stauhaltung: Erhalt des Torfkörpers mit seinen wasserspeichernden Eigenschaften bewirkt Verzögerung des Gebietsabflusses.

Bundesländer:

- seit 2007: Mecklenburg-Vorpommern (zuerst Vertragsnaturschutz, dann AUKM)
- seit 2014: Brandenburg

Mehrjährige Flächenstilllegung bzw. selbstbegrünte mehrjährige Brache

Inhalte: Mehrjährige Stilllegung von Ackerflächen nach geeigneter Bepflanzung, Einsaat, sonstiger Begrünung oder Pflege. Keine Bodenbearbeitungen, Meliorationsmaßnahmen oder Nutzungen, die Umweltschutzbelangen oder dem Erhalt des natürlichen Lebensraums entgegenstehen, erlaubt. Förderkulisse WRRL und Überschwemmungsflächen.

Bewertung: Erosionsschutz, Erhalt des Bodengefüges, Abflussbremsung

Bundesländer:

- 2007–2013: Saarland, Thüringen
- seit 2014: Sachsen

Reduzierte Bodenbearbeitung mit Strip-Till

Inhalte: Einsaat/Pflanzen der Hauptfrucht nach Streifenbearbeitung, keine weitere Grundbodenbearbeitung. Teilweise auf bestimmte Förderkulissen beschränkt.

Bewertung: Erosionsschutz, Erhalt des Bodengefüges

Bundesländer: seit 2014 in Baden-Württemberg, Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen

Brach- oder Grünstreifen auf Ackerland

Inhalte: Ortsfeste Grün- oder Brachstreifen auf Ackerland (Breite 6–50 m bzw. 0,3–5 ha). Einsaat mit Ackerfutter (Grünstreifen), kräuterreichen Ansaatmischungen, Kulturartenmischung oder Selbstbegrünung (Brachestreifen). Nutzung durch Mahd min. alle zwei Jahre. Keine Düngung oder Pflanzenschutzmittel erlaubt.

Bewertung: Erosionsschutz, Verbesserung des Porensystems, Abflussbremsung

Bundesländer: seit 2007 in Sachsen

5.2.2 Maßnahmen mit indirekter Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss

Die folgenden Agrarfördermaßnahmen haben nach fachgutachterlicher Einschätzung eine indirekte Wirkung auf die Verbesserung der Wasserinfiltration und/oder die Vermeidung bzw. Verminderung von Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich genutzten Flächen:

Ökologischer Landbau

Inhalte: Einführung oder Beibehaltung des ökologischen Landbaus nach EU-Öko-Verordnung im gesamten Betrieb. Vertrag mit einer anerkannten Öko-Kontrollstelle und jährliche Vorlage eines Öko-Kontrollberichts. Teilweise Vorgabe eines Mindesttierbesatzes pro ha (für viehhaltende Betriebe). Niedersachsen/Bremen: Zusatzförderung für Ökolandbau in WRRL- und Trinkwassergewinnungsgebieten.

Bewertung: Verbesserung des Bodengefüges durch Kleegrasanbau und erhöhten Eintrag von organischer Substanz

Bundesländer: seit 2007 in allen Bundesländern

Struktur- und Landschaftselemente/Hecken

Inhalte: Anlage und Pflege von beihilfefähigen (CC1 und CC2) Struktur- und Landschaftselementen bzw. Hecken und Schutzpflanzungen auf landwirtschaftlichen Flächen (teilweise in Förderkulisse).

Bewertung: Erosionsschutz, Abflussbremsung

Bundesländer:

- 2007–2013: Thüringen
- seit 2014: Bayern, Niedersachsen/Bremen, Sachsen-Anhalt (Förderrichtlinie Hecken und Feldgehölze)

Vielfältige Kulturen im Ackerbau

Inhalte: Anbau von jährlich meist min. fünf verschiedenen Hauptkulturen auf der Ackerfläche des Betriebes: je Hauptfrucht mindestens 10 und maximal 30 % der Ackerfläche, Getreideanteil max. 66 % Flächenanteil; Leguminosen oft mit min. 10 % vorgegeben.

Bewertung: Verbesserung des Bodengefüges durch wechselnde Fruchtfolge und erhöhten Eintrag von organischer Substanz

Bundesländer:

- seit 2007: Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt
- seit 2014: Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen/Bremen Schleswig-Holstein

5.2.3 Maßnahmen mit fraglicher Wirkung auf Infiltration und/oder Abfluss

Die folgenden Maßnahmen wurden in den Katalog mit aufgenommen, obwohl eine Wirkung auf die Wasserinfiltration und/oder den Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich genutzten Flächen nach fachgutachterlicher Einschätzung fraglich ist und auch durch die weiteren Projektergebnisse nicht zu erwarten ist.

Jährliche Neuanlage von Blühstreifen und -flächen sowie Ackerrand- und Schonstreifen

Inhalte: Ansaat von Blüh-, Ackerrand- oder Schonstreifen auf Ackerflächen mit vorgegebenen Saatgutmischungen bis Mitte/Ende Mai. Keine Düngung oder Pflanzenschutzmittel erlaubt. Jährlicher Umbruch und Neuanlage (nicht flächengebunden). Teilweise Beschränkung auf zulässige Hauptkulturen oder Förderkulissen.

Bewertung: kann Erosionsschutz verbessern (Anlage quer zum Hang), durch jährliche Neuanlage und Flächenwechsel keine langfristigen Wirkungen auf den Boden

Bundesländer:

- 2007–13: Mecklenburg-Vorpommern
- seit 2007: Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Thüringen
- seit 2014: Bayern, Brandenburg (Vertragsnaturschutz), Hessen, Saarland

Extensive Grünlandbewirtschaftung

Inhalte: Extensive Nutzung von Grünlandflächen. Meist beschränkter Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Obergrenze für Tierbesatz. Umbruchverbot. Teilweise Beregnungs- und Meliorationsverbot, beschränkter Nutzungszeitraum oder Beschränkung auf bestimmte Kulissen.

Bewertung: verminderte Befahrungshäufigkeit kann Infiltration erhöhen (weniger Verdichtungen), höherer Bewuchs bremst eventuell den Abfluss

Bundesländer: seit 2007 in allen Bundesländern

Brach- oder Altgrasstreifen im Grünland

Inhalte: Ein- oder überjähriges Stehenlassen von Altgrasbeständen auf Teilflächen bzw. Nutzungsauflassung von Teilflächen (Pflegeschnitt alle zwei Jahre, sonst keine Nutzung oder Düngung erlaubt).

Bewertung: höherer Oberflächenrauigkeit bremst eventuell den Abfluss

Bundesländer:

- seit 2007: Sachsen
- seit 2014: Baden-Württemberg (Landschaftspflegerichtlinie)

Überwinternde Stoppel

Inhalte: Belassen der Ernterückstände und Stoppeln von Getreide, Hackfrüchten, Körnerleguminosen oder Ölfrüchten auf dem Schlag. Kein Anbau von Mais oder Hirse. Keine Düngung. Keine Pflanzenschutzmittel. Keine mechanische Bearbeitung jeweils nach der Ernte bis zum 15.02. des Folgejahres.

Bewertung: Erhalt des Bodengefüges über den Winter, Erosionsschutz über den Winter, sofern eine ausreichende Bodenbedeckung durch Ernterückstände gegeben ist

Bundesländer:

- seit 2007: Sachsen
- seit 2014: Nordrhein-Westfalen (Vertragsnaturschutz)

Verzicht auf Bodenbearbeitung nach Mais bzw. Raps

Inhalte: Keine Bodenbearbeitung nach Mais (bei Anbau einer nachfolgenden Sommerung) oder Raps (Umbruch Ausfallraps bei nachfolgender Winterung: ab 1.10., bei nachfolgender Sommerung ab 1.3.) in der Förderkulisse WRRL und Trinkwassergewinnungsgebiete.

Bewertung: Erhalt des Bodengefüges über den Winter (bei nachfolgender Sommerung), Erosionsschutz, sofern eine ausreichende Bodenbedeckung durch Ernterückstände und Ausfallraps gegeben ist

Bundesländer: seit 2007 in Niedersachsen/Bremen

5.2.4 Maßnahmen zum Hochwasserschutz

Auch Hochwasserschutzmaßnahmen können durch ELER[16]-Mittel gefördert werden. Viele Bundesländer haben bereits eine Richtlinie zum Hochwasserschutz entwickelt, zudem gibt es mehrere nationale Regelungen. Deshalb wurden im Zuge der Recherche nach Agrarförderprogrammen mit Bezug zur Wasseraufnahmefähigkeit von Böden auch die Hochwasserschutzprogramme nach projektrelevanten Inhalten durchsucht. Der Schwerpunkt der meisten Programme liegt aber deutlich auf der Errichtung und Unterhaltung von Bauwerken zum Hochwasserschutz bzw. der Gewinnung von Retentionsräumen (Deichrückverlegungen, Hochwasserrückhaltebecken). Zudem gibt es einige Programme für den nachsorgenden Hochwasserschutz, die Hilfen für die Beseitigung von Hochwasserschäden bereitstellen. Die Finanzierung erfolgt dabei als Projektförderung. Lediglich in Bayern und in Sachsen werden explizit Maßnahmen zur „Verbesserung des Boden- und Landschaftswasserhaushalts“ (Bayrische Richtlinien für Zuwendungen zu wasserwirtschaftlichen Vorhaben RZWas 2016) bzw. zur „Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltevermögens in Überschwemmungsgebieten sowie zur Entsiegelung von geeigneten Flächen in Hochwasserentstehungsgebieten“ (Sächsische Förderrichtlinie Gewässer/Hochwasserschutz RL GH 2018) angeboten. Diese beziehen sich zwar nicht nur auf landwirtschaftlich genutzte Flächen, haben aber als einzige den Bodenwasserhaushalt als Bezugspunkt. In Brandenburg gibt es in der Richtlinie Gewässerentwicklung/ Landschaftswasserhaushalt (RL GewEntw / LWH, 2019) zwar ebenfalls eine Förderung für „Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts in der Landschaft“, es werden aber nur Maßnahmen zur naturnahen Gewässerentwicklung und keine Maßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gefördert. Im Hochwasserschutz besteht demnach durchaus Potenzial, Maßnahmen außerhalb der Agrarförderung zu verankern und Synergien zu nutzen.

5.2.5 Gesamtübersicht über die projektrelevanten Maßnahmen

Aus allen als projektrelevant eingestuften Maßnahmen wurde anschließend eine Übersichtstabelle erstellt (s. Abbildung 29). In dieser sind die Maßnahmen nach direkter, indirekter und fraglicher Wirkung sortiert sowie den Bundesländern und Förderzeiträumen zugeordnet. Ökologischer Landbau und extensive Grünlandbewirtschaftung werden als einzige Maßnahmen kontinuierlich in allen Bundesländern über die untersuchten Förderzeiträume angeboten. Bei der Mulch- oder Direktsaat fällt auf, dass diese in der letzten Förderperiode noch in elf Bundesländern angeboten wurde, während es aktuell nur noch vier Bundesländer sind, die diese Art der Bodenbearbeitung fördern. Gründe für diese Veränderungen werden in den Kapiteln 5.3 und 5.4.1 erörtert.

[16] Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums

Abbildung 29: Übersicht über die projektrelevanten Agrarfördermaßnahmen und deren Verteilung auf Bundesländer und Förderzeiträume

	Bundesland → / Maßnahme ↓	BW	BY	BB	HE	MV	NI/HB	NW	RP	SL	SN	ST	SH	TH
direkte Wirkung	Winterbegrünung													
	Gewässerschutzstreifen													
	Erosionsschutzstreifen													
	Mulch-/ Direktsaat													
	Umwandlung AL in GL													
	mehrjährige Blühstreifen*													
	moorschonende Bewirtschaftung													
	mehrjährige Flächenstilllegung													
	Strip-Tillage													
	Brach- oder Grünstreifen auf Ackerland													
indirekte Wirkung	Ökologischer Landbau													
	vielfältige Kulturen im Ackerbau													
	Struktur- und Landschaftselemente													
fragliche Wirkung	jährlich neu angelegte Blühstreifen*													
	extensive GL-Bewirtschaftung													
	Altgrasstreifen im GL													
	überwinternde Stoppel													
	keine Bodenbearbeitung nach Mais/Raps													

* Blühstreifen, Blühflächen, Schon- und Ackerrandstreifen

Maßnahme gefördert von **2007 bis 2013** (letzte Förderperiode)
Maßnahme gefördert von **2007 bis 2020** (letzte + aktuelle Förderperiode)
Maßnahme gefördert von **2014 bis 2020** (aktuelle Förderperiode)

Quelle: eigene Darstellung, IfÖL GmbH

5.3 Bewertung der Maßnahmeneffektivität

Die Maßnahmeneffektivität wurde mithilfe folgender Kriterien bewertet:

- Reichweite: Anzahl der Bundesländer, die diese Maßnahme fördern (aufgeschlüsselt nach Förderperioden)
- Akzeptanz: Anzahl der geförderten Betriebe und Größe der geförderten Fläche (aufgeschlüsselt nach Förderperioden)
- Wirksamkeit: Fachgutachterliche Einschätzung der Wirkung auf Abfluss und Infiltration unter gegebenen Förderbedingungen sowie Bewertung der Stärke der Förderkriterien
- Risiko: Bewertung des Risikos, dass bei Durchführung der Maßnahme negative Effekte auftreten, die den Projektzielen entgegenwirken.

Die dafür benötigten Daten und einige Auswertungen zur Wirksamkeit der einzelnen Agrarumweltmaßnahmen finden sich in den Ex Post-Berichten der vergangenen Förderperiode sowie den jährlichen Durchführungsberichten der ELER-Länderprogramme. Bei den Durchführungsberichten wurden nur die jeweils letzten veröffentlichten Berichte (meist Bezugsjahr 2016) zu Rate gezogen, sodass auch die spät bewilligten Förderprogramme der neuen Förderperiode berücksichtigt werden konnten. Hinzu kam die Auswertung der im Projekt versandten Fragebögen, der Experteninterviews und der Übersichtsberichte zu ELER in Deutschland von der BLE (2010 und 2017). Da nicht alle Fragebögen

vollständig ausgefüllt wurden und in den Berichten nicht zu jeder Maßnahme konkrete Durchführungszahlen gelistet werden, bleibt die Datenbasis dennoch lückenhaft und die Bewertung eine überwiegend fachgutachterliche Abschätzung.

5.3.1 Breitenwirkung der ausgewählten Maßnahmen

Die am weitesten verbreiteten Maßnahmen sind die Förderung des Ökologischen Landbaus und der extensiven Grünlandbewirtschaftung – dies sind die einzigen Maßnahmen, die in allen Flächenbundesländern angeboten werden. Betrachtet man die Gesamtzahl der geförderten Betriebe zwischen 2007 und 2016, liegen diese beiden Maßnahmen ebenfalls vorne. Mit Beginn der neuen Förderperiode ist auch die Maßnahme Winterbegrünung (aktuell in allen Bundesländern außer Brandenburg gefördert) von vielen Betrieben angenommen worden. In der vergangenen Förderperiode (2007–2013) wurde hingegen die Mulch- und Direktsaat verbreitet gefördert. Da jedoch sieben von vormals elf Bundesländern diese Maßnahme nicht mehr anbieten, hat der Förderumfang stark abgenommen.

Maßnahmen, die viele Betriebe, aber keinen großen Flächenumfang erreichen, sind extensive Grünlandbewirtschaftung und Blühstreifen (ein- und mehrjährig). Es werden also pro Betrieb nur wenige und/oder nur kleine Flächen gefördert. Einen großen Flächenumfang bei wenigen Betrieben erreichten hingegen in der alten Förderperiode Mulch- und Direktsaat sowie in der neuen Förderperiode die Förderung von vielfältigen Kulturen im Ackerbau. Dies liegt zum einen daran, dass die Mulch- und Direktsaat vor allem bei den flächenstarken Betrieben in Sachsen und Sachsen-Anhalt weit verbreitet ist. Zum anderen wird bei den vielfältigen Kulturen die gesamte Ackerfläche eines Betriebes einberechnet, sodass hier ein großer Flächenumfang eingebracht werden kann.

Je geringer die Ansprüche an die Antragsteller sind, desto eher hat eine Fördermaßnahme eine große Verbreitung. So wurde z. B. der Maßnahmenkomplex extensive Grünlandbewirtschaftung in Baden-Württemberg von der letzten zur aktuellen Förderperiode mit höheren Ansprüchen an die Bewirtschaftung versehen und die Maßnahme mit den geringsten Ansprüchen ersatzlos gestrichen. Dadurch verringerte sich die geförderte Fläche erheblich (von ca. 310.000 ha in 2010 zu ca. 72.500 ha in 2016); man kann aber davon ausgehen, dass die Qualität und Wirksamkeit der Maßnahme gesteigert wurden. Auch bei der Änderung von einer viergliedrigen Fruchtfolge zu einer mindestens fünfgliedrigen (ebenfalls in Baden-Württemberg) nahm der geförderte Flächenumfang mit der Steigerung der Anforderungen stark ab (von ca. 358.600 ha in 2010 zu ca. 81.300 ha in 2016). Es ist davon auszugehen, dass dadurch auch Mitnahmeeffekte stark verringert wurden. Bei der Winterbegrünung ist zu beachten, dass weit mehr Zwischenfrüchte angebaut als in den AUM gefördert werden, da viele Betriebe sich ihre Zwischenfruchtflächen als ökologische Vorrangflächen (im Rahmen des sogenannten Greenings) anrechnen lassen oder diese als Gewässerschutzmaßnahme fördern lassen. Die gesamte Breitenwirkung dieser Maßnahme ist also deutlich größer als sich aus den vorliegenden Daten zu den AUM schließen lässt.

Die Verbreitung der Maßnahmen in den einzelnen Bundesländern ist in Abbildung 29 dargestellt. Zur Ermittlung der Betriebszahlen und des Umfangs der Förderflächen wurde auf Daten aus den Fragebögen sowie die Auswertungen in den ELER-Berichten zurückgegriffen. Außerdem fanden diese Eingang in die Wirksamkeitsbewertung der Maßnahmen (s. Abbildung 30).

5.3.2 Bewertung der Wirksamkeit

Mithilfe der Ergebnisse aus der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 3), den Auswertungen zur Wirksamkeit von Maßnahmen in den ELER-Berichten sowie den Ergebnissen aus der Maßnahmenrecherche, den Experteninterviews und den Fragebögen (Verbreitung der Maßnahmen, Förderbedingungen und -inhalte) erfolgte eine fachgutachterliche Einschätzung zur Wirksamkeit der Maßnahmen im Hinblick

auf die Projektziele. Dabei fand sich in den ELER-Berichten nicht immer eine Bewertung der Maßnahmeneffektivität in Bezug auf den Boden, da einige Bundesländer keine bodenbezogenen Ziele an die Agrarumweltmaßnahmen geknüpft haben und nur die Wirkbereiche bewertet wurden, zu denen explizite Ziele formuliert wurden. Auch kann von einer weiten Verbreitung einer Maßnahme nicht automatisch auf eine hohe Wirksamkeit geschlossen werden. So wurde z. B. Mulch- und Direktsaat in Baden-Württemberg als wenig wirksam eingestuft (und in der folgenden Förderperiode nicht mehr angeboten), obwohl sie weit verbreitet war. Für diese Maßnahme wurden hingegen hohe Mitnahmeeffekte ausgemacht, weil geringe Ansprüche an die Umsetzung gestellt wurden und die Maßnahme nicht auf eine bestimmte Kulisse, wie z. B. erosionsgefährdete Gebiete, beschränkt war.

Daher wurde die Wirksamkeit der Maßnahmen zunächst unabhängig von der Verbreitung in einer fünfstufigen Bewertungsskala im Hinblick auf Verbesserung der Infiltration und Verringerung des Oberflächenabflusses beurteilt (s. Abbildung 30). Dabei wurde von den derzeit geltenden Förderanforderungen ausgegangen; somit wurde die aktuelle und nicht die potentielle Wirksamkeit (die bei möglichst starken Förderkriterien entstehen würde) bewertet. Hinzu kam eine Analyse der Förderkriterien im Hinblick auf ihre Stärke: Je strenger die bodenbezogenen Auflagen der Maßnahmen sind, desto besser wird ihre Wirksamkeit bewertet. Auch die Reichweite der Maßnahmen nach Anzahl der Bundesländer sowie die Akzeptanz nach Größe der Förderfläche und Anzahl der geförderten Betriebe gingen in die Bewertungsmatrix ein (s. Abbildung 30). Schließlich wurden alle Faktoren nach der Höhe des maßnahmenbezogenen Risikos für den Bodenschutz gewichtet. Die Risiken wurden vor Erstellung der Matrix aufgelistet und ebenfalls mit einer Einstufung versehen. Daraus ergibt sich mithilfe folgender Formel eine Gesamtbewertung:

$$GMI = \frac{(R1 + R2 + A1 + A2) \times (W + S)}{Risiko} \qquad \text{Gl. 5-1}$$

GMI: Gesamtheitlicher Maßnahmenindex

R1: Reichweite des Maßnahmenangebots (Anzahl Bundesländer) Förderperiode 2014–2020

R2: Reichweite des Maßnahmenangebots (Anzahl Bundesländer) Förderperiode 2007–2013

A1: Akzeptanz (Anzahl der Betriebe, Größe Förderfläche) Förderperiode 2014–2020

A2: Akzeptanz (Anzahl der Betriebe, Größe Förderfläche) Förderperiode 2007–2013

W: Wirksamkeit (bei derzeitigen Förderkriterien)

S: Stärke der Förderkriterien im Hinblick auf Projektziele

Risiko: Bewertung des maßnahmenbezogenen Risikos im Hinblick auf den Bodenschutz

Die Ergebnisse der Gesamtbewertung wurden wiederum in eine fünfstufige Bewertungsskala übersetzt, sodass am Ende alle Maßnahmen eine Gesamtbewertungsstufe erhalten und verglichen werden können. Die Defizite, die sich aus der Analyse der Bewertungsmatrix ergeben, werden im folgenden Kapitel erörtert.

Abbildung 30: Matrix zur Gesamtbewertung der Akzeptanz und Reichweite sowie der Risiken und Wirksamkeit von Agrarfördermaßnahmen (inkl. Risikokatalog) im Hinblick auf die Projektziele

Bewertung der Akzeptanz und Reichweite sowie Risiken und Wirksamkeit von Agrarfördermaßnahmen										
Wirkungs-gruppe	Maßnahme	1. Risikokatalog	2. Bewertungsmatrix							
		bodenbezogene Risiken bei Maßnahmendurchführung	Risiko	Reichweite		Akzeptanz		Wirksamkeit		Gesamt-bewertung
			Bewertung Risiko	Reichweite Maß-nahmenangebot (BL)** aktuelle Förderperiode	Reichweite Angebot vergangene Förderperiode	Akzeptanz (Anz. Betriebe, Förderfläche) aktuell	Akzeptanz (Anz. Betriebe, Förderfläche) 2007-13	Wirksamkeit (bei derzei-tigen För-derkriterien)	Stärke der Förder-kriterien (im Hinblick auf Projektziele)***	
direkte Wirkung	**Winterbegrünung**	Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung. Saat läuft schlecht auf. Zum Teil pflügen Betriebe vor UND nach der Zwischenfrucht, dann mehr Bodenbearbeitung	3	5	4	4	2	4	4	**4**
	Gewässerschutzstreifen	schlechte Pflege, Bodenbedeckung, Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung.	2	3	2	1	1	3	3	**2**
	Erosionsschutzstreifen	Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung.	2	3	2	1	1	5	5	**3**
	Mulch-/ Direktsaat	zu geringe Mulchauflage (< 30 %); Bodenverdichtung durch schwerere Maschinen; z. T. intensive Saatbettbereitung	2	2	4	1	5	3	2	**3**
	Umwandlung AL in GL	Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung. Saat läuft schlecht auf. Rückumwandlung bei Ausstieg aus Maßnahme	2	3	3	1	k.A.	5	4	**3**
	mehrjährige Blühstreifen*	Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung, Saat läuft schlecht auf, ungenügende Bodenbedeckung	3	4	3	1	1	4	3	**2**
	moorschonende Bewirtschaftung	bei Einsatz zu schwerer Maschinen Bodenverdichtung	3	1	1	k.A.	k.A.	4	4	**1**
	mehrjährige Flächenstilllegung	bei Ansaat: Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung; Ansaatrisiko; ungenügende Bodenbedeckung; meist nur auf Flächen die schon extensiv genutzt wurden, dann geringer Effekt	2	1	1	1	1	5	4	**2**
	Strip-Tillage	zu geringe Mulchauflage (< 30 %); Schwerere Maschinen, Bodenverdichtung; Güllestriptill: Einsatz sehr schwerer Maschinen	3	2	nicht angeboten	1	nicht angeboten	4	2	**1**
	Brach- oder Grünstreifen auf Ackerland	Ansaat Grünstreifen: Bodenverdichtung bei zu nasser Bestellung; Ansaatrisiko; ungenügende Bodenbedeckung	2	1	1	1	1	3	3	**1**
indirekte Wirkung	**Ökologischer Landbau**	regelmäßiger Umbruch von Feld- und Kleegrasflächen, hoher Pfluganteil	4	5	5	5	4	2	1	**2**
	vielfältige Kulturen im Ackerbau	Fruchtfolge und Brachezeiten variabel, keine Vorgaben zum Bedeckungsgrad und zur Bodenbearbeitung	2	4	3	3	5	1	1	**2**
	Struktur- und Landschaftselemente	Anwuchsrisiko, schlechte Pflege, Pflanzenausfall durch Krankheiten oder Kalamitäten	2	2	1	k.A.	k.A.	3	3	**1**
fragliche Wirkung	**jährlich neu angelegte Blühstreifen***	intensive Bodenbearbeitung, ungenügende Bodenbedeckung, Ansaatrisiko	3	3	2	1	1	2	2	**1**
	extensive GL-Bewirtschaftung mit Umbruchverbot für Anlage/Erneuerung	lückige Grasnarben	2	5	5	2	3	1	1	**2**
	Altgrasstreifen im GL	lückige Grasnarben	1	1	1	1	k.A.	1	2	**1**
	überwinternde Stoppel	Verdichtungen und Fahrspuren durch Erntemaschinen bleiben bestehen, Verschlämmungsrisiko	1	1	1	1	k.A.	2	2	**1**
	keine Bodenbearbeitung nach Mais/Raps	Verdichtungen und Fahrspuren durch Erntemaschinen bleiben bestehen, Verschlämmungsrisiko	2	1	1	1	1	1	1	**1**

Bewertungsklassen: 1 - sehr gering, 2 - gering, 3 - mittel, 4 - hoch, 5 - sehr hoch. *Blühstreifen = Blühstreifen inkl. Blühflächen, Schon- und Ackerrandstreifen. ** In der aktuellen Förderperiode. Bewertung: 4 Punkte für min. 12 Bundesländer (BL), 3 für min. 9 BL, 2 für min. 6 BL, 1 für min. 3 BL und 0 für weniger als 3 BL. *** Gibt es Auflagen z. B. zum Bedeckungsgrad der Mulchauflage oder zur Position der Blühstreifen?

Quelle: eigene Darstellung, IfÖL GmbH

5.4 Defizitanalyse

Für die Defizitanalyse wurde in den Ex Post-Berichten der vergangenen Förderperiode recherchiert sowie die jeweils letzten veröffentlichten jährlichen Durchführungsberichte (Bezugsjahr 2016) der E-LER-Länderprogramme herangezogen. Ergänzende Angaben fanden sich in den Fragebögen, die an die Länderbehörden verschickt worden waren. Außerdem fanden die Ergebnisse aus der Analyse der Bewertungsmatrix zur Wirksamkeit der Agrarfördermaßnahmen sowie die Erkenntnisse aus den Experteninterviews und einem Fachgespräch mit geladenen Experten Eingang in die Defizitanalyse.

5.4.1 Defizite der einzelnen Maßnahmen

Folgende Maßnahmen haben bereits starke Förderkriterien und können zur Verbesserung der Infiltration bzw. Verringerung des Oberflächenabflusses von landwirtschaftlichen Flächen beitragen (in Klammern die Gesamtbewertungszahl):

- Winterbegrünung (4),
- mehrjährige Erosionsschutzstreifen (3),
- Umwandlung von Ackerland zu Grünland, (3)
- mehrjährige Flächenstilllegung (2) und
- moorschonende Bewirtschaftung (1).

Bei diesen Maßnahmen ist lediglich zu bemängeln, dass die Breitenwirkung und Akzeptanz (noch) nicht so groß sind, wodurch auch die Gesamtbewertung herabgestuft wird. Im Fall der moorschonenden Bewirtschaftung liegt dies schlicht an den natürlichen Gegebenheiten, während Erosionsschutzstreifen nicht so große Flächenausdehnungen erreichen, weil sie nur jeweils einen kleinen Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche bedecken. Entscheidend für die Wirkung von Erosionsschutzstreifen ist zudem ihre Lage im Gelände und ihre Ausprägung (Dichte und Höhe des Bewuchses) zum Zeitpunkt eines Niederschlagsereignisses (vgl. u.a. Kistler et al., 2013). Bei der Winterbegrünung ist zu beachten, dass viele Betriebe ihre Zwischenfruchtflächen für das Greening anrechnen lassen und diese somit nicht mehr über AUM gefördert werden können (Verbot der Doppelförderung). Diese Maßnahme wird also in ihrer Flächenwirkung bei der reinen Betrachtung der Flächen mit AUM-Förderung unterschätzt. Sowohl mehrjährige Flächenstilllegung als auch Umwandlung von Ackerland zu Grünland betreffen jeweils nur einzelne Flächen eines Betriebes und sind fast immer an bestimmte Förderkulissen gebunden (z. B. Überschwemmungsgebiete), sodass diese Maßnahmen nur einen geringen Flächenanteil ausmachen. Hinzu kommt die Befürchtung mancher Landwirte, dass die stillgelegten bzw. umgewandelten Flächen nach dem fünfjährigen Förderzeitraum ihren Ackerstatus verlieren könnten. Dies gilt jedoch laut Bundeslandwirtschaftsministerium nicht für Flächen, die im Zuge von Agrarumweltmaßnahmen stillgelegt oder umgewandelt werden – solche Flächen behalten den Ackerstatus auch nach über fünf Jahren ohne Ackernutzung (Kloos 2015). Ein grundsätzliches Problem ist, dass die Akzeptanz einer Fördermaßnahme bei den Landwirten tendenziell steigt, je geringer die Ansprüche an die Förderkriterien sind, während die Wirkungen der Maßnahmen mit stärkeren Förderkriterien besser werden.

Bei einigen Maßnahmen sind die Förderkriterien schwächer ausgestaltet, sodass sie ihre mögliche Wirkung in der Praxis wahrscheinlich nicht erreichen. So erhöht eine intensive Saatbettbereitung vor der Mulchsaat die Bearbeitung und Durchmischung des Oberbodens und relativiert die bodenschonende Wirkung der Mulchbedeckung im Hinblick auf die Verminderung von Bodenverschlämmung und Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen wieder. Zudem gibt es außer in Bayern keine Vorgaben, wie viel Mulch auf der Fläche bleiben muss (Bayern 10 % Bodenbedeckung durch Mulchauflage); manche Bundesländer wie z. B. Thüringen schreiben lediglich eine „gleichmäßige Häckselstro-

hauflage“ vor. Der Bedeckungsgrad des Bodens durch die Mulchauflage spielt aber bei der erosionsmindernden und infiltrationsfördernden Wirkung des Mulchsaatverfahrens eine entscheidende Rolle, wie die Ergebnisse der Literaturrecherche (s. Kapitel 4.3.2) ganz eindeutig zeigen. So ist für einen ausreichenden Schutz der Bodenoberfläche bei Starkregenereignissen ein Bedeckungsgrad von mindestens 30 % erforderlich.

Bei der Winterbegrünung gibt es in allen Bundesländern außer in Hessen eine Vorgabe, bis wann die Zwischenfrucht einzusäen ist. Dies ist jedoch nicht jedes Jahr gleich gut möglich (vgl. z. B. die extrem trockenen Bedingungen zur Aussaat in 2018), weswegen viele Landwirte davor zurückschrecken, eine fünfjährige Verpflichtung einzugehen (Sanktionsrisiko bei Nichteinhalten der Einsaatzeitpunkte). In Hessen gibt es eine etwas andere Regelung; hier wird nicht der Einsaatzeitpunkt vorgegeben, sondern der Zeitraum, in dem ein bodenbedeckender Bestand auf der Fläche stehen muss. Diese Vorgabe macht es für die Landwirte etwas einfacher, da sie flexibler sind, wann sie die Saat ausbringen. Allerdings ist in der AUM-Richtlinie nicht definiert, was unter einem bodenbedeckenden Bestand zu verstehen ist, hierfür gibt es auch keine Legaldefinition.

Im ökologischen Landbau ist zur Beikrautregulierung die Flächenbewirtschaftung mit dem Pflug weit verbreitet, so dass die Bodenbearbeitung zum Teil sogar intensiver ist als bei konventionell wirtschaftenden Betrieben. Auch bei der Maßnahme „vielfältige Kulturen im Ackerbau“ gibt es keine Vorgaben zur Bodenbearbeitung, sodass die positive Wirkung des vermehrten Eintrags von organischer Substanz in den Boden durch häufigere Bodenbearbeitung wieder abgeschwächt werden kann.

Alle genannten Maßnahmen haben also im Hinblick auf die Projektziele noch Optimierungspotenzial. Dies kann man auch daran erkennen, dass einige Maßnahmen mit hoher Wirksamkeit aufgrund einer geringen Reichweite oder Akzeptanz eine geringere Gesamtbewertung erreichen; im Gegensatz dazu stehen Maßnahmen mit hoher Reichweite und Akzeptanz aber schwächerer Bewertung der Wirksamkeit. Zur Weiterentwicklung der Fördermaßnahmen sollten konkrete Kriterien im Hinblick auf Bodenbearbeitung und Mulchbedeckung vorgegeben werden, diese aber möglichst so gestaltet oder finanziell ausgestattet werden, dass eine möglichst hohe Akzeptanz der Maßnahmen erreicht werden kann.

Da für Blühstreifen, Ackerrand- und Schonstreifen, Brach- oder Grünstreifen auf Ackerflächen sowie Struktur- und Landschaftselemente (z. B. Hecken) keine Vorgaben hinsichtlich Flächenauswahl und Anlagerichtung auf dem Schlag vorgegeben ist, kann es vorkommen, dass diese Streifen parallel zur Hangrichtung angelegt werden und gegebenenfalls bei einem Starkniederschlagereignis die Abflussbahnen sogar verstärken können. Wenig Wirkung im Hinblick auf die Projektziele entfalten Gewässerschutzstreifen, da diese erst im Talbereich greifen, wenn sich bereits größere Wassermengen akkumuliert haben. Ihr vornehmlicher Zweck ist die Verminderung von stofflichen Einträgen in die Oberflächengewässer; daher gibt es hier keine großen Potenziale zur Verbesserung, weil sonst die Schutzwirkung für die Gewässer nicht mehr erfüllt würde. Für die Verminderung des Abflusses direkt auf den Flächen stehen die bereits erwähnten Erosionsschutzstreifen (mit begrünten Tiefenlinien) zur Verfügung.

Für alle Maßnahmen gilt, dass ihre Wirkung sehr stark von der jeweiligen konkreten Ausgestaltung auf dem Betrieb abhängt und Kontrollen der tatsächlichen Wirkung im Feld methodisch anspruchsvoll sind. Vorschläge dazu folgen in Kapitel 5.5.3.

5.4.2 Defizite der Förderprogramme bzw. der politischen Umsetzung

Nicht nur bei den Maßnahmen selbst gibt es Defizite, sondern auch in der politischen Umsetzung oder der Ausrichtung der Förderprogramme. Zunächst ist positiv zu bewerten, dass durch die ständige Evaluierung und Berichtspflicht an die EU gut abgeschätzt werden kann, welche Maßnahmen erfolgreich sind und wo Nachbesserungsbedarf besteht bzw. welche Maßnahmen in späteren Förderprogrammen nicht mehr berücksichtigt werden sollten. Allerdings entsteht dadurch auch ein hoher bürokratischer

Aufwand, der von vielen Antragstellern und Behörden beklagt wird. In Hessen werden in der aktuellen Förderperiode fast alle AUM nur noch national ohne EU-Anteil finanziert, da der Verwaltungsaufwand und die Fehleranfälligkeit (z. B. Anforderungen an Genauigkeit von Flächenvermessung in kleinteiliger Agrarlandschaft) zu hoch waren. Dadurch entfällt für diese Maßnahmen die Berichtspflicht an die EU und das Land ist in der Ausgestaltung der Maßnahmen freier. Es besteht in jedem Fall ein dringender Optimierungsbedarf in den Bundesländern und bei der EU bezüglich der Anforderungen an die Verwaltungs- und Kontrollsysteme. Der lange Verpflichtungszeitraum schreckt zudem einige Bewirtschafter ab – allerdings lassen sich nur durch langfristige Maßnahmen entsprechende Wirkungen erzielen. Es gibt auch bei den Übergängen zwischen den Förderzeiträumen immer wieder Brüche und Unsicherheiten bei den Antragstellern, weil ein Programm ausläuft und das neue nicht direkt anschließt.

In Bezug auf den Bodenschutz haben nicht alle Förderprogramme bereits konkrete Zielvorgaben. In den meisten Bundesländern sind die Ziele „Verbesserung der Bodenqualität“ und „Verminderung der Erosion“ definiert, wobei diese nicht immer konkretisiert werden. Für eine genauere Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen auf den Boden müssen konkrete Ziele in die Förderprogramme geschrieben werden. Als Beispiel kann hier Sachsen-Anhalt dienen: Die Ziele im Hinblick auf den Boden sind festgelegt als *Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit*, *Förderung des Bodenlebens* sowie *Verminderung von Bodenverdichtung und Erosion*. Hier ließe sich noch das Ziel „*Verbesserung der Wasserinfiltration*“ ergänzen.

Auch bei der Wirkkontrolle zur Erreichung der Ziele bestehen einige Defizite; so wird bei der Bewertung der *Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit* davon ausgegangen, dass Ökologischer Landbau grundsätzlich die Humusbilanz verbessert bzw. den Gehalt an organischer Substanz gegenüber konventionellem Landbau erhöht. Zwar gibt es dazu einige Studien, die dies bestätigen (vgl. Kapitel 4.3.6), deren Ergebnisse können aber nicht pauschalisiert werden. Generell ist die Auswertung der Ziele mit Bezug auf den Boden sehr stark auf die Auswertung von Umsetzungszahlen und Literaturstudien gestützt. Lediglich Rheinland-Pfalz verweist auf eine umfangreiche Datenbank auch für bodenbezogene Daten, die vom Dienstleistungszentrum ländlicher Raum geführt wird und eine gute Datenbasis für die Abschätzung der tatsächlichen Wirkung von Agrarfördermaßnahmen bietet. In Sachsen gibt es zudem etliche begleitende Exakt- und Langzeitversuche, um die Maßnahmen zu evaluieren. Auch die bisher angewandten Modelle zur Ermittlung der Bodenabträge durch Erosion überschätzen die Wirkung der ackerbaulichen Maßnahmen, da sie von einer „best practice“ der Landwirte ausgehen. In Wirklichkeit arbeiten die meisten Landwirte aber so, dass sie gerade eben die Förderkriterien erfüllen und nicht so, dass eine optimale Wirkung, z. B. der reduzierten Bodenbearbeitung erreicht wird. Dadurch entsteht eine große Diskrepanz zwischen tatsächlich und theoretisch vermiedenem Bodenabtrag und die Fördermaßnahmen werden als viel wirksamer eingeschätzt, als sie tatsächlich sind (vgl. Auerswald et al., 2018).

Im Hochwasserschutz gibt es bisher fast keine konkreten, auf die landwirtschaftliche Nutzung bezogenen Maßnahmen. Hier besteht noch großes Potenzial für eine Anpassung der Förderprogramme in Ergänzung zu den Agrarumwelt-, Naturschutz- und Gewässerschutzmaßnahmen.

5.5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.5.1 Vorschläge zur Verbesserung bestehender Agrarfördermaßnahmen

In manchen Bundesländern hat es sich bei Erosionsschutzmaßnahmen bereits bewährt, diese nur in bestimmten Gefährdungskulissen anzubieten, gezielt zu bewerben und die Landwirte dabei individuell zu beraten. Zum einen wird damit das vorhandene Förderbudget sinnvoll auf die tatsächlich gefährdeten Flächen gelenkt und zum anderen werden Mitnahmeeffekte vermieden. Somit könnten auch die Förderbeträge für die einzelnen Flächen steigen und schärfere Kriterien sowie Auflagen ausgleichen.

So sollte z. B. bei der Mulch- und Direktsaat ein Bodenbedeckungsgrad von 30 % Mulchauflage vorgegeben werden, damit sie ihre volle Wirkung erreichen kann. In der Maßnahmenbeschreibung müsste das Ziel genau definiert und beschrieben werden, damit sich die Landwirte danach richten können. Mulch- und Direktsaat ist besonders sinnvoll in Kombination mit vielfältigen Fruchtfolgen oder Zwischenfrüchten, die mehr organische Substanz in den Boden bringen. Es wäre auch denkbar, die Mulchsaat nur noch ohne Saatbettbereitung zu fördern, da sie dann ihre Schutzwirkung besser entfalten kann (vgl. Ergebnisse Kapitel 5.3). In vielen Bundesländern wurde Mulch- und Direktsaat nach 2013 nicht mehr gefördert, weil die Maßnahme so, wie sie umgesetzt wurde, als wenig wirkungsvoll eingestuft wurde. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass die Technik nach fünfjähriger Nutzung in den Betriebsstandard übergegangen ist und daher keiner weiteren Förderung bedarf, da sie ohnehin angewendet wird. Vor einer Neueinführung der Maßnahme sollte daher geprüft werden, wie hoch der Förderbedarf tatsächlich ist und in welchen Gebieten sie mit welchen Auflagen eine möglichst hohe Wirkung erzielen kann. Ihre große Flächenwirkung macht sie zu einer bedeutenden Maßnahme – es sollte jedoch kein Verfahren gefördert werden, das ohnehin schon im Betrieb so praktiziert wird. Daher käme es auch in Betracht, die in Deutschland bisher wenig verbreitete Direktsaat abgekoppelt von der Mulchsaat zu fördern. Problematisch ist bei der Direktsaat allerdings, dass der stehende Aufwuchs in der Regel mit einem Totalherbizid abgetötet wird, bevor die Saat stattfindet.

Einige Bundesländer bieten zudem die Streifenbearbeitung (Strip-Tillage), eine Variante der Mulchsaat, seit 2014 als neue Maßnahme an. Da bei diesem Verfahren das Saatbett nur in schmalen Streifen bearbeitet wird, bleibt in den Reihenzwischenräumen mehr Mulch liegen. Allerdings ist die Technik in der Anschaffung sehr teuer und für kleinere Betriebe meist keine Option. Den Landwirten sollten außerdem Informationen und Entscheidungshilfen zur Verfügung gestellt werden, wie sie die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden einschätzen können. Das größte Risiko jeder Bodenbearbeitung besteht nämlich darin, dass die Böden bei ungeeigneten Verhältnissen befahren werden und es dadurch zu Bodenschadverdichtungen kommt, wodurch die Wasserinfiltration vermindert und der Oberflächenabfluss und die Erosion verstärkt werden (s. Kapitel 4.3.5).

Maßnahmen, die eine Anlage von Streifen vorsehen (mehrjährige Blüh-, Schon-, Ackerrandstreifen, Brach- oder Grünstreifen auf Ackerland, Struktur- und Landschaftselemente), sollten so ausgerichtet sein, dass sie gleichzeitig eine abflussbremsende Wirkung entfalten; also vorrangig quer zum Hang oder in abflusswirksamen Tiefenlinien angelegt werden. Dadurch würden sie ihren ursprünglichen Zweck (Förderung der Biodiversität, Schutz bestimmter Tierarten u.a.) um eine erosions- und abflussmindernde Wirkung erweitern. Dies müsste in den Richtlinien klar formuliert werden und auch eine Regelung dazu getroffen werden, was passiert, wenn z. B. der Blühstreifen nach einem Erosionsereignis so mit Sediment behaftet ist, dass seine Blühfähigkeit eingeschränkt ist. Nach der bisherigen Regelung würde für den nicht mehr blühenden Blühstreifen die Förderung aberkannt werden. Bei einer ausdrücklich gewollten Doppelfunktion müsste die Förderung trotzdem gezahlt werden, da ja die Funktion des Erosionsschutzes erfüllt wurde.

Der Ökologische Landbau und vielfältige Kulturen im Ackerbau können nach dem Vorbild der „Zusatzförderung Wasserschutz“ in Niedersachsen durch eine verminderte Bodenbearbeitung speziell auf eine Verbesserung der Infiltration ausgerichtet werden. Diese Maßnahmenerweiterung müsste auf besonders gefährdete Gebiete fokussiert und mit entsprechender Zusatzberatung verbunden werden. Denkbar wäre auch eine Kombination mit anderen abflussmindernden Maßnahmen, z. B. Erosionsschutzstreifen. Schließlich sollten die strengen Auflagen zur exakten Flächenvermessung im Rahmen der EU-Agrarförderungen etwas gelockert werden, die vor allem in kleinstrukturierten Landschaften sehr schwierig umzusetzen sind. Da die Landwirte aber bei Kontrollen mit Sanktionen rechnen müssen, wenn sie diese Auflagen nicht einhalten, verzichten viele auf eine Förderung.

5.5.2 Vorschläge zur Implementierung neuer Agrarfördermaßnahmen

Da es bereits viele Agrarfördermaßnahmen gibt, die nach einigen Anpassungen und bei sachgerechter Ausführung gute Wirkungen im Hinblick auf die Projektziele erwarten lassen, werden im Folgenden nur wenige neue Agrarfördermaßnahmen vorgeschlagen. Sinnvoll erscheint vor allem eine Kombination verschiedener Maßnahmen in konkret definierten Förderkulissen. Um die Hemmschwelle zu senken, kann es auch sinnvoll sein, wie in Thüringen mit der Maßnahme „betrieblicher Erosionsschutz" einen Katalog von Maßnahmen anzubieten und ein Ziel vorzugeben (in diesem Fall Reduzierung des jährlichen Bodenabtrags um 20 %) – die Auswahl der Maßnahmen bleibt dem Landwirt überlassen. Es ist in jedem Fall zu überlegen, ob die *Maßnahme oder die Zielerreichung* gefördert werden soll. Um eine möglichst große Breitenwirkung zu erzielen, müssen zudem die Förderanreize möglichst attraktiv sein.

Denkbar wäre zum einen eine Sonderförderung für pfluglosen Ökolandbau und den pfluglosen Anbau vielfältiger Kulturen (bevorzugt Mulch- oder Direktsaat). Zum anderen wären begrünte Fahrgassen eine Möglichkeit, eine Maßnahme zur Abflussbremsung einzuführen, die geringere Anforderungen an die Fläche stellt als ein Erosionsschutzstreifen und daher von mehr Landwirten umgesetzt wird. Da die Größe der Schläge und vor allem die Hanglänge beim erosionswirksamen Abfluss eine große Rolle spielen, sollte eine Maßnahme zur Hanglängenverkürzung eingeführt werden. Denkbar wären hier Schlagteilungen oder Grünstreifen quer zum Hang. Diese machen wiederum am meisten Sinn, wenn sie mit reduzierter Bodenbearbeitung gekoppelt werden. Die LAWA (2018) schlägt zusätzlich die Anlage von Rückhalteräumen in der Feldflur vor, d. h. kleine Mulden und Senken als Rückhaltebecken auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, die den Abfluss verzögern. Es wird vorgeschlagen, diese als einmalige Projektfinanzierung zur Anlage über Hochwasserschutzmaßnahmen zu fördern.

Die Auswahl der Förderkulissen muss sehr sorgfältig erfolgen, da Starkregenereignisse und Sturzfluten prinzipiell überall auftreten können. Um sicher zu gehen, sollten die Kulissen also eher größer gefasst werden. Als Ansatz kann hier das in Kapitel 6 verwendete SCS[17]-Curve-Number Verfahren zur Abschätzung des abflusswirksamen Niederschlags angewandt werden. Dabei bleibt das zeitliche Abflussverhalten auf den Flächen unberücksichtigt, jedoch können anhand der Abflusshöhen Gebiete mit hohen Abflussmengen ausgewiesen werden. Nach der flächenhaften Erfassung können für definierte Gebiete mit großen Unsicherheiten bei Bedarf auch Abflusskonzentrationen ermittelt werden.

5.5.3 Vorschläge für Wirkungsindikatoren

Insgesamt gilt für die Überprüfung der Wirksamkeit von bodenbezogenen Maßnahmen, dass diese mit erheblichem Aufwand vor Ort verbunden sind. Andererseits werden für die Bewertung der Biodiversität teilweise sehr umfangreiche Felderhebungen durchgeführt (z. B. Vegetationskartierung oder Brutvogelerfassung). Es gibt einige relativ einfache Möglichkeiten, die Bodenverdichtung im Feld zu kontrollieren z. B. den „Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Bodenschadverdichtungen im Feld" von Weyer und Boeddinghaus (2016). Verdichtete Böden nehmen weniger Wasser auf und sind daher für das Ziel der Verbesserung der Wasserinfiltration kontraproduktiv. Des Weiteren könnte, ebenfalls mit einfachen Feldmethoden, die Verteilung der infiltrationswirksamen Poren im Boden ermittelt werden: Die bodenkundliche Kartieranleitung KA5 (Ad-Hoc-AG Boden 2005) bietet z. B. die Möglichkeit, den Anteil der Makroporen (die einen großen Einfluss auf die Infiltrationskapazität haben, s. Kapitel 4.3.3) im Boden mit geringem Aufwand abzuschätzen. Bei dieser Methode wird der Flächenanteil der makroskopisch sichtbaren Poren am Bodenvolumen bestimmt und die Poren können nach ihrer Ausprägung unterschieden werden in Röhren/Gänge allgemein, Wurzelröhren, Regen-

[17] Soil Conservation Services

wurmröhren, Krotowinen (verfüllte Gänge kleinerer Säugetiere) sowie offene Gänge kleinerer Säugetiere. Auch wenn diese Methoden an sich einfach sind, so ist doch der Aufwand von Feldmessungen vor Ort hoch. Wenn die Maßnahmen zur Infiltrationsverbesserung allerdings auf bestimmte Gefährdungskulissen beschränkt werden, verringert sich damit auch der Flächenumfang, der kontrolliert werden muss.

Eine andere Möglichkeit, zumindest die bestehenden Wirkungsabschätzungen[18] zu verbessern wäre, neben den bereits angewendeten Simulationen zum Bodenabtrag durch Erosion entsprechende Modellrechnungen zur Simulation des Oberflächenabflusses durchzuführen. Dazu müssten möglichst reale Eingangsdaten vorliegen (aktuelle Wetterdaten, reale Fruchtfolgen, Lage und Größe von Schutzstreifen o. ä.), damit die Wirkung möglichst gut abgeschätzt werden kann. Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, ermöglicht das in diesem Projekt angewendete, angepasste Curve-Number-Verfahren eine Quantifizierung des Oberflächenabflusses von Flächen. Somit ließe sich ein Vergleich der Abflussmengen in einem Gebiet mit und ohne Agrarfördermaßnahmen berechnen. Zu beachten sind hier die Grenzen des Modells. Zum Abgleich und zur Validierung der Ergebnisse könnten bereits vorhandene Daten von Oberflächenpegeln im Einzugsgebiet genutzt werden.

5.5.4 Vorschläge zur Umsetzung bestehender Agarfördermaßnahmen

Zunächst ist es nötig, die bestehenden Ziele zum Bodenschutz in den Förderprogrammen im Hinblick auf Wasserinfiltration und Oberflächenabfluss zu konkretisieren bzw. diese dann in die Förderprogramme zu implementieren. Die Zielerreichung ist in den ELER-Auswertungsberichten zu bewerten und die Wirksamkeit muss vor Ort kontrolliert werden.

Aus den Erfahrungen der Bundesländer mit Agrarfördermaßnahmen vergangener Förderperioden, die in den Ex post-Berichten dokumentiert sind, ergibt sich, dass eine gezielte Definition von Förderkulissen mit daran angepassten Maßnahmen sowie gezielter Werbung und Beratung von Landwirten die Wirksamkeit von Maßnahmen erhöht. Auch eine regionale Anpassung auf den praktischen Bedarf und die Produktionsbedingungen der Landwirte kann die Akzeptanz verbessern. In Thüringen wurden gute Erfahrungen mit einer Bündelung von Maßnahmen zum Erosionsschutz gemacht: Die Maßnahme „betrieblicher Erosionsschutz“ umfasst insgesamt zehn verschiedene Teilmaßnahmen, aus denen die Betriebsinhaber wählen können. So können sie die Maßnahmen auswählen, die am besten in den Betriebsablauf passen und für die sie die besten Voraussetzungen haben – das Förderziel muss natürlich trotzdem erreicht werden und sollte so hoch angesetzt sein, dass möglichst wenige Mitnahmeeffekte auftreten. In Thüringen muss der Landwirt mithilfe eines zur Verfügung gestellten Rechners das allgemeine Bodenabtragsrisiko für seine Ackerflächen ohne bzw. mit Maßnahmenumsetzung berechnen und erhält nur dann eine Förderungsbewilligung, wenn er durch seine Maßnahmen mindestens 20 % Minderung des berechneten jährlichen Bodenabtrags erreicht (ergebnisorientierte Förderung). Ein ähnliches Modell könnte sicherlich auch für Verbesserung der Wasserinfiltration entwickelt werden. Da die Maßnahmen zum Erosionsschutz und zur Verbesserung der Wasserinfiltration auf Feldebene sich kaum unterscheiden, wäre es sinnvoll, die Rechenmodelle zu kombinieren.

Für die Ausweisung von Gefährdungsgebieten sollte beachtet werden, dass die höchsten Wasserrückhaltepotenziale im Mittel- und Unterlauf der Flusseinzugsgebiete zur Verfügung stehen, weil dort tiefgründigere Böden vorherrschen: Ebert et al. (2016) verweisen darauf, dass Böden, die bereits natürlicherweise über eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität verfügen, durch die An-

[18] Wirkungsabschätzungen erfolgen mithilfe von Ergebnis- und Wirkungsindikatoren, die im Hinblick auf die Ziele der Förderprogramme von den Bundesländern definiert werden. Ein Beispiel für einen Ergebnisindikator ist die Berechnung der Minderung des Bodenabtrags (in t Boden/Jahr), der durch Maßnahmen wie Mulchsaat erreicht wird.

wendung von AUM nur noch bedingt verbessert werden können. Sieker et al. (2008) schreiben hingegen, dass Flächenmaßnahmen in Gebieten mit tiefgründigeren Böden wesentlich effektiver sind und Maßnahmen auf flachgründigen Böden keine so große Wirkung erzielen, weil deren Speicherkapazität von vorneherein beschränkt ist. Es muss also eine verlässliche Methode gefunden werden, mit der Gefährdungs- und Potenzialgebiete für die Anwendung von infiltrationsfördernden Agrarfördermaßnahmen ausgewiesen werden können. Eine gute Datengrundlage zu den Boden- und Nutzungsverhältnissen ist dabei unerlässlich.

Ein wichtiger Punkt, der vor allem in den beantworteten Fragebögen an die Landesministerien oft genannt wurde, ist eine gute Beratung der Landwirte. Dadurch wird das Problembewusstsein der Landwirte geschärft und sie werden bei der Umsetzung der Fördermaßnahmen gezielt unterstützt. Zudem sollte die Kommunikation zwischen den Bewirtschaftern, den Landwirtschaftsverwaltungen und Bodenschutzbehörden ausgebaut werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Initiative *boden:ständig* des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF), in deren Rahmen auf Initiative von Betroffenen in enger Kooperation von Bewirtschaftern, Anwohnern, Gemeinden und Behörden gezielt Projekte zum Bodenschutz in Problemgebieten umgesetzt werden. Dies zeigt, dass auch ohne große Fördersummen viel erreicht werden kann, wenn kooperative Umsetzungsmodelle etabliert werden.

Für die Verwaltung ist es wichtig, dass angebotene Agrarfördermaßnahmen auch kontrolliert werden können. Aus diesem Grund wurden z. B. auch in fast allen Bundesländern bisher keine Mindestbedeckungsgrade für eine Mulchschicht festgelegt. Hier könnten frei verfügbare Fernerkundungsdaten eine Lösung bieten: Eine Kurzrecherche bei zwei Unternehmen, die in der Auswertung von satellitengestützten Fernerkundungsdaten tätig sind, ergab, dass in der Auswertung von Radardaten durchaus die Möglichkeit gesehen wird, dass man auf großer Fläche ohne Ortsbegehung die Mulchbedeckung abschätzen kann (mdl. Mitt. Buck 2019; Born 2019). Die Methodik hierfür müsste allerdings noch entwickelt werden, da Radardaten bisher noch nicht so häufig genutzt werden. Außerdem wäre die Frage des Datenschutzes zu klären, wobei die Radardaten ohnehin bereits vorhanden und teilweise im Internet frei verfügbar sind (über das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus, s. DLR 2019).

Insgesamt reichen aber Maßnahmen der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung allein nicht aus, um den Abfluss zu dämpfen. Dafür muss auch die Agrarstruktur und Landschaftsgestaltung eines Einzugsgebiets, z. B. durch die Anlage von Verwallungen, Muldenrückhalt, Graben- und Vorflutregelung, Hecken oder Begrünung der bevorzugten Abflussbahnen, verändert werden. Es ist zudem fraglich, ob allein durch freiwillige Maßnahmen, die zudem zeitlich begrenzt sind, eine flächendeckende Wirkung erreicht werden kann oder ob es dazu einer rechtlichen Verankerung bedarf. Diese Thematik wurde in Kapitel 4 erörtert.

Notwendige Schritte zur Verbesserung der Agrarfördermaßnahmen zum Bodenschutz

1. Definition konkreter Bodenschutz-Ziele in den Agrarförderprogrammen.
2. Ableitung und Definition konkreter Gefährdungsgebiete als Förderkulissen.
3. Gezielte Verbesserung und Weiterentwicklung des bestehenden Förderinstrumentariums der AUM im Hinblick auf die Projektziele (vor allem sinnvolle Kombinationen geeigneter Maßnahmen).
4. Vorgabe konkreter Zielwerte in den Maßnahmen und sinnvoller Wirkindikatoren zur Bewertung.
5. Effektive, möglichst automatisierte flächenrepräsentative Kontrolle der Maßnahmenumsetzung und Zielerreichung.

6 Regionale Analysen vergangener Hochwasserereignisse und Bewertung des Einflusses der landwirtschaftlichen Flächennutzung

6.1 Einführung und Zielstellung

Zur Verifizierung einiger der in den vorangegangenen Kapiteln aufgestellten Hypothesen wurden bedeutsame Überflutungsereignisse der jüngeren Vergangenheit in Deutschland mit gut dokumentierten Daten und zugleich erheblichen Schäden nach Stark- oder Dauerregen exemplarisch hinsichtlich ihrer markanten Ursachen analysiert. Diese auch als praktische „Fallbeispiele“ kennzeichenbaren Arbeiten ergänzen die theoretische Analyse des Förderinstrumentariums und der gesetzlichen Grundlagen.

Es wurde herausgearbeitet, welche Rolle landwirtschaftlich genutzte sowie versiegelte Flächen spielen und welchen Beitrag sie zur Abflussbildung leisten. Bei den Betrachtungen standen vor allem die Nutzungsart, die Bewirtschaftungsform und der Versiegelungsgrad im Vordergrund. Für die Analysen wurden Stark- und Dauerregenereignisse von vier Untersuchungsgebieten in vier Bundesländern als regionale Fallbeispiele ausgewählt:

- Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (Gemeinde Grafschaft, RP/NW)
- Engebach/Hod (Bad Bellingen, BW)
- Simbach (BY)
- Wolfsbach/Aichbach (BY)

Die Zielstellung dieser Ursachenanalyse liegt in der Identifikation abflusserzeugender Flächen und deren Charakteristika. Diese erfolgt mittels eines modifizierten Curve-Number-Verfahrens nach Kleeberg & Overland (1989) zur Modellierung der Abflussbildung auf Schlag- bzw. Flurstücksebene. Als Untersuchungskenngröße wurde die Abflussbildung ausgewählt, da Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden im Fokus der Aufgabenstellung stehen. Die bodenhydrologischen Eigenschaften sind in der Landwirtschaft maßgeblich von der Nutzungsform (Ackerland, Grünland) und der Bewirtschaftung (Bodenbearbeitung, Bedeckungsgrad, Fruchtfolge etc.) abhängig. Anhand der Modellergebnisse wird überprüft, ob signifikante Unterschiede bezüglich der Abflussmengen zwischen verschiedenen Landnutzungsformen, insbesondere bei Ackerflächen, vorliegen.

Auf die Ursachenanalyse folgten Variantenrechnungen mit alternativen Bewirtschaftungsformen und variierenden Niederschlagsszenarien, um Lösungsansätze zur Reduktion der Direktabflussmengen und der Stärkung des Wasserrückhalts auf Einzugsgebietsebene zu entwickeln sowie deren Wirkungspotential abzuschätzen. Die Lösungsansätze bilden die fachlich-technische Grundlage für integrierte Handlungsempfehlungen.

6.2 Methoden und Datengrundlagen

Hier werden zunächst - ergänzend zu der in Kap. 3 gegebenen Übersicht zum Stand des Wissens hinsichtlich der Parameter - die für das ausgewählte Modell notwendigen Grundlagendaten detailliert beschrieben. Das ist zum Verständnis der durchgeführten Untersuchungen zwingend notwendig.

6.2.1 Definition Direktabfluss

Der Direktabfluss beschreibt die Abflusskomponenten, die sich durch eine kurze Antwortzeit im Vorfluter auszeichnen. Er setzt sich gemäß DWA (2018) aus drei maßgeblichen Komponenten zusammen, dem HORTONschen Oberflächenabfluss oder Infiltrationsüberschuss (HOF), dem Sättigungsoberflächenabfluss (SOF) und dem schnellen Zwischenabfluss (SSF), s. Abbildung 4.

Für die vorliegende Fragestellung ist die Verwendung des Direktabflusses zweckmäßig. Das dafür verwendete SCS-Curve-Number Verfahren (USDA NRCS, 2004a) fasst die Summe der schnellen Abflusskomponenten zur Abschätzung von Hochwasserganglinien zusammen.

In Bach et al. (2017) wird ausgeführt, dass Oberflächen- und Direktabfluss häufig fälschlicherweise gleichgesetzt werden, vor allem im Zusammenhang mit dem Curve-Number Verfahren. Der Direktabfluss ist nicht gleichzusetzen mit dem Oberflächenabfluss. Letzterer beschreibt die auf der Erdoberfläche abfließende Wassermenge (HOF, SOF) und enthält nicht den schnellen Zwischenabfluss, welcher dem Direktabfluss zuzuordnen ist.

6.2.2 Modifiziertes Curve-Number Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989)

Das SCS-Curve-Number Verfahren ist eine empirische Methode zur Beschreibung der Abflussbildung und der Bestimmung der schnellen Abflusskomponenten. Die Abflussbildung ist als Teilkonzept des Abflussprozesses für die vorliegende Studie zweckmäßig, da sie Ergebnisse zum Wasseraufnahme- und –speichervermögen landwirtschaftlicher Flächen liefern kann. In DVWK (2003) wird die Ermittlung der Abflussbildung nach Kleeberg & Overland (1989), einer Modifikation des SCS-Curve-Number Verfahrens, empfohlen. Diese wird nachfolgend methodisch beschrieben.

Zunächst werden **Vorregenindizes**, die als Maß für die Vorfeuchte zum Zeitpunkt des Ereignisses dienen, ermittelt. Hierbei beschreiben VN_{mit} [mm] den mittleren Vorregenindex und VN_{akt} [mm] den Wert vor Eintritt des Ereignisses. Zur Berechnung des aktuellen Vorregenindex werden die Niederschläge der letzten 30 Tage exponentiell gewichtet und summiert:

$$VN_{akt}(ta) = \sum_{i=1}^{30} N(i) \times 0{,}9^{i} \qquad \text{Gl. 2}$$

Dabei sind i der i-te Tag vor dem Zeitpunkt t_a und $VN_{akt}(t_a)$ der Vorregenindex zum Zeitpunkt t_a. Durch Mittelung von VN_{akt} über einen gewählten Zeitraum (z. B. einzelner Monat, Jahreszeit, etc.) und die Anzahl der Jahre wird der mittlere Vorregenindex berechnet:

$$VN_{mit}(m) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{tg} \sum_{ta=1}^{tg} VN_{akt}(ta) \qquad \text{Gl. 3}$$

Dabei sind t_g die Anzahl der Tage im Zeitraum m [-] und n die Anzahl der betrachteten Jahre [-].

Die Differenz zwischen der mittleren und aktuellen Vorfeuchte beschreibt die Abhängigkeit der Abflussbildung von der Bodenfeuchte. Folgende Gleichung zur Berechnung der **bodenfeuchteabhängigen Curve-Number CN_{bf}** verdeutlicht den Sachverhalt:

$$CN_{bf} = \begin{cases} \dfrac{1000}{\dfrac{1000}{CN_{II}} + \dfrac{VN_{mit} - VN_{akt}}{25{,}4}} & f\ddot{u}r\ 0 < CN_{II} < 100, wobei\ 0 < CN_{bf} \leq 100 \\ 100 & f\ddot{u}r\ CN_{II} = 100 \end{cases} \quad \text{Gl. 4}$$

Die **Curve-Number (CN_{II})** ist der Schlüsselparameter des Verfahrens und beschreibt die Tendenz einer Erdoberfläche zur Abflussbildung. Sie ist u. a. abhängig von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens sowie der Landbedeckung bzw. -nutzung und maßgeblich für die Größe der **potentiellen Infiltration S_{bf}** [mm], die das Wasseraufnahme- und -speichervermögen der betrachteten räumlichen Einheit (je nach Anwendung z. B. Schlag, Flurstück oder Einzugsgebiet) ausdrückt:

$$S_{bf} = 25{,}4\left(\frac{1000}{CN_{bf}} - 10\right) \quad \text{Gl. 5}$$

Der Parameter S_{bf} fließt zudem in die Bestimmung des **Anfangsverlustes I_a** [mm] ein. Er beschreibt die Niederschlagsschwelle, die überwunden werden muss um Oberflächen- bzw. Direktabfluss zu erzeugen und ist physikalisch u. a. auf Mulden-, Interzeptions- und Benetzungsverluste zurückzuführen. Direktabfluss setzt auf Flächen mit hohem Anfangsverlust also später ein. Zur Berechnung von I_a wird der dimensionslose Gebietsfaktor C eingeführt:

$$I_a = C \times S_{bf} \quad \text{Gl. 6}$$

Der **Gebietsfaktor C** [-] ist hierbei vom mittleren **Gebietsgefälle G** (m/m) und dem **Gewichtungsfaktor K** [-] für die exponentielle Abnahme abhängig:

$$C = 0.1\ e^{-K \times G} \quad \text{Gl. 7}$$

Das Rückhaltevermögen S_{bf} und der Anfangsverlust I_a liefern die Grundlage zur Berechnung der **Infiltration F** [mm] im Zeitintervall t:

$$F(t) = \frac{S_{bf}^2}{\left(\sum_t N(t) - I_a + CN_{bf}\right)^2} N(t) \quad \text{Gl. 8}$$

Unter der Voraussetzung, dass der **kumulierte Niederschlag N(t)** bis zum aktuellen Zeitschritt den Anfangsverlust I_a übersteigt, wird die betrachtete räumliche Einheit mit abflusswirksamem Niederschlag **N_{eff}** [mm] bzw. Direktabfluss belastet:

$$N_{eff} = \begin{cases} 0 & f\ddot{u}r\ N(t) \leq I_a \\ N(t) - F(t) & f\ddot{u}r\ N(t) > I_a \end{cases} \quad \text{Gl. 9}$$

6.2.3 Bedeutung der Vorfeuchte und der Hangneigung im Verfahren

Das Verfahren zur Modellierung der Abflussbildung nach Kleeberg & Overland (1989) unterscheidet sich vom ursprünglichen SCS-Curve-Number Verfahren (USDA NRCS, 2004a). Das betrifft die Erweiterung des Verfahrens um die Vorfeuchte in Form von Vorregenindizes und die Einbeziehung der Hangneigung. Um die Funktionstüchtigkeit der Modellierung zu gewährleisten, soll nachfolgend die Wirkung der sich vom ursprünglichen SCS-Curve-Number Verfahren unterscheidenden Parameter aufgezeigt werden.

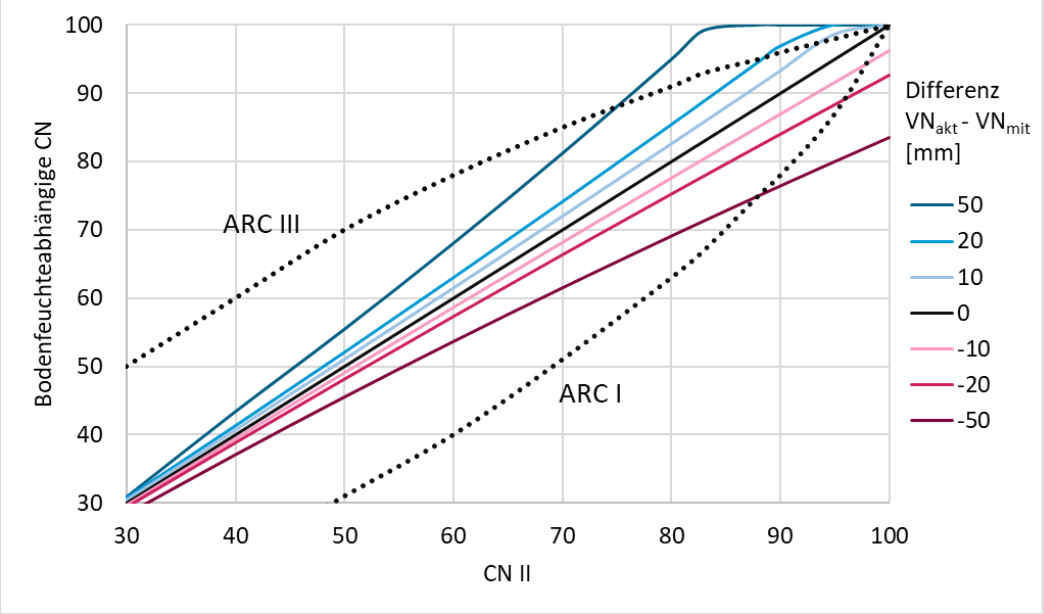
Bei Starkregenereignissen wird die Rolle der **Vorfeuchte** bzw. Bodenfeuchte zu Ereignisbeginn unterschiedlich bewertet. Nach Karl et al. (1985) spielt sie zu Ereignisbeginn eine wesentliche Rolle. Siegert (1978) führt aus, dass eine geringe Anfangsbodenfeuchte zu relativ geringen Abflussmengen führen kann. Mollenhauer et al. (1985) stellen hingegen eine Abhängigkeit des Oberflächenabflusses von der Vorfeuchte des Bodens nur auf Grünland fest. Für Ackerflächen war kein signifikanter Einfluss der Vorfeuchte ersichtlich. Bezüglich der Bodenbedeckung herrscht hingegen weitestgehend – bei den o. g. Studien – Konsens einer abflussmindernden Wirkung bei höherem Bodenbedeckungsgrad.

Die unterschiedlichen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Wirkung der Vorfeuchte von weiteren Faktoren abhängt. Es ist denkbar, dass sie bei hohen Bodenbedeckungsgraden eine untergeordnete Rolle spielt, die sich jedoch mit abnehmenden Bedeckungsgraden erhöht. Vor allem ist zu erwarten, dass der Einfluss ebenfalls von der Niederschlagsintensität und -dauer abhängig ist.

Im Rahmen der durchgeführten regionalen Analysen wird ein Einfluss der Vorfeuchte berücksichtigt, da zu erwarten ist, dass ein Starkregenereignis, dem eine außergewöhnlich niederschlagsreiche Periode vorangegangen ist, ein anderes Abflussverhalten aufweist als ein Ereignis, dem eine Zeitspanne mit durchschnittlicher oder sehr geringer Niederschlagsmenge vorausgeschaltet ist. Auch in den durchgeführten Falluntersuchungen findet sich ein solches Beispiel mit einer sehr niederschlagsreichen Periode vor Ereignisbeginn, bei der von gesättigten Verhältnissen ausgegangen werden kann.

In Abbildung 31 ist die bodenfeuchteabhängige CN_{bf} gegen die Curve-Number unter mittleren Feuchtebedingungen (CN_{II}) für verschiedene Vorregendifferenzen aufgetragen. Im klassischen Modell des SCS-Curve-Number-Verfahrens wird der Einfluss der Vorfeuchte durch drei Zustände (trocken – mittel – feucht) beschrieben. In der Abbildung 31 sind diese Zustände als Einheitsfunktion sowie als Einhüllende ARC I und ARC III (engl. Antecedent Runoff Condition, auch: Antecedent Moisture Condition) gekennzeichnet. Es wird deutlich, dass große Unterschiede zwischen feuchtem (ARC III) und trockenem Zustand (ARC I) herrschen, die prinzipiell als Ober- und Untergrenze der Parametrisierung angesehen werden können. Der Vorteil des Verfahrens nach Kleeberg & Overland (1989) liegt darin, dass aufgrund der Gl. 4 abrupte Übergänge dieser diskreten Zustände vermieden werden. Die Vorfeuchte erhält bei extremen Differenzen der Vorregenindizes (aktueller Vorregenindex abzüglich des mittleren langjährigen Vorregenindex) im Bereich ab ca. ±20 mm jedoch ein starkes Gewicht. Bei extremen Vorfeuchtedifferenzen (z. B. +50 mm), die in der vorliegenden Studie vorkommen, in Kombination mit CNII-Werten ab ca. 75 wird die Einhüllenden ARC III (feucht) aus dem ursprünglichen SCS-Curve-Number Verfahren bereits übertroffen. Ergebnisse, die unter solchen Bedingungen ermittelt werden, sind also kritisch zu betrachten.

Abbildung 31: Einfluss der Vorregenindizes nach Kleeberg & Overland (1989) auf die bodenfeuchteabhängige Curve-Number mit den Einhüllenden ARC I und ARC III aus (USDA NRCS, 2004a)



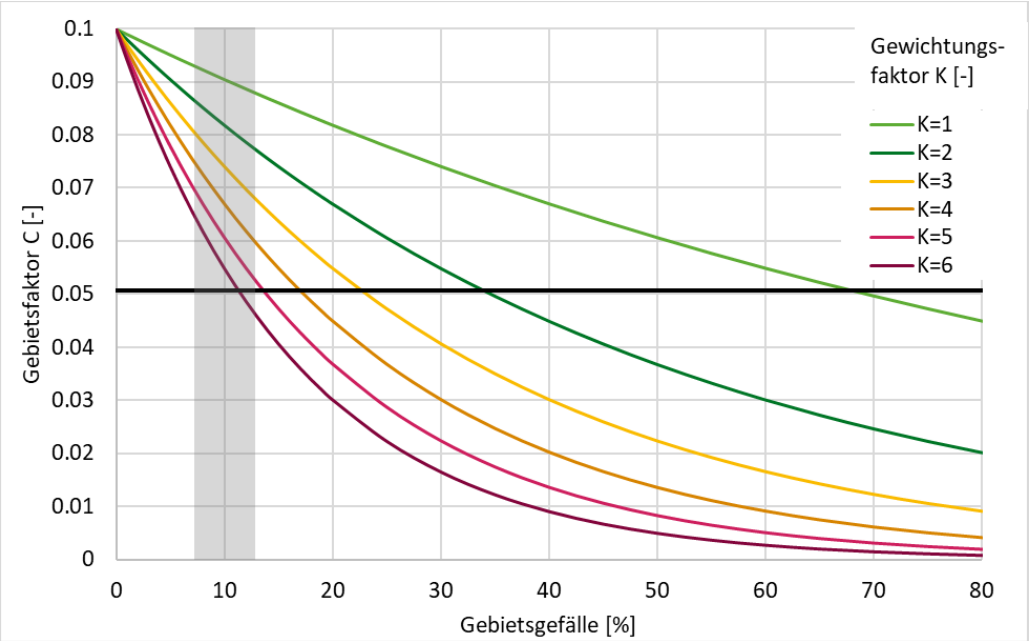
Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH; Daten der Einhüllenden ARC I und ARC III aus (USDA NRCS, 2004a)

Eine zusätzliche Erweiterung ist die Einführung der **Hangneigung**. Für Sturzfluten infolge von Starkregen hat sie für die Abflusskonzentration einen sehr hohen Stellenwert, da sie die Abflusswege und Wasserakkumulation bestimmt. Für die Abflussbildung, die Gegenstand der vorliegenden Analyse ist, spielt sie jedoch nur eine untergeordnete Rolle. In zahlreichen Studien konnte im Rahmen künstlicher Beregnungsversuche kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Hangneigung (i. d. R. <20 %) und Oberflächenabfluss hergestellt werden (Winter, 2013; Scherrer, 1997; Karl et al., 1985; Mollenhauer et al., 1985; Siegert, 1978;). Ein Einfluss der Geländeneigung wurde jedoch nicht ausgeschlossen; er ist lediglich von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zum Einfluss der Bodeneigenschaften und der Vegetation.

Bei der Abflussbildung nach Kleeberg & Overland (1989) fließt die Hangneigung in die Berechnung des Anfangsverlustes I_a über den Gebietsfaktor C ein, d. h. auf stärker geneigten Flächen verringert sich der Anfangsverlust und es kommt schneller zur Abflussbildung, was aus den Gl. 6 und Gl. 7 hervorgeht. Das unmodifizierte Curve-Number Verfahren legt einen konstanten und von der Hangneigung unabhängigen Gebietsfaktor von C=0,2 fest, was bedeutet, dass der Anfangsverlust mit 20 % des Rückhaltevermögens relativ hoch angesetzt ist. Somit besteht bei Ereignissen mit relativ geringen Niederschlagsmengen die Gefahr der Unterschätzung des Direktabflusses. Aus diesem Grund schlägt Maniak (1997) für mitteleuropäische Verhältnisse einen Wert von 0,05 vor.

Die Auswirkung der Geländeneigung und der Gewichtung auf den Gebietsfaktor zeigt Abbildung 32.

Abbildung 32: Gebietsfaktor in Abhängigkeit des Gebietsgefälles und des Gewichtungsparameters K



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

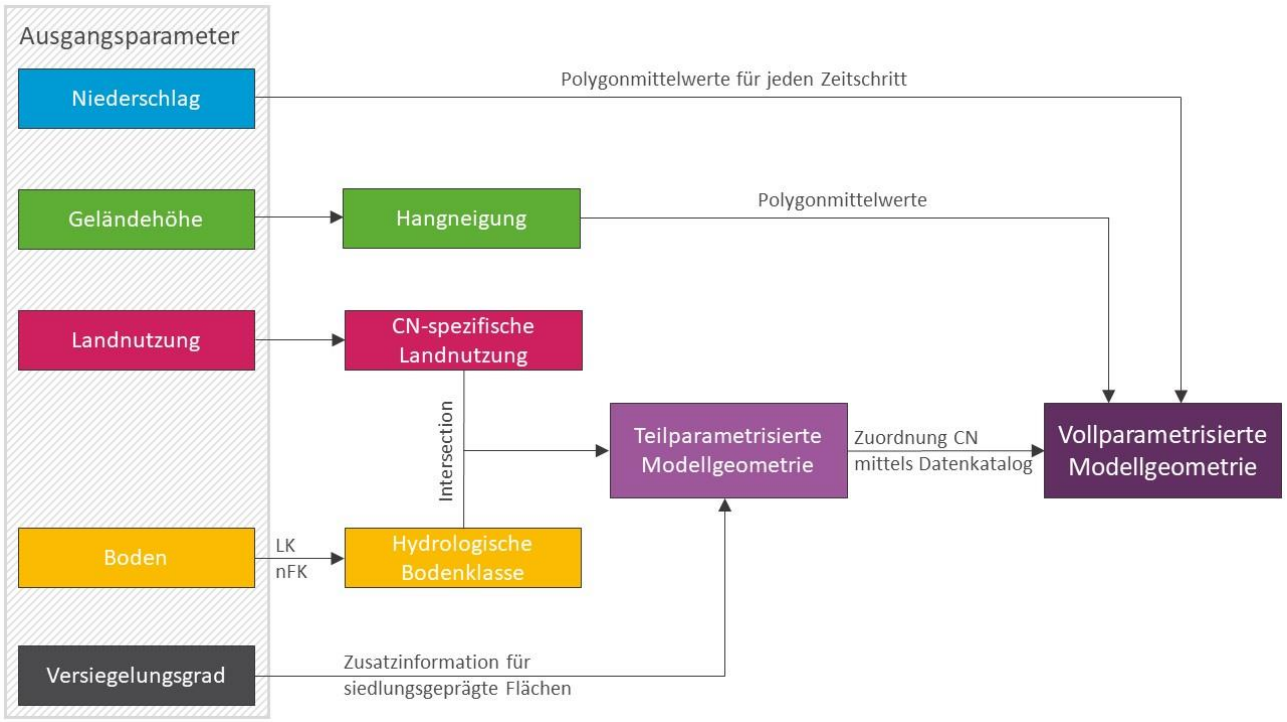
Die mittleren Gebietsgefälle der Fallbeispiele sind grau hinterlegt und liegen etwa zwischen 8 % und 12 % (s. Tabelle 11). Der von Maniak (1997) empfohlene Gebietsfaktor von C=0,05 wird als Orientierungswert herangezogen und ist als schwarze Linie dargestellt. Die Wahl einer Gewichtung von K=6 liegt in diesem Fall nahe, da sie bei den mittleren Gebietsgefällen der Untersuchungsgebiete zu Gebietsfaktoren von C=0,045 und 0,065 führt und damit im Bereich des empfohlenen Wertes von Maniak (1997) liegt.

Abschließend ist bemerkenswert, dass der Einfluss des Anfangsverlustes, der mitunter durch die Hangneigung bestimmt wird, mit steigender Niederschlagsintensität abnimmt, d. h. bei Starkregenereignissen, die Gegenstand der hier dokumentierten regionalen Analysen sind, ist der Einfluss des Anfangsverlustes naturgemäß als relativ gering einzuschätzen. Folglich hält sich auch der Einfluss der Hangneigung generell in Grenzen. Bei geringen Niederschlagsintensitäten ist der Einfluss jedoch hoch und spielt für lokal ausgeprägte Ereignisse, deren Niederschlagsintensität am Rand der Niederschlagszelle stark abnimmt, eine Rolle.

6.2.4 Datengrundlagen und -verarbeitung

Bei näherer Betrachtung der Gleichungen in Kapitel 6.2.2 und der Abbildung 33 wird deutlich, dass Niederschlags- sowie Höhen- bzw. Hangneigungsdaten ohne wesentliche Datenbearbeitungsschritte direkt in die Abflussberechnung eingehen. Weniger deutlich sind die Einflüsse der Bodenparameter und der Landbedeckung bzw. -nutzung, da sie indirekt durch die Curve-Number ausgedrückt werden. Das Fließdiagramm in Abbildung 33 zeigt die Arbeitsschritte mit deren Hilfe die Ausgangsdaten in das parametrisierte Modell überführt werden. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Abbildung 33: Fließschema: von den Eingangsdaten zum parametrisierten Modell



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Tabelle 7: Zusammenfassung und wichtige Eigenschaften der Datengrundlagen (verwendete Abkürzungen s. Abkürzungsverzeichnis)

Parameter	Fall 1 Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach		Fall 2 Engebach/ Hod	Fall 3 Simbach	Fall 4 Wolfsbach/ Aichbach
	RP	NW	BW	BY	
Niederschlag	DWD RADOLAN RW 1 km, 1 h				
Höhendaten	Copernicus DGM (SRTM + Aster) 25 m				
Allg. Landnutzung	Basis-DLM	Basis-DLM	Basis-DLM	Basis-DLM	Basis-DLM
Landwirtsch. Nutzung	InVeKoS	InVeKoS	Basis-DLM	InVeKoS	InVeKoS
Bodenkarten	BFD50 RP	BK50 NW	BK50 BW	ÜBK25 BY	ÜBK25 BY
Bodenart	+	+	+	(+)	(+)
Bodenkundl. Einheiten	+	+	+	+	+
Horizontdaten	bis 7 Horizonte	-	-	-	-
Nutzbare Feldkapazität	Einzelw. je Horizont	Ein Wert	Min-Max	-	-
Luftkapazität	Einzelw. je Horizont	Ein Wert	Min-Max	-	-
Ges. hydr. Leitfähigkeit	-	Ein Wert	Min-Max	-	-
Bezugstiefe	2 m	0,2 m bis 1,1 m	1 m	-	-
Versiegelungsgrad	Copernicus High Resolution Layer "Imperviousness" 20 m				

+ vorhanden, (+) vorhanden mit begrenzter Präzision bei der Angabe, - nicht vorhanden

6.2.4.1 Niederschlag

Für die Abflussbildung sind Niederschläge in großen Mengen bzw. hohen Intensitäten eine notwendige Bedingung. Zur Beschreibung der Niederschlagsverteilung wurde das Rasterprodukt RADOLAN RW des Deutschen Wetterdienstes genutzt. Dabei handelt es sich um flächendeckende Niederschlagsdaten für das Gebiet Deutschlands, die in der räumlichen Auflösung 1 km x 1 km im Intervall von einer Stunde verfügbar sind. Es handelt sich um Regenradardaten, die im sog. „Aneichverfahren" mit Stationsdaten abgeglichen werden (Bartels et al., 2004). Eine Validierung der Daten hat gezeigt, dass der mittlere absolute Fehler im Vergleich zu Stationsniederschlägen mit 1,05 mm/d beziffert werden kann (DWD, 2017).

Die stündlichen Niederschlagsdaten bilden die Grundlage des Dateneingangs für die flächendifferenzierte Modellierung der Direktabflüsse. Des Weiteren wurden sie verwendet, um Tageswerte zur Bestimmung der Vorfeuchte nach Kleeberg & Overland (1989) zu generieren. Die Vorfeuchte VN_{mit} wurde flächendifferenziert ermittelt. Dazu wurden die stündlichen Daten des RW-Produktes in Tagessummen umgerechnet. Als jahreszeitlicher Rahmen zur Charakterisierung der langjährigen mittleren Vorfeuchte VN_{mit} wurden die Vorfeuchten der 30 Tage (Mittelwert) vor dem Tag des Ereignisses verwendet. Insgesamt stehen vollständige RADOLAN-RW-Daten ab dem Jahr 2006 zur Verfügung. Für ein Ereignis, das z. B. am 31. Mai 2016 stattfand, wurden also die täglichen Vorregenindizes vom 1. bis zum 30. Mai der Jahre 2006 bis 2015 berechnet und deren Mittelwert (VN_{mit}) bestimmt.

6.2.4.2 Digitale Geländemodelle

Daten der digitalen Geländemodelle dienen der Erzeugung des Hangneigungsrasters als Gradient der Höhe. Dazu wurde das Rasterprodukt EU-DEM v1.1 des Copernicus Land Monitoring Service verwendet, das flächendeckend für Europa zur Verfügung steht. Die Rasterbreite beträgt 25 m und die Genauigkeit der Höhen liegt bei ca. 7 m. Die Daten werden für Anwendungen im Bereich der Hochwassermodellierung empfohlen (EEA, 2017), wobei diese skalenabhängig ist. Für die Zwecke der vorliegenden Studie (Abflussbildung) werden die vorliegende Auflösung und Genauigkeit als ausreichend angesehen.

6.2.4.3 Curve-Numbers: Literaturrecherche und Qualitätssicherung

Die Curve-Number (CN) spiegelt die Belastungsaufteilung des Niederschlags wider, d. h. sie bestimmt, welcher Anteil des Niederschlags abflusswirksam wird. Bei der Bestimmung der Curve-Number werden Niederschlagsdaten mit Oberflächen- oder Direktabflussdaten in homogenen Einzugsgebieten (bezogen auf Bodenart und Landnutzung) oder im Versuchsaufbau auf Feldskala in Zusammenhang gesetzt.

Grunddaten: Das National Engineering Handbook 630

Die umfänglichste Primärquelle für CN-Werte bildet das sogenannte *„National Engineering Handbook Part 630, Hydrology"*, im Folgenden kurz: NEH-630. Die dort enthaltenen Daten basieren auf Messungen im nordamerikanischen Raum, jedoch ist das exakte methodische Vorgehen sowie die Datengrundlage nicht im Detail dokumentiert. Das Kapitel 9 des NEH-630 (*Hydrologic Soil-Cover Complexes*) enthält eine umfangreiche Aufstellung von Curve-Numbers hinsichtlich ackerbaulicher Nutzung u. a. mit Unterscheidungen in Brache (*fallow*), Reihenkulturen (*row crop*), geschlossenen Beständen (*small grain*) etc. Des Weiteren werden Bewirtschaftungsaspekte berücksichtigt, z. B. gerade Reihen (*straight row*), konturiert oder höhenlinienparallel (*contoured*), Bedeckung mit Mulch (*crop residue*) etc.

Zudem spielt der hydrologische Zustand der Fläche eine wichtige Rolle. Damit wird der Summeneffekt folgender infiltrationsbegünstigender oder -hemmender Faktoren nach (USDA NRCS, 2004b) zusammengefasst:

- Vegetationsdichte,
- Bodenbedeckungsgrad im Jahresverlauf,

- Anteil der Zwischensaat,
- Anteil des Ernterückstands,
- Bodenbearbeitung.

Bei Ackerflächen hängen die Vegetationsdichte und der Bodenbedeckungsgrad maßgeblich von der Kulturpflanze ab. Zudem ist der Bodenbedeckungsgrad aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte von Aussaat und Ernte jahreszeitabhängig. Folglich ist auch der hydrologische Zustand zeitlich variabel und wird im NEH-630 je nach Landnutzung bei Ackerflächen in zwei und bei Grünland sowie Waldflächen in drei Klassen (*poor*, ggf. *fair*, *good*) eingeteilt. In Hinblick auf die hier untersuchten Ereignisse, die ausnahmslos zwischen Ende Mai und Anfang Juni lagen, wurden die Zuordnungen kulturabhängig auf diese Jahreszeit ausgerichtet.

Weiterführende Datenrecherche hinsichtlich nicht-wendender Bodenbearbeitung

In Voges (1999) sind CN-Werte für Ackerland (allgemein) auf Grundlage der Daten im NEH-630 (USDA NRCS, 2004b) aufgeführt. Die Werte entsprechen etwa dem Mittel zwischen Reihenkulturen und geschlossenen Beständen. Daher eignen sie sich für die notwendige Parametrisierung von unspezifischem Ackerland als Näherung, jedoch handelt es sich dabei nicht um eigene Messungen. Basierend auf diesen Daten nahm Halbfass (2005) verringerte Curve-Numbers für konservierende Bodenbearbeitung auf Ackerflächen aufgrund der infiltrationsbegünstigenden Faktoren an. Ein messtechnischer Nachweis fand allerdings nicht statt, daher wurden die Angaben nicht in den Datenkatalog aufgenommen.

In Bonta & Shipitalo (2013) wurde der Einfluss langjähriger Direktsaat (engl. no-till) nach einer Phase konventioneller Bewirtschaftung auf Maisflächen mit der hydrologischen Bodenklasse C untersucht. Die ausgewertete Curve-Number lag bei 66,3, wobei gemäß NEH-630 (USDA NRCS, 2004b) CN=82 erwartet wurden. Als Ursache für diese außergewöhnlich hohe Infiltrationsleistung wurde vor allem auf die aktive Bodenfauna und die daraus resultierenden Makroporen vermutet (Bonta & Shipitalo, 2013).

Zur Qualitätssicherung wurden alle Literaturwerte auf Plausibilität und Konsistenz überprüft. Dazu müssen zwei Kriterien erfüllt sein:

- CN-Werte müssen, besonderer Effekte ungeachtet (z. B. Verschlämmung), mit absteigender Bodenklasse (von A nach D) zunehmen und
- zwischen unterschiedlichen Datenquellen darf bei ähnlichen Landnutzungen keine große Diskrepanz herrschen und CN-Werte infiltrationsbegünstigender Bewirtschaftungsformen (z. B. nicht-wendende Bodenbearbeitung) sollten eine geringere Curve-Number aufweisen als die wendende Bearbeitung um sicherzustellen, dass die Einflüsse von Messanordnung, Datengrundlage und Umweltfaktoren minimal sind.

Nach der Datenprüfung wurden die Curve-Numbers als Datenbasis zusammengefasst. Die Einträge enthalten für jede Landnutzung den CN-Wert zur entsprechenden Bodenklasse. Dabei handelt es sich um eine CN-spezifische Landnutzung, die sich von der datensatzspezifischen Landnutzung unterscheidet, daher musste für jede Datengrundlage eine Zuordnung stattfinden. Dazu wurde in den Datensätzen jede tatsächliche Landnutzungsart in eine CN-spezifische Landnutzung reklassifiziert (CN-ID), beispielsweise *Silomais* in *Reihenkultur, hydrologisch ungünstig*. Bei der Zuweisung des hydrologischen Zustands (infiltrationsfördernd oder –hemmend) wurde vor allem das Vegetationsstadium der Frucht zum Zeitpunkt des Ereignisses berücksichtigt. Tabelle 8 zeigt die relevantesten CN-Werte der vorliegenden Untersuchungen.

Tabelle 8: Liste ausgewählter Curve-Number-Werte

CN-ID	CN-spezifische Landnutzung	CN_{II} nach hydrologischer Bodenklasse				Quelle
		A	B	C	D	
Forst- und Grünland						
46	Wald	36	60	73	79	USDA NRCS (2004b)
41	Wiesen- und Buschlandschaft, hydrologisch günstig*	30	48	65	73	USDA NRCS (2004b)
44	Baum-/Wiesenlandschaft (50:50), hydrologisch günstig*	32	58	72	79	USDA NRCS (2004b)
37	Weidelandschaft, hydrologisch günstig*	39	61	74	80	USDA NRCS (2004b)
38	Wiese ohne Weideaktivität	30	58	71	78	USDA NRCS (2004b)
Ackerflächen unspezifisch						
0	Acker (konventionell)	67	78	86	89	Voges (1999)
Geschlossene Bestände						
17	Geschlossene Bestände, gerade Reihen, hydrologisch ungünstig***	65	76	84	88	USDA NRCS (2004b)
18	Geschlossene Bestände, gerade Reihen, hydrologisch günstig***	63	75	83	87	USDA NRCS (2004b)
19	Geschlossene Bestände, gerade Reihen, 5-20 % Bedeckung mit Mulch	64	75	83	86	USDA NRCS (2004b)
20	Geschlossene Bestände, gerade Reihen, >20 % Bedeckung mit Mulch	60	72	80	84	USDA NRCS (2004b)
Reihenkulturen						
5	Reihenkulturen, gerade Reihen, hydrologisch ungünstig ***	72	81	88	91	USDA NRCS (2004b)
6	Reihenkulturen, gerade Reihen, hydrologisch günstig ***	67	78	85	89	USDA NRCS (2004b)
7	Reihenkulturen, gerade Reihen, 5-20 % Bedeckung mit Ernterückständen	71	80	87	90	USDA NRCS (2004b)
8	Reihenkulturen, gerade Reihen, >20 % Bedeckung mit Ernterückständen	64	75	82	85	USDA NRCS (2004b)
51	Mais, Direktsaat	50***	60***	66.3	69***	Bonta & Shipitalo (2013)

*hydrologisch günstig: Bedeckungsgrad >75 %

**nicht in der vorliegenden Studie verwendet, da es sich um Annahmen handelt

***hydrologisch günstig: infiltrationsfördernd, hydrologisch ungünstig: infiltrationshemmend

****keine Messwerte außer für C; Abschätzung für A, B, D anhand des Mittelwertes für die Übergänge C->D (+4 %), C->B (-9 %), C->A (-24 %) der Curve-Numbers für alle Bewirtschaftungsformen der Reihenkulturen in USDA NRCS (2004b)

Nachdem die Datenbasis (CN_{II}-Werte) aufgebaut war, wurde eine Verknüpfung der datensatzspezifischen Nutzung (z. B. Winterweizen) mit der CN-spezifischen Landnutzung (z. B. geschlossene Bestände, gerade Reihen, hydrologisch günstig) hergestellt.

6.2.4.4 Landnutzung

Datengrundlage der Landbedeckung bzw. -nutzung bildet das digitale Landschaftsmodell Basis-DLM (AAA-Modellierung) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG, 2016). Darin werden topographische Objekte basierend auf dem AFIS-ALKIS-ATKIS-Datenmodell und dem ATKIS-Objektartenkatalog dargestellt. Die Sachebenen (Gewässer, baulich geprägten Flächen, Vegetationsflächen, Infrastruktur, Forst- und Landwirtschaft etc.) wurden im Rahmen der Datenbearbeitung sinnvoll zusammenzufügt oder ggf. verschnitten.

Mit dem Basis-DLM können landwirtschaftliche Flächen vor allem in Ackerland, Obst- und Beerenbestände, Weingärten sowie Grünland differenziert werden. Die Differenzierung hinsichtlich landwirtschaftlicher Nutzung ist allerdings noch relativ gering.

Für eine hinreichende Beschreibung des hydrologischen Verhaltens von landwirtschaftlichen Flächen auf Flurstücks- bzw. Schlagebene werden zusätzliche Informationen benötigt. Dafür bietet sich die Verarbeitung der InVeKoS-Daten[19] an, mit denen beispielsweise Mais- von Weizenflächen unterschieden werden können. Die InVeKoS -Daten wurden nicht für alle Gebiete seitens der Länder bereitgestellt, trotz Inanspruchnahme der Amtshilfe durch das UBA. Für die Falluntersuchungen 1, 3 und 4 (Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen und Bayern) konnten die InVeKoS-Daten verwendet werden (LfL BY, 2018; LWK NW, 2018; Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz (MWVLW), 2018). Es wurden anonymisierte Informationen zur Hauptfrucht im Jahr des Starkregenereignisses (2015 bzw. 2016) verarbeitet und dienten der Ergänzung des zugrundeliegenden Basis-DLM. Für den zweiten Fall (Engebach/Hod, Baden-Württemberg) musste ausschließlich das Basis-DLM verwendet werden.

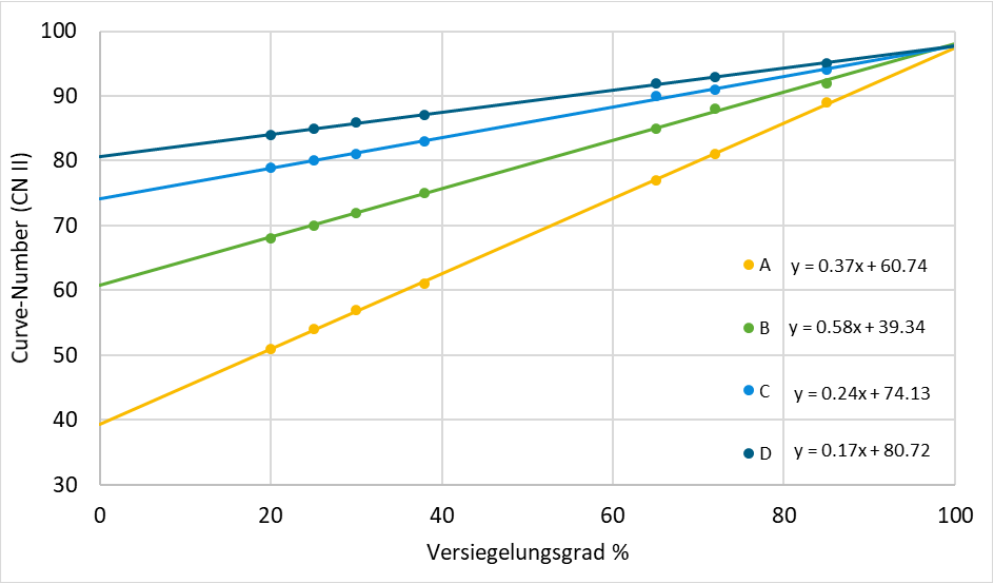
6.2.4.5 Versiegelungsgrad

Flächen, die von Siedlung, Infrastruktur, Gewerbe und Industrie geprägt sind, weisen komplexe Strukturen in Hinblick auf Infiltrationseigenschaften aufgrund ihrer oftmals (teil-)versiegelten Oberflächen auf. Sie können jedoch mit zusätzlichen Informationen zur Versiegelung differenziert werden. Dazu wurde der aus Satellitendaten abgeleitete Versiegelungsgrad (High Resolution Layer „Imperviousness“ 2015) des Copernicus Land Monitoring Service (EEA, 2018) herangezogen. Die räumliche Auflösung der Rasterdaten beträgt 20 m.

Im Arbeitsbericht zu Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen (DVWK, 2003) sind für diskrete Versiegelungsgrade CN-Werte für jede Bodenklasse gegeben. Diese sind in Abbildung 34 als Punkte dargestellt. Mittels linearer Regressionsgleichungen wurde eine kontinuierliche Verteilung hergestellt, die zur Zuordnung des Versiegelungsgrads zu einem CN_{II}-Wert dient.

[19] Kontrollinstrument, womit EU-Mitgliedstaaten landwirtschaftliche Daten verwalten

Abbildung 34: Zuordnung von Versiegelungsgrad zu CN_{II}-Wert mit Punktdaten aus DVWK (2003)



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

6.2.4.6 Bestimmung der hydrologischen Bodenklassen

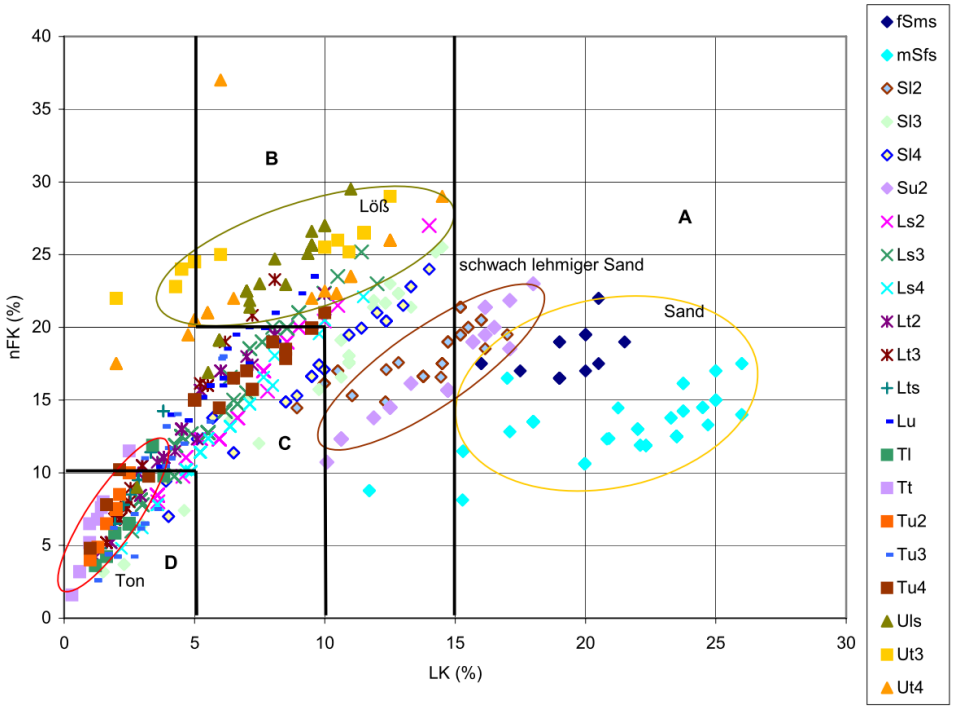
Hydrologische Bodenklassen (HSG, engl. hydrologic soil group) dienen der Aggregierung von Böden mit ähnlichem Wasserleitfähigkeits- bzw. -speichervermögen. Im NEH-630 (USDA NRCS, 2009) werden vier Gruppen unterschieden:

- **Gruppe A**: geringes Abflussbildungspotential, z. B. Sande, Kiese, Böden mit Tonanteil <10 % und Sandanteil >90 %
- **Gruppe B**: mäßig geringes Abflussbildungspotential, z. B. lehmige Sande, sandige Lehme
- **Gruppe C**: mäßig hohes Abflussbildungspotential, z. B. Lehme, tonige Schluffe, lehmige Tone
- **Gruppe D**: hohes Abflussbildungspotential, z. B. (quellende) Tone, Böden mit Tonanteil >40 % und Sandanteil <50 %, geringer Grundwasserflurabstand

Die bodenhydraulischen Eigenschaften bestimmen primär das Infiltrations- und Wasserspeichervermögen von Böden. Wichtige Parameter zur Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften von Böden sind z. B. die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf), die nutzbare Feldkapazität (nFK) und die Luftkapazität (LK). Im NEH-630 findet die hydraulische Leitfähigkeit zusammen mit dem Grundwasserflurabstand und der Tiefenlage der undurchlässigen Bodenschicht Anwendung. Allerdings erfordert diese Methodik sehr viele Informationen. Vor allem die Lage der undurchlässigen Schicht lässt sich aus Datensätzen, wie z. B. den Bodenkarten 1:50.000 der Länder, nicht ablesen.

Im Rahmen der Erstellung der flächendeckenden Oberflächenabflusskarte für den Hydrologischen Atlas Deutschlands (BGR, 2004) wurde eine Methodik entwickelt, um anhand hydraulischer Bodenparameter eine Zuordnung zur hydrologischen Bodenklasse zu treffen. Diese Zuweisung erfolgt durch die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität. Der Vorteil dabei liegt u. a. in der guten Datenverfügbarkeit, da sie häufig Bestandteil von Datensätzen zu Bodeneigenschaften (z. B. in Bodenkarten wie der aktuellen Bodenübersichtskarte 1:200.000, BÜK 200) sind.

Abbildung 35: Zuordnung der hydrologischen Bodenklasse anhand der Bodenparameter Luftkapazität (LK) und nutzbare Feldkapazität (nFK) nach BGR (2004)



Quelle: aus BGR (2004)

In Abbildung 35 sind die Felder der hydrologischen Bodenklassen A bis D deutlich durch quantitative Kriterien der Parameter LK und nFK voneinander abgegrenzt. Je höher die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität, desto höher das Drainage- bzw. Wasserspeichervermögen der Böden. Die Bodenarten sammeln sich meist in einem HSG-Feld, jedoch ist auch ersichtlich, dass die Streuung bis in benachbarte Felder hineinreicht. In Einzelfällen kann eine Zuordnung nach Bodenart also mehrdeutig sein.

6.2.4.7 Bodenparameter

Die Ableitung der HSG erfolgte durch die Analyse von Bodendaten. Hierzu wurden Bodendatensätze in den Maßstäben 1:25.000 bzw. 1:50.000 aus den Daten der betroffenen fünf Bundesländer in den vier Untersuchungsgebieten verarbeitet. Die Datensätze sind aufgrund der verschiedenen Datenquellen nicht homogen.

BFD50, Rheinland-Pfalz und BK50 Nordrhein-Westfalen

Für die drei Teileinzugsgebiete bei Bad Neuenahr-Ahrweiler (Fall 1) wurden die Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD50 RP) vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RP) zur Verfügung gestellt (LGB RP, 2018). Darin sind ausführliche Informationen zum Bodenaufbau enthalten:

- Bodentypen und Bodenarten, Differenzierung in bis zu sieben Bodenhorizonten,
- Hydraulische Parameter nFK, LK mit eindeutigem Zahlenwert für jeden Horizont,
- Horizontbezogene Informationen (inkl. Mächtigkeit) bis maximal 2 m Tiefe.

Einige Bereiche der oben genannten Teileinzugsgebiete (Fall 1) liegen in Nordrhein-Westfalen, daher wurde zusätzlich die Bodenkarte 1.50.000 (BK50 NW) herangezogen (GD NRW, 2018):

- Angabe von Bodentypen und Bodenarten für eine repräsentative Bodenschicht,
- Hydraulische Parameter nFK, LK, k_f mit eindeutigem Zahlenwert,
- Bezugstiefe (effektive Durchwurzelungstiefe) je nach Bodenprofil von 0,2 m bis 1,1 m.

Grundsätzlich sind die beiden Datensätze BK50 NW und BFD50 RP kompatibel, da beide Angaben zu den Parametern LK und nFK enthalten. Hinsichtlich der Differenzierung der Horizonte in der BFD50 RP sowie der variierenden Bezugstiefe der BK50 NW herrschen allerdings große Unterschiede.

Für eine Harmonisierung war also die Berechnung eindeutiger LK- und nFK-Werte sowie eine Verminderung der Bezugstiefe auf maximal 1,1 m bei der BFD50 RP notwendig. Schließlich wurden eindeutige Luftkapazitäten und nutzbare Feldkapazitäten durch Gewichtung der Horizontmächtigkeiten berechnet. Zum Angleichen der Bezugstiefe wurden die Informationen der Horizonte unterhalb 1,1 m Tiefe nicht berücksichtigt. Zudem wurden die Geometrien der Datensätze in den Randbereichen manuell harmonisiert.

BK50, Baden-Württemberg

Für das Gebiet um Bad Bellingen (Fall 2) bildete die Bodenkarte 1:50.000 (BK50 BW) die Grundlage (LGRB BW, 2015):

- Angabe von Bodentypen und Bodenart, Differenzierung in bis zu 3 Bodenhorizonte,
- Zuweisung hydraulischer Parameter in Form von Klassen mit einer Bezugstiefe von 100 cm mit teilweise differenzierten Angaben für Bodenhorizonte,
- Anthropogen geprägten Flächen, z. B. Siedlungsgebiete, Deponien, Abgrabungen und Verfüllungen wurden keine Bodenarten oder –parameter zugewiesen.

Die Angabe der Bodenart ist in bis zu drei Horizonte differenziert. Die Parameter LK, nFK und kf sind in Klassen eingeteilt, die Wertebereiche (Minimum, Maximum) abbilden. Die Wertebereiche beziehen sich dabei auf den oberen Meter Boden. Im Datensatz fanden sich vereinzelt Angaben zu Unter- und Oberboden, wobei beide Angaben Beachtung fanden. Auf Grundlage der Minimal- und Maximalwerte wurden Mittelwerte für die LK sowie die nFK berechnet.

ÜBK25, Bayern

Für die zwei Einzugsgebiete Simbach und Wolfsbach/Aichbach (Fälle 3 und 4) in Bayern waren lediglich Bodendaten aus der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK25 BY) verfügbar (LfU BY, 2017). Dabei handelt es sich um Bodenbeschreibungen (Kartenrandlegende) auf Grundlage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5):

- Angaben zu Bodentypen und Bodenart,
- keine hydraulischen Parameter,
- keine Bezugstiefen.

Die Zuweisung hydrologischer Bodenklassen erfolgte anhand des Bodenartenspektrums der ÜBK25 BY (s. Tabelle 9) und dem Einordnungsschema der BGR (2004), s. Abbildung 35.

Tabelle 9: Zuordnung von Bodenartenspektren der ÜBK25 BY zu hydrologischen Bodenklassen

Bodenartenspektrum	HSG
Kiessand-Sandkies	A
Lehm über Sand-/Schluffkies	B
Sand-Schluff	B
Lehmsand-Sandlehm	B
Schluff	B
Schluff-Lehm	C
Schluff-Schluffton	C
Lehm	C
Lehm über Lehm-Tonschluff	C
Sandlehm-Schluffton	C
Lehm-Schluffton	C
Schluff-Lehm über Lehm-Ton	C
Lehm über Ton	C

Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

6.2.4.8 Modellgeometrie und Qualitätssicherung

Der Modellaufbau (Raster, Vektor, Auflösung etc.) wird aus zweckmäßigen Gründen an die Struktur der Eingangsdaten und das verfolgte Ziel angepasst. Hierbei stehen Rasteransätze den polygonbasierten Berechnungen gegenüber. Erstere sind aufgrund des einheitlichen räumlichen Aufbaus leichter zu handhaben, während letztere Flächenelemente erhalten, da die Geometrie und Größe jedes Polygons individuell sein kann. Die Polygone bilden Einheiten, innerhalb derer das hydrologische Verhalten gleichbleibt, daher werden die kleinsten Einheiten als HRU (engl. hydrologic response unit) bezeichnet.

In dieser Studie wurde der Vektoransatz gewählt. Die Modellgeometrie hängt dabei von den räumlichen Eigenschaften der Boden- und Landnutzungsdaten ab, die miteinander verarbeitet werden müssen. Liegen ATKIS Basis-DLM und InVeKoS-Daten vor, müssen diese zunächst zur Erzeugung eines eindeutigen Landnutzungsdatensatzes kombiniert werden. Dazu wird die Differenz (*difference*) aus Basis-DLM und InVeKoS-Daten gebildet und das Ergebnis im Anschluss erneut mit den InVeKoS-Daten zusammengefügt (*merge*). Als Folge entstehen Polygone mit sehr kleinen Flächen, die unbedeutend für die Abflussbildung auf Einzugsgebietsskala sind, daher wurden Polygone mit Flächen kleiner als 100 m² im GIS mittels *dissolve* aufgelöst und mit dem benachbarten Polygon (größte Fläche) verschmolzen (*merge*). Der aus den vorigen Schritten resultierende kombinierte Landnutzungsdatensatz wird im nächsten Schritt mit den Bodendaten verschnitten (*intersect*). Hierbei entstehen weitere Polygone mit kleinen Flächen, die wie oben mit selbigem Kriterium (100 m²) bereinigt wurden.

Die Ausdehnung der Berechnungseinheiten (HRU) ist für die korrekte Abbildung des Abflussprozesses bei sehr lokalen Ereignissen von großer Bedeutung. Die geometrischen Randbedingungen der Berechnungen werden in der nachfolgenden Tabelle 10 kurz zusammengefasst. Demnach liegt die durchschnittliche Polygonfläche zwischen 0,5 und 0,9 ha, wobei sich die maximalen Flächeninhalte im Bereich von ca. 20 bis ca. 100 ha bewegen.

Tabelle 10: Übersicht zur Modellgeometrie

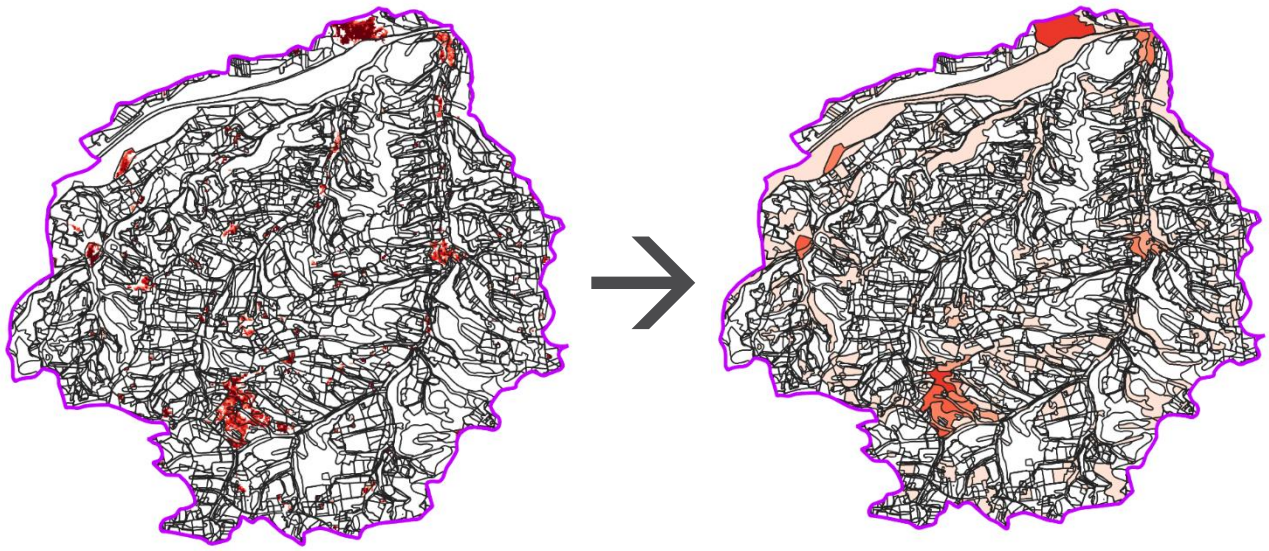
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Anz. Polygone (HRU)	2.1583	5.407	6.097	8.932
Durchschnittliche Flächengröße [ha]	0,63 (Max: 35,45)	0,84 (Max: 20,95)	0,55 (Max: 66,47)	0,72 (Max: 104,03)

Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

6.2.4.9 Verarbeitung von Rasterinformation in Vektorobjekten

Nach dem Verschnitt der Landnutzung mit dem Bodendatensatz zur Erzeugung der Modellgeometrie wurden für die resultierenden kleinsten hydrologischen Einheiten (HRU) Polygonmittelwerte für die Parameter Hangneigung in Prozent (alle Flächen) und der Versiegelungsgrad (nur siedlungsgeprägte Flächentypen) berechnet. Der Prozess wird in der Abbildung 36 veranschaulicht.

Abbildung 36: Prinzip der Verarbeitung von Rasterinformation in Polygonmittelwerte



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

6.2.5 Grenzen des Verfahrens

Den Grenzen kommt vor allem als Randbedingung für Schlussfolgerungen eine bedeutsame Rolle zu, da bei der Ableitung von Handlungsempfehlungen Unschärfen berücksichtigt werden müssen. Das Curve-Number Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989) bildet nur einen Teil des gesamten Abflussprozesses ab und beschreibt die Menge des abflusswirksamen Niederschlags. Eine anschließende Modellierung der Abflusskonzentration, die den Fließpfad und die Fließgeschwindigkeit berücksichtigt, findet nicht statt.

Es handelt sich um ein empirisches Verfahren zur Abschätzung der Direktabflussmenge diskreter Ereignisse. Die dabei verwendeten Grunddaten des NEH-630 (USDA NRCS, 2004b) wurden im amerikanischen Raum erhoben und sind nicht zwangsläufig gleichzusetzen mit mitteleuropäischen Vegetations- und Klimaverhältnissen.

In Kapitel 6.2.4.6 wurden die hydrologischen Bodenklassen erläutert. Die Aufteilung in vier große Klassen ist sehr grob, womit die detaillierte Abbildung von hydraulischen Bodeneigenschaften stark begrenzt wird. Folglich birgt die Parametrisierung große Fehlerspannen. Zusätzliche Unsicherheiten

können entstehen, wenn die Ermittlung der hydrologischen Bodenklassen nur auf Grundlage der Bodenarten geschieht (z. B: Fallbeispiele 3 und 4 auf Grundlage der ÜBK25 BY) anstatt mittels hydraulischer Eigenschaften.

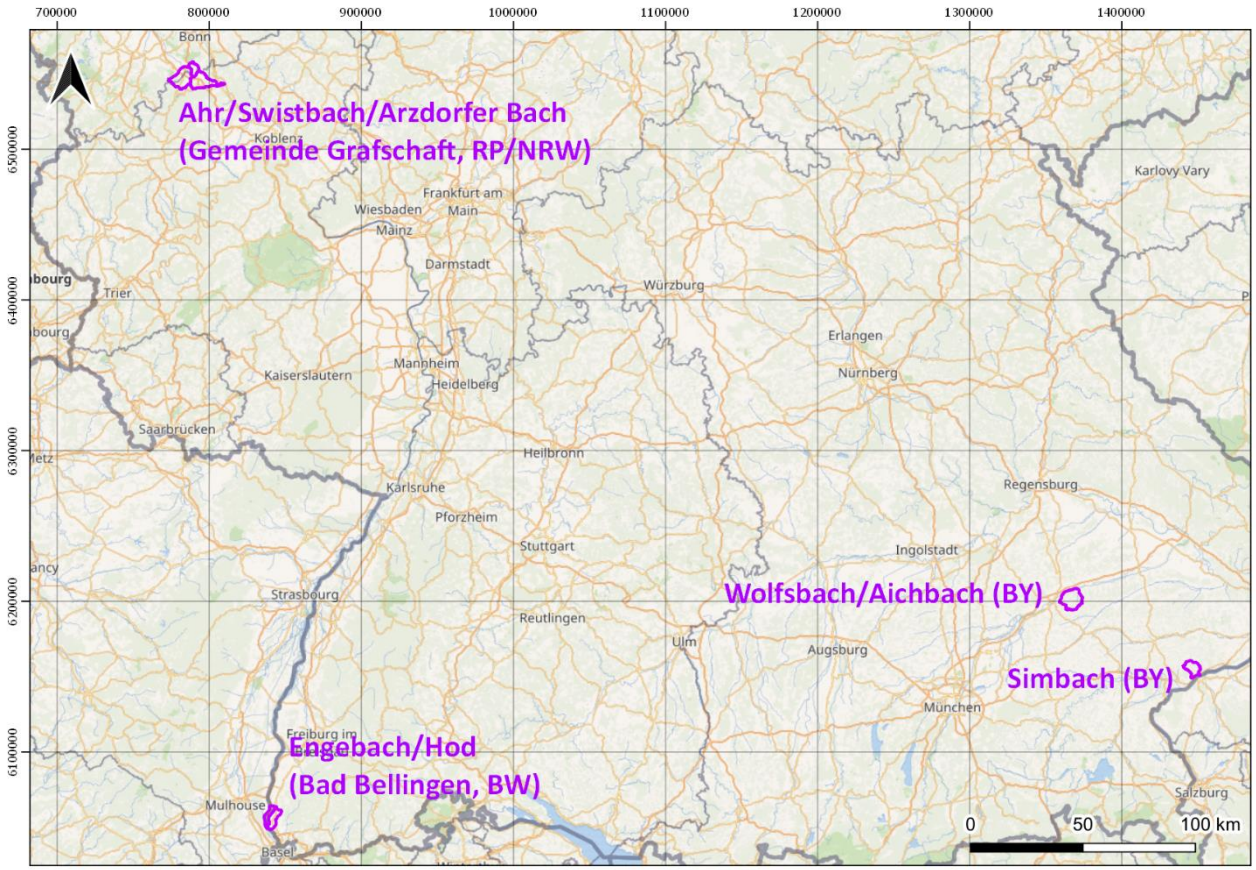
Eine Integration von Grundwasserinformation zur Erfassung von Sättigungsflächen wird ebenfalls vernachlässigt. Im klassischen SCS-Curve-Number Verfahren geschieht dies über die hydrologischen Bodenklassen und Flurabständen <0,6 m (USDA NRCS, 2009). Für regionale Analysen ist der Anteil der Flächen mit derartigen Flurabständen zu vernachlässigen, jedoch müssen eventuelle Sättigungsflächen bei lokalen Aussagen, z. B. in Talsohlen, Berücksichtigung finden. Hier können bei sehr geringen Flurabständen des Grundwassers extreme Unterschätzungen des Direktabflusses auftreten.

6.3 Standortfaktoren und Eingangsparameter der Gebiete (Fallbeispiele)

6.3.1 Geographische Einordnung und Relief

Die regional analysierten Untersuchungsgebiete liegen im west- und süddeutschen Raum (s. Abbildung 37). Die Untersuchungsgebiete bestehen aus bis zu drei hydrologischen Teileinzugsgebieten, die sich in den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg sowie Bayern befinden. Übersichtskarten mit Geländehöhenmodellen befinden sich in der jeweiligen thematischen Karte in der Anlage 9.1. Die Flächen sowie die durchschnittlichen Gebietsgefälle sind in der nachfolgenden Tabelle 11 dargestellt.

Abbildung 37: Übersichtskarte zur geographischen Lage der Fallbeispiele



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH; Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende

Tabelle 11: Übersicht zu den Einzugsgebietsflächen und dem durchschnittlichen Gebietsgefälle

Parameter	Fall 1: Ahr/Swistbach/ Arzdorfer Bach	Fall 2: Engebach/Hod	Fall 3: Simbach	Fall 4: Wolfsbach/ Aichbach
Bundesland	**RP, NW**	**BW**	**BY**	**BY**
Fläche [km²]	122,9	45,5	33,3	64,4
Durchschnittliches Gebietsgefälle [%]	6,3	10,4	12,0	8,7

Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

Das Untersuchungsgebiet des ersten Falls umfasst die Gemeinde Grafschaft (Rheinland-Pfalz) und nördlich benachbarte Gebiete Nordrhein-Westfalens. Die bedeutendsten Siedlungsgebiete sind Bad Neuenahr-Ahrweiler sowie Meckenheim und Remagen.

Das Untersuchungsgebiet besteht aus drei Teileinzugsgebieten (TEZG). Das größte TEZG entwässert nach Süden in die Ahr, die nach Osten in den Rhein fließt. Nördlich dieses TEZGs verlaufen Wasserscheiden, die zwei kleine TEZG abgrenzen. Der Arzdorfer Bach entwässert nach Norden und fließt dem Rhein flussabwärts der Ahr zu, während der Swistbach nach Nordwesten fließt und einen Nebenfluss der Erft bildet.

Die absoluten Höhen liegen bei ca. 80 bis 500 m NN und spiegeln die Höheniveaus des Rheintals und des Rheinischen Schiefergebirges wider. Die größten Gefälle treten mit 10 bis 30 % an den Hängen des Ahrtals auf, wobei stellenweise Steilhänge Neigungen von 70 % erreichen. In den kleineren TEZG des Swistbaches und des Arzdorfer Baches reichen die Geländeneigungen flächenhaft bis 5 % und lokal bis maximal 30 %.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

Das zweite Untersuchungsgebiet liegt in Baden-Württemberg an der deutsch-französischen Grenze am Oberrhein und besteht aus zwei TEZG, die sich in Nord-Südrichtung erstrecken. Im Norden befinden sich die Stadt Bad Bellingen und im Süden Efringen-Kirchen. Weitere größere Siedlungsgebiete sind Rheinweiler und Kleinkems, die sich dazwischen befinden.

Lokale Erhöhungen in der Nähe der Ortschaften Bad Bellingen und Hertingen grenzen die Teileinzugsgebiete nach Norden ab. Der westliche flussnahe Teil zeichnet sich durch kleinere Gerinne, die in den Rhein entwässern, aus. Im östlichen Gebiet entspringen diverse Bäche und fließen nach Süden bzw. Südwesten in den Engebach bzw. in die Hod. Vor Efringen-Kirchen erfolgt eine Änderung der Fließrichtung der Hod nach Westen bzw. Nordwesten zum Rhein.

Die Höhen reichen von 200 bis 500 m NN. Im Rheintal liegen die Geländeneigungen überwiegend bei 0 bis 5 %. Durch Böschungen, deren Neigungen 10 bis 30 % nördlich bzw. 30 bis 60 % (vereinzelt bis 90 %) südlich von Rheinweiler aufweisen, wird das Gebiet von den Hochlagen getrennt.

Fallbeispiel 3 - Simbach

Das dritte Fallbeispiel befindet sich in Simbach am Inn in Bayern. Es handelt sich um ein einzelnes EZG mit annähernd kreisförmiger Geometrie, dessen Hauptvorflut der Simbach bildet. Dieser wird aus drei parallel südöstlich verlaufenden Bächen gespeist und mündet schließlich in den Inn.

Die Reliefunterschiede sind hier im Vergleich zu den vorangegangenen Gebieten mit einer Spanne von 340 bis ca. 550 m NN (Schellenberg) geringer. Die Täler zeichnen sich durch asymmetrische Querprofile aus, meist mit einem steilen Hang (30-50 %) mit Südwest-Gradient und einen flacheren Hang (bis ca. 30 %) mit Nordost-Gefälle.

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

Das Untersuchungsgebiet des vierten Fallbeispiels liegt ebenfalls in Bayern in der Nähe der Stadt Landshut. Es handelt sich um zwei zusammengefasste Einzugsgebiete, deren Hauptvorfluter, Wolfsbach und Aichbach, nach Nordosten in die Isar entwässern. Der Wolfsbach im westlichen Teil fließt in den Stausee Niederaichbach, während der sich im östlichen Teil befindliche Aichbach erst hinter dem Staubauwerk in die Isar mündet.

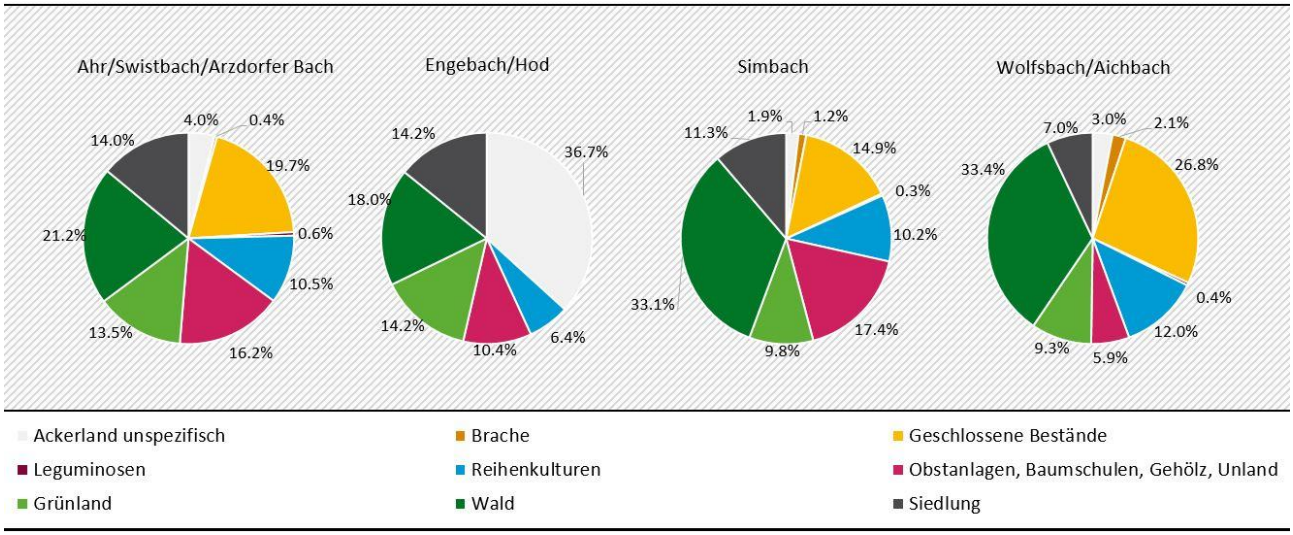
Das Tal der Isar liegt bei ca. 375 m NN und weist Geländeneigungen von weitestgehend 0 bis 2 % auf. Durch Steilhänge von 30 bis 60 % ist das Tal vom höher gelegenen Gelände des Untersuchungsgebietes getrennt. Dort werden maximale Höhen von etwa 540 m NN erreicht. Die Hangneigungen liegen in der Regel bei bis zu 20 %, wobei in den Tälern der Nebenflüsse des Aichbachs bzw. Wolfsbachs das Gelände lokal bis max. 60 % geneigt ist.

6.3.2 Landnutzung und Zuordnung der Curve-Number

Die Landbedeckung bzw. -nutzung ist ein wichtiger Parameter für die Entstehung von Oberflächenabfluss. Zusammen mit den Eigenschaften des Bodens, bestimmt die Landbedeckung bzw. -nutzung das Infiltrations- und Rückhaltevermögen eines Einzugsgebietes. Von Relevanz ist einerseits der allgemeine Typ der Landnutzung (z. B. Acker, Grünland, Wald, Siedlung etc.), andererseits sind Detailinformationen notwendig (z. B. Fruchtfolge auf Äckern, Baumbestand bei Wäldern, Versiegelungsgrad bei Siedlungen etc.) um eine genaue Charakterisierung vornehmen zu können. Jeweils in der Karte 5 in den gebietsspezifischen Anlagen 9.1 werden die räumlichen Verteilungen der Landnutzung veranschaulicht.

Da das Infiltrations- und -speichervermögen sowohl landwirtschaftlich genutzter als auch versiegelter Flächen im Fokus der Aufgabenstellung stand, wurden Gebiete ausgewählt, die entsprechend hohe Flächenanteile davon aufweisen. Nachfolgende Abbildung 38 zeigt eine Übersicht zur Landnutzung. Die Landwirtschaft zeigt hier Flächenanteile von rund 40 bis 60 % und die Ackerflächen (ohne Obstanlagen und Grünland) ca. 28 bis 44 %. Von Siedlungen geprägte Anteile bilden 7 bis 14 %.

Abbildung 38: Verteilung der Landbedeckung bzw. –nutzung. Der Anteil der Leguminosen liegt im Diagramm zwischen geschlossenen Beständen und Reihenkulturen.



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH; Datengrundlagen: InVeKoS und Statistisches Landesamt BW (2018)

Aufgrund der überwiegenden Bereitstellung von InVeKoS-Daten konnte die Bewirtschaftung der Ackerflächen zumeist sehr gut ausdifferenziert werden. Der Anteil unspezifischer landwirtschaftlicher Flächen liegt in der Regel bei nur 2-4 %. Lediglich im zweiten Fall (Engebach/Hod), wo keine InVeKoS-Daten bereitgestellt wurden, beläuft sich deren Anteil auf 37 %. Als unspezifische Ackerflächen gelten diejenigen, die im Datensatz des Basis-DLM das Attribut *Ackerland (Feld- und Beerenfrüchte)* enthalten und mit keinen weiteren spezifischen Informationen aus dem InVeKoS-Datensatz belegt sind.

Bei der Zuordnung der CN-ID (s. Kapitel 6.2.4.3) ist die Ausdifferenzierung von Mais und Wintergetreide von großer Bedeutung, da sie sich im hydrologischen Verhalten z.T. stark unterscheiden und beide Kulturen in allen Fallbeispielen häufig vorkommen. Da Mais erst etwa Ende April ausgesät wird und im Mai bzw. Anfang Juni nur sehr geringe Bedeckungsgrade aufweist, erfolgt für den Zeitraum Ende Mai/Anfang Juni die Zuordnung zur CN-spezifischen Kategorie *Reihenkultur (gerade Reihen, hydrologisch ungünstig)* (CN-ID 5). Wintergetreide weist zum genannten Zeitraum einen deutlich höheren Bedeckungsgrad auf, daher wird diesen Flächen die CN-ID 18 *Geschlossene Bestände (gerade Reihen, hydrologisch günstig)* zugewiesen. Entsprechend erhielt Sommergetreide mit geringerem Bedeckungsgrad das Attribut *hydrologisch ungünstig* (CN-ID 17).

In den vier Einzugsgebieten liegen zudem signifikante Flächenanteile mit Sonderkulturen vor, z. B. Rebflächen, Erdbeeren, Beerenobst, Obstanlagen oder Baumschulen. Eine einheitliche hydrologische Charakterisierung mittels Curve-Number ist hier jedoch nicht möglich. Daher wurden Rebflächen sowie Erdbeeren als Reihenkulturen (CN-ID 5) behandelt, Obstanlagen und Baumschulen als Baum-/Wiesenlandschaft (CN-ID 32) und Flächen mit Beerenobst als Busch-/Wiesenlandschaft (CN-ID 30).

Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

Im Gebiet der Gemeinde Grafschaft sowie deren Umland stehen Basis-DLM- und InVeKoS-Daten (Hauptfrucht 2016) zur Verfügung. Siedlungs- und Waldflächen nehmen in diesem Untersuchungsgebiet einen Anteil von rund 35 % ein. Geschlossene Bestände sind mit einem Flächenanteil von ca. 20 % vertreten, wobei diese hauptsächlich aus Winterweizen, Wintergerste und Winterraps bestehen. Reihenkulturen besitzen einen geringeren Anteil von etwa 10 bis11 %. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Zuckerrüben (ca. 4,5 %), Erdbeeren (2,5 %), Mais (2 %) und Rebflächen (1,5 %). Ihnen wurde ein für Reihenkulturen im Frühjahr typischer ungünstiger hydrologischer Zustand zugewiesen. Eine Ausnahme bilden die Zuckerrüben, da hier die Aussaat zeitlich vor der Maissaat erfolgt. Aus diesem Grund wurde für Anfang Juni bei Zuckerrüben ein guter hydrologischer Zustand angenommen. Der Anbau der Erdbeeren erfolgt mittlerweile vermehrt in Folientunneln[20]. Obstanlagen repräsentieren mit knapp 13 % zumeist Kernobst und untergeordnet Baumschulen. Die Hauptanteile des relativ hohen Anteils von 13,5 % an Grünland sind Mähweiden und Dauergrünland.

Die Flächenversiegelung ist am deutlichsten in Bad Neuenahr-Ahrweiler ausgeprägt, wo der Anteil höher versiegelter Flächen (Versiegelungsgrad ≥75 %) den Anteil geringerer Versiegelung (Versiegelungsgrad <75 %) überwiegt. In den kleineren Siedlungsgebieten nördlich von Bad Neuenahr-Ahrweiler sind die Anteile ausgeglichener, d. h. es erhöht sich der Anteil geringer versiegelter Flächen (Versiegelungsgrad <75 %). Räumlich ist hier zudem der höhere Versiegelungsgrad der Ortskerne auffällig.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

Für den zweiten Fall liegen keine InVeKoS-Daten vor, daher wurden alle verfügbaren Informationen des Basis-DLM verwendet. Auffällig ist zunächst der geringe Anteil an Waldflächen (18 %). Aufgrund der Datenlage konnten ca. 37 % der Flächen keine spezifische landwirtschaftliche Nutzung zugewiesen werden. Der Anteil der Reihenkulturen liegt bei 6 % (hier: ausschließlich Rebflächen), der Obstanlagen

[20] Pers. Mitteilung durch Landesamt für Geologie und Bergbau RP am 06.11.2018

bei 10,4 % und des Grünlands bei 14,2 %. Zur Charakterisierung der Ackerflächen, bei denen die Anbaukultur nicht näher bekannt ist, werden Daten zur Agrarstatistik BW der Gemeinden Bad Bellingen, Kandern und Efringen-Kirchen aus dem Jahr 2016 herangezogen (Statistisches Landesamt BW, 2018). Demnach entsprechen bei den Ackerflächen etwa

- 55 % Maisanbau (überwiegend Silomais),
- 27 % Winterweizen,
- 13 % Pflanzen zur Grünernte und
- 5 % Brachen.

Aufgrund dessen ist der vorher genannte Anteil an Reihenkulturen tatsächlich höher und liegt voraussichtlich bei etwa 25 bis 30 % Anteil an der Gesamtfläche, was Mais- und Rebflächen entsprechen würde. Trotz einer Abschätzung mittels Daten des Statistischen Landesamts wurden die entsprechenden Daten für geschlossene Bestände und Brachen, sowie den höheren Anteilen der Reihenkulturen nicht in Abbildung 38 aufgenommen, da diese keinen flächendifferenzierten Eingang in die Modellrechnung finden.

Von Siedlungen und Gewerbe geprägte Flächen beherrschen ca. 14 % des Gebietes. Diese liegen in den Ortschaften Bad Bellingen und Rheinweiler sowie in Efringen-Kirchen. Der Anteil höher versiegelter Flächen >75 % ist insgesamt relativ gering.

Fallbeispiel 3 - Simbach

Als Datengrundlage für das Einzugsgebiet Simbach dienen Basis-DLM und InVeKoS-Daten. Neben etwa 33 % Wäldern sind auch Wiesen sehr verbreitet und werden im entsprechenden Datensatz InVeKo mit Streuobstwiesen zusammengefasst. Da Streuobstwiesen jedoch der Kategorie „Obstanlagen und Baumschulen“ zugeordnet werden, ist es sinnvoll, die Anteile der Obstanlagen und des Grünlands gemeinsam auf ca. 26 % zu beziffern. Bei Reihenkulturen (10 %) spielen vor allem Silo- und Körnermais (diese etwa Verhältnis ca. 2:1) die größte Rolle.

Etwa 11 % sind Siedlungs- und Gewerbeflächen. Diese konzentrieren sich jedoch auf die Ortschaft Simbach am Inn und erstrecken sich nach Südwesten. Der Versiegelungsgrad der Flächen liegt meist unter 75 %, lediglich vereinzelt finden sich hochversiegelte Flächen.

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

Die Landnutzung basiert in diesem Fallbeispiel ebenfalls auf Basis-DLM und InVeKoS-Daten. Auffällig ist die weite Verbreitung der geschlossenen Bestände, die laut Abbildung 38 nahezu 27 % der Flächen einnehmen. Es handelt sich hier vorwiegend um Winterweizen und Wintergerste (Verhältnis etwa 3:1). Damit bilden die geschlossenen Bestände nach den Waldflächen (33,4 %) den zweitgrößten Flächenanteil. Obstanlagen und Grünland machen etwa 15 % der Flächen aus. Reihenkulturen haben im Vergleich zu den restlichen Fallstudien einen hohen Anteil von insgesamt 12 %, wobei es sich fast ausschließlich um Körner- und Silomais (Verhältnis ca. 1:1) handelt. Vermehrt treten die Flächen der Reihenkulturen im westlichen Teileinzugsgebiet Wolfsbach auf.

Die Siedlungsflächen besitzen in den Einzugsgebieten Wolfsbach und Aichbach einen geringen Anteil von lediglich 7 %. Der größte Teil fällt auf die Ortschaft Adlkofen. Die meisten dieser Flächen weisen einen relativ geringen Versiegelungsgrad (<75 %) auf.

6.3.3 Böden und hydrologische Bodenklassen

In den Kapiteln 6.2.4.6 und 6.2.4.7 wurde auf die verfügbaren Bodendaten eingegangen und die Methodik beschrieben, die der Ableitung der hydrologischen Bodenklassen (HSG) diente. Im Folgenden werden die Böden der vier Fallstudien jeweils mit den abgeleiteten HSG kurz in ihrer regionalen Verbreitung beschrieben.

Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

Regionalgeologisch ist der südliche Teil des Untersuchungsgebietes dem Rheinischen Schiefergebirge und das nördliche Teilgebiet der Kölner Bucht zuzuordnen. Aufgrund der dominanten Ausgangssubstrate des Rheinischen Schiefergebirges (z. B. Tonschiefer, Sandsteine, Grauwacken) und der Kölner Bucht (z. B. fluviatile Ablagerungen, Löss) sind überwiegend lehmig-tonige bzw. sandig-schluffige Bodenarten zu erwarten. Die HSG wurden mittels LK und nFK ermittelt und lassen sich gut mit den Bodentypen korrelieren.

Als Grundlage dienen die BK50 NW (GD NRW, 2018) und die BFD50 RP (LGB RP, 2018). Flächenhaft sind Parabraunerden und Braunerden ausgeprägt, wobei der Anteil der Parabraunerden nach Norden in Richtung der Kölner Bucht zunimmt. Die Braunerden korrelieren meist mit der HSG-Klasse der C-Böden, während die Parabraunerden am häufigsten durch die hydrologische Bodenklasse B vertreten wird. Im südwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes sowie dem Norden und Nordosten sind zudem Pseudogleye verbreitet und entsprechen meistens C-Böden. In Niederungen und Talsenken dominieren Gleye (C-Böden), wobei im Tal der Ahr der Bodentyp Vega (B) vorherrscht.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

Das Untersuchungsgebiet befindet sich geologisch im Holozän außerhalb des Molassebeckens und ist durch fluviatile Ablagerungen und Löss geprägt, welche die Ausgangsmaterialien der Böden bilden. Die Ermittlung der hydrologischen Bodenklassen erfolgte anhand der Mittelwerte der Minimal- und Maximalwerte der Parameter LK und nFK der BK50 BW (LGRB BW, 2015).

Das östliche TEZG ist durch den Rhein geprägt. Dort herrscht der Bodentyp Pararendzina vor, der aus Hochwasserablagerungen gebildet wurde (HSG B bis C). In höher gelegenen Bereichen ist die Pararendzina aus Hangschutt bzw. Fließerden aufgebaut und entspricht zumeist der hydrologischen Bodenklasse C. Untergeordnet und regional eher unbedeutend wird die Pararendzina von Pelosol-Pararendzina und Braunerde-Pararendzina begleitet. In kleineren Nebentälern kommen Böden aus Kolluvium vor, die i. d. R. ein relativ geringes Abflusspotential aufweisen (HSG B). In den Haupttälern befinden sich vorwiegend Gleye aus Auensand bis -lehm oder Sandlöss. Die entsprechenden hydrologischen Bodenklassen sind B bzw. C. Im Nordosten erstreckt sich ein Gebiet mit ausgedehnten Parabraunerden, die sich jedoch hydrologisch nicht von der Pararendzina abheben (HSG C).

Fallbeispiel 3 - Simbach

Die großräumige Geologie wird in diesem Fall durch das Molassebecken bestimmt. Das sehr heterogene Substrat der Molasse und Lössablagerungen bilden das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung. Die Bestimmung der HSG erfolgte hier anhand der Bodenarten aus der ÜBK25 BY (LfU BY, 2017). (s. Methodik in den Kapiteln 6.2.4.6 und 6.2.4.7).

Der vorherrschende Hauptbodentyp ist die Braunerde, die den Großteil der Fläche des Einzugsgebietes einnimmt. Die zugehörigen Bodenarten liegen in einem weiten Korngrößenspektrum, jedoch überwiegen Lehme mit unterschiedlichen Sand-, Schluff- und Tonanteilen. Sandlehmen und Lehmsanden wurde die hydrologische Bodenklasse B zugeordnet, während die übrigen Braunerden mit höherem Feinkornanteil in die HSG C eingeordnet wurden. Der Schellenberg im Osten (HSG A) ist aus sandigem und kiesigem Material aufgebaut. Neben den flächendeckenden Braunerden dominieren im Nordwesten lokal Pseudogley-Braunerden aus Schluff bis Lehm über Ton (HSG C). In den Tälern sind Gleye ausgeprägt und bestehen meist aus Schluff bis Lehm (HSG C).

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

Das Gebiet ist ebenfalls durch Ablagerungen des voralpinen Molassebeckens geprägt und zeichnet sich durch Sedimente unterschiedlicher Korngrößen aus, die teilweise von quartärem Löss- oder Decklehm überlagert werden. Die Ableitung der hydrologischen Bodenklassen erfolgte analog zu Fall 3 anhand der Bodenarten aus der ÜBK25 BY (LfU BY, 2017).

In den Teileinzugsgebieten Aichbach und Wolfsbach befinden sich, mit Ausnahme des Isartals, vorwiegend Braunerden, die größtenteils aus Lehmen, Schlufftonen und Tonschluffen aufgebaut sind. Dementsprechend erhalten sie aufgrund der relativ geringen Luftkapazitäten und mäßigen bis hohen nutzbaren Feldkapazitäten die hydrologische Bodenklasse C. Lokal können sich die Bodenartenspektren der Braunerden zu Gunsten des Grobkorns verschieben. Den Sandlehmen und Lehmsanden wurde die HSG B zugeordnet. Zudem kann die Ausbildung podsolig sein; vor allem dort, wo die Böden aus Kiessanden (HSG A) bestehen.

Das Tal der Isar ist vom Bodentyp Kalkpaternia bestimmt und besteht aus Karbonatsandkiesen sowie Karbonatsanden (HSG A) und -schluffen (HSG B). Der Oberlauf des Aichbachs ist von Gleyen geprägt, die aus Schluffen und Lehmen (HSG C) bestehen. Im östlichen Teileinzugsgebiet Wolfsbach ist neben den Braunerden lokal der Bodentyp der Pararendzina aus Karbonatschluff (HSG B) zu finden.

6.3.4 Extreme Niederschlagsereignisse und Vorfeuchteverhältnisse

Die regional analysierten Niederschlagsereignisse fanden ausschließlich in den Jahren 2015 und 2016 im späten Frühjahr Ende Mai bis Anfang Juni statt. Infolge der Ereignisse wurden schwere Sachschäden dokumentiert, darunter Ernteschäden, zerstörte Straßen und Brücken sowie Gebäudeschäden etc. (Brandhuber et al., 2017; LfU RP, 2016; ProAqua, 2016).

Die nachfolgende Übersicht zeigt einige Charakteristika der Niederschlagsereignisse auf Grundlage der Radolan RW Daten. Vor allem bei der Niederschlagsdauer sollte die minimale zeitliche Auflösung von einer Stunde berücksichtigt werden. Die Angabe der kurzen Niederschlagsdauer von ca. 15 Minuten im Fall Engebach/Hod wurde allerdings aufgrund der höheren Genauigkeit ergänzt und stammt von der lokalen Feuerwehr (Pro

Aqua, 2016). Die Niederschlagsintensitäten und die räumliche Ausdehnung der Ereignisse werden fallspezifisch behandelt. Aus der Tabelle 12 geht bereits hervor, dass nach Abgleich mit den Daten der KOSTRA-2010-DWD (DWD, 2018) alle Ereignisse hinsichtlich der Intensität unter Berücksichtigung der Niederschlagsdauer die Jährlichkeit eines HN100 übersteigen. Dabei entspricht ein HN100 einem extremen Niederschlagsereignis, das statistisch einmal in 100 Jahren auftritt.

Tabelle 12: Übersicht zu Kenngrößen bezüglich der Niederschlagsereignisse

	Ahr/Swistbach/ Arzdorfer Bach	Engebach/Hod	Simbach	Wolfsbach/ Aichbach
Datum	04.06.16 12-14 Uhr	07.06.15 20-21 Uhr	31.05.16, 6 Uhr - 01.06.16, 17 Uhr	29.05.16 18-20 Uhr
Dauer	Max. 2 h	ca. 15 min	ca. 36 h (3 h)	Max. 2 h
Nmit* (Gebiet) [mm/dt]	28	17	165 (56**)	48
Nmax* (Zelle) [mm/dt]	117	36	184	76
Jährlichkeit* [a]**	>100	>100	>100	>100
Mittlerer Vorregenindex VN mit [mm]	18-22	24-28	19-28	21-25
Aktueller Vorregenindex VNakt [mm]	52-76	9-10	22-31	23-38

*gemäß RADOLAN RW (1 km x 1 km, zeitl. Auflösung 1 h)
**Wert bezieht sich auf 3 h Starkniederschlag innerhalb des Dauerregenereignisses
***gemäß KOSTRA-DWD Version 2010R (DWD, 2018)

Neben den Niederschlagsintensitäten werden im Folgenden auch die Vorfeuchteverhältnisse für jedes Fallbeispiel beschrieben, da die Vorregenindizes ebenfalls anhand der RADOLAN-Daten ermittelt wurden. Nach Kleeberg & Overland (1989) bezieht sich die Vorfeuchte auf die Niederschläge der 30 Tage vor dem Extremereignis, wobei weit zurückliegende Tage weniger stark gewichtet werden als die Tage kurz vor dem Ereignis (s. Kapitel 6.2.3). Die Abweichung der aktuellen von der mittleren jahreszeitlichen Vorfeuchte ist als Übersicht in der Tabelle 12 und die räumlichen Verteilungen in der jeweiligen Karte 4 der Anlage 9.1 dargestellt. Die Vorfeuchteindizes lagen in allen Gebieten zwischen ca. 18 mm und 28 mm.

Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

In den Teileinzugsgebieten Ahr, Swistbach und Arzdorfer Bach fielen bereits wenige Tage vor dem Ereignis am 4. Juni 2016 große Mengen Niederschlag. Am 27. und 29. Mai sowie am 1. Juni 2016 fielen größtenteils flächendeckend jeweils etwa 30 mm/d, d. h. in 8 Tagen vor dem Ereignis fielen etwa 90 mm Niederschlag. Die Ereignisse erstreckten sich über mehrere Stunden, so dass eine Aufsättigung des Gebietes angenommen werden kann, was durch die Vorfeuchtedifferenzen von +35 mm bis+55 mm abgebildet wird.

Auf die niederschlagsreichen Tage von Ende Mai bis Anfang Juni folgte das Extremereignis am 4. Juni 2016 in der Gemeinde Grafschaft. Die Rasterdaten in Anlage 9.1.1 zeigen die räumliche Niederschlagsverteilung dieses Ereignisses. Es wurden vom DWD mittels Radar maximal etwa 117 mm in 2 Stunden aufgezeichnet. An den Rändern der Niederschlagszelle betrugen die Werte ca. 10 bis 20 mm. Es zeigt sich, dass es sich um ein sehr lokales Ereignis mit einer ellipsenförmigen Geometrie und einer Ausdehnung von ca. 10 x 20 km handelte, das in alle drei TEZG hineinreichte. Aufgrund der heterogenen Niederschlagsverteilung ergibt sich ein geringer durchschnittlicher Gebietsniederschlag von ca. 28 mm.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

Im Gebiet um Bad Bellingen (Engebach/Hod) herrschten im Gegensatz zu den EZG in der Gemeinde Grafschaft relativ trockene Verhältnisse mit Vorfeuchtedifferenzen von ca. -15 mm. Der Mai bzw. Juni 2015 waren entsprechend trockener als das langjährige Mittel.

Das Extremereignis vom 07.06.2015 in Bad Bellingen zeichnete sich durch eine extrem hohe Intensität aus, die aufgrund der zeitlich begrenzten Auflösung der Radardaten (DWD RW-Produkt) mit maximal 36 mm in 1 Stunde nur eingeschränkt hinsichtlich seiner Intensität wiedergegeben werden kann. ProAqua (2016) geben eine Niederschlagsdauer von 15 Minuten an.

Das Ereignis erstreckte sich räumlich in Nord-Süd Richtung, was der Geometrie des Untersuchungsgebietes entspricht (s. Anlage 9.1.2.3). Damit wurden die TEZG nahezu vollständig von relativ hohen Niederschlagsmengen erfasst. Die höchsten Niederschlagsmengen fielen im nördlichen und zentralen Teil des Untersuchungsgebietes zwischen Bad Bellingen und Rheinweiler.

Fallbeispiel 3 - Simbach

Im Einzugsgebiet Simbach herrschten zu Ende Mai bzw. Anfang Juni 2016 etwa mittlere Vorfeuchteverhältnisse. Die Unterschiede beliefen sich auf lediglich wenige Millimeter.

Vom 31.05. bis zum 01.06.2016 ereignete sich ein flächenhafter Dauerregen, der von einem Starkregen am 01.06. von ca. 10 bis 13 Uhr begleitet wurde. Der durchschnittliche Gebietsniederschlag des gesamten Ereignisses betrug ca. 165 mm (max. 184 mm), die in 36 Stunden fielen. Die räumliche Verteilung war dabei relativ homogen (s. Anlage 9.1.3.3). Der Starkregen von ca. 56 mm in 3 Stunden Dauer war ebenfalls flächendeckend ausgeprägt.

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

In den Einzugsgebieten Wolfsbach und Aichbach wurden vor dem Extremereignis mittlere bis leicht feuchte relative Vorfeuchten ermittelt, d. h. die Differenzen zwischen VN_{akt} und VN_{mit} lagen bei -1 mm

bis +15 mm, wobei die höheren Vorfeuchten im Tal der Isar vorherrschten. In den höher gelegenen Gebieten lagen die Vorfeuchten im mittleren Bereich ohne signifikante Abweichungen von den mittleren Vorfeuchteverhältnissen.

Darauf folgte am 29. Mai 2016 ein Extremereignis mit durchschnittlich 48 mm Gebietsniederschlag. Das Ereignis war flächendeckend ausgeprägt und füllte beide Einzugsgebete vollständig aus (s. Anlage 9.1.4.3). Dennoch gab es lokale Unterschiede hinsichtlich der Intensitäten. In der Nähe der Isar bei der Ortschaft Dirnau fielen ca. 76 mm. Ein weiteres lokales Niederschlagsmaximum befand sich in der Ortschaft Adlkofen und der Umgebung, wo ca. 74 mm fielen.

6.4 Modellergebnisse

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zur Berechnung der flächendifferenzierten Direktabflüsse ausgewertet. In einigen Fällen sind Vergleiche mit vorhandenen Ergebnissen aus anderen Studien möglich. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für jedes Fallbeispiel zunächst in Kartenform zur räumlichen Übersicht und um lokale Unterschiede in der Abflussbildung zu untersuchen. Im Anschluss werden die Abflussanteile der Flächengruppen betrachtet. Zur Qualitätssicherung werden Ergebnisse vergleichbarer Studien, sofern vorhanden, herangezogen.

6.4.1 Fallspezifische Betrachtung

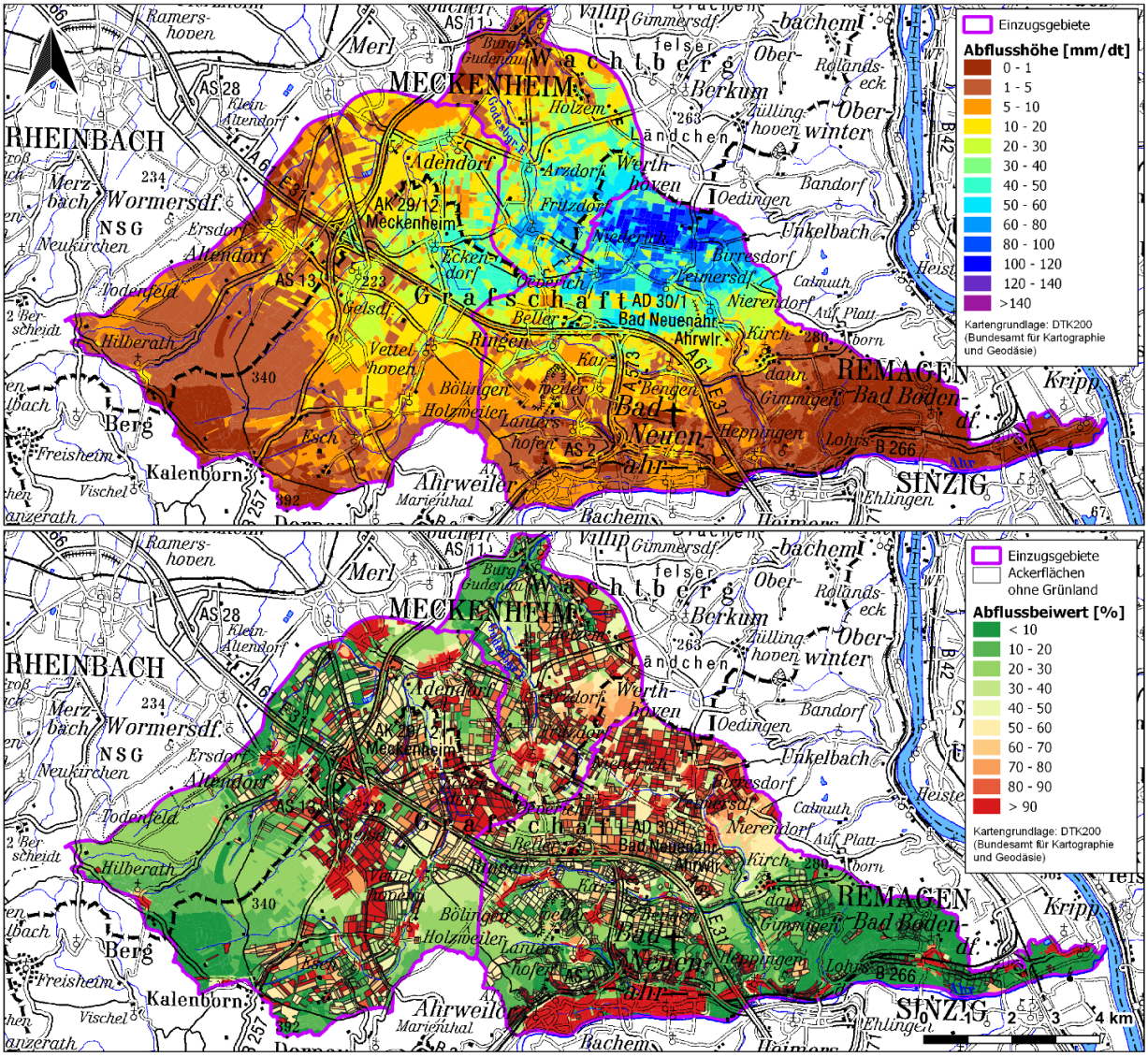
Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

Die Abflusshöhen liegen in der Gemeinde Grafschaft und den umliegenden Gebieten um ca. 20 mm bis über 100 mm (s. Abbildung 39, oben). Erwartungsgemäß treten die höchsten Direktabflüsse im Zentrum des Niederschlagsereignisses auf, das sich ca. 6 km nördlich von Bad Neuenahr-Ahrweiler befindet und in alle TEZG hineinreicht. Von dort nehmen die Abflusshöhen in Richtung des Randes der Niederschlagszelle kontinuierlich ab. Am Rand fielen Niederschläge von ca. 10 mm bis 20 mm und außerhalb lagen sie i. d. R. bei <10 mm.

Von den höchsten Direktabflüssen (>100 mm) ist das Teileinzugsgebiet der Ahr im Südosten betroffen, insbesondere die sich im Norden befindlichen Ortschaften, z. B. Nierendorf und Birresdorf. Diese befinden sich am Oberlauf der lokalen Vorfluter, durch die die Direktabflüsse nach Süden in die Ahr abgeführt werden. Die Konzentration der Höchstwerte auf dieses Gebiet führte zum Hochwasserfall und zum Überlauf des Regenrückhaltebeckens Nierendorf (LfU RP, 2016). Obwohl eine Aufteilung der Abflussbelastung durch die Lage der Niederschlagszelle auf drei Teileinzugsgebiete erfolgt, was prinzipiell eine hochwassermindernde Wirkung zur Folge hat, wird der Oberlauf dieses Gebietes vollständig erfasst. In der Nähe von Bad-Neuenahr-Ahrweiler wurden hingegen relativ geringe Abflusshöhen bis ca. 10 mm ermittelt. In Remagen fiel mit max. 5 mm die Intensität der Abflussbildung noch geringer aus. Die weiteren TEZG Swistbach und Arzdorfer Bach sind insgesamt weniger stark betroffen, jedoch wurden auch dort lokal Abflusshöhen von >50 mm festgestellt.

Betrachtet man die Abflussbeiwerte als Anteil des Direktabflusses am Niederschlag, so ergibt sich ein anderes Bild (s. Abbildung 39, unten). Hier ist nicht mehr erkennbar, wo genau sich das lokale Extremereignis abgespielt hat. Folglich ist hier der Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert nicht bzw. nur sehr schwach ausgeprägt, da nicht nur im Niederschlagszentrum die höchsten Abflussbeiwerte von über 90 % auftreten, sondern weitere Maxima des Abflussbeiwertes z. B. in Bad Neuenahr-Ahrweiler, Eckendorf, Gelsdorf und auf weiteren vereinzelten Flächen zu verzeichnen sind. Geringe Abflussbeiwerte bis etwa 40 % zeichnen sich durch Wälder aus, wobei bemerkenswerterweise östlich von Arzdorf auch auf Waldflächen Abflussbeiwerte von ca. 70 % auftreten.

Abbildung 39: Abflusshöhe (oben) und Abflussbeiwerte (unten) für das Untersuchungsgebiet Ahr /Swistbach/Arzdorfer Bach



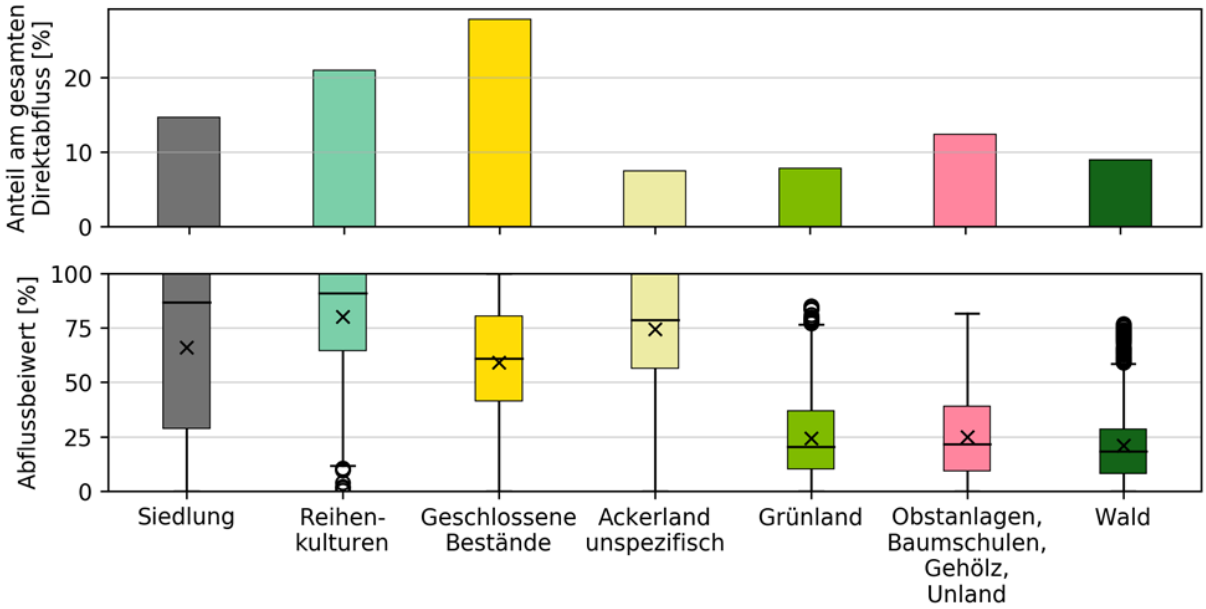
Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Der Umstand, dass selbst Flächen mit geringer Niederschlagsbelastung hohe Abflussbeiwerte erzeugen, ist auf die hohe Vorfeuchte zurückzuführen, die sich durch die extremen Differenzen von ca. +30 mm bis über 50 mm auszeichnet und eine Erhöhung der Curve-Number bewirken. Bei einem Wert von >75 für CN_{II}, der typisch für eine landwirtschaftlich genutzte Fläche ist, werden entsprechende bodenfeuchteabhängige CN_{bf} von über 90 erreicht (s. Kapitel 6.2.3 bzw. Abbildung 31), daher erzeugen solche Flächen wesentlich mehr Direktabfluss. Durch die hohe Vorfeuchte (ca. 90 mm Niederschlag in acht Tagen vor dem Ereignis) verringert sich die Wasserretention dieser Flächen.

Die Ackerflächen wurden in Abbildung 39 (unten) mit einem schwarzen Rand gekennzeichnet. Daraus geht hervor, dass hohe Abflussbeiwerte i. d. R. auf diesen Flächen zu finden sind. Ausnahmen bilden siedlungsgeprägte Flächen mit hohem Versiegelungsgrad, z. B. das Stadtgebiet von Bad Neuenahr-Ahrweiler. Allerdings gilt im Umkehrschluss nicht, dass auf Ackerflächen generell hohe Abflussbeiwerte auftreten, beispielsweise befinden sich ca. 2 km nördlich von Bad Neuenahr-Ahrweiler Ackerflächen mit geringeren Abflussbeiwerten bis ca. 50 %. Hier handelt es sich meist um geschlossene Bestände.

Der Sachverhalt wird durch Abbildung 40 weiter verdeutlicht. Ackerflächen (Reihenkulturen, geschlossene Bestände, unspezifische Flächenbewirtschaftung) produzieren fast 60 % der Abflussmenge (s. Abbildung 40, oben), wobei sie nur 35 % der Fläche ausmachen.

Abbildung 40: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (Median: Linie, Mittel: Kreuz)



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Diese Flächentypen bilden neben den siedlungsgeprägten Flächen die höchsten Mediane der Abflussbeiwerte von ca. 60 % bis 80 %. Wald, Obstanlagen sowie Grünland zeigen geringe Abflussbeiwerte (Mediane) zwischen 15 und 20 %. Allerdings werden auch auf diesen Flächen maximale Abflussbeiwerte von 80 % erreicht. Hier handelt es sich um die Flächen, die im Zentrum der Niederschlagsmaxima liegen. Insgesamt zeigen alle Flächentypen weite Streuungen, was auf den lokalen Charakter des Ereignisses zurückzuführen ist.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

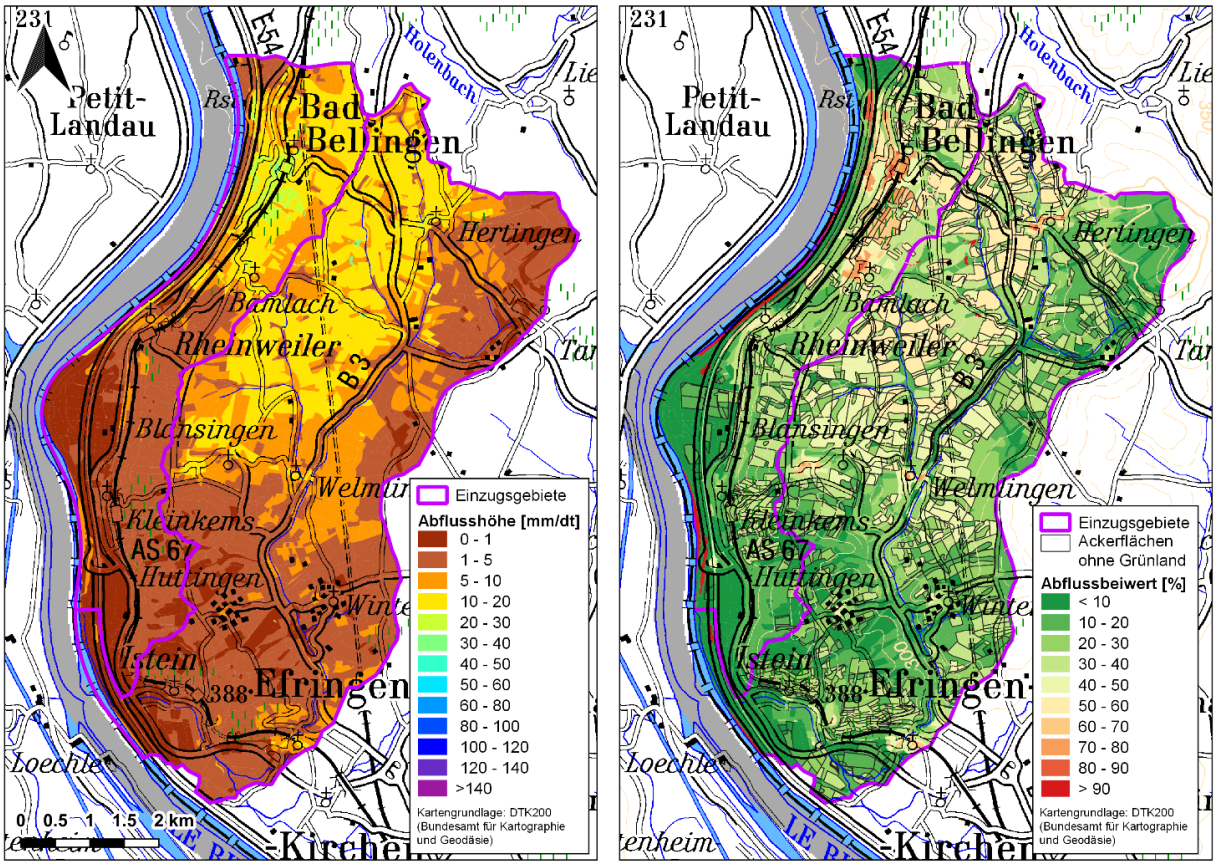
Im Fallbeispiel Engebach/Hod wurde ebenfalls eine lokale Ausprägung der Direktabflüsse festgestellt (s. Abbildung 41, links). Hier erstreckt sich die Fläche mit den höchsten Abflusshöhen (ca. 10 mm bis 20 mm) von Nordosten nach Südwesten bis zu den Orten Rheinweiler bzw. Blansingen. Das Maximum von etwa 20 - 30 mm tritt im Teileinzugsgebiet nahe des Rheins in der Ortschaft Bad Bellingen auf. Die Abflussmengen werden auf kurzem Weg nach Westen über Gräben und das Kanalnetz abgeführt (ProAqua, 2016).

Im östlichen Teileinzugsgebiet erfolgt die Entwässerung über die Hauptvorfluter Engebach bzw. Hod bis zum Ort Efringen in Richtung Süden und anschließend nach Westen in den Rhein. In den südlichen Teilen beider Teileinzugsgebiete fiel weniger Niederschlag. Dementsprechend wurden relativ geringe Abflusshöhen bis ca. 5 mm erreicht.

Analog den Abflusshöhen zieht sich bei den Abflussbeiwerten in Abbildung 41 (rechts) ein Gebiet mit erhöhten Abflussbeiwerten vom Nordosten des Untersuchungsgebietes in Richtung Südwesten. Die Beiwerte liegen hier überwiegend bei ca. 40 - 50 %, wobei sich erneut zeigt, dass hohe Abflusshöhen

und Abflussbeiwerte überwiegend auf Ackerflächen fallen. In den umliegenden Gebieten belaufen sich die Abflussbeiwerte auf ca. 10 - 20 %.

Abbildung 41: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Engebach/Hod



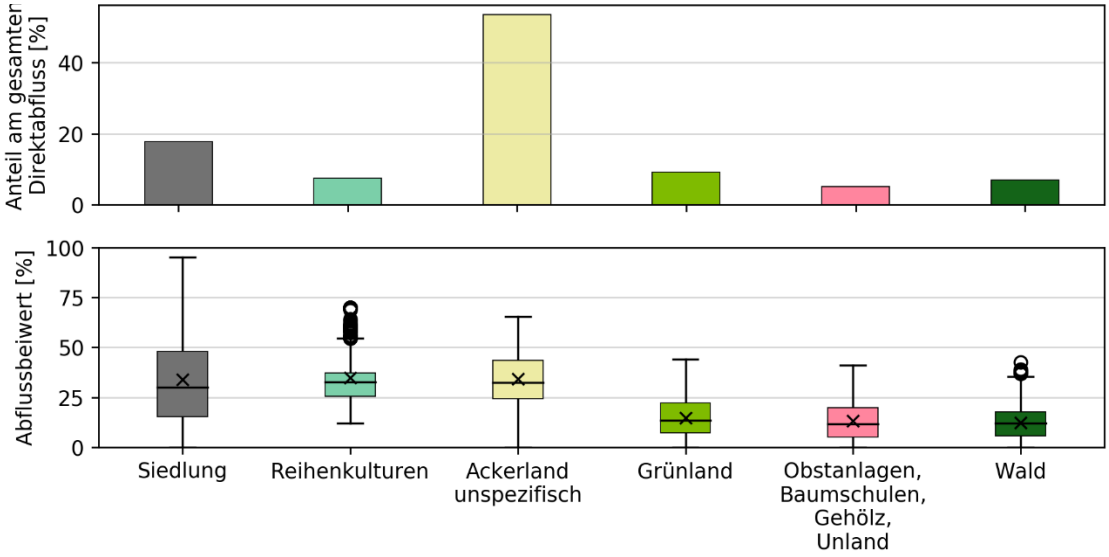
Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Die Gegenüberstellung der Flächentypen in Abbildung 42 zeigt, dass Ackerland (Rebflächen als Reihenkulturen und unspezifische Flächenbewirtschaftung) etwa 55 % des Gesamtabflusses erzeugen (Flächenanteil ca. 44 %).

Die Täler heben sich in diesem Fallbeispiel durch geringere Abflüsse und Abflussbeiwerte hervor. Hierdurch wird das unterschiedliche hydraulische Verhalten der Böden widergespiegelt. Während die Talbereiche häufig der HSG B zugeordnet wurden (Auensand und Kolluvium), zeichnet sich das Umland durch die HSG C, meist Pararendzina, aus.

Aufgrund des Mangels an differenzierten Daten zur Landnutzung können die spezifischen Bewirtschaftungsformen, die zu den höchsten Abflüssen führen, nicht identifiziert werden. Zusammen mit den Siedlungsgebieten zeigen die Ackerflächen die höchsten Abflussbeiwerte mit Medianen von ca. 30 %. Die Gebiete mit zu erwartenden geringeren Abflussbeiwerten (Grünland, Obstanlagen, Wald) zeigen Mediane von 10-15 % und erzeugen ca. 20 % des Gesamtabflusses bei einem Flächenanteil von über 30 %. Die Streuung der Werte fällt geringer aus als im ersten Fallbeispiel, da das Niederschlagsereignis weniger lokal ausgeprägt war.

Abbildung 42: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Engebach/Hod¶
(Median: Linie, Mittel: Kreuz)



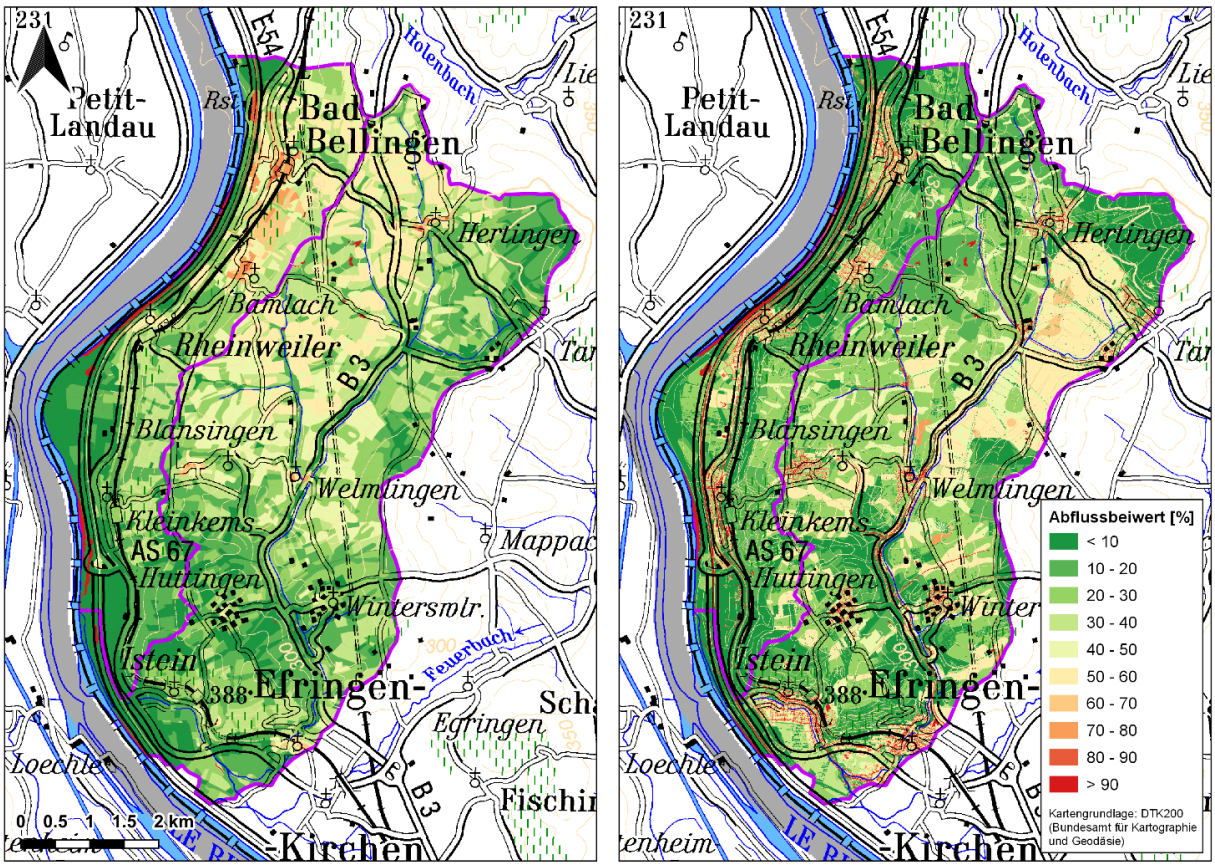
Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Die Ergebnisse des Untersuchungsgebietes Engebach/Hod können vorhandenen Studien oder Datensätzen, z. B. ProAqua (2016) oder (LUBW, 2016) gegenübergestellt werden. Ein Vergleich mit den modellierten Spitzenabflussspenden (Größenordnungen von 50 l/s*ha bis über 200 l/s*ha) von ProAqua (2016) zeigt dahingehend räumliche Gemeinsamkeiten, dass die höchsten Werte jeweils in den Stadtgebieten von Bad Bellingen, Bamlach und Rheinweiler auftreten.

Das Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) verfügt landesweit über Datensätze zu Oberflächenabflusskennwerten, die für verschiedene Niederschlagsintensitäten modelliert wurden. Da Oberflächenabfluss und Direktabfluss eng miteinander verknüpft sind, ist ein Vergleich der Direktabflüsse dieser Studie mit den vom LUBW berechneten Oberflächenabflüssen naheliegend. Die Methodik des LUBW beginnt mit der Auswertung der Extremwertstatistik, aus der drei Niederschlagsszenarien (seltenes, außergewöhnliches und extremes Ereignis) abgeleitet werden. Diese fließen in die rasterbasierte Berechnung der Oberflächenabflüsse anhand des Modells RoGeR (LUBW, 2016) ein. Zudem wird ein Verschlämmungsszenario integriert. Für den folgenden Vergleich wurde der Datensatz für ein seltenes Ereignis (44 mm/h) ohne Verschlämmungsszenario ausgewählt, da die Größenordnung der Niederschlagsintensität, mit jener der vorliegenden Studie gut übereinstimmt und bei der Abflussbildung von Kleeberg & Overland (1989) keine Mechanismen eingebaut sind, die Verschlämmungen abbilden. Da sich die Niederschlagsverteilungen voneinander unterscheiden, wurden für einen angemessenen Vergleich die Abflussbeiwerte ermittelt (s. Abbildung 43, rechts).

Im Vergleich (s. Abbildung 43) werden im Gebiet zwischen Bamlach und Blansingen bei beiden Modellergebnissen höhere Abflussbeiwerte als in der nahen Umgebung angetroffen. Die Stadtgebiete fallen in den Ergebnissen des LUBW durch erhöhte Oberflächenabflüsse mit Beiwerten von bis zu 90 % auf, was sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie deckt. Geringe Übereinstimmung herrscht hingegen im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes südlich von Hertingen. Möglicherweise bestehen hier Unterschiede in der Parametrisierung, z. B. der bodenphysikalischen Eigenschaften. Trotz zum Teil erheblicher Abweichungen weisen die Berechnungen des LUBW und die Direktabflüsse der vorliegenden Studie Gemeinsamkeiten auf, was die Plausibilität der Ergebnisse nahelegt. Die unterschiedliche Methodik und Datengrundlage muss dabei berücksichtigt werden.

Abbildung 43: Vergleich der Abflussbeiwerte für das Untersuchungsgebiet Engebach/Hod zwischen vorliegender Studie (links) und des LUBW (2016), rechts



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

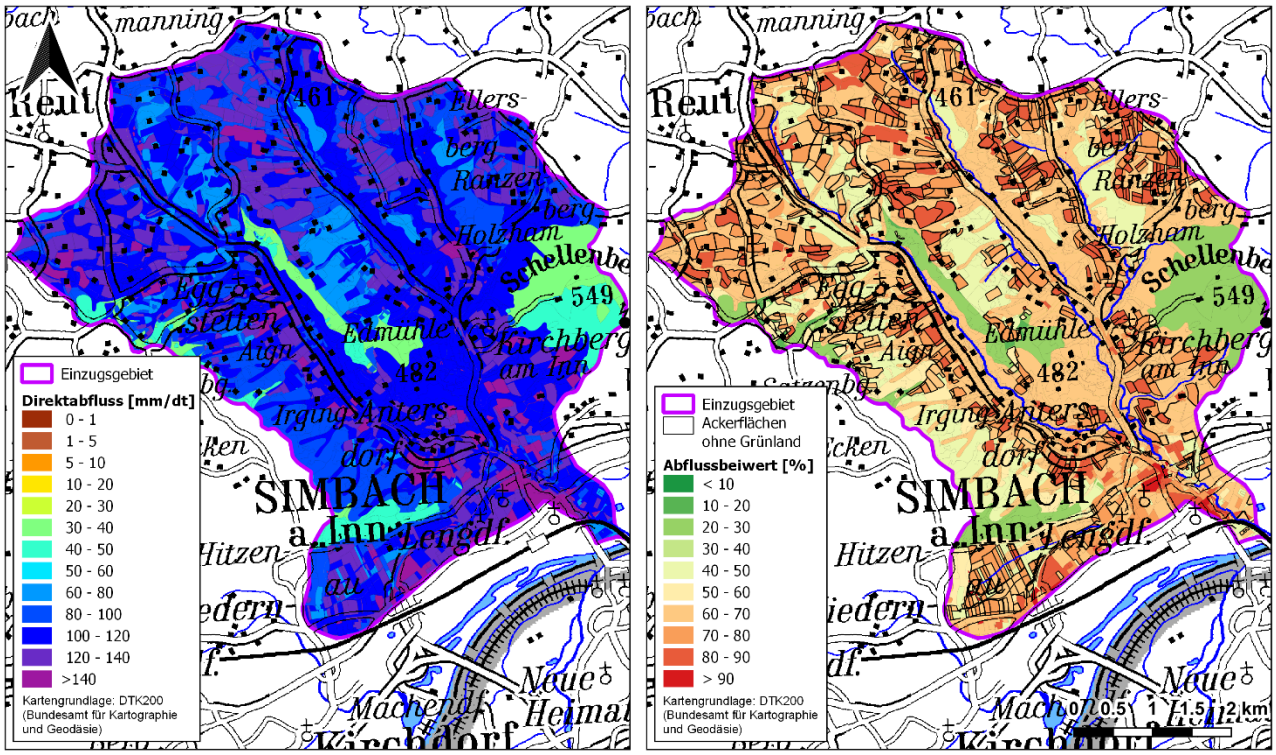
Fallbeispiel 3 - Simbach

Das Extremereignis in Simbach zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Fallbeispielen durch einen flächenhaften Charakter aus. Hier wurden innerhalb der vier Fallbeispiele erwartungsgemäß auch die höchsten Direktabflüsse festgestellt (s. Abbildung 44, links). Abflusshöhen von 60 mm werden hier selten unterschritten. Etwa drei größere zusammenhängende Flächengruppen zeichnen sich durch relativ geringe Direktabflüsse von 30 mm bis 50 mm aus. Dabei handelt es sich um Sand- und Kiesböden mit der hydrologischen Bodenklasse A und günstigen Eigenschaften bezüglich des Wasserrückhaltevermögens. Insgesamt dominieren jedoch Werte, die 100 mm übersteigen und lokal über 140 mm erreichen. Die Hauptentwässerung erfolgt über die drei Bäche, die sich zum Simbach vereinen, von Nordwesten nach Südosten.

Die Abflussbeiwerte zeichnen ein ähnliches Bild (s. Abbildung 44, rechts). Die oben beschriebenen Sand- und Kiesböden mit geringen Direktabflüssen zeigen Abflussbeiwerte von etwa 20-30 %. Überwiegen liegen die Beiwerte jedoch bei über 60 %. Diese Flächen beinhalten häufig Äcker und siedlungsgeprägte Flächen, die die höchsten Abflussbeiwerte von teilweise über 80 % tragen.

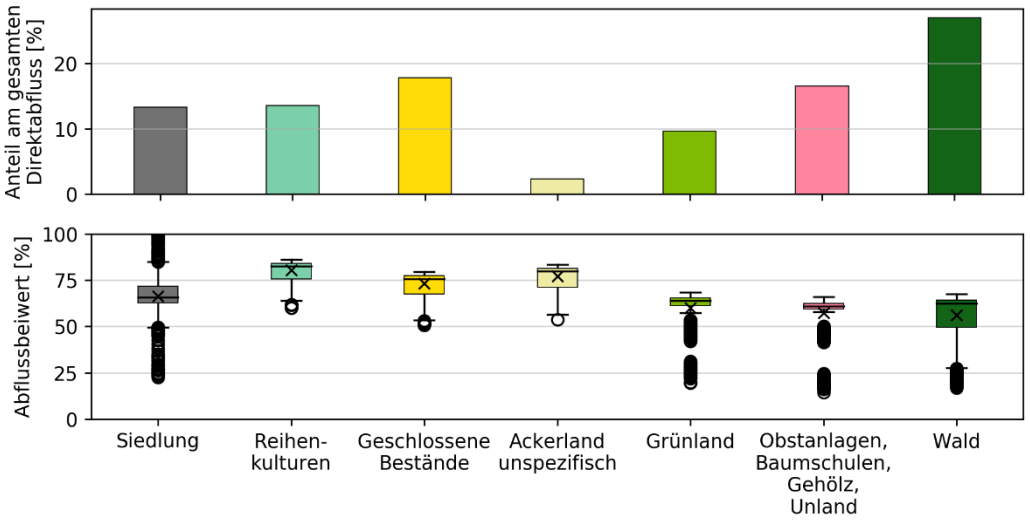
Die Abzeichnung der hydrologischen Bodenklasse ist bei diesem Fallbeispiel gut an den Tälern erkennbar. Sie zeigen im Vergleich zu ihrer Umgebung häufig höhere Abflüsse und Beiwerte, da ihnen aufgrund ihrer Bodencharakteristika die hydrologische Bodenklasse C zugeordnet wurde (Gleye aus Schluff bis Lehm), während sich die Umgebung ggf. durch die HSG B auszeichnet.

Abbildung 44: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Simbach



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Abbildung 45: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Simbach (Median: Linie, Mittel: Kreuz)



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Das Extremereignis von Simbach im Jahr 2016 wurde bereits von Brandhuber et al. (2017) ausführlich beschrieben und die Hochwasserbildung sowie Abflusswege untersucht. Im Rahmen dieser Analyse erfolgte auch eine Abflussberechnung, wobei alle Böden mit der HSG C parametrisiert und ein Tagesniederschlag von 160 mm/d angenommen wurde. Getreide- und Maisflächen (Blanksaat) erzeugten Abflusshöhen von jeweils 110 mm und 116 mm, während Wald und Grünland je 76 mm und 87 mm

produzierten. In Siedlungen wurden mit ca. 130 mm die höchsten Werte ermittelt. Die Ergebnisse decken sich mit Ausnahme der Waldflächen mit den Werten aus Abbildung 44 (links). Die Diskrepanz bei Waldflächen ist durch die Annahme unterschiedlicher hydrologischer Bodenklassen zu erklären.

Bisher wurden in den Untersuchungsgebieten hohe Unterschiede bei Abflussbeiwerten zwischen verschiedenen Flächengruppen festgestellt. Dieser Sachverhält kann für das Einzugsgebiet Simbach nicht im gleichen Maß bestätigt werden. Abbildung 45 (unten) zeigt, dass die Landnutzungen sehr ähnliche Abflussbeiwerte mit Medianen zwischen 65 % und 80 % aufweisen. Es herrschen nur geringfügige Unterschiede, sogar zwischen Flächen mit geringem (Waldflächen, Grünland, Obstanlagen) und hohem (Ackerland und Siedlung) Abflusspotential.

Aufgrund der geringen Diskrepanzen des Abflussbeiwerts entsprechen die Anteile am gesamten Direktabfluss (s. Abbildung 45, oben) etwa den Flächenanteilen der Flächenbewirtschaftungsgruppen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen von Brandhuber et al. (2017). Der Niederschlag erreicht bei dem Extremereignis in Simbach ein derart hohes Maß, dass die Flächenbewirtschaftung nur noch eine untergeordnete Rolle spielt und jeder Flächentyp annähernd gemäß seiner Flächengröße Direktabfluss liefert. Durch den Dauerregen mehrere Stunden vor Beginn des Starkregens wurde das Erdreich gesättigt, sodass die Bedingungen aufgrund des geringen verbleibenden bzw. verbrauchten Retentionsvermögens stark abflussfördernd waren.

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

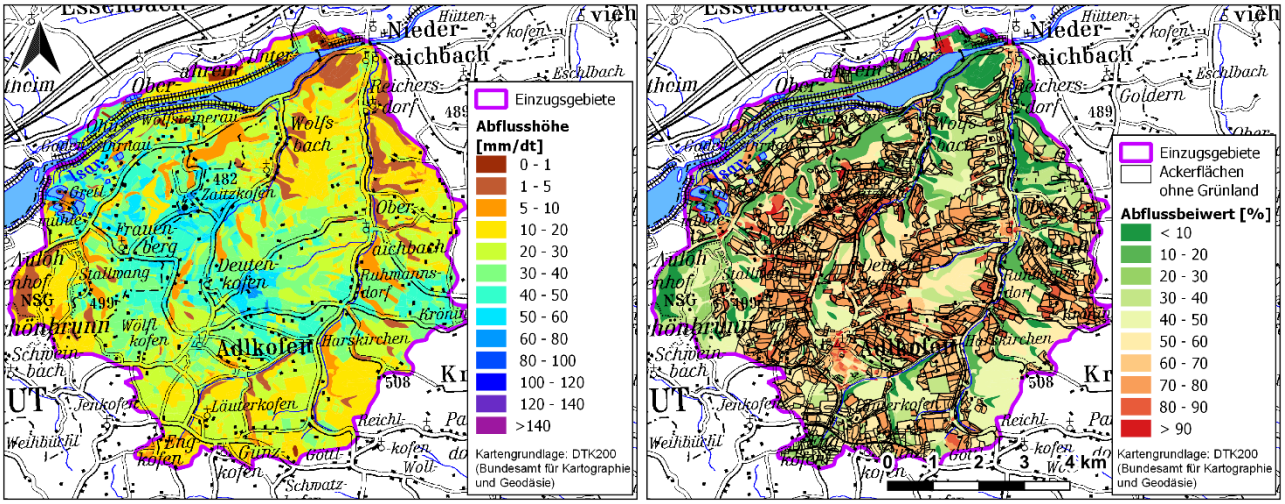
In den Ergebnissen zum Extremereignis in den EZG Wolfsbach und Aichbach zeichnet sich erneut das Muster der Niederschlagsverteilung ab, das auch hier einen ausgeprägten lokalen Charakter hatte (s. Abbildung 46, links). Dabei werden im niederschlagsreichen Kerngebiet, das sich in Richtung Ost-West bzw. SO-NW über beide Einzugsgebiete erstreckt, absolute Abflusshöhen von ca. 20 mm bis über 60 mm erreicht, die über die Hauptvorfluter Aichbach und Wolfsbach in Richtung Nordosten in die Isar abgeführt werden. Außerhalb des niederschlagsreichen Kerngebietes wurden Abflusshöhen bis etwa 20 mm ermittelt.

Insgesamt ist die Verteilung der Abflusshöhen und -beiwerte sehr heterogen. Das Große Maß an Heterogenität ist auf das Vorhandensein und die Häufigkeit von drei verschiedenen hydrologischen Bodenklassen zurückzuführen. Die Braunerden aus Kiessand (HSG A) produzieren für das vorliegende Ereignis Abflusshöhen bis max. 10 mm, während die Braunerden aus Lehmsand (HSG B) bereits bis zu 50 mm erzeugen. Die übrigen Böden (Lehme, Schlufftone etc.) sind für die höheren Abflüsse verantwortlich.

Die Heterogenität wird auch anhand der Abflussbeiwerte deutlich. Diese übersteigen lokal 90 %, d. h. auf diesen Flächen wird nahezu der gesamte Niederschlag abflusswirksam. In Abbildung 46 (rechts) sind die Ackerflächen erneut durch eine schwarze Umrandung akzentuiert. Hier zeigt sich sehr deutlich, dass sie eine erhöhte Tendenz zur Abflussbildung aufweisen. Die Beobachtung bestätigt sich in den statistischen Ergebnissen, die nach Flächennutzungstypen (s. Abbildung 47, unten) geordnet sind.

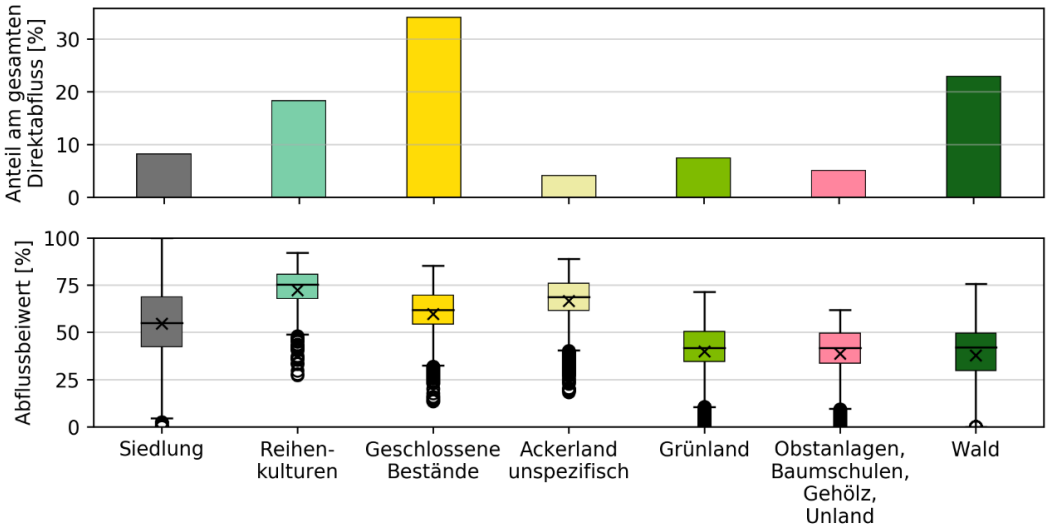
Die Abflussbeiwerte der Reihenkulturen und der geschlossenen Bestände liegen bei Betrachtung der Mediane zwischen 60 % und 75 % und damit wesentlich höher als die von Grünland, Wald und Obstanlagen (ca. 40 %). Die entsprechenden Anteile am Gesamtabfluss liegen für die Reihenkulturen, geschlossenen Bestände und die unspezifische Ackernutzung bei 55 % (Flächenanteil ca. 44 %). Dem stehen 35 % des Gesamtabflusses der Flächentypen Grünland, Obstanlagen und Wald (Flächenanteil ca. 50 %) gegenüber.

Abbildung 46: Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Abbildung 47: Anteiliger Direktabfluss (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Wolfsbach/Aichbach (Median: Linie, Mittel: Kreuz)



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

6.4.2 Fallübergreifende Auswertung

Anhand der Modellergebnisse der flächendifferenzierten Direktabflüsse wurde erkannt, dass an der Abflussbildung einzelner Flächen bzw. Schläge diverse Faktoren beteiligt sein können. Die Faktoren umfassen die Niederschlagsmenge bzw. -intensität, die Vorfeuchte, die hydrologische Bodenklasse sowie die Landnutzung bzw. Flächenbewirtschaftung. Je nach Ausprägung sind die Verteilungsmuster der Faktoren in Teilen sehr gut wiedererkennbar, z. B. der Niederschlagsintensität, der hydrologische

Bodenklasse oder landwirtschaftlich genutzte Flächen. Die Unterschiede zwischen den vier Fallbeispielen bezüglich des Charakters der Extremereignisse und der Standortfaktoren sowie anderer Modellparameter führen zu differenzierten Ergebnissen in Hinblick auf die Ursachenanalyse der Sturzflutsituation.

Niederschlag

Die Niederschlagsintensität und -dauer unterschied sich zwischen den Ereignissen erheblich. Erwartungsgemäß fielen bei den höchsten Niederschlagsintensitäten (z. B. Fall 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach und Fall 4: Wolfsbach/Aichbach) und -dauern (z. B. Fall 3: Simbach) die Abflussbeiwerte wesentlich höher aus als bei Ereignissen mit geringeren Niederschlagsintensitäten bzw. –dauern (z. B. Fall 2). Der Sachverhalt bestätigt sich auch innerhalb der Fallbeispiele, wo die Ereignisse besonders lokal ausgeprägt sind (z. B. Fall 1) und Flächen in unterschiedlicher Intensität mit Niederschlag belastet werden.

Böden

In den Fallbeispielen 3 und 4 kommen sandig-kiesige Böden der hydrologischen Bodenklasse A vor, die sich sehr deutlich in den Abflusshöhen abzeichnen und sich von den Bodenklassen B und C abheben. Die entsprechenden Abflusshöhen können sich um ein Vielfaches unterscheiden. Die Beobachtungen unterstreichen, wie sensitiv das Curve-Number Verfahren auf die bodenhydraulischen Eigenschaften reagiert und wie wichtig deren adäquate Erfassung ist.

Vorfeuchte

Der Einfluss einer sehr hohen Vorfeuchte zeigte sich beispielhaft im ersten Fall (Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach) in der Gemeinde Grafschaft. Hinsichtlich der Sturzflutsituation entstand durch die extremen Vorregenindizes (ca. 90 mm Niederschlag in acht Tagen vor dem Ereignis) ein besonderer Umstand, der dazu führte, dass aufgrund des erschöpften Wasserrückhaltevermögens der Flächen die Tendenz zur Abflussbildung erhöht wurde, insbesondere auf Flächen mit bereits natürlich erhöhtem Abflusspotential, z. B. Ackerland mit geringer Bodenbedeckung. Dies zeigte sich sehr deutlich durch Abflussbeiwerte von >90 % bei Reihenkulturen, auf denen nur ca. 20 mm Niederschlag fielen.

Plausibilität

Zur Plausibilitätsprüfung der Modellergebnisse wurden nach Möglichkeit vorhandene Studien herangezogen. Dies war in den Fällen 2 (Engebach/Hod) und 3 (Simbach) möglich. In beiden Fällen konnten Parallelen festgestellt werden. Im Fall 2 stimmen die Größenordnung der Abflussbeiwerte gut und die räumliche Verteilung nur mäßig überein. Im Fall 3 gab es gute Übereinstimmungen bezüglich der absoluten Abflusshöhen und der relativen Unterschiede zwischen Landnutzungsgruppen.

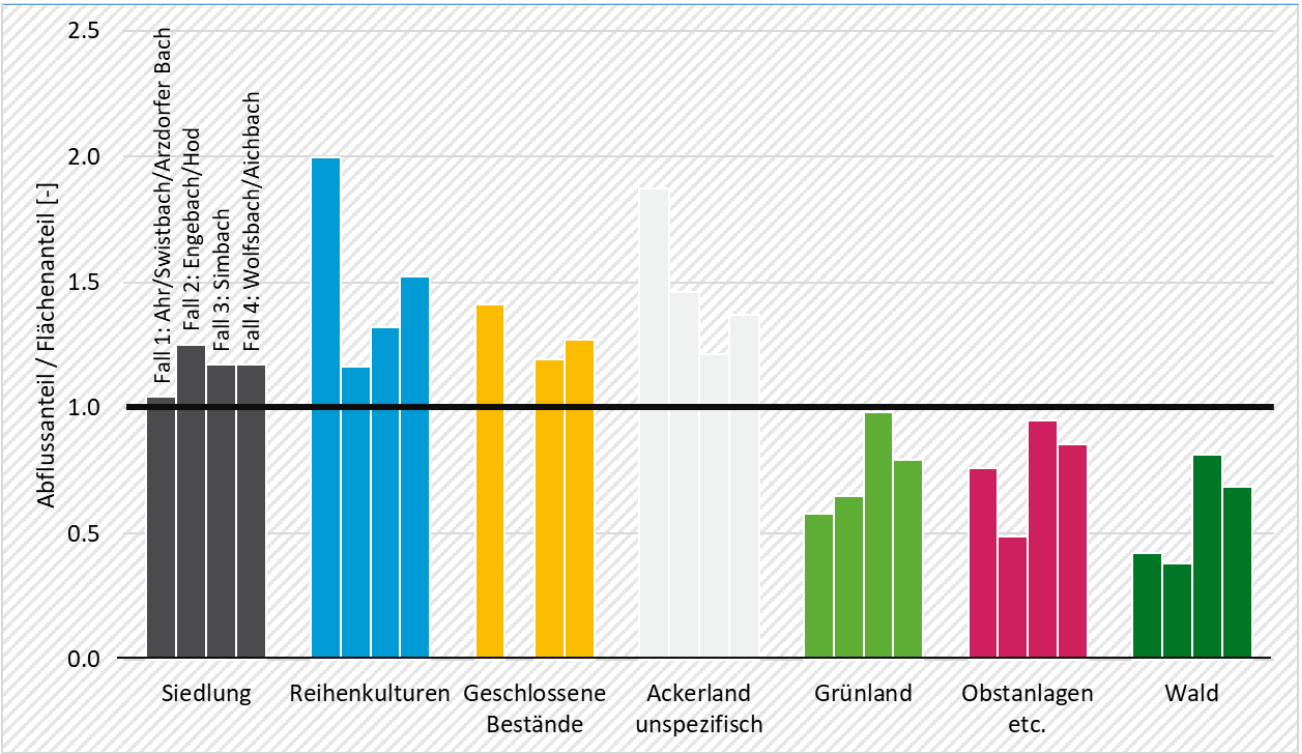
Datengrundlage

Die Fallbeispiele besaßen eine einheitliche Datengrundlage (s. Kapitel 6.2.4), mit Ausnahme des zweiten Falls (Engebach/Hod). Hier lagen lediglich Basis-DLM und keine InVeKoS-Daten zur Verfügung. Infolgedessen war die präzise Identifikation abflussfördernder Flächen nur begrenzt möglich, da die spezifische Flächenbewirtschaftung für Ackerflächen nicht bekannt war.

Ausweisung abflussfördernder Flächentypen

Die gesamtheitliche Analyse der landnutzungsspezifischen Verteilung der Abflussbeiwerte und der Anteile an der gesamten Direktabflussmenge deutet darauf hin, dass gewisse Landnutzungs- bzw. Bewirtschaftungsformen mit charakteristischen Abflussgrößen identifiziert werden können. Daraus gehen zwei Gruppen hervor, die sich in abflussfördernde und abflussmindernde bzw. abflussarme Flächen gliedern lassen.

Abbildung 48: Gesamtabflussanteile bezogen auf den Flächenanteil verschiedener Landnutzungen der untersuchten Fallbeispiele. Die Reihenfolge der Fallbeispiele ist für jede Landnutzungsgruppe gleich. Die schwarze Linie trennt als Gleichgewicht zwischen Abflussanteil und Fläche abflussfördernde von abflussarmen Flächen.



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Abflussarme Flächen zeichnen sich durch relativ geringe Abflussbeiwerte aus und dadurch, dass ihr Beitrag zum Gesamtabfluss deutlich unter ihrem Flächenanteil liegt. In der vorliegenden Studie handelt es sich dabei um Wald, Grünland und Obstanlagen (s. Abbildung 48).

Abflussfördernde Flächen besitzen hingegen gegenteilige Eigenschaften, d. h. hohe Abflussbeiwerte und Gesamtabflussanteile, die deutlich über dem Maß ihres Flächenanteils liegen. In den hier untersuchten Fallbeispielen sind dies siedlungsgeprägte Flächen und Ackerland (Reihenkulturen, geschlossene Bestände und unspezifischer Ackerbau).

Die Abflussbeiwerte waren ereignisspezifisch (s. oben), jedoch herrschten stets signifikante Differenzen zwischen den Abflussbeiwerten (Mediane) der abflussarmen und abflussfördernden Flächen, die i. d. R. bei 20-35 % für die Fallbeispiele 2-4 lagen. Im Fallbeispiel 1 (Gemeinde Grafschaft) lag diese Differenz bei ca. 70 %. Die Vergleichbarkeit ist in diesem Fall jedoch aufgrund der sehr heterogenen Niederschlagsverteilung begrenzt.

Innerhalb der Gruppe abflussfördernder Flächen sind bezüglich der Abflussbeiwerte ebenfalls signifikante Unterschiede ersichtlich. Siedlungsgeprägte Flächen erreichen in jedem Fallbeispiel Maxima von >90 % und streuen stets nahezu über den gesamten Wertebereich von 0 bis 100 %. Da hier der Versiegelungsgrad als Parameter eingeht, fällt auch die Abflussbildung in Siedlungen entsprechend heterogen aus.

Bei Ackerland konnten die Unterschiede lediglich durch die Bereitstellung der InVeKoS-Daten zur Hauptfrucht im Jahr des Ereignisses adäquat abgebildet werden. So lagen die Differenzen der Abfluss-

beiwerte (Mediane) zwischen Reihenkulturen, vorwiegend Mais, und geschlossenen Beständen, hauptsächlich vertreten durch Wintergetreide, in den Fällen 3 und 4 bei 8-15 %, im Fallbeispiel 1 hingegen bei ca. 25 %.

Folglich werden in den Fallbeispielen einerseits Siedlungsflächen mit hohen Versiegelungsgraden und andererseits Ackerflächen im Allgemeinen, insbesondere Reihenkulturen (vorwiegend als Maisflächen), als abflussfördernde Flächen ausgewiesen. Die entscheidenden Parameter zur Steuerung der Abflussbildung sind hierbei der Versiegelungsgrad und die spezifische Flächenbewirtschaftung. Bei Ackerland hängt letztere von diversen Faktoren ab, z. B. Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bodenbearbeitung. Die Einflussfaktoren wurden in Kapitel 3 erörtert. Die bisherigen Ausführungen führen schließlich zur Frage hin, wie sich das flächenspezifische Retentionspotential und somit die Abflussmenge, die im Einzugsgebiet produziert wird und durch alternative Flächenbewirtschaftungen reduzieren lässt.

6.5 Untersuchung abflussmindernder Flächenbewirtschaftung

Auf Grundlage der ausgewiesenen abflussfördernden Flächen im vorangegangenen Kapitel 6.4 können Maßnahmen zur Förderung des natürlichen Wasserrückhaltepotentials auf landwirtschaftlichen Flächen geprüft werden. Dabei kann die abflussmindernde Wirkung der Maßnahmen modellhaft im Rahmen von Variantenbetrachtungen quantifiziert werden. Unter Abflussminderung wird im Zusammenhang mit der Abflussbildung lediglich die Verminderung der Direktabflussmenge bzw. des abflusswirksamen Niederschlags verstanden. Die Verzögerung des Abflusses, die aufgrund der Dämpfung und zeitlichen Verschiebung des Hochwasserscheitels aus zeitlicher Sicht ebenfalls als abflussmindernd einzustufen ist, kann mit dem Curve-Number Verfahrens allein nicht berücksichtigt werden.

Das Ziel der Variantenbetrachtungen ist die Untersuchung der Abflussbildung unter veränderten Bedingungen

- der Flächenbewirtschaftung (z. B. nicht-wendende Bodenbearbeitung, Ökolandbau etc.) oder
- der Niederschlagsintensität.

Die Vorfeuchteverhältnisse, die bodenhydraulischen Parameter und die Hangneigung bleiben hierbei unverändert, lediglich die Flächenbewirtschaftung bzw. die Niederschläge werden variiert.

6.5.1 Variation der Flächenbewirtschaftung

Bisher wurde bei der Modellierung davon ausgegangen, dass alle Ackerflächen zum Zeitpunkt des Ereignisses konventionell mit wendender Bodenbearbeitung (Pflug) bestellt wurden. Um die Auswirkungen alternativer Flächenbewirtschaftungsvarianten zu untersuchen, ist eine zusätzliche Datenermittlung zu differenzierten Curve-Numbers notwendig, die je nach Szenario den entsprechend anders bewirtschafteten Flächen zugeordnet werden können. Im Rahmen der Datenrecherche in Kapitel 6.2.4.3 konnten Curve-Numbers für das Mulchsaatverfahren (Bedeckung mit Ernterückständen) sowie für die langjährige Direktsaat ermittelt werden. Darauf aufbauend wurden folgende Varianten der alternativen Flächenbewirtschaftung betrachtet:

- **Variante 1:** Mulchsaatverfahren mit Saatbettbereitung (Bedeckungsgrad <20 %),
- **Variante 2:** Direktsaat bzw. Mulchsaatverfahren ohne Saatbettbereitung (Bedeckung >20 %),
- **Variante 3**: Variante 2 zzgl. 50 Jahre Direktsaat ohne Bodenbearbeitung bei Mais und Rüben.

Beim Mulchsaatverfahren wird der Bodenbedeckungsgrad auf dem Acker durch das Aufbringen von totem Pflanzenmaterial bzw. durch den Verbleib des Pflanzenmulchs der Zwischen- oder Vorfrucht erhöht. Die Aussaat kann dabei ohne oder mit Saatbettbereitung erfolgen. Da die Saatbettbereitung die Bodenbedeckung reduziert, wird bei Variante 1 von einem geringen Bedeckungsgrad von <20 % aus-

gegangen. Erfolgt hingegen keine Bodenbearbeitung (Direktsaat in verbleibende Rückstände der Vorfrucht), so wird von einem Bedeckungsgrad von >20 % ausgegangen (Variante 2). Der Schwellenwert von 20 % ist methodisch bedingt und auf die Datengrundlage zurückzuführen (USDA NRCS, 2004b).

Es wurde bei den Bewirtschaftungsszenarien 1 und 2 davon ausgegangen, dass eine Mulchauflage grundsätzlich auf Flächen mit geschlossenen Beständen sowie Reihenkulturen vorliegt, also nahezu die gesamte Ackerfläche ohne Grünland. Für Rebflächen herrschen jedoch praktische Einschränkungen hinsichtlich der Realisierbarkeit des Mulchsaatverfahrens. Hier wird als Maßnahme mit äquivalenter Wirkung eine Zwischenbegrünung angenommen, die in ihrer abflussmindernden Wirkung der Mulchsaat mit Saatbettbereitung (Variante 1) als Annäherung gleichgesetzt wird. Bei Flächen mit unspezifischer Ackernutzung wurde keine Mulchsaat berücksichtigt, da die Datenlage für die Variantenrechnung als unzureichend erachtet wurde (s. Kapitel 6.2.4.3).

Als weitere Bewirtschaftungsvariante 3 wurde eine langjährig praktizierte Direktsaat ohne Bodenbearbeitung nach Bonta & Shipitalo (2013) betrachtet. Dabei werden die Flächen grundlegend mit den Daten aus Variante 2 (Mulchsaat ohne Saatbettbereitung bzw. Direktsaat) parametrisiert. Allerdings wird bei Maiskulturen angenommen, dass die Direktsaat über einen langen Zeitraum von etwa 50 Jahren betrieben wird und in der Folge durch eine verbesserte Bodenstruktur sowie intakte Bodenfauna (Makroporen) zu einer Erhöhung der Wasserretention in der Fläche führt. Da Rübenäcker hydrologische Ähnlichkeiten zu Maisäckern aufweisen, wurden die Curve-Numbers bei dieser Variante auch auf Futter- und Zuckerrübenflächen angewandt. Insgesamt stellt diese Betrachtung ein Best-Case Szenario dar.

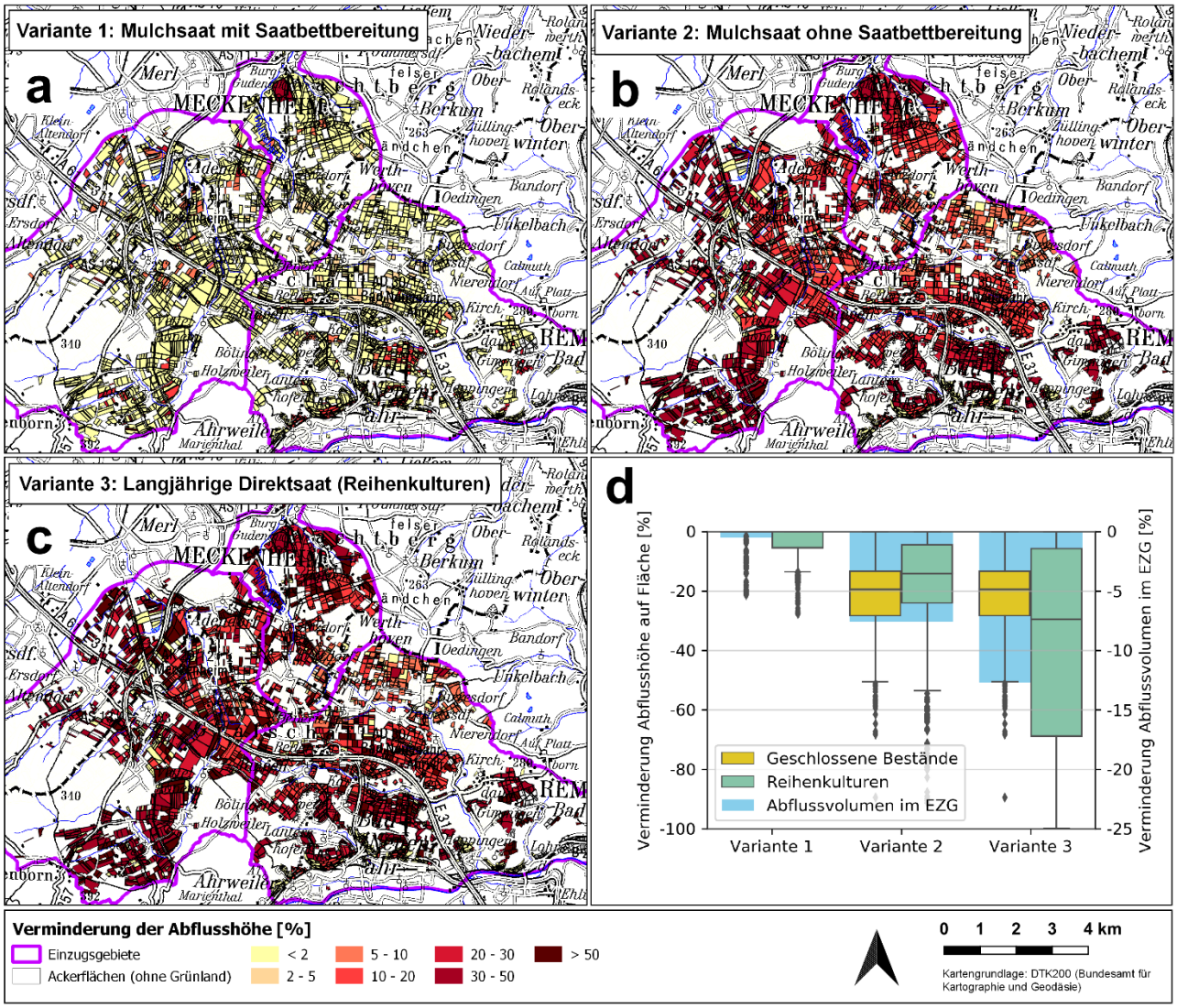
Fallbeispiel 1 – Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

Im Fallbeispiel der Gemeinde Grafschaft (Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach) konnte die alternative Flächenbewirtschaftung auf nahezu allen Ackerflächen (ohne Grünland) untersucht werden, was ca. 30 % der Gesamtfläche entspricht, ausgenommen waren die geringen Anteile an Brachflächen und unspezifisch bewirtschafteten Ackerland. Die Ergebnisse aller Varianten sind räumlich differenziert in Abbildung 49 a – c dargestellt.

Dabei wird aus Gründen der Darstellbarkeit nicht das gesamte Einzugsgebiet gezeigt, sondern lediglich der Ausschnitt, in dem das Ereignis stattfand und sich landwirtschaftliche Flächen befinden. Die entsprechenden statistischen Kennwerte befinden sich in Abbildung 49 d. Um die Aussagefähigkeit der Statistiken zu erhöhen wurden Flächen von geringem Interesse (Direktabflüsse <1 mm) nicht berücksichtigt.

Bei der Mulchsaat mit anschließender Saatbettbereitung (Variante 1) wird laut Modellergebnissen die Abflusshöhe im Kernbereich des Niederschlagsereignisses (nördliche Spitze des südöstlichen Einzugsgebietes) nur um ca. 2 % vermindert. In den Gebieten mit weniger Niederschlag wurde hingegen auf vereinzelten Flächen eine deutlich stärkere Verminderung um 5-20 % erzielt, z. B. auf den zwischenbegrünten Rebflächen nördlich von Bad Neuenahr-Ahrweiler oder auf vereinzelten Flächen, auf denen Leguminosen angebaut werden. Die statistische Darstellung in Abbildung 49d verdeutlich den Sachverhalt. Für geschlossene Bestände wird mit Ausnahme einzelner Ausreißer keine Abflussminderung erzielt. Der Median sowie das obere und untere Quartil liegen praktisch bei 0. Bei Reihenkulturen drückt die Lage der Quartile aus, dass die Hälfte der betroffenen Flächen Abflussminderungen von <5 % erfahren. Bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet, in diesem Fall der Summe der drei Einzugsgebiete, lässt sich das Abflussvolumen insgesamt kaum reduzieren (<1 %).

Abbildung 49: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 1 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen (Boxplots, Primärachse) und auf Einzugsgebietsebene (Balken, Sekundärachse)



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

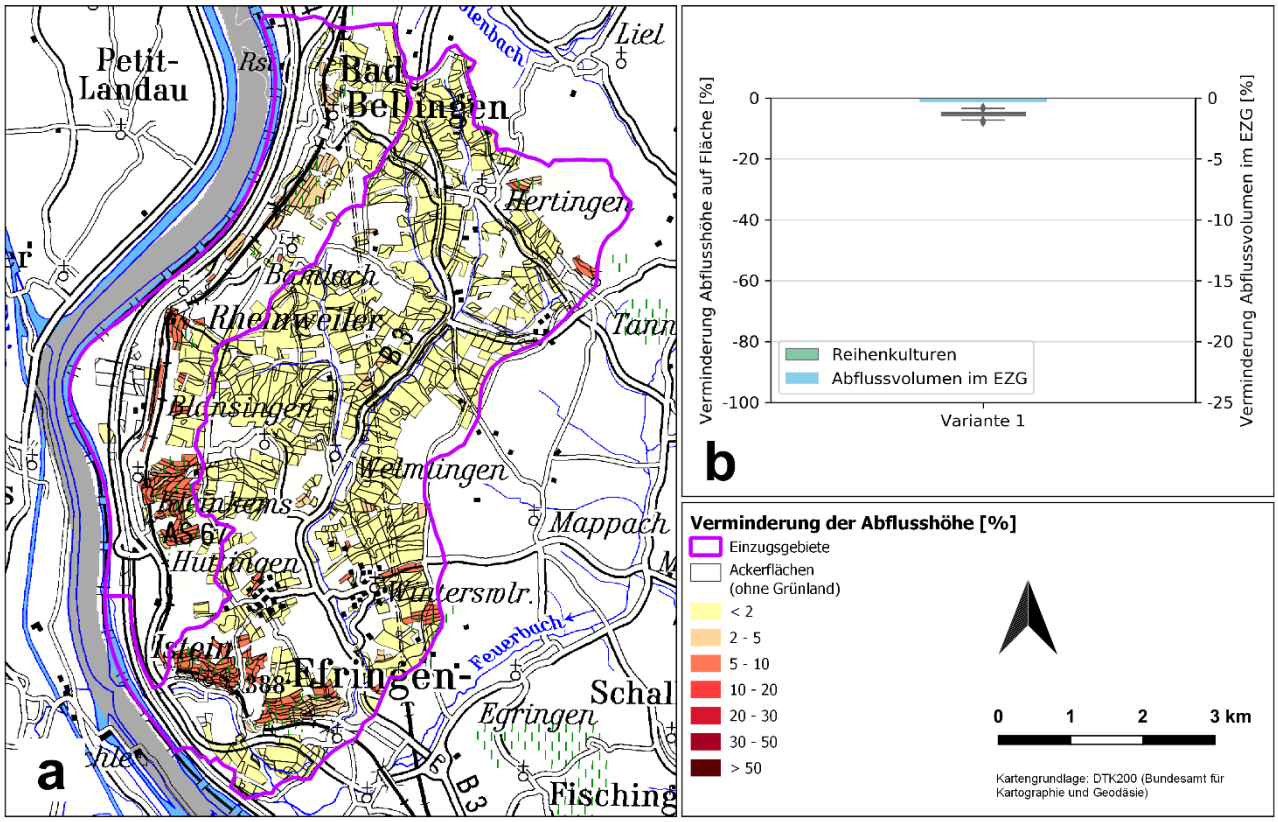
Bei der Mulchsaatvariante mit Verzicht auf die Saatbettbereitung (Variante 2) zeigt sich ein deutlich anderes Ergebnis. Hierbei können auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Flächen die Abflusshöhen um ca. 20 % gedrosselt werden. Dabei treten die geringsten Abflussminderungen von ca. 5-20 % erneut im Kernbereich auf, wo Niederschläge bis zu 120 mm fielen. Reihenkulturen und geschlossene Bestände zeigen Verringerungen der Abflusshöhe von je etwa 10 % und 20 %, wobei die Streuung sehr groß ist. Entgegen der Erwartungen fällt die Abflussminderung bei Reihenkulturen hier geringer aus als bei geschlossenen Beständen. Die Erklärung liegt in der Verteilung der Hauptfrucht. Im Untersuchungsgebiet ist der Anteil der Zuckerrüben mit 4,5 % relativ hoch. Dies entspricht nahezu 50 % der Flächen mit Reihenkulturen. Die abflussmindernde Wirkung der Mulchsaat wirkt sich auf Zuckerrüben modelltechnisch geringer aus, da hier für das Extremereignis Anfang Juni ein hydrologisch günstiger Zustand angenommen wurde, für Mais hingegen ein hydrologisch ungünstiger Zustand aufgrund des Vegetationsstadiums. Durch die Direktsaat bzw. Mulchsaat ohne Saatbettbereitung wird im gesamten Untersuchungsgebiet die Abflussmenge 7-8 % vermindert.

Der von der Variante 3 betroffene Flächenanteil beläuft sich auf ca. 9 % der Gesamtfläche. Dies entspricht den Reihenkulturen, mit Ausnahme der Rebflächen. Aus diesem Grund sind im räumlichen Vergleich zur Variante 2 nur auf vereinzelten Flächen Unterschiede erkennbar. Auf diesen wird jedoch eine massive Drosselung des Abflusses mit einem Median von ca. 55 % erreicht. Die abflussmindernde Leistung der Direktsaat durch deren dauerhaften Praxis wird also nahezu verdoppelt. Auf einigen Flächen kann der Direktabfluss nahezu vollständig unterbunden werden. Infolge der hohen Drosselung wird das Gesamtabflussvolumen um ca. 13 % reduziert.

Fallbeispiel 2 – Engebach/Hod

Im Fallbeispiel Engebach/Hod konnte die Variation der Flächenbewirtschaftung nur auf einem kleinen Teil der Gesamtfläche untersucht werden, da die Datengrundlage keine weitergehenden Analysen erlaubte. Grund dafür ist die unspezifische Information zu Ackerfläche, die ca. 37 % der Fläche ausmachen. Allerdings konnte die Zwischenbegrünung bei Rebflächen (Variante 2) untersucht werden. Die Ergebnisse zur räumlichen Verteilung sind in Abbildung 50 a dargestellt, während statistische Parameter in Abbildung 50 d aufgeführt sind. Hier wurden ebenfalls, wie in Fall 1, Flächen mit geringen Abflusshöhen von <1 mm nicht berücksichtigt.

Abbildung 50: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 2 und die Variante 2 (a) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen (Boxplot, Primärachse) und auf Einzugsgebietsebene (Balken, Sekundärachse)



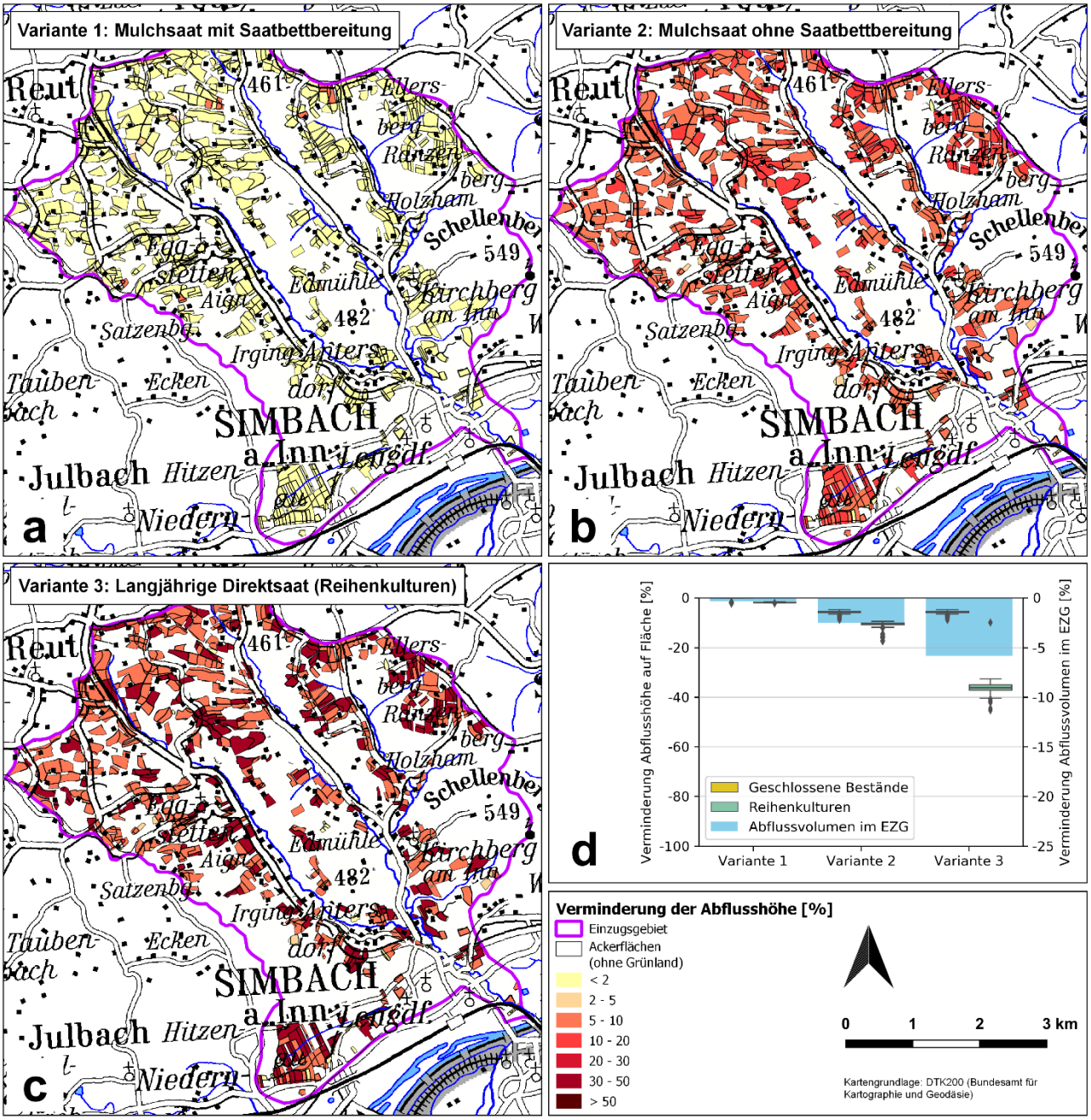
Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Es zeigt sich, dass durch die Zwischenbegrünung der Rebflächen eine Verringerung der Abflusshöhe von nur 5-10 % erreicht werden kann. Mit einem relativ geringen Flächenanteil von ca. 6 % hat die Zwischenbegrünung hier praktisch keine Auswirkung auf Einzugsgebietsebene, jedoch handelt es sich hierbei meist um zusammenhängende Flächen, daher sollte die lokale abflussmindernde Wirkung auf Flächen in Größenordnung um ca. 50 ha nicht unterschätzt werden.

Fallbeispiel 3 - Simbach

Im Fallbeispiel Simbach wurden die Bewirtschaftungsvarianten praktisch auf allen Ackerflächen, ausgenommen sind hier Brachen und Ackerland mit unspezifischer Nutzung, untersucht. Diese besitzen einen Anteil von ca. 25 % an der Gesamtfläche. Die räumliche Darstellung der Ergebnisse aller Varianten erfolgt in Abbildung 51 a-c, während die Flächen- und Einzugsgebietsstatistik der Abflussverminderung aus Abbildung 51 d hervorgeht.

Abbildung 51: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 3 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen (Boxplots, Primärachse) und auf Einzugsgebietsebene (Balken, Sekundärachse). Für jede Variante in (d) repräsentiert der linke Boxplot geschlossene Bestände und der rechte die Reihenkulturen.



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Wenn im EZG Simbach auf den Maisflächen die Direktsaat langfristig etabliert würde (Variante 3), zeichnete sich dies deutlich in der Abflussminderung dieser Flächen ab. Diese steigt von ca. 10-20 % (Variante 2) auf über 30 %. In Hinblick auf die Wirkung auf den Gesamtabfluss des Einzugsgebietes wird eine Minderung des gesamten Abflussvolumens um lediglich 6 % erreicht. Auch im Best-Case Szenario fällt die Abflussminderung relativ gering aus. Der Grund liegt in der enormen Niederschlagsmenge von durchschnittlich 165 mm, die in ca. 36 Stunden im EZG Simbach fielen und den natürlichen Wasserrückhalt trotz abflussmindernder Flächenbewirtschaftung ausschöpft und übersteigt.

Bei Variante 1 ist praktisch keine abflussmindernde Wirkung erkennbar. Auf allen Flächen, mit Ausnahme einzelner Äcker mit Leguminosen, liegt die Verringerung der Abflusshöhe durch Mulchsaat mit anschließender Saatbettbereitung bei <2 %. Entsprechend fällt die abflussmindernde Wirkung auf Einzugsgebietsebene mit einer Verringerung des Abflussvolumens um weit weniger als 1 % sehr gering aus. Die zweite Variante zeigt ein wesentlich höheres Abflussminderungspotential. Auf den meisten Flächen werden Abflussminderungen von ca. 5-10 % erreicht, vereinzelt auch >10 %. Auf den Flächen sind allerdings kaum Unterschiede erkennbar, was sich ebenso in der statistischen Darstellung widerspiegelt. Zwischen den geschlossenen Beständen und Reihenkulturen sind die Unterschiede bei den Medianen mit je etwa 5 % und 10 % gering. Durch die Abflussminderung auf diesen Flächen kann potentiell eine Verringerung des Abflussvolumens von nur 2-3 % im gesamten Einzugsgebiet erzielt werden.

Fallbeispiel 4 – Wolfsbach/Aichbach

Für das Fallbeispiel Wolfsbach/Aichbach konnten auf den meisten Ackerflächen (ca. 30 % der Gesamtfläche) die Flächenbewirtschaftungsformen variiert werden. Die flächendifferenzierten Ergebnisse sind in Abbildung 52 a-c dargestellt.

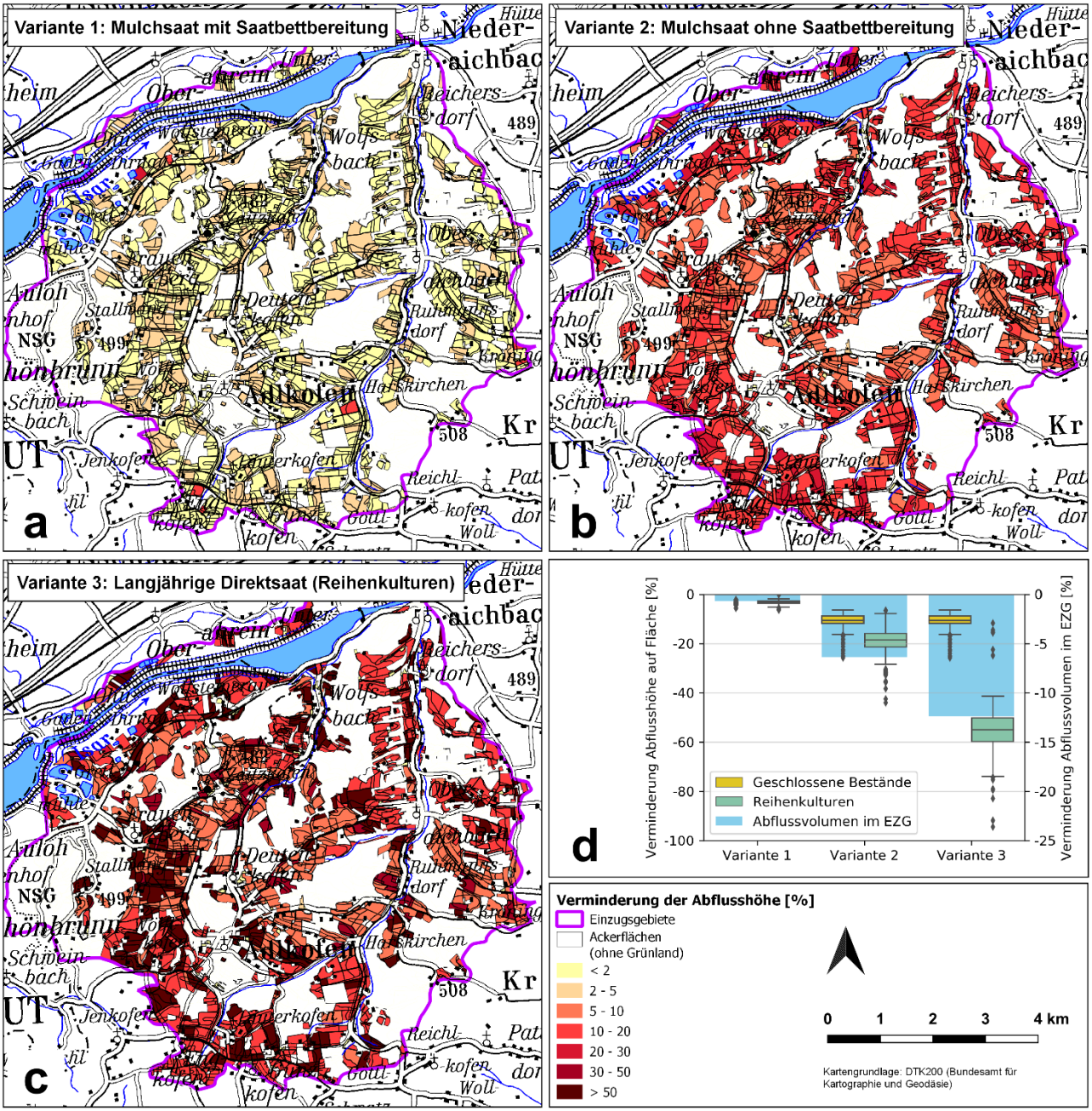
Die Statistik der Abflussverminderung geht aus Abbildung 52 d hervor. Der Flächenanteil mit geringem Abflussaufkommen <1 mm war sehr gering und beschränkte sich auf Waldflächen, die bei der Variantenbetrachtung unberührt bleiben. Ein Ausschluss von der statistischen Auswertung war daher nicht notwendig.

Wie bereits in den Fallbeispielen der Gemeinde Grafschaft und von Simbach, wird auch hier eine sehr geringe Abflussminderung bei der Variante 1 (Mulchsaat mit Saatbettbereitung) festgestellt. Die räumliche Verteilung zeigt erneut einen hohen Grad an Homogenität. Die Abflussminderungen liegen hier unwesentlich höher bei 2-5 %. Damit kann der Gesamtabfluss um ca. 1 % verringert werden.

Beim Mulchsaatverfahren mit Verzicht auf die Saatbettbereitung (Variante 2) kann die Abflussminderung um 5-10 % bzw. 10-20 % verstärkt werden, wobei tendenziell die stärkere Verminderung auf Flächen erreicht wird, wo weniger Niederschlag fällt. Die Mediane der Flächengruppen der geschlossenen Bestände und Reihenkulturen liegen bei etwa 10 und 20 %. Die entsprechende Drosselung auf Einzugsgebietsebene beläuft sich hier auf ca. 6 %.

Darüber hinaus zeigt in diesem Fallbeispiel Variante 3 bei Reihenkulturen (ca. 12 % Flächenanteil, vorwiegend Maisflächen) eine zusätzliche Verminderung der Abflusshöhe von 20 % auf ca. 55 %. Hier ist bemerkenswert, dass durch einen dauerhaften Verzicht auf die Bodenbearbeitung auf 12 % der Einzugsgebietsfläche das Abflussvolumen des Sturzflutereignisses vom 31. Mai 2016 potentiell um weitere 6 % reduziert werden könnte.

Abbildung 52: Flächendifferenzierte Abflussminderung für das Fallbeispiel 4 und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen (Boxplots, Primärachse) und auf Einzugsgebietsebene (Balken, Sekundärachse)

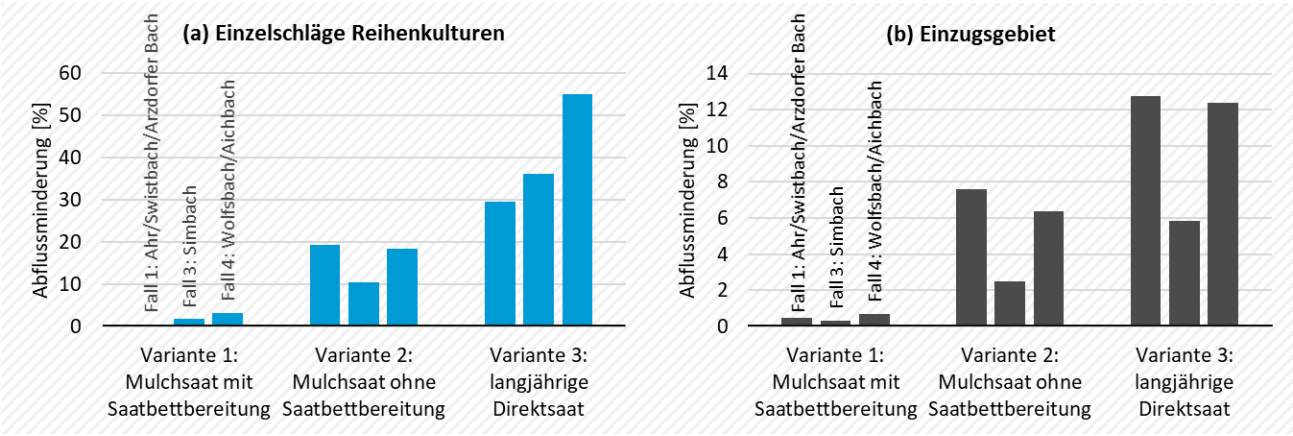


Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Abflussminderung auf Schlag- und Einzugsgebietsebene

Aus den vorangegangenen Einzelbeispielen lassen sich fallübergreifend ähnliche Ergebnisse feststellen, die in der Abbildung 53 dargestellt sind. Auf der Schlag- bzw. Feldebene wurden die Abflussminderungen der Reihenkulturen betrachtet, da für diese Flächengruppe alle Varianten vollumfänglich untersucht werden konnten. Die Ergebnisse des Fallbeispiels 2 wurden aufgrund der mangelhaften Datengrundlage nicht miteinbezogen.

Abbildung 53: Abflussminderung auf (a) Einzelschlägen der Reihenkulturen mit (b) Auswirkung auf das gesamte Einzugsgebiet für die Fallbeispiele 1, 3 und 4. Die Reihenfolge der Fallbeispiele ist für jede Landnutzungsgruppe gleich. Die Skalen der Ordinaten unterscheiden sich etwa um den Faktor 4.



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Ackerflächen (Variante 1) zeigt für alle Ereignisse ein extrem geringes Abflussminderungspotential, während bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (Variante 2) auf Schlagebene der Abfluss um 10-20 % vermindert werden kann, was sich auf Einzugsgebietsebene mit etwa 7 % verringertem Abflussvolumen auswirkt. Die höchsten Werte werden bei der langjährigen Direktsaat erzielt. Hierbei werden auf Einzelschlägen bis zu 50 % Abflussminderung erzielt, was zu maximal 13 % weniger Abfluss im Einzugsgebiet führt. Auffällig ist das geringe Drosselungspotential für das Fallbeispiel 3 (Simbach). Die relativ geringe Wirkung der Abflussminderung ist hier womöglich auf den außerordentlich hohen Gebietsniederschlag von 165 mm zurückzuführen.

6.5.2 Variation der Niederschlagsintensität

Offenbar wird die Verringerung der Abflusshöhe nicht nur von den Maßnahmen der Flächenbewirtschaftung beeinflusst, sondern auch von der Niederschlagsintensität. Im Fallbeispiel Simbach wurde sehr deutlich, dass auch unter optimalen hydrologischen Bedingungen auf Ackerflächen, z. B. langjährige Direktsaat, der Wasserrückhalt ab einer gewissen Niederschlagsintensität bzw. -dauer erschöpft ist, d. h. die Maßnahme führt zu keiner signifikanten Verminderung der Direktabflussmenge. Dies ist in Hinblick auf die flächenhafte Risikoerfassung von Sturzflutereignissen auf landwirtschaftlichen Flächen von großer Bedeutung und führt zur Frage, ab welchen Niederschlagsintensitäten die Landnutzung bzw. Bewirtschaftungsform keine Rolle mehr spielt. Aus diesem Grund werden nachfolgend die bisher vorgestellten Modellierungen für verschiedene Niederschlagsszenarien wiederholt, wodurch das Wirksamkeitspotential der Bewirtschaftungsvarianten abgeschätzt werden soll.

Die Variation des Niederschlags erfolgt ereignisunabhängig mittels Blockregen, der flächendeckend innerhalb einer Stunde auf das gesamte Untersuchungsgebiet fällt. Die Vorfeuchte zum Zeitpunkt des Ereignisses sowie die hydrologische Bodenklasse bleiben erhalten. Die Niederschlagsintensität wird im Intervall von 5 mm/h bis 150 mm/h variiert und die flächendifferenzierten Direktabflüsse [mm] ermittelt. Anschließend wird die Verminderung der Abflussmenge auf relevanten Flächengruppen sowie unter Einbeziehung des Flächenanteils im gesamten Untersuchungsgebiet für jede Bewirtschaftungsvariante ermittelt.

Zur Wirksamkeitsabschätzung werden die Ergebnisse der Niederschlagsvariation mit Regenintensitäten charakteristischer Wiederkehrintervalle verglichen. Letztere sind in der Tabelle 13 für jedes Fallbeispiel aufgelistet. Demnach liegen die Spannweiten eines HN20 bei 36 mm/h bis 40 mm/h, eines

HN50 bei 43 mm/h bis 47 mm/h und eines HN100 bei 47 mm/h bis 53 mm/h. Die Werte der charakteristischen Ereignisse sind in der Abbildung 54 als vertikale Linien dargestellt.

In Abbildung 54 ist die Verminderung der Direktabflüsse unter den Bewirtschaftungsvarianten aus Kapitel 6.5.2 der vier Fallbeispiele (Zeilen 1 bis 4) dargestellt. Dabei repräsentiert jeder Punkt das Ergebnis einer Simulation des entsprechenden Niederschlagsereignisses unter den gegebenen Bedingungen und Standortfaktoren. In der linken Spalte (a) jeder Zeile ist die Abflussminderung auf Gebietsebene dargestellt, während in der rechten Spalte (b) die abflussmindernde Wirkung auf maßnahmenrelevanten Flächengruppen aufgeführt ist. Man beachte zwischen den Spalten die unterschiedliche Skalierung der Ordinate.

Tabelle 13: Niederschlagsintensitäten (Dauer 1 h) für die Wiederkehrintervalle 20, 50 und 100 Jahre

Einzugsgebiet	Ahr/Swistbach/ Arzdorfer Bach	Engebach/Hod	Simbach	Wolfsbach/ Aichbach
HN20 [mm]	36	40	39	40
HN50 [mm]	43	47	46	47
HN100 [mm]	47	52	51	53

Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH; Daten aus KOSTRA (DWD, 2018)

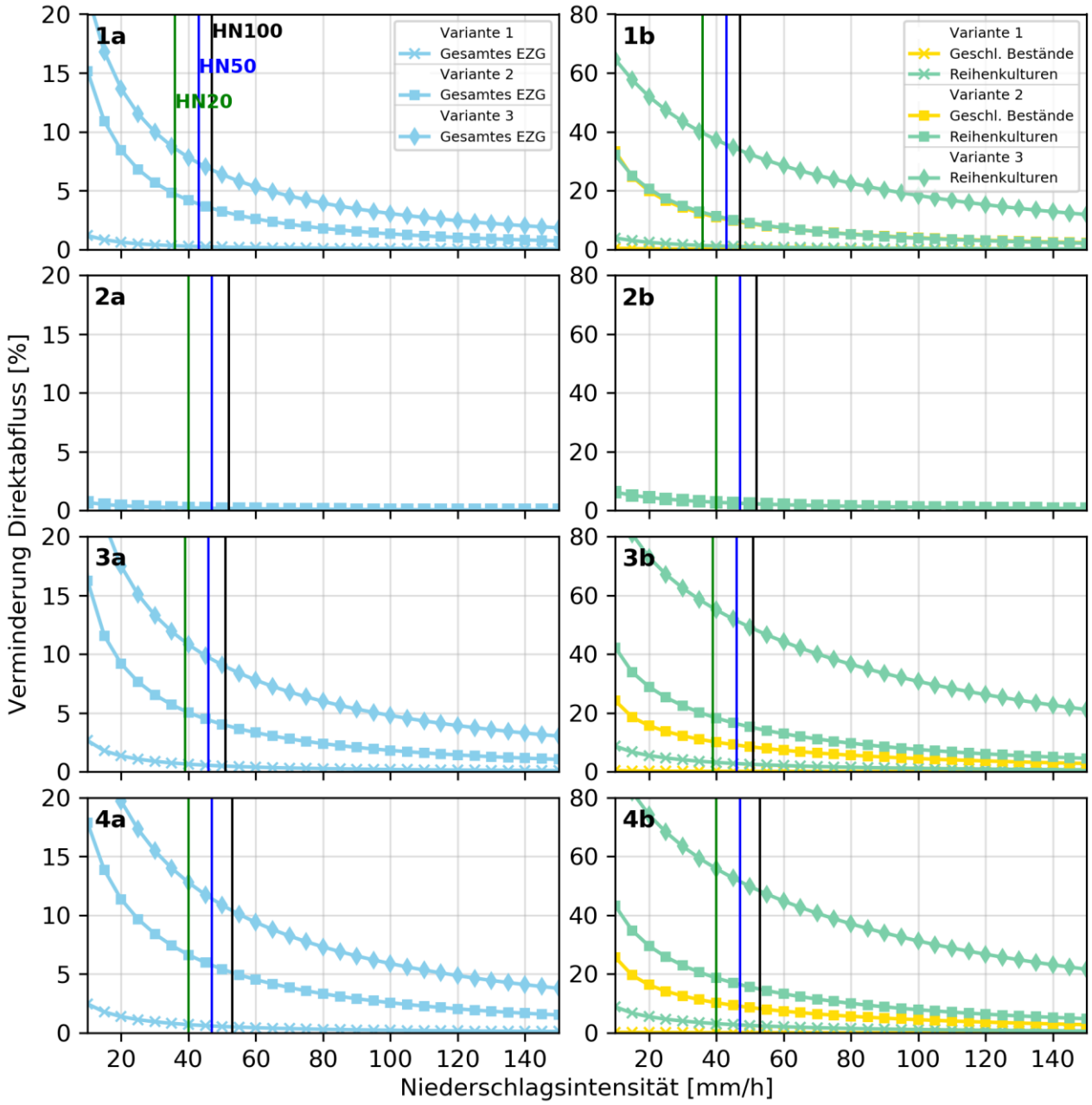
Wirksamkeit bei Ereignissen bis HN100

Die Ergebnisse in Abbildung 54 weisen viele Gemeinsamkeiten auf, die eine fallübergreifende Auswertung nahelegen, wobei Fallbeispiel 2 aufgrund der begrenzten Möglichkeiten bei den Variantenrechnungen gesondert betrachtet wird. Durch die Mulchsaat mit anschließender Saatbettbereitung (Variante 1, Kreuzsymbole) können für die Fallbeispiele 1, 3 und 4 bei relativ geringen Niederschlagsintensitäten von 20 mm/h maximale Abflussminderungen von 2 % (EZG/Untersuchungsgebiet) bzw. ca. 5 % auf Schlagebene (geschlossene Bestände oder Reihenkulturen) erreicht werden. Bei höheren Intensitäten >40 mm/h versagt die abflussmindernde Wirkung der Variante 1 vollständig. Folglich können die Abflüsse bei Niederschlagsereignissen vom Ausmaß HN20 und stärker durch die Mulchsaat mit Saatbettbereitung nicht signifikant beeinflusst werden.

Die Direktsaat bzw. Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (Variante 2, Quadratsymbole) liegt in ihrer Retentionswirkung wesentlich höher. Die Gebietsabflüsse eines HN20 können bei den Fallbeispielen um 5-7 % vermindert werden, während das Drosselungspotential bei einem HN100 bei 4 bis 5 % liegt. Bei den Reihenkulturen liegen die Drosselungen entsprechend der Intensitäten eines HN20 bzw. HN100 meist bei 10 bis 20 % bzw. 8 bis 15 % und die der geschlossenen Bestände bei ca. 10 % (HN20) bzw. etwa 8 % (HN100). In den Fällen 3 und 4 ist Potential bei Reihenkulturen doppelt so hoch. Der Grund liegt im wesentlich höheren Anteil an Maisflächen von 10 bis 12 % (Fall 1: ca. 2 %), die am meisten von den Retentionssteigerungen profitieren.

Die maximalen Abflussminderungen werden durch die dauerhafte Direktsaat ohne Bodenbearbeitung (Variante 3, Rautensymbole) erzielt, die das Best-Case Szenario darstellt. Allerdings erlaubt die Datenlage nur eine Untersuchung auf Flächen mit Reihenkulturen, insbesondere Futter-/Zuckerrüben und Mais. Die Verminderungen belaufen sich für ein HN20 auf 8 bis 13 % und auf ca. 7 bis 10 % Verminderung der Direktabflüsse eines HN100 auf Gebietsebene. Bezüglich der Reihenkulturen werden auf den Flächen bei diesen Intensitäten noch enorme Steigerungen der Wasserretention von 35 % (Fall 1) bzw. 50 % (Fallbeispiele 3 und 4) erreicht.

Abbildung 54: Verminderung des Direktabflusses verschiedener Bewirtschaftungsvarianten (Variante 1 bzw. 2: Mulchsaat mit bzw. ohne Saatbettbereitung, Variante 3: Direktsaat) unter Variation der Niederschlagsintensität für die Fallbeispiele 1-4 entsprechend der Nummerierung (a) bezogen auf das Untersuchungsgebiet oder (b) Flächengruppen. Die Skalierung der Ordinaten in den Spalten a und b unterscheidet sich um den Faktor 4.



Quelle: eigene Darstellung, HYDOR Consult GmbH

Insgesamt decken sich die Ergebnisse in Abbildung 54 mit den Beobachtungen aus der Variation der Flächenbewirtschaftung in Kapitel 6.5.1. Bei einer detaillierten Betrachtung der Fallbeispiele 1 (Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach) und 2 (Engebach/Hod) ergeben sich einige Besonderheiten. Die Grafiken in den Abbildung 54 2a und 2b (Fallbeispiel Engebach/Hod) veranschaulichen, dass eine adäquate Untersuchung des Abflussminderungspotentials ohne geeignete Datengrundlage nicht möglich ist. Wie bereits in Kapitel 6.5.1 erläutert, konnte aufgrund der Datenlage lediglich die potentielle Wirkung einer Zwischenbegrünung untersucht werden. Das geringere Abflussminderungspotential zeigt

sich in der Grafik 2b. Durch den Rebflächenanteil von etwa 6 % hat die Maßnahme auf Einzugsgebietsebene praktisch keine Auswirkungen.

In Abbildung 54 1a sind die Ergebnisse für den Fall 1 dargestellt. Generell zeigt dieses Fallbeispiel ein geringeres Abflussminderungspotential als die Fallbeispiele 3 und 4. Ein gravierender Unterschied zwischen den Fallbeispielen ist die extrem hohe Vorfeuchte im Fall 1. Diese ist zwar für höhere Abflüsse, nicht jedoch für ein geringeres Abflussminderungspotential verantwortlich. Bei höheren Vorfeuchten wird die Kurve der bodenfeuchteabhängigen Curve-Number steiler (s. Abbildung 31). Infolgedessen erhöhen sich die Unterschiede zwischen den Curve-Numbers und bewirken eine Steigerung der potentiellen Abflussminderung, d. h. im vorliegenden Fallbeispiel konkret, dass die Wasserretention der Flächen mit Direktsaat geringer von der Vorfeuchte beeinflusst wird als die der konventionell bewirtschafteten Flächen.

Der beobachtete Effekt ist jedoch entgegengesetzt. Wie oben bereits angedeutet und wie in Kapitel 6.5.1 erläutert, ist der tatsächliche Grund in der Verteilung der Hauptfrüchte zu suchen. Im Vergleich zu den Fallbeispielen 3 und 4 sind die Anteile der Zuckerrübenflächen relativ hoch (4,5 %) und die der Maisflächen gering (2 %). Die konventionell bewirtschafteten Ackerflächen mit Zuckerrüben produzieren zum Zeitpunkt des Ereignisses Anfang Juni aufgrund des fortgeschrittenen Vegetationsstadiums tendenziell weniger Abfluss als die für Reihenkulturen sonst typischen Maisflächen. Bei sinkendem Flächenanteil der Kulturen mit Neigungen zu hohem Direktabfluss (z. B. Mais) verringert sich das Potential entsprechend der Maßnahmenwirksamkeit.

Wirksamkeitspotential unter Extrembedingungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Ereignisse betrachtet, deren Wiederkehrintervall teils weit über 100 Jahren liegt (s. Tabelle 12 und Tabelle 13). Bezogen auf Niederschlagsdauern von einer Stunde handelt es sich dabei um Intensitäten >60 mm/h. Bei dieser Intensität liegen die Abflussminderungspotentiale von Variante 2 (Direktsaat) zwischen 3 und 5 % auf Gebietsebene und bei 5 bis 15 % für geschlossene Bestände bzw. Reihenkulturen, was bereits eine Erschöpfung der Maßnahmenwirksamkeit andeutet. Bei noch extremeren Ereignissen von 100 mm/h nähern sich die Kurven einem Grenzwert an, der einige Prozent nur selten übersteigt.

Die langjährige Direktsaat (Variante 3) zeigt bei Extremereignissen von 60 mm/h eine geringere Erschöpfung bezüglich der abflussmindernden Wirkung. Die Verringerungen liegen hier bei 5 bis 10 % bezogen auf das Untersuchungsgebiet, wobei diese auf 3 bis 6 % bei 100 mm/h sinken. Dieser Sachverhalt impliziert, dass auch einem Best-Case Szenario natürliche Grenzen gesetzt sind. Auf den Flächen der Reihenkulturen wurden die Abflussmengen bei 60 mm/h noch um 30 bis 45 % verringert. Bei sehr extremen Verhältnissen von 100 mm/h sinken die Drosselungen hier auf 20 bis 30 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewirtschaftungsvarianten unter extremen Niederschlagsintensitäten weitestgehend einer Erschöpfung des natürlichen Abflussminderungspotentials unterworfen sind. Zu dieser Erkenntnis kam ebenfalls eine Studie zu Sturzflutereignissen 2016 in Bayern (Brandhuber et al., 2017). Die Ergebnisse für das Einzugsgebiet Simbach (Fallbeispiel 3) zeigen, dass die abflussmindernde Wirkung der Bodenbedeckung mit zunehmendem Niederschlag abnimmt und ab gewissen Niederschlagsintensitäten bzw. –dauern praktisch bedeutungslos wird, da alle Landnutzungsgruppen, darunter auch relativ abflussarme Flächen wie Grünland oder Wald, entsprechend ihrem Flächenanteil Abfluss liefern. Die Bestätigung des Sachverhalts kann durch die vorliegenden Ergebnisse auf alternative Flächenbewirtschaftungen übertragen werden. Eine Ausnahme bilden hier jedoch die Ergebnisse des Best-Case Szenarios auf lokaler Ebene.

6.6 Schlussfolgerungen

6.6.1 Ergebnisse aus den Gebietsanalysen

Mit dem modifizierten Curve-Number-Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989) wurden flächendifferenzierte Abflusshöhen (Direktabfluss) für vier reale Niederschlagsereignisse, die in den Jahren 2015 und 2016 jeweils im Frühsommer zwischen Ende Mai und Anfang Juni stattfanden, modelliert. Anhand der Modellergebnisse wurden Ackerflächen eindeutig als primär abflussliefernde Flächengruppen identifiziert. Die Differenzen der Abflussbeiwerte zwischen Ackerland und abflussärmeren Flächen, z. B. Wald oder Grünland, lagen bei durchschnittlichen Vorfeuchten bei 20 bis 35 %. Bei extremer Vorfeuchte erreichten die Differenzen der Mediane bis zu 70 %. Die Datengrundlage in Kombination mit dem angewandten Verfahren erlaubte eine Unterscheidung der abflussfördernden Flächen in geschlossene Bestände und Reihenkulturen. Zwischen diesen Gruppen wurde hinsichtlich der Abflussbeiwerte eine Differenz von 8 bis 15 % festgestellt, wobei Reihenkulturen ausnahmslos die höchsten Direktabflüsse erzeugten.

Da der Ackerflächenanteil in den vier Untersuchungsgebieten mit 28 bis 44 % sehr hoch war, führten die hohen Abflussbeiwerte der Flächen zu entsprechend hohen Volumenanteilen an Gesamtabfluss. In drei von vier Fallbeispielen stellte das Ackerland die höchsten Abflussanteile von 55 bis 60 % bereit. Dies entspricht etwa dem 1,5-fachen ihres Flächenanteils. Die vorliegenden Modellergebnisse lassen, bezogen auf die Abflussmengen und ungeachtet der Abflusskonzentration, den Schluss eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen den durch Ackerflächen erzeugten Direktabflussmengen und der Intensität der Sturzflut- bzw. Hochwasserereignisse zu. Infolgedessen führen hohe Ackerflächenanteile im Allgemeinen, insbesondere Reihenkulturen mit später Aussaat, zu einer Verschärfung der Hochwasser- und Sturzflutproblematik in Einzugsgebieten.

6.6.2 Variantenuntersuchungen zur Abflussminderung

Da der Abflussbildungsprozess auf landwirtschaftlichen Flächen maßgeblich von der Fruchtfolge und der Flächenbewirtschaftung sowie der Bodenbearbeitung abhängt, wurde modellhaft untersucht, wie die Beschaffenheit des Ackerlands verändert werden kann, um eine Minderung der Direktabflussmengen zu erreichen. Dazu wurden drei Bewirtschaftungsszenarien analysiert, um das ereignisspezifische Direktabflussminderungspotential auf Untersuchungsgebietsebene sowie auf für die abflussfördernden Flächengruppen zu untersuchen. Im Anschluss wurde die Maßnahmenwirksamkeit der Flächenbewirtschaftungsszenarien durch die Variation der Niederschlagsintensität erfasst.

Eine Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Ackerflächen (Variante 1) zeigte für alle Ereignisse ein extrem geringes Potential von nur wenigen Prozent Direktabflussminderung, sowohl auf Gebietsebene als auch für die Teilflächen der geschlossenen Bestände bzw. Reihenkulturen.

Wird hingegen auf eine Saatbettbereitung verzichtet (Variante 2), so erhöht sich die abflussmindernde Wirkung bei geschlossenen Beständen auf ca. 10 % und bei Reihenkulturen auf 20 %. Auf Gebietsebene wurde in zwei Fallbeispielen ein Minderungspotential von 7 % erreicht. Der Vergleich zeigt, dass eine ausreichende Bodenbedeckung eine effiziente Abflussminderung auf lokaler Ebene bewirkt, die sich auch auf Gebietsebene bemerkbar macht. Zur effizienten Abflussminderung darf der Bodenbedeckungsgrad der Flächen mit Mulchsaat 20 % nicht unterschreiten. Der Grenzwert von 20 % Bodenbedeckung stammt in diesem Fall aus dem Datenkatalog des NEH-630 (USDA NRCS, 2004b) und ist Voraussetzung für eine solche Parametrisierung. Die Wirksamkeit der Direktsaat ist bei Ereignissen, die über die Ausmaße eines HN100 (ca. 50 mm/h) hinausgehen, noch vorhanden. Bei wesentlich höheren Niederschlagsintensitäten erschöpft sich jedoch das Abflussminderungspotential und eine Wirksamkeit der Maßnahme ist praktisch nicht mehr gegeben.

Im Best-Case Szenario (Variante 3) wurden Reihenkulturen mit einer langjährigen Direktsaat parametrisiert, die jedoch einen dauerhaften Charakter mit Bewirtschaftungszeiträumen von rund 50 Jahren ohne Bodenbearbeitung aufweist (Bonta & Shipitalo, 2013). Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass durch eine Veränderung der Bewirtschaftung auf nur 10 % der Einzugsgebietsfläche Verminderungen des Gebietsabflusses von bis zu 13 % ermöglicht werden. Dieses große Potential wird durch die Verringerung der Abflusshöhen von bis zu 50 % auf einzelnen Schlägen (Reihenkulturen, vor allem Maisflächen) erreicht (s. Abbildung 53).

Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass die Mulchsaat ein enormes Potential zur Abflussminderung sowohl auf Schlag- als auch auf Einzugsgebietsebene besitzt. Allerdings ist zu erwarten, dass dem Abflussminderungspotential Grenzen gesetzt sind. Die Maßnahmenwirksamkeit wurde durch die Variation der Niederschläge untersucht. Ein Jahrhundertereignis (HN100) kann noch mit ca. 10 % Abflussminderung auf Einzugsgebietsebene gedämpft werden. Bei Niederschlagsintensitäten von 100 mm/h treten auch bei optimistischen Betrachtungen stagnierende Verhältnisse bezüglich der Abflussminderung von ca. 5 % ein, jedoch wird auf den Flächen der Reihenkulturen laut Modellergebnissen selbst bei diesen Verhältnissen der Direktabfluss noch um 30 % verringert. Trotz des Eintretens eines Erschöpfungszustands im Best-Case Szenario, ist der lokale Effekt in Teilgebieten mit einem besonders hohen Anteil an Maisflächen nicht zu unterschätzen, denn neben der Hochwasserschutzwirkung ist auch der Schutz vor Überflutungen durch Sturzfluten zu berücksichtigen. Lokal wirksame Abflussminderungen durch langjährige Direktsaat besitzen daher selbst bei Extremereignissen, die weit über ein HN100 hinausreichen, ein hohes Schutzpotential für Unterlieger. Bei lokaler, räumlich hochaufgelöster Anwendung muss jedoch der abschätzende Charakter des Curve-Number Verfahrens und die hohe Sensitivität gegenüber räumlich in der Natur variierenden Bodenparametern berücksichtigt werden, um Fehleinschätzungen auf Schlagebene zu vermeiden.

Der flächendifferenzierten Modellierung der Direktabflüsse lag in den meisten Fällen eine umfassende Datenlage zu Grunde, die für eine möglichst präzise Parametrisierung und geometrische Erfassung der Schläge und der daraus resultierenden Ausweisung abflussfördernder Flächen unabdingbar war. In drei von vier Fallbeispielen lagen durch die InVeKoS-Daten Informationen zur Hauptfrucht des Ereignisfalles vor. Im Fallbeispiel 2 (Engebach/Hod) konnten mangels dieser Daten keine aussagefähigen Analysen zu alternativen Flächenbewirtschaftungen und deren Maßnahmenwirksamkeitspotential durchgeführt werden.

Schlussfolgerungen aus den regionalen Analysen von Hochwasserereignissen

1. Hohe bodenbürtige Abflussbeiwerte auf Ackerland führen zu hohen Direktabflüssen im Einzugsgebiet und fördern Sturzflut- und daraus ggf. resultierende Hochwassersituationen.
2. Der potentielle Wasserrückhalt auf Ackerflächen lässt sich durch unterschiedliche Bewirtschaftungsformen signifikant beeinflussen.
3. Mulchsaat ohne Saatbettbereitung und langjährige Direktsaat führen zu effizienter Abflussminderung auf Einzelschlägen mit Auswirkung auf das komplette Einzugsgebiet bei einem Mindestbedeckungsgrad des Bodens von ≥20 % zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses.
4. Potentielle Abflussminderungen durch Maßnahmen auf Schlagebene nehmen bei Starkregenereignissen mit Jährlichkeiten >100 a deutlich ab.

Hinsichtlich der aus den regionalen Analysen abgeleiteten Anpassungen des Förderinstrumentariums und der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten werden in Kap. 7.2 Empfehlungen ausgesprochen.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Forschungsbedarf

Abschließend werden Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen gezogen. Dabei wird zunächst bewertet, welche Bedeutung das angewandte Curve-Number Verfahren für die regionale Gefährdungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen bei Sturzflutereignissen hat. Anschließend folgen Handlungsempfehlungen für die Anpassung des Förderinstrumentariums und der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten. Zuletzt wird als Ausblick der weitere Forschungsbedarf abgeleitet.

7.1 Gefährdungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen bei Sturzflutereignissen

Mit dem SCS-Curve-Number Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989) werden grundlegend quantitative Aussagen auf Feldebene zu Direktabflussmengen, also der schnellen Antwortfunktion der Nutzflächen im gesamten Einzugsgebiet, getroffen. Damit können Teilflächen im Einzugsgebiet identifiziert werden, die eine hohe Anfälligkeit zur Direktabflussbildung besitzen. Die **Abflusssensitivität** solcher Flächen drückt sich in den vier in Süddeutschland untersuchten Sturzflut- bzw. Dauerregenereignissen vor allem dadurch aus, dass sie einen überproportionalen Abflussanteil im Verhältnis zu ihrem Flächenanteil im Einzugsgebiet lieferten. Dabei handelte sich um **siedlungsgeprägte und landwirtschaftlich genutzte Flächen**, wobei letztere durch ihren hohen Flächenanteil eine wesentlich höhere Bedeutung für den Gesamtabfluss im Einzugsgebiet besitzen.

Durch eine gezielte Variation der Flächenbewirtschaftung auf Feldebene unter Berücksichtigung der Ereignischarakteristika und der Standortbedingungen konnten die Abflussminderungspotentiale quantifiziert werden. Dabei wurde herausgearbeitet, dass beim **Mulchsaatverfahren** die Saatbettbereitung maßgeblichen Einfluss auf das Wasserrückhaltevermögen landwirtschaftlicher Flächen hat. Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung führt zu keiner nennenswerten Verminderung des Abflusses, während dieser bei Mulchsaat ohne Saatbettbereitung auf Schlagebene um bis zu 20 % verringert werden kann. Dies macht sich auf Einzugsgebietsebene durch verminderte Abflussvolumina von bis zu 7 % bemerkbar. Diesen Ergebnissen liegt die Datengrundlage des USDA NRCS (2004b) mit einer Bodenbedeckung von >20 % zu Grunde. In Verbindung mit den Erkenntnissen aus Kapitel 3, in dem für einen effektiven Erosionsschutz ein Bedeckungsgrad von >30 % genannt wurde, wird ebendieser als **Mindestbedeckungsgrad** für landwirtschaftliche Flächen zum Schutz vor Sturzfluten und Bodenerosion empfohlen. Noch stärkere Effekte lassen sich mit langjähriger Direktsaat erreichen.

Als Best-Case Szenario wurde die Auswirkung einer langjährigen **Direktsaat** mit dem Ergebnis einer Halbierung des Abflusses auf einzelnen Ackerflächen simuliert, die auf Einzugsgebietsebene bis zu 13 % Abflussminderung bewirkte. Dabei ist nicht nur die Höhe der Abflussminderung, sondern auch der vorsorgende Charakter der Direktsaat hervorzuheben, der bei der Vorhersage von Sturzflutereignissen an Bedeutung gewinnt. Bei derartigen Rückhaltepotentialen von über 10 % können außerdem bei einem realistischen Extremereignis mit einer Niederschlagsintensität von N=50 mm/h und einem Abflussbeiwert von 30 % in einem Einzugsgebiet der Größe 50 km^2 mindestens 75.000 m^3 Abflussvolumen zurückgehalten werden. Dies entspricht der Größenordnung von mittelgroßen Hochwasserrückhaltebecken und verdeutlicht das enorme Potential des natürlichen Wasserrückhalts auf den Nutzflächen innerhalb des Einzugsgebietes. Diese Tatsache ist neben dem Sicherheitsaspekt der Gefährdung durch Sturzflutereignisse auch aufgrund finanzieller Gesichtspunkte hinsichtlich der Kostenminderung baulicher Investitionsmaßnahmen von öffentlichem Interesse. Allerdings ist das Direktsaatverfahren zurzeit noch an den wiederkehrenden Einsatz von Totalherbiziden (z. B. Glyphosat) gekoppelt, der gesellschaftspolitisch sehr kritisch bewertet wird.

Für die simulierten Bewirtschaftungsvarianten können weiterhin **Schwellenwerte** ermittelt werden, die Auskunft darüber geben, bei welcher Niederschlagsintensität bzw. -dauer eine Erschöpfung des Abflussminderungspotentials einer Flächengruppe oder eines Einzugsgebietes eintritt. In der oben genannten Variante der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung wird eine Abflussminderung von 5 % bei ei-

ner Niederschlagsintensität von ca. 40 bis 50 mm/h unterschritten. Selbst bei einem Best-Case Szenario einer langjährigen Direktsaat sinkt das Abflussminderungspotential auf ca. 5 % bei einer Niederschlagsintensität von etwa 100 mm/h. Folglich haben alle Maßnahmen auf Feldebene im Hinblick auf die Abflussminderung, die bei entsprechend hoher Niederschlagsintensität erreicht werden können, ihre Grenzen. Dann erreichen alle Flächen einen Zustand, in dem das gesamte Wasserrückhaltepotential erschöpft ist und jede Fläche größenproportionalen Abfluss liefert.

Nach unseren Erfahrungen eignet sich das Curve-Number-Verfahren nach Kleeberg & Overland (1989) als **Werkzeug zur orientierenden Gefährdungsanalyse** von Sturzflutereignissen. Die Übertragung der angewandten Methodik auf weitere Einzugsgebiete ist zweifelsfrei gegeben. Sie erfordert jedoch sachlich und zeitlich präzise sowie räumlich hochaufgelöste Informationen auf Feldebene zur landwirtschaftlichen Flächenkulisse im Untersuchungsgebiet. Dafür muss die Haupt- bzw. Zwischenfrucht zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses bekannt sein. Für die Variation der Flächenbewirtschaftung sind zudem Daten zur hydrologischen Kenngröße, in diesem Fall der Curve-Number, unabdingbar.

Die Ausweisung abflusssensitiver Flächen wurde in der vorliegenden Studie für vier Fallbeispiele durchgeführt. Sie muss jedoch nicht zwangsläufig auf Grundlage realer Niederschlagsereignisse erfolgen, sondern kann für beliebige Bemessungsniederschläge, z. B. HN 100 oder höher, durchgeführt werden. Je nach Gefährdungsgrad bzw. Anfälligkeit gegenüber der Direktabflussbildung können in Gebieten mit hohen Abflussanteilen **Handlungsoptionen** zur Abflussminderung ermittelt werden. Die Handlungsmöglichkeiten richten sich dabei nach dem verwaltungsrechtlichen Handlungsspielraum und der Auswahl an geeigneten Agrarfördermaßnahmen. Die Handlungsoptionen können durch Zielformulierungen, z. B. zur Erreichung eines Mindestbedeckungsgrades von 30 %, in ihrer Wirksamkeit optimiert werden.

Nach Feststellung des Handlungsbedarfs können nach den oben beschriebenen Beispielen Abflussminderungspotentiale entsprechender Maßnahmen sowie Schwellenwerte zur Bemessung des Wirksamkeitspotentials für Einzelflächen und die Wirkung auf das gesamte Einzugsgebiet ermittelt werden. Diese Größen dienen der Maßnahmenbewertung und begleiten als zusätzliches **Planungsinstrument** die mögliche Umsetzung von Maßnahmen auf Feldebene zur hydrologischen Optimierung landwirtschaftlicher Flächen im gesamten Einzugsgebiet.

Bei der Gefährdungsabschätzung landwirtschaftlicher Flächen gegenüber Sturzflutereignissen werden jedoch keine direkten Aussagen zur Erosionsgefährdung getroffen, da Oberflächenabfluss nicht mit Bodenerosion gleichzusetzen ist. Bei Maßnahmen, die im Sinne eines abflussmindernden Effektes umgesetzt werden, kann durch die Verminderung des Oberflächenabflusses häufig auch eine erosionsmindernde Wirkung erwartet werden.

Die Anwendbarkeit ist nicht für das gesamte Bundesgebiet gegeben. Es gibt Gebiete mit besonderem Abflussverhalten, z. B. Karst, die durch das Curve-Number Verfahren nicht abgebildet werden können oder dies zumindest zu prüfen ist. Den **Grenzen des Verfahrens** kommt als Randbedingung für die Schlussfolgerungen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen eine wichtige Rolle zu. Grundsätzlich handelt es sich bei den Ergebnissen des Verfahrens um empirische Schätzungen und nicht um Modellierungen auf Basis von Messungen des Direktabflusses. Dabei wird ein hydrologischer Teilprozess - die Abflussbildung - relativ einfach beschrieben. Die anschließende Abflusskonzentration sowie der Abfluss im offenen Gerinne werden in der oben beschriebenen Methodik vernachlässigt.

Die Komplexität und der hohe Aufwand einer vollständigen Niederschlags-Abflussmodellierung und damit verbundene zeitliche bzw. finanzielle Zusatzkosten sowie Unsicherheiten bei der Modellbildung werden damit methodisch umgangen. Aufgrund dessen können z. B. abflussmindernde Effekte einer Dämpfung und zeitlichen Verschiebung einer Hochwasserwelle nicht untersucht und beurteilt werden. Dies betrifft einerseits die in dieser Studie untersuchten Maßnahmen, da die Mulch- bzw. Direktsaat durch die erhöhte hydraulische Rauigkeit zusätzlich zur Drosselung der Abflussmenge auch eine Ver-

ringerung der Abflussgeschwindigkeit zur Folge hat. Die Komplexität der Problematik nimmt im Zusammenhang mit der Abflussbremsung durch Hangmulden in Hinblick auf die Erfassung der Maßnahmenwirksamkeit zu. Andererseits betrifft die Problematik die Untersuchung von Handlungsmöglichkeiten im Rahmen der Landschafts- und Flurgestaltung, z. B. Schlaggröße, Wasserführung, Nutzung vorhandener Strukturelemente oder die Anlage von Grünstreifen. Solchen Maßnahmen kommt aufgrund ihrer potentiellen abflusshemmenden Wirkung bei allen Niederschlagsintensitäten eine zentrale Rolle zu. Bei Überschreitung der Schwellenwerte bzw. bei Erschöpfung des natürlichen Abflussminderungspotentials reduzieren sich die Handlungsspielräume zur Abflussminderung auf abflusshemmende und abflusssteuernde Maßnahmen.

Die oben beschriebene Verfahrensweise bildet die Grundlage für einen einheitlichen **Methodenstandard** auf Bundesebene. Die vorliegende Studie liefert dafür fachliche Ansätze, die geprüft und weiterentwickelt werden müssen.

7.2 Anpassungen des Förderinstrumentariums und der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten

Zur Verbesserung des Förderinstrumentariums im Hinblick auf die Projektziele müssen zunächst einmal konkrete Ziele zur Verbesserung der Wasserinfiltration bzw. Minderung des Abflusses von landwirtschaftlichen Flächen definiert werden. Denn es werden bisher in den Ex-Post-Berichten nur die in den Agrarförderprogrammen formulierten Zielsetzungen mithilfe verschiedener Indikatoren auf ihre Erfüllung hin bewertet (Ex Post-Berichte nach Ende einer Förderperiode bzw. Jahresberichte). In Ergänzung zu den bisherigen Wirk- und Ergebnisindikatoren, die vor allem auf Berechnungen und Modellierungen (z. B. Simulation des Bodenabtrags mit und ohne Mulchsaat) beruhen, sollten bei den Vor-Ort-Kontrollen auch schlagspezifische Kontrollen erfolgen. Da aber der Aufwand für eine flächendeckende Kontrolle sehr hoch ist, sollten auch die Modellierungsverfahren verbessert werden. Einen Ansatz dazu, nämlich das Abflussbildungspotenzial einzelner Flächen im Einzugsgebiet abzuschätzen, bietet das in Kapitel 6 beschriebene Curve-Number-Verfahren.

Da bei Modellierungen oft pauschale Werte oder Wertebereiche angenommen werden (z. B. für den Grad der Bodenbedeckung durch Mulch bei der Mulchsaat), sollte sichergestellt sein, dass diese Parameter auch der landwirtschaftlichen Praxis entsprechen. Zurzeit ist es oft so, dass in Berechnungen, z. B. mit der ABAG zur Ermittlung des Bodenabtrags, der Bewirtschaftungsfaktor mit „best practice"-Annahmen berechnet wird; d. h. es wird davon ausgegangen, dass der Landwirt bei konservierender Bodenbearbeitung eine Bodenbedeckung von mindestens 30 % durch abgestorbene Pflanzenteile erreicht (DIN 19708, 2017). Da es in der Praxis aber bisher keine Vorgaben dazu gibt, wie hoch die Bodenbedeckung durch Mulch bei der Umsetzung der Fördermaßnahme Mulch- und Direktsaat sein muss, ist davon auszugehen, dass in den Berechnungen eine geringere Erosionsgefährdung der Böden ermittelt wird als tatsächlich vorhanden ist. Nach Auerswald et al. (2018) setzen die meisten Landwirte bei den Fördermaßnahmen nur das um, wie sie unbedingt zur Erfüllung der Förderkriterien müssen, und nicht so viel, wie sie könnten, um „best-practice" zu erreichen. Um diese Diskrepanz zu überwinden, müssen verbindliche Ziel- und Schwellenwerte in den Maßnahmenkatalogen festgehalten werden, die von den Landwirten einzuhalten sind, z. B. mindestens die Einhaltung von 30 % Bodenbedeckung bei Mulch- und Direktsaatverfahren. Eine Vor-Ort-Kontrolle dieser Vorgaben ist pro Jahr nur bei einem geringen Prozentsatz der Betriebe möglich, da ansonsten der Aufwand nicht mehr vertretbar wäre. Eine Möglichkeit bietet hier die Nutzung von Satelliten- und Fernerkundungsdaten; die Verfahren dazu müssen aber noch entwickelt werden sowie transparent und gerichtsfest sein. Die Überprüfung der Wirksamkeit einer Maßnahme wird bis dahin also weiterhin auf Berechnungen und Simulationen bzw. Modelle angewiesen sein – diese sollten dann auf einer möglichst realitätsnahen Datengrundlage basieren.

Die bisherigen Agrarfördermaßnahmen haben bereits großes Potenzial, um auch infiltrationsfördernde bzw. abflussmindernde Wirkungen zu entfalten; sie werden allerdings aufgrund fehlender Zielwerte und wegen zum Teil weicher Kriterien nicht bestmöglich umgesetzt. Daneben erscheint auch eine Anpassung der Förderziele bei einzelnen Maßnahmen sinnvoll, sodass neben dem ursprünglichen Zweck eine Komponente zur Infiltrationsverbesserung bzw. Abflussminderung hinzukommt. So könnte es eine spezielle Förderung für Linienelemente (mehrjährige Blühstreifen, Hecken, Ackerrandstreifen etc.) geben, die quer zur Hangrichtung oder in Tiefenlinien angelegt werden, sodass sie neben der Biotopfunktion auch eine abflussbremsende Wirkung entfalten. Die Möglichkeit, dass angelagertes Sediment den Blühaspekt verringert, müsste in der Maßnahmenbeschreibung berücksichtigt werden und sollte ohne Sanktionen bleiben.

Vielmehr sollte für Antragsteller die Möglichkeit gegeben sein, eine Maßnahme sanktionsfrei für ein Jahr auszusetzen, wenn sie aufgrund äußerer Umstände nicht in der Lage sind, die Auflagen zu erfüllen, z. B. Aussaat der Zwischenfrucht oder schlecht etablierte Blühstreifen bei ungünstiger Witterung. Da schlagbezogene Maßnahmen aber nur einen Teil des Abflusses abpuffern können, kommt Landschaftselementen zur Strukturierung der Feldflur eine große Bedeutung zu. Solche Elemente finden sich bereits teilweise in Natur- oder Hochwasserschutzprogrammen. Man könnte ihre Funktion dort also weiter definieren, sodass sie auch dem Zweck der Abflussminderung dienen und hätte damit eine sinnvolle Einbettung in bereits vorhandene Strukturen erreicht. Auch eine Kombination von Agrarfördermaßnahmen mit der ELER-Verordnung „Natürliches Erbe“, die u. a. Erhalt, Wiederherstellung und Verbesserung des natürlichen Erbes zum Ziel hat, wäre sinnvoll. Dabei wäre eine gezielte Fokussierung auf besonders abflussrelevante Flächen innerhalb der Einzugsgebiete, die z. B. durch das Curve-Number Verfahren (s. Kapitel 6) ermittelt werden können, sehr zielführend. Durch die Ausweisung besonders gefährdeter Gebiete und die Fokussierung der Fördermaßnahmen auf klar definierte Zielkulissen können Maßnahmen effektiver umgesetzt und Mitnahmeeffekte vermieden werden.

Bei all den positiven Aspekten der Agrarfördermaßnahmen stellt sich dennoch die Frage, ob freiwillig ergriffene Maßnahmen (die zudem auch noch zeitlich begrenzt sind) ausreichen, um die negativen Folgen von Starkregenereignissen zu verringern. Deshalb wurden neben dem Förderinstrumentarium auch die für die Projektziele relevanten rechtlichen Vorgaben untersucht und bewertet. Hierbei stand vor allem die Identifizierung von vorhandenen sowie potentiellen - also über geringe rechtliche Anpassungen erreichbaren - Ermächtigungsgrundlagen im Fokus.

Großes Potenzial zur Verbesserung der Wasserinfiltration bzw. Minderung des Abflusses von landwirtschaftlichen Flächen birgt insbesondere die Fokussierung auf bestimmte, besonders betroffene Gebiete. Sturzflutereignisse hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, die je nach Gebiet höchst unterschiedlich ausgeprägt sein können, wodurch bundeseinheitliche Vorgaben und Maßnahmen wenig wirkungsvoll sind. Ein Zugriff auf besondere Gefährdungsgebiete ist insbesondere über § 78d WHG möglich, der die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten durch die Landesregierungen mittels Rechtsverordnung ermöglicht. Innerhalb der Hochwasserentstehungsgebiete können schließlich Maßnahmen definiert werden, die der Verbesserung des Wasseraufnahme- und Versickerungsvermögens dienen. Diese können unter anderem in Aufforstung, Entsiegelung oder Bewirtschaftungsauflagen bestehen.

Aufgrund fehlender einheitlicher Kriterien zur Festlegung von Hochwasserentstehungsgebieten sowie die bisher nur freiwillige Ausweisung ist die momentane Umsetzung allerdings noch sehr lückenhaft. Konkret wurden nur in Sachsen bislang Hochwasserentstehungsgebiete ausgewiesen. Dies könnte über eine Änderung von Abs. 2 in § 78d WHG verbessert werden, indem die Kriterien zur Gebietsausweisung (Boden, Geologie, Hangneigung, Landnutzung, Gewässernetz und Höhenlage – in Abhängigkeit der Häufigkeit von Starkregenfällen) konkretisiert werden, z. B. in Anlehnung an jene in Sachsen, und die Ausweisung durch die Bundesländer verpflichtend vorgeschrieben wird.

Methodisch könnte die Festsetzung der Gebietskulisse erfolgen, indem die Gesamtheit der Einflussfaktoren (angegeben als Abflussbereitschaft) in einem Wert je Flächeneinheit (100 x 100 m) ausgedrückt wird. Bei Überschreitung eines Schwellenwertes würde die betroffene Fläche als Hochwasserentstehungsgebiet klassifiziert. Die Abgrenzung des konkreten Hochwasserschutzgebietes würde dann in Anpassung an die Flurstücke unter Beachtung fachlicher und rechtlicher Gesichtspunkte erfolgen. Abweichungen von ±10 % von der Gebietskulisse wären hierbei tolerierbar (Seidler & Kändler, 2012).

Mögliche Maßnahmen innerhalb solcher Gebiete wären hierbei z. B. die Einführung von Schlaggrößenobergrenzen, die Bodenbearbeitung in Abhängigkeit der Bodenfeuchte, der Erhalt von Strukturelementen, die Anpassung der Schlagformen in Abhängigkeit der Abflussbahnen, die Anlage mehrjähriger Kulturen besonders in Hanglagen und die Umwandlung von Ackerland in Grünland. Für ein optimales Zusammenspiel der betroffenen Akteure in den Gebieten könnten analog zu den Wasserschutzgebieten auch hier Kooperationsvereinbarungen mit den Flächenbewirtschaftern abgeschlossen werden. Für infiltrationsfördernde Maßnahmen, die über die gute fachliche Praxis hinausgehen, könnte dann ein Ausgleich gezahlt werden. Absprachen zwischen den Bewirtschaftern, z. B. ein Wechsel von Sommerung und Winterung innerhalb des Gebietes zur Streuung des Risikos wären so einfacher möglich.

Weitere rechtliche Anpassungsmöglichkeiten bieten sich im Bodenschutzrecht. Zum Beispiel könnte durch eine Ergänzung in § 17 Abs. 2 BBodSchG um einen Punkt Nr. 8, der eine Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität über gezielte Maßnahmen explizit benennt, dieser Aspekt in der Vermittlung der guten fachlichen Praxis durch die landwirtschaftliche Offizialberatung stärkere Berücksichtigung finden. Ordnungsrechtlich wäre diese Anpassung allerdings nur wirksam, wenn die Nichtberücksichtigung entsprechend sanktioniert würde. Zusätzlich könnte über eine Änderung von § 17 Abs. 4 BBodSchG die Anordnung von Maßnahmen, welche der Entstehung von Bodenerosion und Sturzfluten entgegenwirken, durch die zuständigen Behörden ermöglicht werden – unter der Voraussetzung des § 7 Satz 4. Dies könnte wiederum auf besonders betroffene Gebiete beschränkt werden, um die Akzeptanz entsprechend zu erhöhen.

Eine weitere Möglichkeit für die Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherkapazität bietet sich bei der Ausgestaltung und nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik, unter anderem durch eine Überarbeitung der GLÖZ-Mindestanforderungen. Damit könnten weitaus konkretere und weitreichendere Vorgaben für Landwirte verpflichtend umsetzbar gemacht werden. Auch die Anpassung des „Greenings“ bietet hier eine valide Handlungsoption, wobei einerseits bestehende Maßnahmen durch Bestimmungen zur Verbesserung des Schutzes gegenüber Sturzfluten ergänzt werden könnten. Andererseits könnten die „Greening“-Auflagen auch erweitert werden, wodurch eine Komponente zur Infiltrationsverbesserung bzw. Abflussminderung i. S. der Einführung multifunktionaler Maßnahmen hinzukommt. Auch eine Erhöhung des Anteils ökologischer Vorrangflächen, die gezielt in bestimmten Gebietskulissen förderfähig sind, wäre denkbar. Generell gibt es bezüglich einer Ökologisierung der GAP dringenden Handlungsbedarf, da sich aus der finanziellen Unterstützung auch eine weitereichende Verantwortung ergibt, der durch die derzeitigen geringen Auflagen nicht angemessen begegnet wird. Verbesserungen könnten im Zuge der kommenden GAP-Reform auf den Weg gebracht und umgesetzt werden.

Flurbereinigungsverfahren bergen eine Option zur Abflussminderung, insbesondere über die Einbringung von Landschaftselementen und die Umgestaltung der Feldflur. Dies wäre ohne Gesetzesanpassungen möglich, da laut § 4 FlurbG eine Flurbereinigung neben dem Zweck der Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft auch zur Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen angeordnet werden kann. Allerdings dauern solche Verfahren in der Regel lange und sind zudem mit hohen Kosten verbunden.

Letztlich konnten relevante Ermächtigungsgrundlagen identifiziert werden (s. Kapitel 3), die teilweise bereits in ihrer jetzigen Form zu einer Erhöhung der Infiltrationsleistung sowie der Abflussminderung

beitragen könnten, allerdings effektiver umgesetzt bzw. vollends ausgeschöpft werden müssten. Zudem sind über geringfügige rechtliche Anpassungen im Bodenschutzrecht (z. B. § 17 BBodSchG) sowie im Wasserrecht (z. B. § 78d WHG), wie oben beschrieben, weitere Verbesserungen der genannten Aspekte prinzipiell möglich.

7.3 Ausblick und Forschungsbedarf

Es wurden umfassende Handlungsempfehlungen für die Methodik zur Gefährdungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen gegenüber Starkregenereignissen und für die Anpassungen des Förderinstrumentariums sowie der rechtlichen Steuerungsmöglichkeiten formuliert, die aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie hervorgegangen sind. Dabei wurden Defizite festgestellt, die einer möglichen Umsetzung der Handlungsempfehlungen entgegenstehen. Aus diesen Defiziten können Empfehlungen abgeleitet und Hinweise zum Forschungsbedarf werden.

Im Ergebnis der Literaturrecherche bestehen Kenntnisdefizite hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Sturzfluten und bestimmten Substrateigenschaften. So ist der Einfluss des Humusgehaltes, insbesondere im Kontext der Hydrophobie, auf die Entstehung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten auf Einzugsgebietsebene nicht abschließend geklärt. Zu den Wechselwirkungen gibt es insgesamt wenige Untersuchungen bzw. Veröffentlichungen.

Auch bestehen Unsicherheiten, wie sich Makroporosität in Bodenprofilen großflächig auf Einzugsgebietsebene auswirkt. Zudem zeigen sich standortabhängig bei den Bodenbearbeitungssystemen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des Wasserinfiltrationsvermögens und -verhaltens. Hier sind weitere Forschungsarbeiten inklusive deren Validierung auf Feld- und Einzugsgebietsebene erforderlich, um die Maßnahmenbewertungen zu verbessern und abzusichern.

Die Auswertung des bestehenden Förderinstrumentariums ergab, dass die Einführung von Mindestbedeckungsgraden, vor allem bei der Förderung von Mulch- und Direktsaat, sinnvoll ist. Als effiziente Kontrollinstrumente kommen vor allem Fernerkundungsmethoden in Frage. Allerdings existieren derzeit keine etablierten Verfahren dazu. Satellitentechnologien scheiden aus, da totes Pflanzenmaterial nicht mittels des NDVI-Indexes (normalized density vegetation index) erfasst wird. Andere Technologien können jedoch möglicherweise Abhilfe schaffen. Zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades müsste mittels der derzeit zur Verfügung stehenden Radardaten ein Verfahren entwickelt werden, um die Umsetzung von Maßnahmen zur Mulchbedeckung effektiv und effizient zu kontrollieren. Eine derartige Technologie hätte den zusätzlichen Vorteil, dass grundsätzlich bundesweit erfasst werden könnte, wie verbreitet Mulchsaat- bzw. Direktsaatverfahren sind und welche Bodenbedeckungsgrade tatsächlich eingehalten werden.

Notwendig erscheint die eindeutige Definition von Förderkulissen zur gezielten Lenkung von Fördergeldern in Starkregengefährdungsgebieten. Auch hinsichtlich der praktischen Umsetzung der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen gibt es Regelungsbedarf: das betrifft die Abgrenzung einer spezifischen Gebietskulisse zu den Gefährdungsgebieten, die Identifikation besonders empfindlicher Schläge, die stark zur Abflussbildung beitragen und die Kombination von gezielten Maßnahmen auf Feldebene mit Maßnahmen auf Einzugsgebietsebene zur Abflusshemmung und -verzögerung. Auch projektbezogene Kontrollen der Maßnahmenwirkung anhand von Modellrechnungen bzw. Satelliten- oder Radardaten sollten in exemplarischen und repräsentativen Pilotprojekten validiert werden.

Das Curve-Number Verfahren eignet sich prinzipiell als Werkzeug zur allgemeinen Untersuchung der Sturzflutgefährdung landwirtschaftlicher Einzelflächen (Schläge). Aus modelltechnischer Sicht gibt es jedoch noch methodischen Anpassungsbedarf. Die verwendeten Modelldaten bzw. -annahmen sind z. T. nicht repräsentativ für mitteleuropäische klimatische Bedingungen. Zudem wurden sie unter z. T. veralteten bzw. nicht typisch deutschen Bewirtschaftungsverfahren erarbeitet. Angesichts der unter

den Vorzeichen des Klimawandels zunehmenden Bedeutung von Starkregen- und daraus resultierenden Sturzflutereignissen ist eine Aktualisierung der Daten und Kenngrößen unter mitteleuropäischen Verhältnissen und aktuellen Bodenbearbeitungsverfahren für den zukünftigen Einsatz unbedingt erforderlich.

Zudem wurde herausgearbeitet, dass die Fruchtfolge bzw. die Anbaukultur zum Zeitpunkt des Extremereignisses für aussagefähige Untersuchungen möglichst detailliert bekannt sein muss. Gegenwärtig bieten hierzu personenbezogene InVeKoS-Daten eine verlässliche Datengrundlage. Aus datenschutzrechtlichen Gründen bestehen jedoch in der realen Verwaltungspraxis in einzelnen deutschen Bundesländern dazu jedoch oft unverhältnismäßige Hemmnisse hinsichtlich der freien und unentgeltlichen Datenzugänglichkeit, die abgebaut werden sollten.

Alternativ kommen grundsätzlich auch Fernerkundungsmethoden in Frage. Mittels Satellitendaten können anhand der NDVI-Indices Fruchtfolgen bestimmt werden, um eine Unabhängigkeit von personenbezogenen InVeKoS-Daten zu erreichen. Derartige methodische Ansätze gibt es aktuell in Deutschland bereits, jedoch werden sie nicht flächendeckend eingesetzt. Forschungsbedarf besteht hier in der Untersuchung signifikanter Unterschiede zwischen den InVeKoS-Daten und der aus Satellitendaten abgeleiteten Kulturarten und Fruchtfolgen.

Im Rahmen der regionalen Analysen wurde deutlich, dass Wirkungen von abflussmindernden Maßnahmen beim Eintritt bzw. der Überschreitung gewisser Niederschlagsintensitäten einen Grenzwert erreichen oder dann praktisch unwirksam werden. Bei solchen Bedingungen sind nur noch Maßnahmen mit abflussbremsender Wirkung von Bedeutung. Die Wirkung ist jedoch ereignis-, standort- und geometriespezifisch. Dazu sollte die abflussmindernde Wirkung von Streifen- und Strukturelementen modellhaft mittels Abflusskonzentration bzw. vollständigem Niederschlagsabflussmodell in naturräumlich und landwirtschaftlich repräsentativen Beispielgebieten untersucht werden.

8 Quellenverzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

Abu-Hashim, M.S.D. (2011): Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig.

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Hannover.

Ahmed, M.A.; Kroener, E.; Benard, P.; Zarebanadkouki, M.; Kaestner, A. & Carminati, A. (2015): Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere of maize: measurements and modelling. Plant Soil 407: 161–171.

Alhassoun, R. (2009): Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig.

Alliance Environment (2018): Evaluation study of the impact of the CAP on climate change and greenhouse gas emissions. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/evaluation/market-and-income-reports/2019/cap-and-climate-evaluation-executive-summary_en.pdf. Aufgerufen am: 22.07.2019.

Appel, T. (2012): Boden-Bearbeitungssysteme im Fokus von Ökonomie und Ökologie – Handreichung für eine differenzierte Beurteilung. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.).

Armenise, E.; Simmons, R.W.; Ahn, S.; Garbout, A.; Doerr, S.H.; Mooney, S.J.; Sturrock, C.J. & Ritz, K. (2018): Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. Journal of Hydrology 556: 211–219.

Auerswald, K. (2002): Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen. Landnutzung und Landentwicklung 43: 1–5.

Auerswald, K. (2018): persönliche schriftliche Mitteilung am 27.04.2018 und 02.05.2018.

Auerswald, K.; Moyle, P.; Seibert, S.P.; Geist, J. (2019): HESS Opinions: Socio-economic and ecological trade-offs of flood management – benefits of a transdisciplinary approach. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23 (2): 1035–1044.

Auerswald, K.; Fischer, F.K.; Kistler, M.; Treisch, M.; Maier, H. & Brandhuber, R. (2018): Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. Science of the Total Environment 613-614: 1–9.

Auerswald, K.; Kainz, M. & Fiener, P. (2003): Soil erosion potential of organic versus conventional farming evaluated by USLE modelling of cropping statistics for agricultural districts in Bavaria. Soil Use & Management 19: 305–311.

Auerswald, K.; Mutchler, C.K. & McGregor, K.C. (1994): The influence of tillage-induced differences in surface moisture content on soil erosion. Soil and Tillage Research 32: 41–50.

Auerswald, K. & Schröder, R. (2001): Simulation von verschlämmungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. Wasser & Boden 53/10: 17–20.

Bach, M.; Guerniche, D.; Thomas, K.; Trapp, M.; Kubiak, R.; Hommen, U.; Klein, M.; Reichenberger, S.; Pires, J. & Preu; T. (2017): Bewertung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer – Runoff, Erosion und Drainage, GERDA – GEobased Runoff, erosion and Drainage risk Assessment for Germany. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). Dessau-Roßlau.

Bartels, H.; Weigl, E.; Reich, T.; Lang, P.; Wagner, A.; Kohler, O. & Gerlach, N. (2004): Zusammenfassender Abschlussbericht: Projekt RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie.

Becker, P.; Becker, A.; Dalelane, C.; Deutschländer, T.; Junghänel, T. & Walter, A.; (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland - Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Berichte zu Extremereignissen. Deutscher Wetterdienst. Offenbach.

Beisecker, R. (1994): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. Dissertation Universität Gießen. Bodenökologie und Bodengenese, Heft 12.

Billen, N.; Kempf, J.; Assmann, A.; Puhlmann, H. & von Wilpert, K. (2017): Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen (KliStaR). KLIMOPASS-Berichte. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). Karlsruhe.

Billen, N.; Puhlmann, H. & Assmann, A. (2018): Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Kommunen - Steckbriefe für die Praxis. WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (Hrsg.). Karlsruhe.

Birkenstock, M.; Röder, N. (2018): Gestaltung und Umsetzung der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik ab 2021 – Übersicht über die politischen Debatten. Umweltbundesamt. ISSN 1862-4359. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-13_texte_108-2018_eu-agrarpolitik-2021.pdf. Aufgerufen am 22.07.2019.

BLE Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung & DVS Deutsche Vernetzungsstelle Ländliche Räume (Hrsg., 2010): ELER in Deutschland - Übersicht über die in den Programmen der Länder angebotenen Maßnahmen: Länderübersicht und Maßnahmensteckbriefe Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen (Code 214), Zahlungen für Tierschutzmaßnahmen (Code 215). Bonn.

BLE Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung & DVS Deutsche Vernetzungsstelle Ländliche Räume (Hrsg., 2017): ELER in Deutschland – Übersicht über die Nationale Rahmenregelung und die Programme der Länder: Maßnahmensteckbriefe 2014–2020 Agrarumweltmaßnahmen, Tierschutzmaßnahmen, Ökolandbauförderung. Bonn.

BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2017): Cross-Compliance. Verfügbar unter: https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Foerderung-Agrarsozialpolitik/_Texte/Cross-Compliance.html. Aufgerufen am 07.09.2018.

Bonta, J. V. & Shipitalo, M. J. (2013): Curve-Numbers for long-term no-till corn and agricultural practices with high watershed infiltration. In: Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 68, No. 6, 487-500.

Borga, M.; Stoffel, M.; Marchi, L.; Marra, F. & Jakob, M. (2014): Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. Journal of Hydrology 518: 194–205.

Born, J. (2019): Telefonisches Gespräch mit Dr. Jürgen Born (Geschäftsführer Spatial Business Integration GmbH, Darmstadt) am 14.03.2019. Kassel und Darmstadt.

Brandhuber, R.; Treisch, M.; Fischer, F.; Kistler, M.; Maier, H. & Auerswald, K. (2017): Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten – Beobachtungen und Analysen im Mai/Juni 2016. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan.

Bronstert, A. (2005): Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 13.05. Hennef.

Bronstert, A.; Fritsch, U. & Katzenmaier, D. (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwassereinfluss in Flussgebieten. Postdam-Institut für Klimafolgenforschung (Hg.). Potsdam.

Bronstert, A.; Agarwal, A.; Boessenkool, B.; Fischer, M.; Heistermann, M.; Köhn-Reich, L.; Moran, T. & Wendi, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“ – Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61: 150–162.

Buck, O. (2019): Telefonisches Gespräch mit Oliver Buck (Mitarbeiter EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster) am 14.03.2019. Kassel und Münster.

Buczko, U.; Bens, O.; Hangen, E.; Brunotte, J. & Hüttl, R.F. (2003): Infiltration and macroporosity of a silt loam soil under two contrasting tillage systems. Landbauforschung Völkenrode 53: 181–190.

BUND (2019): Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP): Lasche Mindeststandards und Förderung nach Flächenstärke. Verfügbar unter: https://www.bund.net/landwirtschaft/eu-agrarpolitik/. Aufgerufen am 07.09.2018.

Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg., 2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Erfurt.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2014): Erosivität der Niederschläge in Deutschland. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Bilder/Bodenerosion/Bod_BoEro_KarteErosivitaet_g.html. Aufgerufen am 19.02.2019.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2004): Ableitung des Oberflächenabflusses für die Erstellung der Sickerwasserratenkarte im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD). Hannover.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2016): Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung). Stand: 01.04.2016.

Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2017): EU Agrarpolitik: Cross Compliance. Verfügbar unter: https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Foerderung-Agrarsozialpolitik/_Texte/Cross-Compliance.html. Aufgerufen am 07.09.2018.

Crittenden, S.J.; Poot, N.; Heinen, M.; van Balen, D.J.M. & Pulleman, M.M. (2015): Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. Soil and Tillage Research 154: 136–144.

DeBano, L. (1981): Water repellent soils: a state-of-the-art. General Technical Report PSW-46. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station (Hrsg.). Berkeley (US).

Deumelandt, P.; Kasimir, M.; Steininger, M. & Wurbs, D. (2014): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten – Lokale Kooperation zwischen Landwirten und Gemeinden sowie weiteren Akteuren zur Vermeidung von Bodenerosion. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.). Halle (Saale).

Deutscher Naturschutzbund (DNR), Positionspapier: GAP-Reform nach 2020. Verfügbar unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/landwirtschaft/landwirtschaft_positionen_eu_budget.pdf. Aufgerufen am 22.07.2019.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg., 2018): Merkblatt DWA-M 922 – Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung (Entwurf). Juni 2018. Hennef.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DVWK) (Hrsg., 2003): Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen. ATV-DVWK-Arbeitsgruppe HW-3.2 „Hochwasser“. Hennef.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2017): DWD Climate Data Center (CDC), Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe (GIS-lesbar). Version V001. Stand: 29.05.2017.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): DWD Climate Data Center (CDC), Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen für das Gebiet Deutschland. Version 2010R. Stand: 08.03.2018.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019): Warnkriterien. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html. Aufgerufen am 26.02.2019.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2019): Sentinel-1 – Radar vision für Copernicus. Verfügbar unter: https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Sentinel-1_sheet_170321.pdf. Aufgerufen am 16.07.2019.

Diamantopoulos, E.; Durner, W.; Reszkowska, A.; Bachmann, Jörg (2013): Effect of soil water repel-lency on soil hydraulic properties estimated under dynamic conditions. In: Journal of Hydrology 486, S. 175–186.

DIN 19708: 2017-08 (2017): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Beuth-Verlag.

Doerr, S.H.; Ferreira, A.J.D.; Walsh, R.P.D.; Shakesby, R.A.; Leighton-Boyce, G. & Coelho, C.O.A. (2003): Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. Hydrological Processes 17: 363–377.

Doerr, S.H.; Shakesby, R.A. & Walsh, R.P.D. (2000): Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth-Science Reviews 51: 33-65.

Ebert, V.; Kliebisch, C.; Strecker, O.; Haarhoff, C.; Stegmann, S.; Welz, D.; Horlitz, T.; Bathke, M.; Benner, T.; Setzer, F. & Spinner, K. (2016): Ex-post-Bewertung des Entwicklungsprogramms für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007–2013 – Ex-post-Bewertungsbericht.

Eisenkrämer, N. (2014): Strategien zur Erosionsminderung beim Anbau von Silomais im ökologischen Landbau. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

European Environment Agency (EEA) (2017): Reference Data: EU-DEM v1.1, Copernicus Land Monitoring Service, Stand: Mai 2017.

European Environment Agency (EEA) (2018): High Resolution Layer Imperviousness, Copernicus Land Monitoring Service, Stand: 06.04.2018.

Fiener, P. & Auerswald, K. (2003): Effectiveness of Grassed Waterways in Reducing Runoff and Sediment Delivery from Agricultural Watersheds. Journal of Environment Quality 32: 927–936.

Fiener, P.; Auerswald, K. & Van Oost, K. (2011): Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments—A review. Earth-Science Reviews 106: 92–104.

Fiener, P.; Auerswald, K.; Winter, F. & Disse, M. (2013a): Statistical analysis and modelling of surface runoff from arable fields in central Europe. Hydrology and Earth System Sciences 17: 4121–4132.

Fiener, P.; Neuhaus, P. & Botschek, J. (2013b): Long-term trends in rainfall erosivity – analysis of high resolution precipitation time series (1937–2007) from Western Germany. Agricultural and Forest Meteorology 171-172: 115–123.

Flaig, H. & Schickler, J. (2012): Bodenwasserhaushalt und Bodenbearbeitung – Bodenwasserhaushalt bei konservierender Bodenbearbeitung. Forschungsbericht KLIMOPASS. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.).

Frede, H.G.; Beisecker, R. & Gäth, S. (1994): Long-term impacts of tillage on the soil ecosystem. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 157: 197–203.

Friedrich, G. & Franken, H. (2003): Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz – Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn. Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 108. Bonn.

Ganz, Christina; Bachmann, Jörg; Lamparter, Axel; Woche, Susanne K.; Duijnisveld, Wilhelmus H.M.; Göbel, Marc-O. (2013): Specific processes during in situ infiltration into a sandy soil with low-level water repellency. In: Journal of Hydrology 484, S. 45–54.

Germann, P.F. (1981): Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 51: 1–135.

Geologischer Dienst NRW (GD NRW) (2017): IS BK 50 Bodenkarte von NRW 1:50.000 – Datensatz, Stand: 11.08.2017.

Göbel, M.-O.; Bachmann, J.; Reichstein, M. & Janssens, I.A. (2011): Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? Global Change Biology 17: 2640–2656.

Green, T.R.; Ahuja, L.R. & Benjamin, J.G. (2003): Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. Geoderma 116: 3–27.

Haas, G. (2010): Wasserschutz im Ökologischen Landbau: Leitfaden für Land- und Wasserwirtschaft. Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft & Verbraucherschutz im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau, FKZ 06OE175.

Halbfass, S. (2005): Entwicklung eines GIS-gestützten Modells zur Quantifizierung diffuser Phosphoreinträge in Oberflächengewässer im mittleren Maßstab unter Berücksichtigung geoökologisch wirksamer Raumstrukturen. Dissertation. Beiträge zur Landschaftsforschung, Bd. 1. Rhombos-Verlag. Berlin.

Hartmann, K.; Lilienthal, H.; Abu-Hashim, M.S.D.; Al-Hassoun, R.; Eis, Y.; Stöven, K. & Schnug, E. (2009): Vergleichende Untersuchungen der Infiltrationseigenschaften von konventionell und ökologisch bewirtschafteten Böden – Eine Fallstudie aus dem Main-Tauber-Kreis, Baden-Württemberg. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (Hrsg.).

Hathaway-Jenkins, L. J.; Sakrabani, R.; Pearce, B.; Whitmore, A. P. & Godwin, R. J. (2011): A comparison of soil and water properties in organic and conventional farming systems in England. Soil Use and Management 27: 133–142.

Helming, K. (1992): Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion. Dissertation TU Berlin. Bodenökologie und Bodengenese, Heft 7.

Hiller, D.A.; Jacobs, G. & Elhaus, D. (2007): Bodenerosion durch Wasser – Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Münster.

Jankiewicz, P.; Neumann, J.; Duijnisveld, Wilhelmus H.M.; Wessolek, G.; Wycisk, P. & Hennings, V. (2005): Abflusshöhe – Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung – Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49: 2–13.

Junghänel, Th.; Ertel, H.; Deutschländer, Th. (2017): KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, zuletzt geprüft am 29.05.2018.

Karl, J.; Porzelt, M.; Bunza, G. (1985): Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. In: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hg.): Beiträge zu Oberflächenabfluß und Stoffabtrag bei künslichen Starkniederschlägen. Bd. 71, S. 37–102. Verlag Paul Parey (DVWK Schriften, 71). Hamburg, Berlin.

Kistler, M.; Brandhuber, R. & Maier, H. (2013): Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen – Ergebnisse eine Feldstudie. Bericht zum Forschungsvorhaben „Evaluierung der Cross Compliance-Bestimmungen zum Erosionsschutz in Bayern". Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 8. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL (Hrsg.)

Kleeberg, H.-B. & Overland, H. (1989): Zur Berechnung des effektiven oder abflusswirksamen Niederschlags. Institut für Wasserwesen. Mitteilung Heft 32/1990. Universität der Bundeswehr München.

Kloos, R. (2015): Brief an den Generalsekretär des Deutschen Bauernverbandes von Dr. Robert Kloos (Staatssekretär im Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin). Verfügbar unter: https://media.repro-mayr.de/61/633261.pdf. Aufgerufen am 22.03.2019.

Kornmann, M.; Schmidt; W. & Müller, E. (2006): Hochwasserschutz durch konservierende Bodenbearbeitung – Umsetzung erosionsmindernder und hochwasserreduzierender Maßnahmen auf Einzugsgebietsebene am Beispiel des Stausees Baderitz. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 16.

LABO Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2017): Vorsorge gegen Bodenerosion durch Wasser vor dem Hintergrund des Klimawandels – Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. Kiel.

Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern (LfL BY) (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für die Einzugsgebiete Simbach, Wolfsbach, Aichbach.

Landesamt für Umwelt Bayern (LfU BY) (2017): Digitale Übersichts-Bodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25.000. Stand: Februar 2017.

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP) (2016): Starkregen und Hochwasser in Rheinland-Pfalz im Mai/Juni 2016. Mainz.

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RP) (2018): BFD 50 – Bodenflächendaten 1:50.000 Rheinland-Pfalz (vorläufig), Stand: September 2018.

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB BW) (2015): BK 50 Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:50.000. Stand: April 2015.

Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung (2018): Flurbereinigung im Saarland. Verfügbar unter: https://www.saarland.de/landentwicklung.htm. Aufgerufen am 26.02.2019.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg., 2016): Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe.

Landwirtschaftskammer NRW (LWK NW) (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für die Gebiete Swistbach und Arzdorfer Bach.

Landwirtschafskammer NRW (2018). Maßnahmenblatt: Ökologische Vorrangflächen im Greening – Flächenmaßnahmen. Verfügbar unter: https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/naturschutz/biodiversitaet/oevfflaechen/index.htm. Aufgerufen am 13.03.2019.

Lilienthal, H. & Schnug, E. (2008): Hochwasserschutz durch ökologische Bodenbewirtschaftung. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (Hrsg.). KTBL-Schrift 472.

Lüs, U. (2018): Vortrag bei der Jahrestagung 2018 „Bodenschutzvollzug oder Bodenentzug" des Bundesverbandes Boden. Verfügbar unter https://www.bvboden.de/images/texte/tagungsberichte/jata_2018/Vortrag_Freiberg-Doktor_Lüs_-_ALFF_Süd.pdf. Aufgerufen am 20.03.2019.

Maniak, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag. Berlin.

Martínez, I.; Chervet, A.; Weisskopf, P.; Sturny, W. G.; Rek, J. & Keller, T. (2016): Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. Soil and Tillage Research 163: 130–140.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2006): Erlass Bodenerosion.

Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz (MWVLW) (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für ein Gebiet in der Gemeinde Grafschaft.

Mollenhauer, K.; Müller, S.; Wohlrab, B. (1985): Oberflächenabfluss und Stoffabtrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen – Untersuchungsergebnisse aus dem Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre. In: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (Hrsg.): Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen, S. 103–184. Verlag Paul Parey (DVWK Schriften, 71). Hamburg, Berlin.

Möller, M. & Volk, M. (2010): Maßstabsspezifische Analyse der Bodenerosion durch Wasser. In Helbig, H. et al. (Hrsg.) Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt – Ausmaß, Wirkungen und Vermeidungsstrategien.

Mosimann, T.; Sanders, S. & Brunotte, J. (2007): Erosionsschutz in Fahrgassen. Pflanzenbauwissenschaften 11: 57–66.

Müller, E.N. & Pfister, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. Journal of Hydrology 411: 266–278.

Nawaz, M.F.; Bourrié, G. & Trolard, F. (2013): Soil compaction impact and modelling. A review. Agronomy for Sustainable Development 33: 291–309.

Nciizah, A.D. & Wakindiki, I.I.C. (2015): Soil sealing and crusting effects on infiltration rate: a critical review of shortfalls in prediction models and solutions. Archives of Agronomy and Soil Science 61: 1211–1230.

Niehoff, D. (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation. Universität Potsdam.

Nitzsche, O.; Krück, S. & Zimmermann, M. (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Teilthema I: Begleitende Untersuchungen zur praktischen Anwendung und Verbreitung von konservierender Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau sowie Mulchsaat in den Ackerbaugebieten Sachsens zur Minderung von Wassererosion und Nährstoffaustrag im Elbeeinzugsgebiet. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Fachbereich Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.).

Partschefeld, I. (2019): Regelflurbereinigung. Verfügbar unter: http://www.flurbereinigung.org/index.php/verfahren/regelflurbereinigung. Aufgerufen am 06.02.2019.

ProAqua Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Umwelttechnik mbH (2016): Untersuchung von Starkregenereignissen in Bad Bellingen, Aachen (unveröffentlicht).

Rippel, R. (2007): Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. 6. Kulturlandschaftstag. LfL.

Roth, Chr. (1992): Die Bedeutung der Oberflächenverschlämmung für die Auslösung von Abfluss und Abtrag. Habilitationsschrift TU Berlin. Bodenökologie und Bodengenese, Heft 6.

Scherrer, S. (1997): VAW Mitteilung 147: Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. VAW ETH Zürich (Hrsg.).

Scwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart; 2. Auflage.

Seidel, N. (2008): Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell. Dissertation. Universität Freiberg.

Seidel, N.; Peschke, S. & Schütze, S. (2015): Erosionsschutz und Wasserrückhalt mit Hilfe von bewirtschaftungsintegrierten Verwallungen. Wasserwirtschaft 4: 42–47.

Seidler, C. & Kändler, M. (2012): Prüfung der Übertragbarkeit des WBS FLAB zur Nutzung in der Tschechischen Republik und vergleichende Bewertung bei der Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten in Sachsen und der Tschechischen Republik. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Siegert, K. (1978): Oberflächenabfluß von landwirtschaftlichen Nutzflächen infolge von Starkregen. Braunschweig: Eigenverlag (Mitteilungen aus dem Lichtweiß-Institut für Wasserbau der technischen Universität Braunschweig, 58).

Sieker, F. (2002): Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. DBU-Projekt AZ 15877.

Sieker, F.; Zacharias, S.; Wilcke, D.; Schmidt, W.-A.; Sieker, H. & Merta, M. (2008): Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche – Untersucht am Beispiel des Einzugsgebietes der Mulde in Sachsen. Wasser Abwasser 149 (5): 2–13.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018): Landwirtschaftlich genutzte Fläche 2016 und Ackerland nach Fruchtarten 2016 für die Gemeinden Bad Bellingen, Kandern Stadt und Efringen-Kirchen. Verfügbar unter https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/. Aufgerufen am 13.12.2018.

Tebrügge, F. & Düring, R.-A. (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. Soil and Tillage Research 53: 15-28.

Tenholtern, R. & Feldwisch, N. (2019): Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr bei Bodenerosion durch Wasser. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/228696898_Handlungsempfehlungen_zur_Gefahrenabwehr_bei_Bodenerosion_durch_Wasser. Aufgerufen am 16.04.2019.

United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (USDA NRCS) (2004a): National Engineering Handbook – Part 630 Hydrology, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.

United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (USDA NRCS) (2004b): National Engineering Handbook – Part 630 Hydrology, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes.

United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA NRCS) (2009): National Engineering Handbook – Part 630 Hydrology, Chapter 7: Hydrologic Soil Groups.

Thomas, F.; Denzel, K.; Hartmann, E.; Luick, R. & Schmoock, K. (2009): Kurzfassungen der Agrarumwelt- und Naturschutzprogramme – Darstellung und Analyse der Entwicklung von Maßnahmen der Agrarumwelt- und Naturschutzprogramme in der Bundesrepublik Deutschland. F+E-Vorhaben des Bundesamtes für Naturschutz UFOPLAN 2007 – FKZ 807 88 030. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Skripten 253, Bonn-Bad Godesberg.

Vogel, K.; Ozturk, U.; Riemer, A.; Laudan, J.; Sieg, T.; Wendi, D.; Agarwal, A.; Rözer, V.; Korup, O. & Thieken, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“ – Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61: 163–175.

Voges, J. (1999): Empirisches Modell für die mittlere Maßstabsebene zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer. Dissertation. Universität Hannover.

Weiß, A. (2009): Beitrag unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft zur Reduzierung des Hochwasserabflusses. Dissertation. Universität Kassel.

Weyer, T. & Boeddinghaus, R. (2016): Bodenverdichtungen vermeiden - Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und Fachhochschule Südwestfalen (Hrsg.). Düsseldorf.

Winter, F. (2013): Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration auf verschlämmungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.

Wurbs, D. & Steininger, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden – Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Umweltbundesamt (UBA) (HrsG). Dessau-Roßlau.

Zeiger, M. & Fohrer, N. (2009): Impact of organic farming systems on runoff formation processes – A long-term sequential rainfall experiment. Soil & Tillage Research 102: 45–54.

8.2 Gesetzesverzeichnis

Gesetz	Ebene	Stand
Abfallrahmenrichtlinie	EU	Abfallrahmenrichtlinie vom 19. November 2008 ABl. L 312 vom 22.11.2008, S. 3
Wasserrahmenrichtlinie	EU	Wasserrahmenrichtlinie vom 23. Oktober 2000 ABl. L 327 vom 22.12.2000, S. 1–73
Hochwasserrichtlinie	EU	Hochwasserrichtlinie vom 23. Oktober 2007 ABl. L 288 vom 6.11.2007, S. 27-34
Grundwasserrichtlinie	EU	Grundwasserrichtlinie vom 12. Dezember 2006 ABl. L 372 vom 27.12.2006, S. 19-31, Nachfolgende Änderungen der Richtlinie 2006/118/EG wurden in den Originaltext eingefügt.
Nitratrichtlinie	EU	Nitratrichtlinie vom 12. Dezember 1991 ABl. EG Nr. L 375, 31.12.1991
Klärschlammverordnung	EU	Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
Direktzahlungen-Durchführungsgesetz (DirektZahlDurchfG)	Bund	Direktzahlungen-Durchführungsgesetz vom 9. Juli 2014 (BGBl. I S. 897), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2370) geändert worden ist
Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV)	Bund	Direktzahlungen-Durchführungsverordnung vom 3. November 2014 (BGBl. I S. 1690), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Februar 2019 (BGBl. I S. 170) geändert worden ist
Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz (AgrarZahlVerpflG)	Bund	Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 02. Dezember 2014 (BGBl. I S. 1928)
Agrarzahlungen-Verpflichtungenverornung (AgrarZahlVerpflV)	Bund	Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Dezember 2014, Anz AT 23.12.2014 V1), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2018 (BAnz AT 28.09.2018 V1) geändert worden ist
Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)	Bund	Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV)	Bund	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	Bund	Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. September 2017 (BGBl. I S. 3434) geändert worden ist

Düngegesetz (DüG)	Bund	Düngegesetz[21] vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1068) geändert worden ist
Düngeverordnung (DüV)	Bund	Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)
GAK-Gesetz	Bund	GAK-Gesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juli 1988 (BGBl. I S. 1055), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 11. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2231) geändert worden ist
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	Bund	Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
Raumordnungsgesetz (ROG)	Bund	Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 15 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Bund	Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist
Richtlinien für Zuwendungen zu wasserwirtschaftlichen Vorhaben (RZWas 2018)	Bund	Richtlinien für Zuwendungen zu wasserwirtschaftlichen Vorhaben. Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz vom 8. Oktober 2018. (AllMBl/ 31 [Nr. 14], S. 929)
Förderrichtlinie Gewässer/Hochwasserschutz (RL GH 2018)	Bund	Richtlinie des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft zur Förderung von Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässerzustandes und des präventiven Hochwasserschutzes vom 18. Juni 2018 (SächsABl. 2018 Nr. 27, S. 832)
Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz (BbgAbfBodG)	BB	Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz vom 6. Juni 1997 (GVBl.I/97, [Nr. 05], S.40) zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 7 des Gesetzes vom 25. Januar 2016 (GVBl.I/16, [Nr. 5])
Richtlinie Gewässerentwicklung/ Landschaftswasserhaushalt (RL GewEntw/ LWH)	BB	Richtlinie des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL) des Landes Brandenburg über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der naturnahen Entwicklung von Gewässern und zur Förderung von Maßnahmen zur Stärkung der Regulationsfähigkeit des Landschaftswasserhaushaltes vom 19. Februar 2019 (ABl./19, [Nr. 9], S.275)

[21] Die Verpflichtungen aus der Richtlinie 98/34/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juni 1998 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der Normen und technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 204 vom 21.7.1998, S. 37), die zuletzt durch die Richtlinie 2006/96/EG vom 20. November 2006 (ABl. L 363 vom 20.12.2006, S. 81) geändert worden ist, sind beachtet worden.

Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz (LBodSchAG)	BW	Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz[22] Vom 14. Dezember 2004 letzte berücksichtigte Änderung: § 6 geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 17. Dezember 2009 (GBl. S. 809, 815)
Erosionsschutzverordnung (ErosionsSchV)	BW	Erosionsschutzverordnung Vom 29. Mai 2010 letzte berücksichtigte Änderung: Überschrift geändert durch Artikel 169 der Verordnung vom 23. Februar 2017 (GBl. S. 99, 118)
Landwirtschafts- und Landeskulturgesetz (LLG)	BW	Landwirtschafts- und Landeskulturgesetz vom 14. März 1972 letzte berücksichtigte Änderung: § 7 geändert durch Artikel 50 der Verordnung vom 23. Februar 2017 (GBl. S. 99, 105)
Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG)	BW	Wassergesetz für Baden-Württemberg[23] vom 3. Dezember 2013, letzte berücksichtigte Änderung: §§ 39 und 126 geändert durch Artikel 65 der Verordnung vom 23. Februar 2017 (GBl. S. 99, 106)
Bayerisches Bodenschutzgesetz(BayBodSchG)	BY	Bayerisches Bodenschutzgesetz (BayBodSchG) vom 23. Februar 1999 (GVBl. S. 36, BayRS 2129-4-1-U), das zuletzt durch § 2 Nr. 17 des Gesetzes vom 12. Mai 2015 (GVBl. S. 82) geändert worden ist
Erosionsschutzverordnung (ESchV)	BY	Erosionsschutzverordnung (ESchV) vom 26. November 2015 (GVBl. S. 442, BayRS 7841-3-L)
Bayerisches Wassergesetz (BayWG)	BY	Bayerisches Wassergesetz (BayWG) vom 25. Februar 2010 (GVBl. S. 66, 130, BayRS 753-1-U), das zuletzt durch § 1 des Gesetzes vom 21. Februar 2018 (GVBl. S. 48) geändert worden ist
Hessisches Altlasten- und Bodenschutzgesetz (HAltBodSchG)	HE	Hessisches Altlasten- und Bodenschutzgesetz vom 28. September 2007 (GVBl. I S. 652), geändert durch Gesetz vom 27. September 2012 (GVBl. I S. 290)
Verordnung zur Einteilung landwirtschaftlicher Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung	HE	Verordnung zur Einteilung landwirtschaftlicher Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung vom 27. August 2010 (GVBl. I S. 300) Geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2015 (GVBl. S. 339)
Hessisches Wassergesetz (HWG)	HE	Hessisches Wassergesetz vom 14. Dezember 2010 (GVBl. I S. 548) zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. August 2018 (GVBl. S. 366)
Landesbodenschutzgesetz (LBodSchG M-V)	MV	Landesbodenschutzgesetz[24] vom 4. Juli 2011 GVOBl. M-V 2011, S. 759, letzte berücksichtigte Änderung: §§ 13 und 14 geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 4. Juli 2011 (GVOBl. M-V S. 759, 764)

[22] Verkündet als Artikel 1 des Gesetzes zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und zur Änderung abfallrechtlicher und wasserrechtlicher Vorschriften vom 14. Dezember 2004 (GBl. S. 908)

[23] Verkündet als Artikel 1 des Gesetzes zur Neuordnung des Wasserrechts in Baden-Württemberg vom 3. Dezember 2013 (GBl. S. 389)

[24] Verkündet als Artikel 1 des Gesetzes des Landes Mecklenburg-Vorpommern zur Ergänzung und Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und Änderung anderer Gesetze Vom 4. Juli 2011 (GVOBl. M-V.S. 759)

Agrarreform-Umsetzungs-Landesverordnung (AgrarreformUmsetzLVO M-V)	MV	Agrarreform-Umsetzungs-Landesverordnung[25] vom 4. September 2015 GVOBl. M-V 2015, S. 262, 263, letzte berücksichtigte Änderung: § 2 geändert durch Verordnung vom 29. September 2016 (GVOBl. M-V S. 813)
Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (LWaG)	MV	Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern vom 30. November 1992 GVOBl. M-V 1992, S. 669 letzte berücksichtigte Änderung: §§ 106, 107 geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 5. Juli 2018 (GVOBl. M-V S. 221, 228)
Landesbodenschutzgesetz (LBodSchG)	NW	Landesbodenschutzgesetz vom 9. Mai 2000, zuletzt geändert am 27. September 2016
Landeserosionsschutzverordnung (LESchV)	NW	Landeserosionsschutzverordnung vom 27. Oktober 2015 (GV. NRW. S. 730)
Landeswassergesetz (LWG)	NW	Landeswassergesetz vom 25. Juni 1995 GV.NRW. S. 926 / SGV. NRW. 7 zuletzt geändert am 16. Juli 2016
Niedersächsisches Bodenschutzgesetz (NBodSchG)	NI	Niedersächsisches Bodenschutzgesetz[26] vom 19. Februar 1999 (Nds. GVBl. 1999, 46) letzte berücksichtigte Änderung: § 13 geändert durch Artikel 16 des Gesetzes vom 16.05.2018 (Nds. GVBl. S. 66)
Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)	NI	Niedersächsisches Wassergesetz vom 19. Februar 2010 Nds. GVBl. 2010, 64 letzte berücksichtigte Änderung: Anlage 4 geändert durch Artikel 2 § 7 des Gesetzes vom 12.11.2015 (GVBl. S. 307)
Verordnung über erosionsgefährdete landwirtschaftliche Flächen	NI	Verordnung über erosionsgefährdete landwirtschaftliche Flächen Vom 16. Dezember 2015 (Nds. GVBl. 2015, 407)
Landesbodenschutzgesetz (LBodSchG)	RP	Landesbodenschutzgesetz[27] vom (GVBl. 2005, 302) letzte berücksichtigte Änderung: §§ 9, 11 und 13 geändert durch § 50 des Gesetzes vom 06.10.2015 (GVBl. S. 283, 295)
Landesverordnung über die Einteilung landwirtschaftlicher Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung	RP	Landesverordnung über die Einteilung landwirtschaftlicher Flächen nach dem Grad der Erosionsgefährdung Vom 14. März 2011 (GVBl. 2011, 87) letzte berücksichtigte Änderung: §§ 1 und 3 sowie Anlage 1 geändert durch Verordnung vom 28.02.2016 (GVBl. S. 201)
Landeswassergesetz (LWG)	RP	Landeswassergesetz vom 14. Juli 2015 GVBl. 2015, 127 letzte berücksichtigte Änderung: zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 19.12.2018 (GVBl. S. 469)

[25] Verkündet als Artikel 1 der Landesverordnung zur Umsetzung der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik und zur Änderung der Tierkennzeichnungszuständigkeitslandesverordnung vom 4. September 2015 (GVOBl. M-V S. 262)

[26] Verkündet als Artikel 1 des Gesetzes zur Einführung des Niedersächsischen Bodenschutzgesetzes und zur Änderung des Niedersächsischen Abfallgesetzes vom 19. Februar 1999

[27] Verkündet als Artikel 1 des Landesgesetzes zur Einführung des Landesbodenschutzgesetzes und zur Änderung des Landesabfallwirtschafts- und Altlastengesetzes vom 25.7.2005 (GVBl. S. 302)

Saarländisches Bodenschutzgesetz (SBodSchG)	SL	Saarländisches Bodenschutzgesetz vom 20. März 2002 zuletzt geändert durch das Gesetz vom 21. November 2007 (Amtsbl. S. 2393)
Verordnung über Sachverständige und Untersuchungsstellen für den Bodenschutz und die Altlastenbehandlung im Saarland (VSU Boden und Altlasten)	SL	VSU Boden und Altlasten Vom 2. Dezember 2002 zuletzt geändert durch die Verordnung vom 1. Juni 2017 (Amtsbl. I S. 548).
Saarländisches Wassergesetz (SWG)	SL	Saarländisches Wassergesetz vom 28. Juni 1960 Amtsblatt 2004, S. 1994 zuletzt geändert durch das Gesetz vom 3. Dezember 2013 (Amtsbl. I 2014 S. 2).
Sächsisches Abfallwirtschafts- und Bodenschutzgesetz (SächsABG)	SN	Sächsisches Abfallwirtschafts- und Bodenschutzgesetz vom 31. Mai 1999 (SächsGVBl. S. 256) zuletzt geändert durch Art. 31 des Gesetzes vom 26. April 2018 (SächsGVBl. S. 198)
Sächsisches Wassergesetz (SächsWG)	SN	Sächsisches Wassergesetz vom 12. Juli 2013 zuletzt geändert durch Art. 22 des Gesetzes vom 29. April 2015 (SächsGVBl. S. 349, 362)
Bodenschutz-Ausführungsgesetz Sachsen-Anhalt (BodSchAG LSA)	ST	Bodenschutz-Ausführungsgesetz Sachsen-Anhalt[28] vom 2. April 2002 (GVBl. LSA 2002, 214), letzte berücksichtigte Änderung: Fußnote der Überschrift neu eingefügt sowie § 8 geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Dezember 2009 (GVBl. LSA S. 708)
Verordnung zur Umsetzung der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik in Sachsen-Anhalt	ST	Verordnung zur Umsetzung der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik in Sachsen-Anhalt vom 21. Juli 2015 (GVBl. LSA 2015, 381)
Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (RdErl. BodEr Wass)	ST	Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen vom 9. August 2012 (MBl. LSA. 2012, 498)
Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt (WG LSA)	ST	Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt GVBl. LSA 2011, 492 letzte berücksichtigte Änderung: Anlage 3 neu gefasst durch Artikel 2 der Verordnung vom 17. Februar 2017 (GVBl. LSA S. 33)
Landesbodenschutz- und Altlastengesetz (BodSchAG LSA)	SH	Landesbodenschutz- und Altlastengesetz[29] vom 14. März 2002 (GVOBl. 2002, 60) letzte berücksichtigte Änderung: § 6 Abs. 3 aufgehoben (Art. 18 Ges. v. 02.05.2018, GVOBl. S. 162)

[28] Dieses Gesetz dient der Umsetzung der Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme (ABl. L 197 vom 21. 7. 2001, S. 30).

[29] Gemäß Artikel 40 des Gesetzes zur Anpassung des Datenschutzrechts an die Verordnung (EU) 2016/679 und zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2016/680 vom 2. Mai 2018 (GVOBl. 162) gilt: „Die Evaluierung erfolgt nach einem Jahr. Evaluiert werden sollen insbesondere die Regelungen zu Artikel 1 § 9, § 33 Absatz 6, § 64, Artikel 2 § 1."

Landesverordnung zur Einteilung der Wasser- und Winderosionsgefährdung landwirtschaftlicher Flächen	SH	Landesverordnung zur Einteilung der Wasser- und Winderosionsgefährdung landwirtschaftlicher Flächen[30] vom 16. Juli 2015 (GVOBl. 2015, 297, 299)
Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (WasG SH)	SH	Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein vom 11. Februar 2008 GVOBl. 2008, 91 letzte berücksichtigte Änderung: Ressortbezeichnungen ersetzt (Art. 20 LVO v. 16.01.2019, GVOBl. S. 30)
Thüringer Bodenschutzgesetz (ThürBodSchG)	TH	Thüringer Bodenschutzgesetz[31] vom 26. Dezember 2003 (GVBl. 2003, 511) letzte berücksichtigte Änderung: §§ 9, 10, 11 geändert durch Artikel 16 des Gesetzes vom 20. Dezember 2007 (GVBl. S. 267, 276)
Thüringer Erosionsschutzverordnung (ThürErVO)	TH	Thüringer Erosionsschutzverordnung vom 22. Dezember 2015 (GVBl. 2015, 240) letzte berücksichtigte Änderung: §§ 1, 2, 3 sowie Anlage geändert durch Artikel 88 des Gesetzes vom 18. Dezember 2018 (GVBl. S. 731, 788)
Thüringer Wassergesetz (ThürWG)	TH	Thüringer Wassergesetz vom 18. August 2009 GVBl. 2009, 648 letzte berücksichtigte Änderung: mehrfach geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 18. Dezember 2018 (GVBl. S. 731, 743)

[30] Verkündet als Artikel 3 der Landesverordnung zur Durchführung der Gemeinsamen Agrarpolitik 2015 vom 16. Juli 2015 (GVOBl. S. 297, 299)

[31] Verkündet als Artikel 1 des Thüringer Gesetzes zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 16. Dezember 2003 (GVBl. S. 511)

9 Anlagen

9.1 Anlage 9.1 Kartenmaterial zu regionalen Analysen

9.1.1 Fall 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach

9.1.1.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell

9.1.1.2 Hangneigung

9.1.1.3 Niederschlagsverteilung

9.1.1.4 Vorfeuchteverhältnisse

9.1.1.5 Landnutzung

9.1.1.6 Bodentypen BFD50 RP und BK50 NW

9.1.1.7 Hydrologische Bodenklassen

9.1.1.8 Verteilung der Curve-Numbers

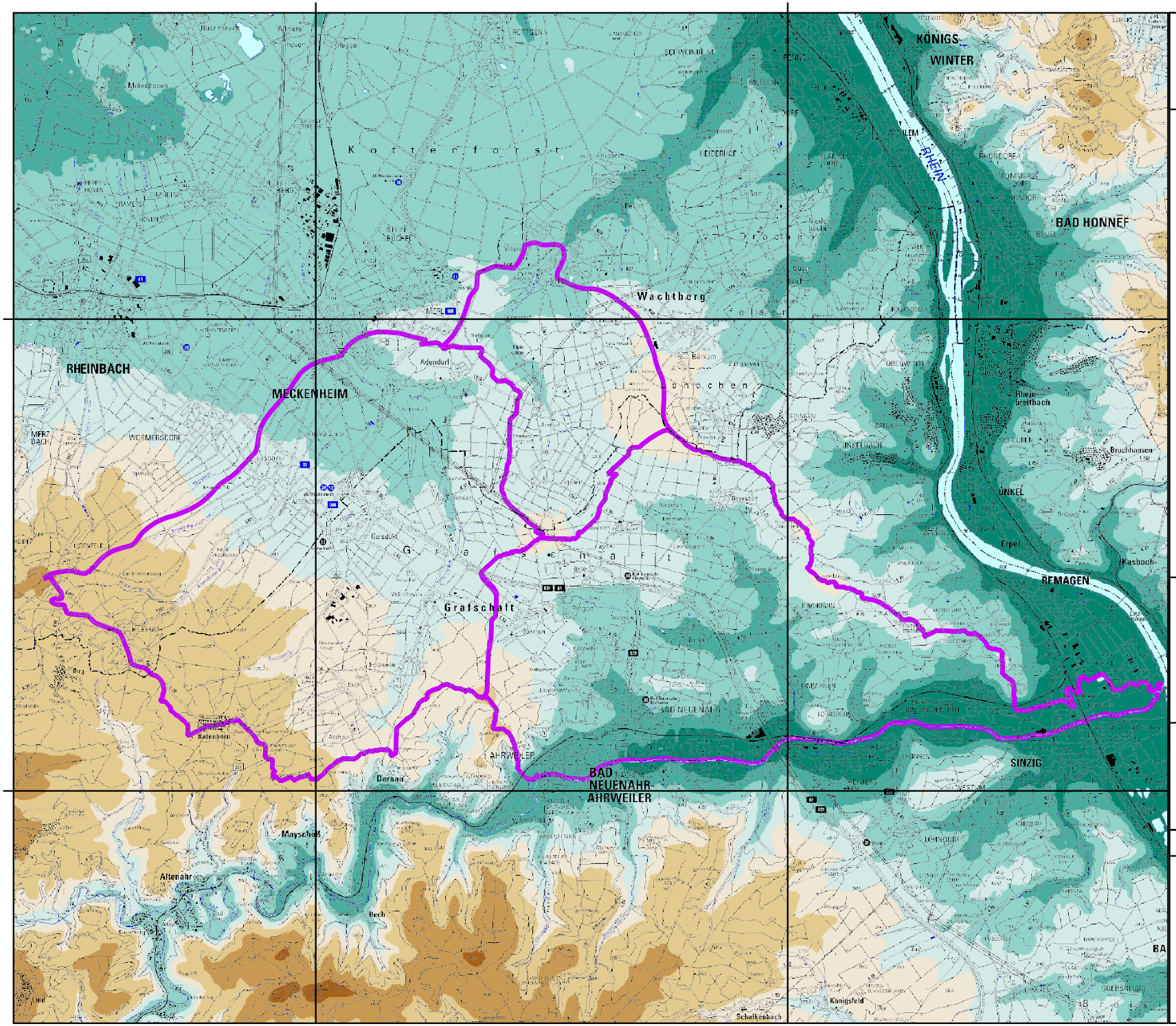
9.1.1.9 Kumulierte Abflusshöhen

9.1.1.10 Abflussbeiwerte

9.1.1.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung

9.1.1.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung

9.1.1.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat



Darstellungstitel:

Fall 1: Übersichtskarte und digitales Geländemodell

Einzugsgebiete

Geländehöhe [m NN]

- < 100
- 100 - 150
- 150 - 200
- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600

Datengrundlage: EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

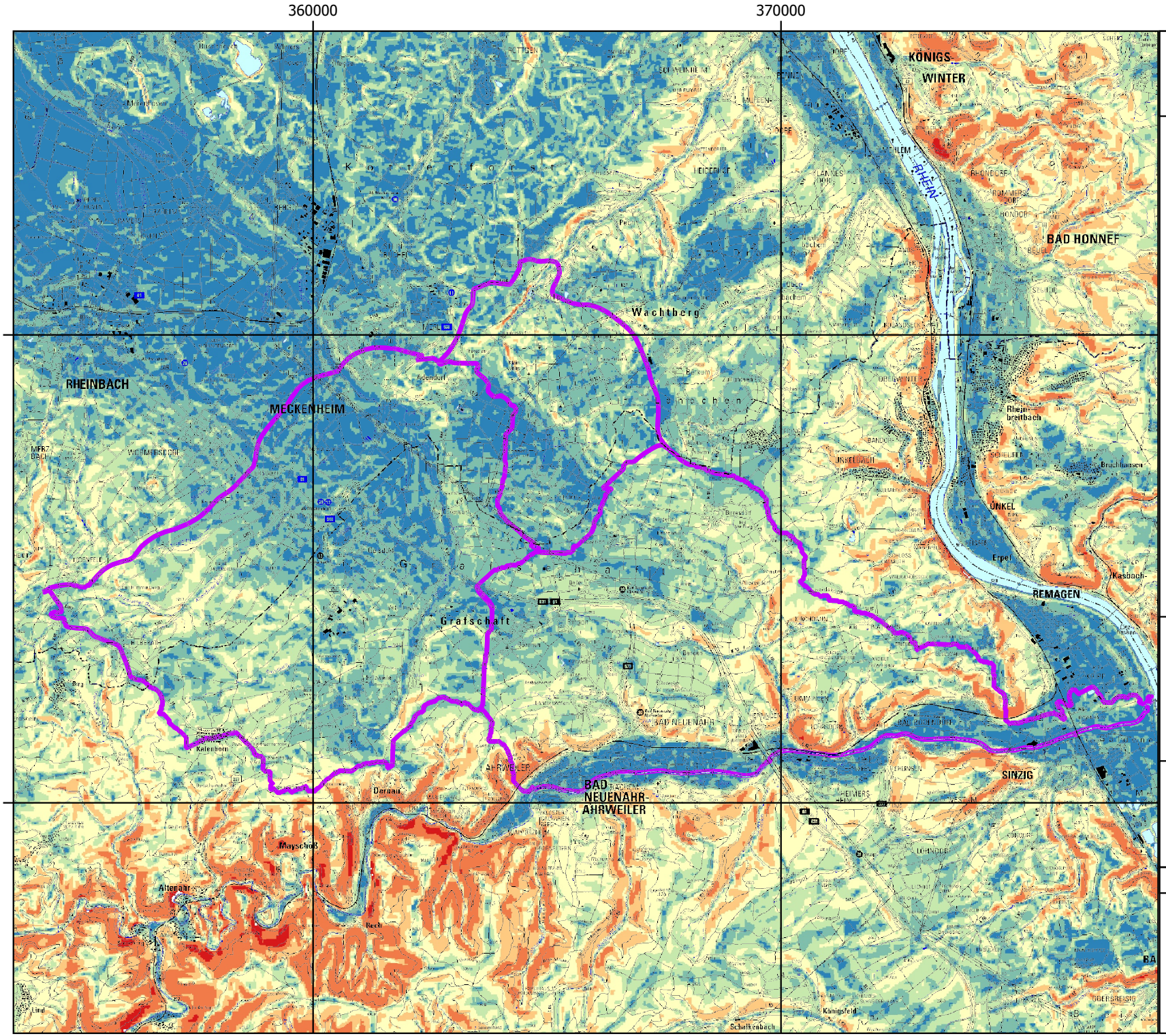
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.1

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Hangneigung

Einzugsgebiete

Hangneigung [%]

- 0 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 60
- 60 - 90

Datengrundlage: EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

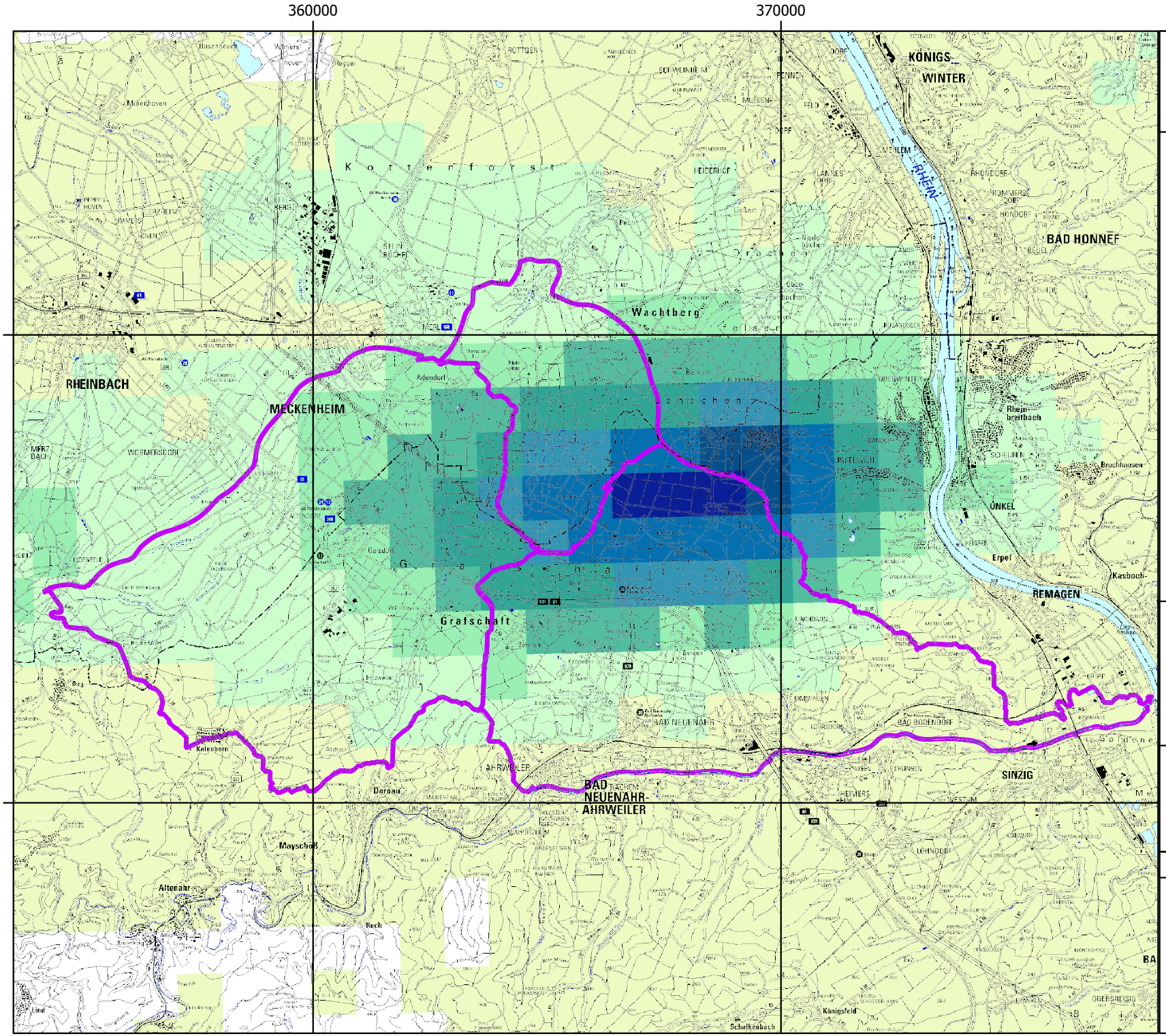
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.2

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Niederschlagsverteilung

Einzugsgebiete

Niederschlag [mm] zum Extremereignis 04.06.2016 - 12 bis 14 Uhr

- < 1
- 1 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 70
- 70 - 90
- 90 - 105
- 105 - 120

Datengrundlage: Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

Hydor Consult GmbH

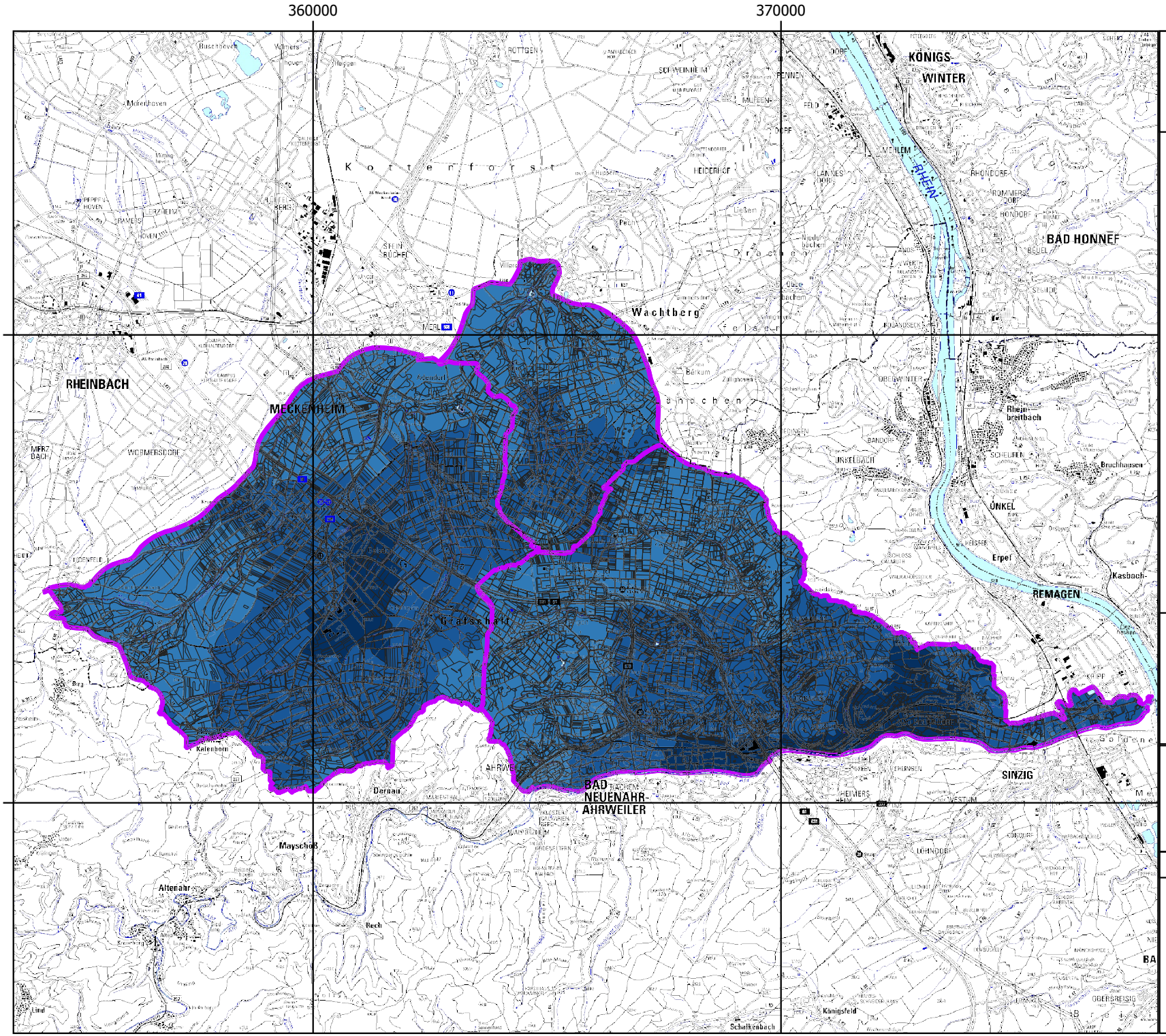
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.3

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Vorfeuchteverhältnisse

Einzugsgebiete

Differenz der Vorregenindizes VN akt - VN mit [mm]

- -30 - -20
- -20 - -10
- -10 - 0
- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

Datengrundlage: Tageswerte aus historischen stündlichen RADOLAN-Rastern der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

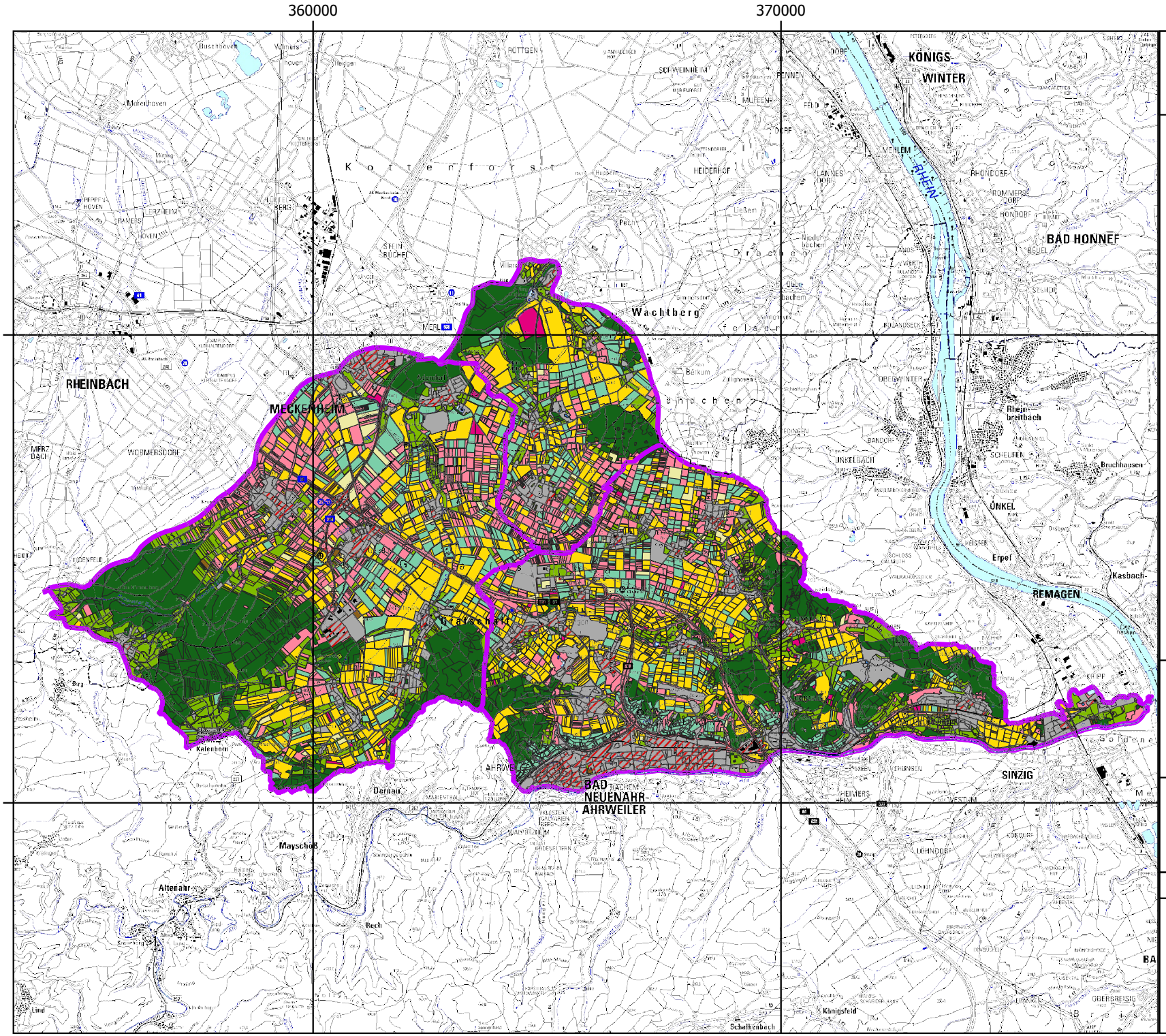
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.4

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Landnutzung

Einzugsgebiete

Siedlung, Gewerbe, Infrastruktur

- 0 - 75% Versiegelung
- 75% - 100% Versiegelung

Landwirtschaft und Forst

- Ackerland unspezifisch
- Brache
- Geschlossene Bestände
- Reihenkulturen
- Leguminosen
- Obstanlagen, Baumschulen, Gehoelz, Unland
- Gruenland
- Wald

Datengrundlage:
Basis-DLM 2015 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie);
INVEKOS Hauptfrucht 2016 RP (Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau RP);
INVEKOS Hauptfrucht 2016 NW (Landwirtschaftskammer NW);
High Resolution Layer "Imperviousness", 20m (Copernicus Land Monitoring Service)

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

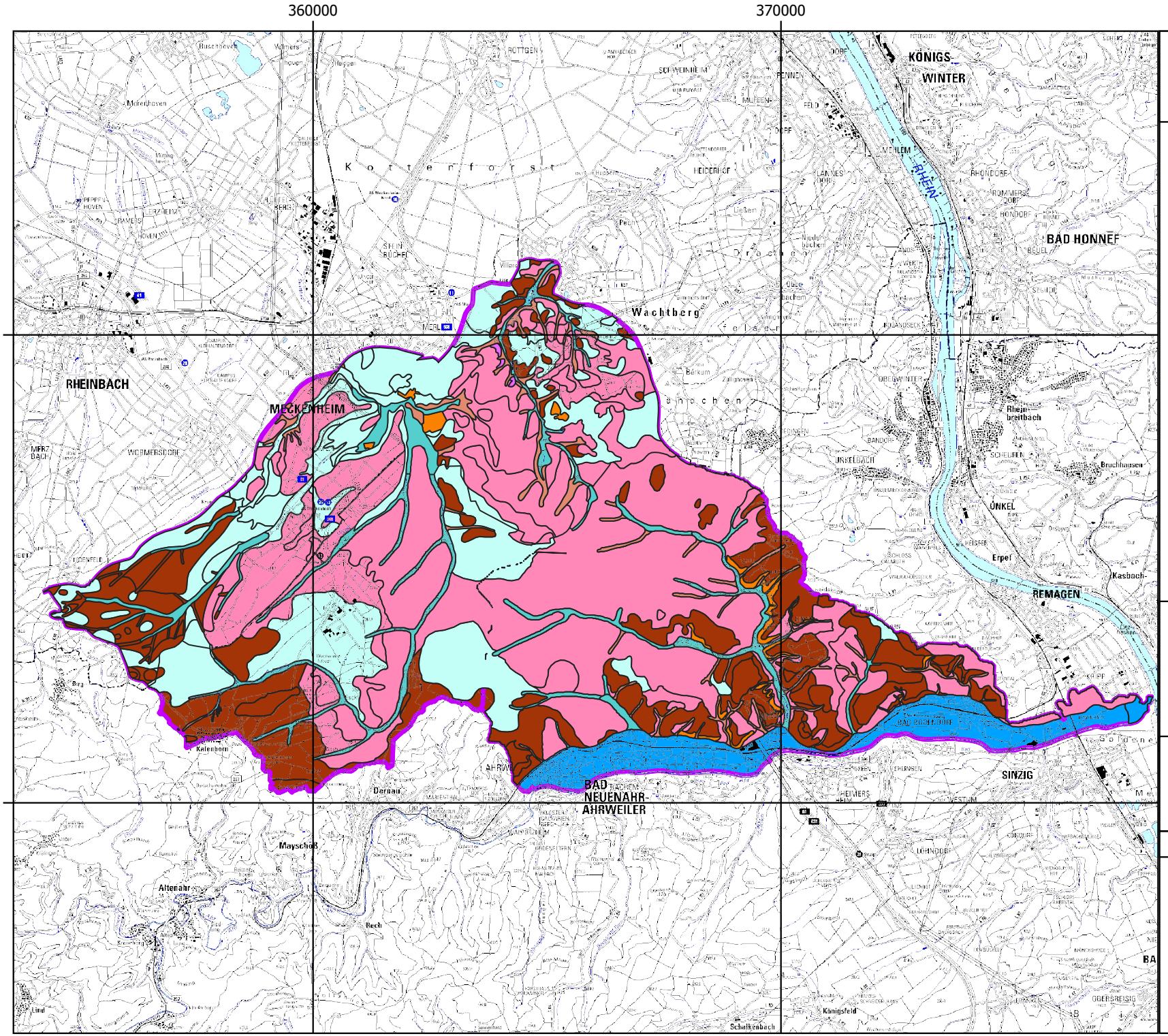
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.5

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Bodentypen BFD50 RP und BK50 NW

Einzugsgebiete

Bodentypen

- Braunerde, vereinzelt Pseudogley
- Regosol
- Kolluvisol
- Parabraunerde, vereinzelt Braunerde, Pseudogley
- Pseudogley
- Gley
- Vega
- Pararendzina

Datengrundlage: BFD50 RP [vorläufig] (Landesamt für Geologie und Bergbau RP);
BK50 NW (Geologischer Dienst NRW)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

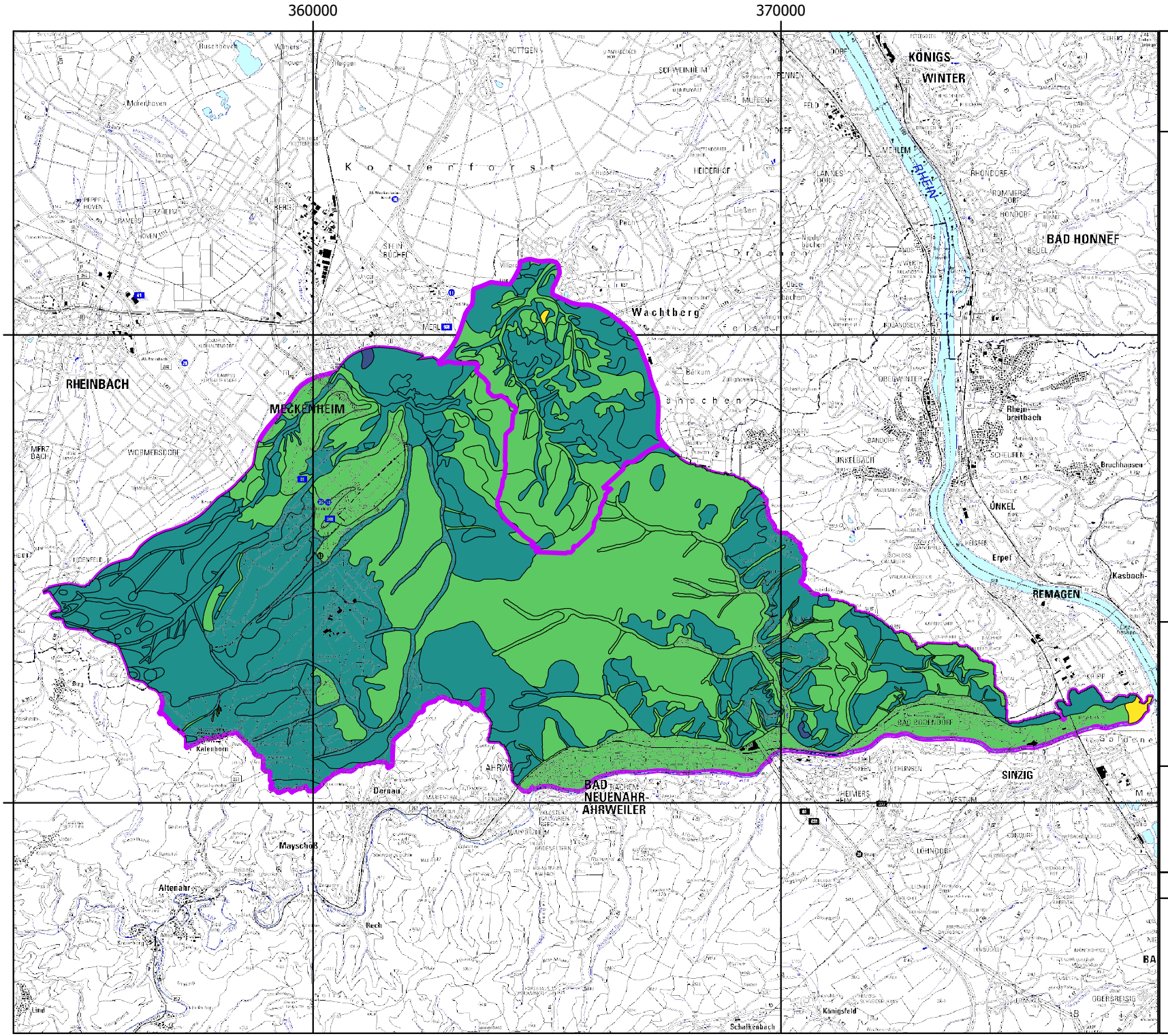
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.6

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Hydrologische Bodenklassen

Einzugsgebiete

Hydrologische Bodenklasse

- A
- B
- C
- D

Datengrundlage: BFD50 RP [vorläufig] (Landesamt für Geologie und Bergbau RP);
BK50 NW (Geologischer Dienst NRW)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

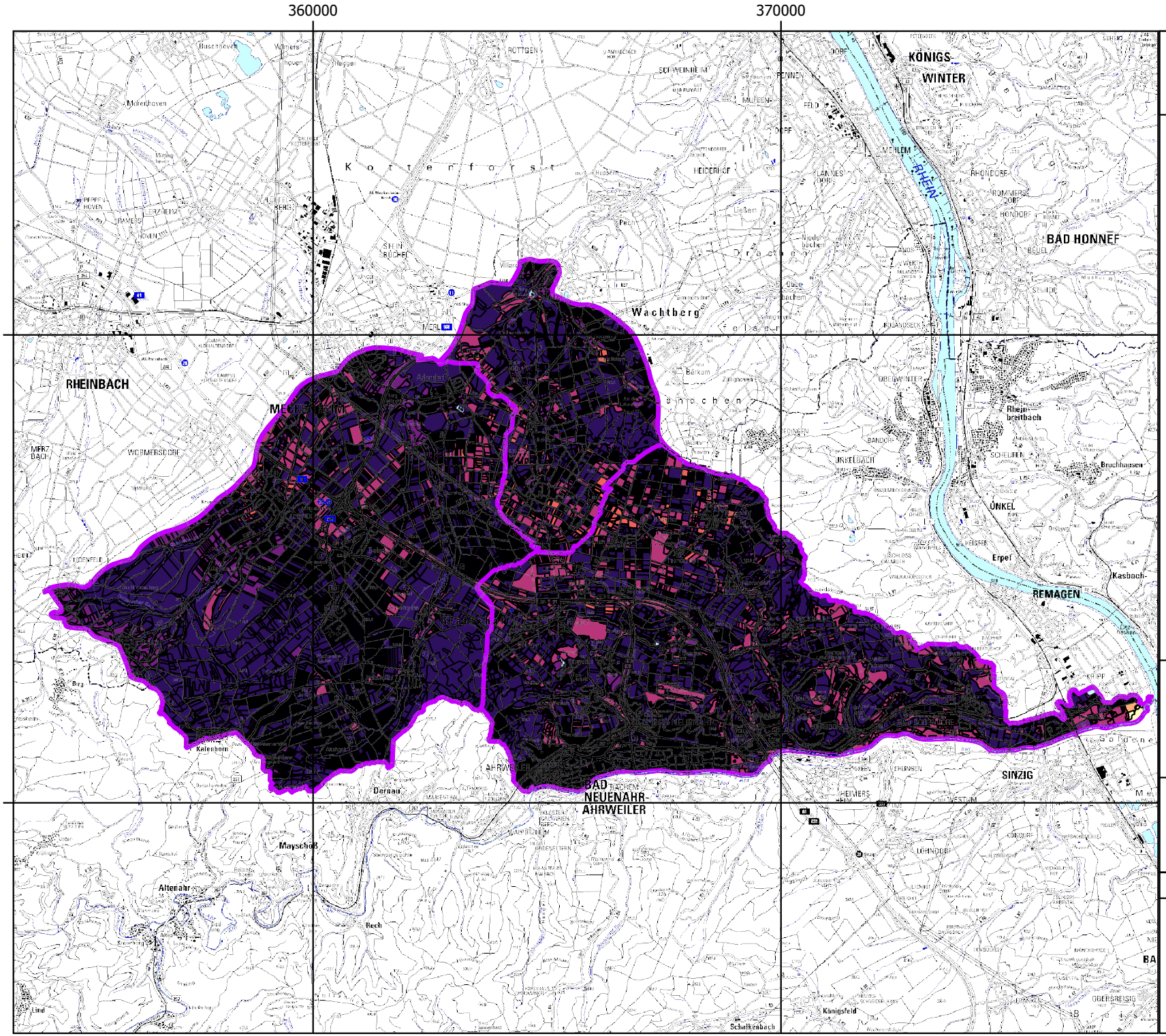
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.1.7

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Verteilung der Curve-Numbers

Einzugsgebiete

Bodenfeuchteabhängige Curve-Number [-]

- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

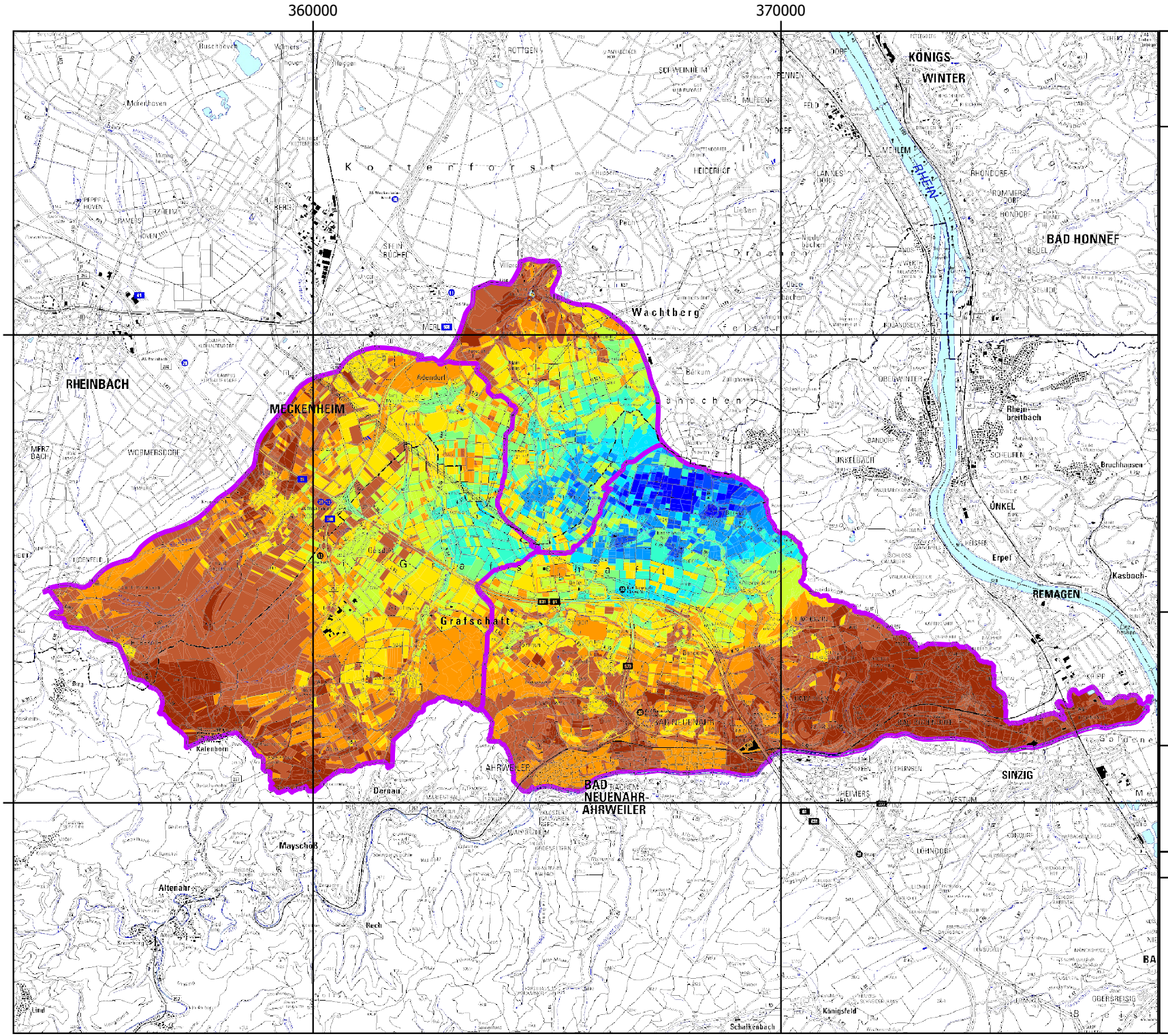
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.1.8

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Kumulierte Abflusshöhen

Einzugsgebiete

Direktabfluss [mm/dt] zum Extremereignis 04.06.2016 - 12 bis 14 Uhr

- 0 - 1
- 1 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 80
- 80 - 100
- 100 - 120
- 120 - 140
- >140

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

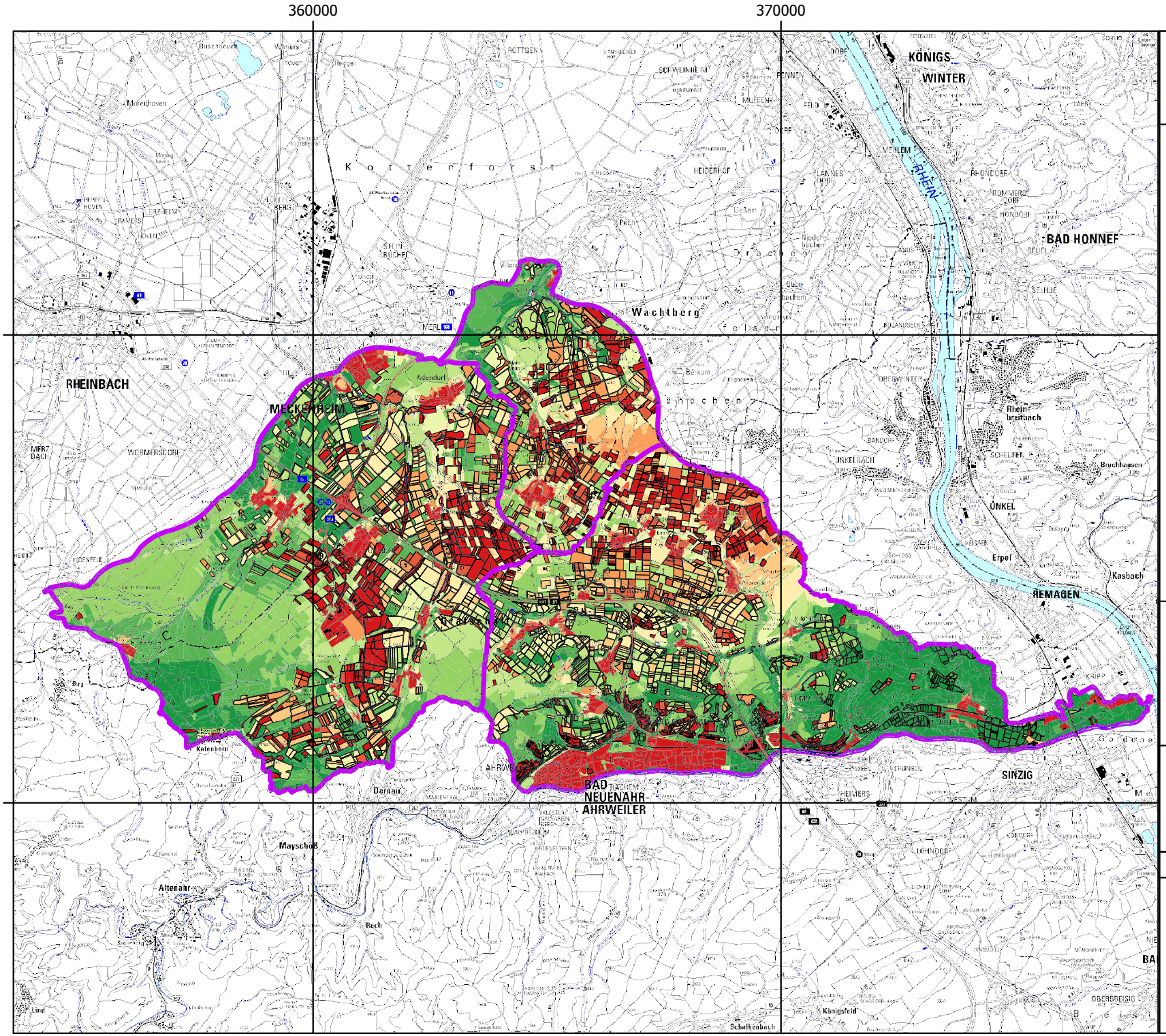
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.9

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Abflussbeiwerte

Einzugsgebiete

Ackerland

Beiwert Direktabfluss [%] zum Extremereignis 04.06.2016 - 12 bis 14 Uhr

- < 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- > 90

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

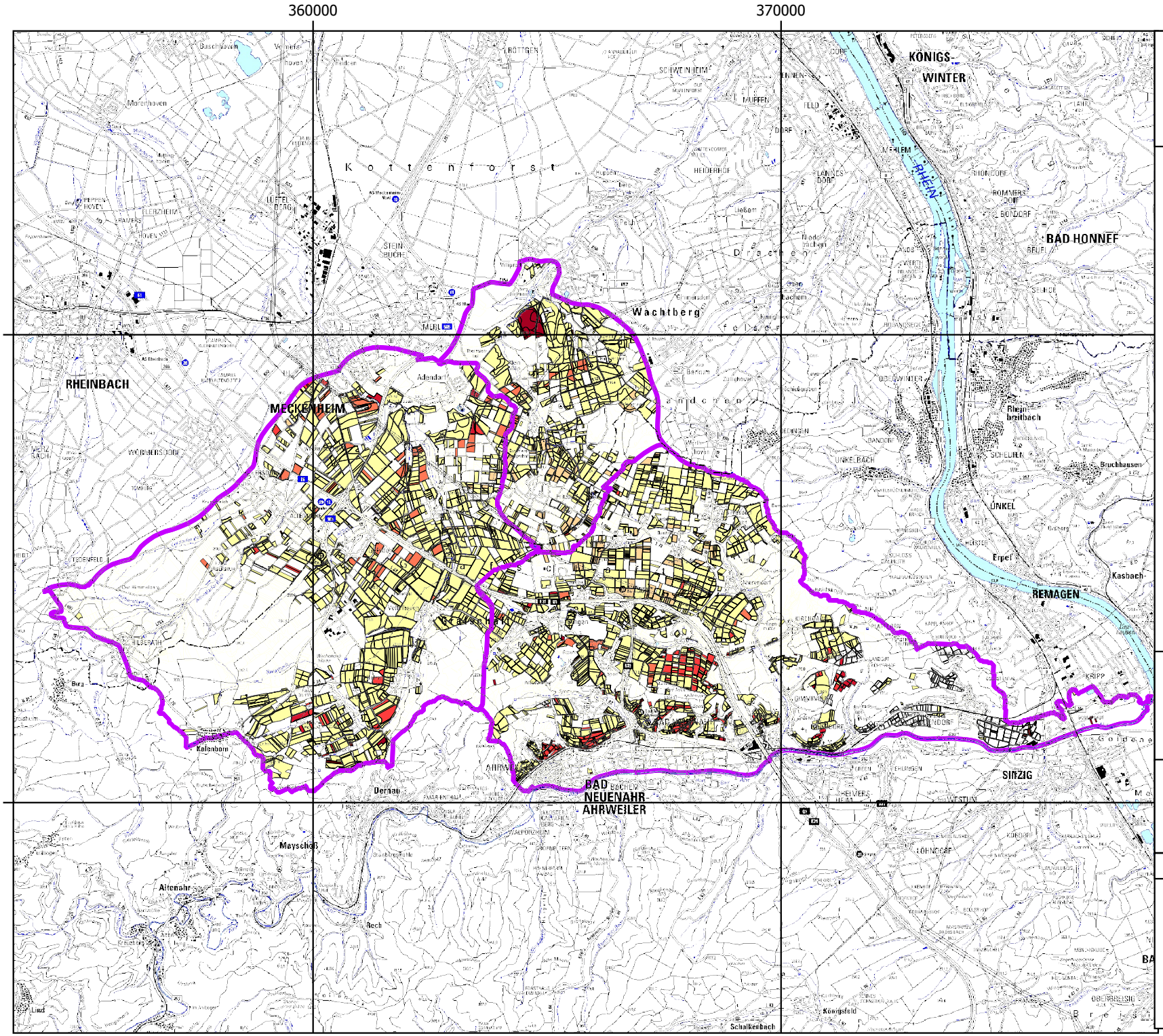
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.1.10

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:110000

1 0 1 2 3 4 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Variante 1 - Mulchsaat mit Saatbettbereitung

Einzugsgebiete

Ackerland

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 1
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

Hydor Consult GmbH

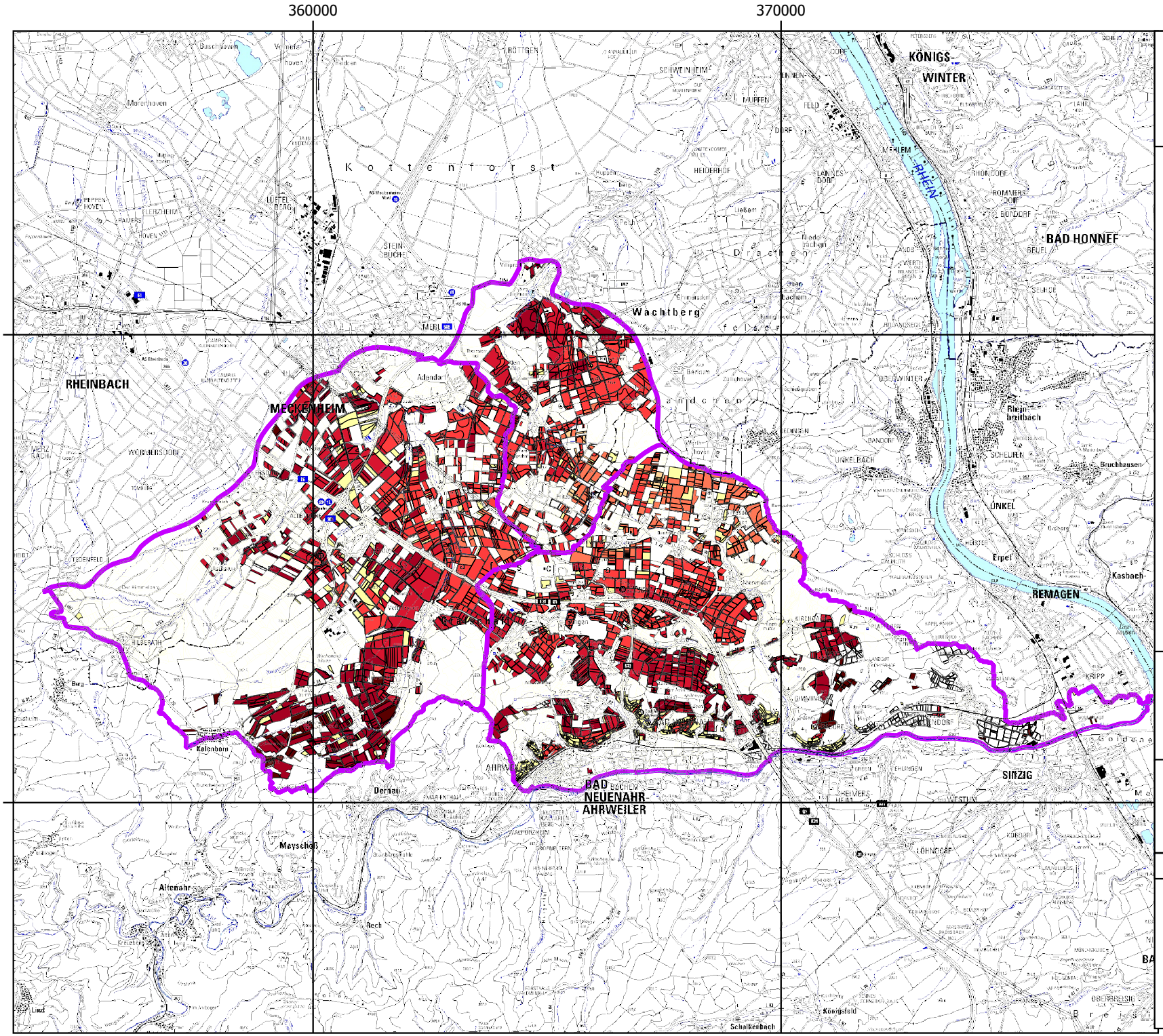
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.11

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Variante 2 - Mulchsaat ohne Saatbettbereitung

Einzugsgebiete

Ackerland

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 2
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

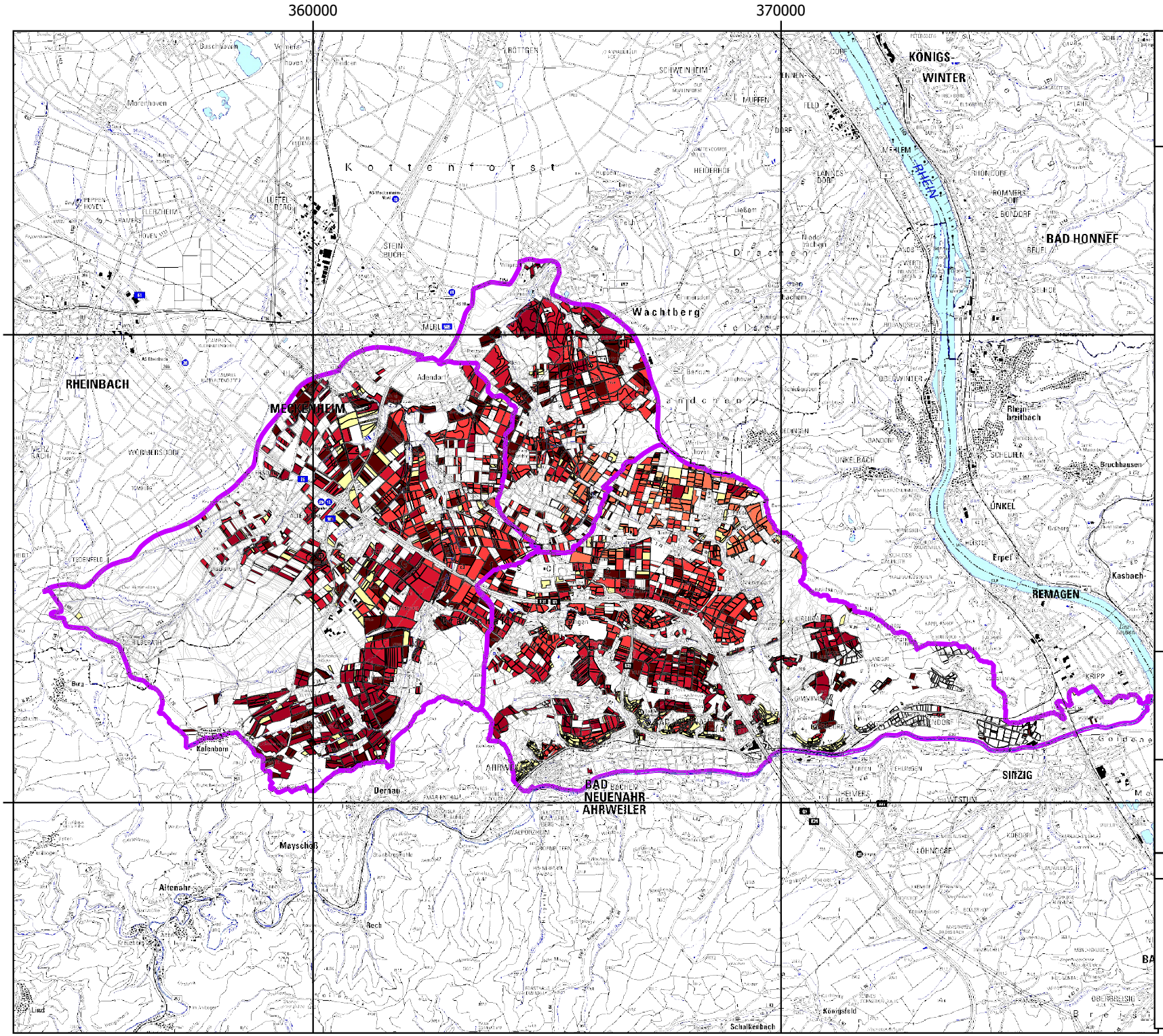
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.12

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 1: Variante 3 - Langjährige Direktsaat

Einzugsgebiete

Ackerland

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 3
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.1.13

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km

9.1.2 Fall 2: Engebach/Hod

9.1.2.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell

9.1.2.2 Hangneigung

9.1.2.3 Niederschlagsverteilung

9.1.2.4 Vorfeuchteverhältnisse

9.1.2.5 Landnutzung

9.1.2.6 Bodenkundliche Einheiten BK50 BW

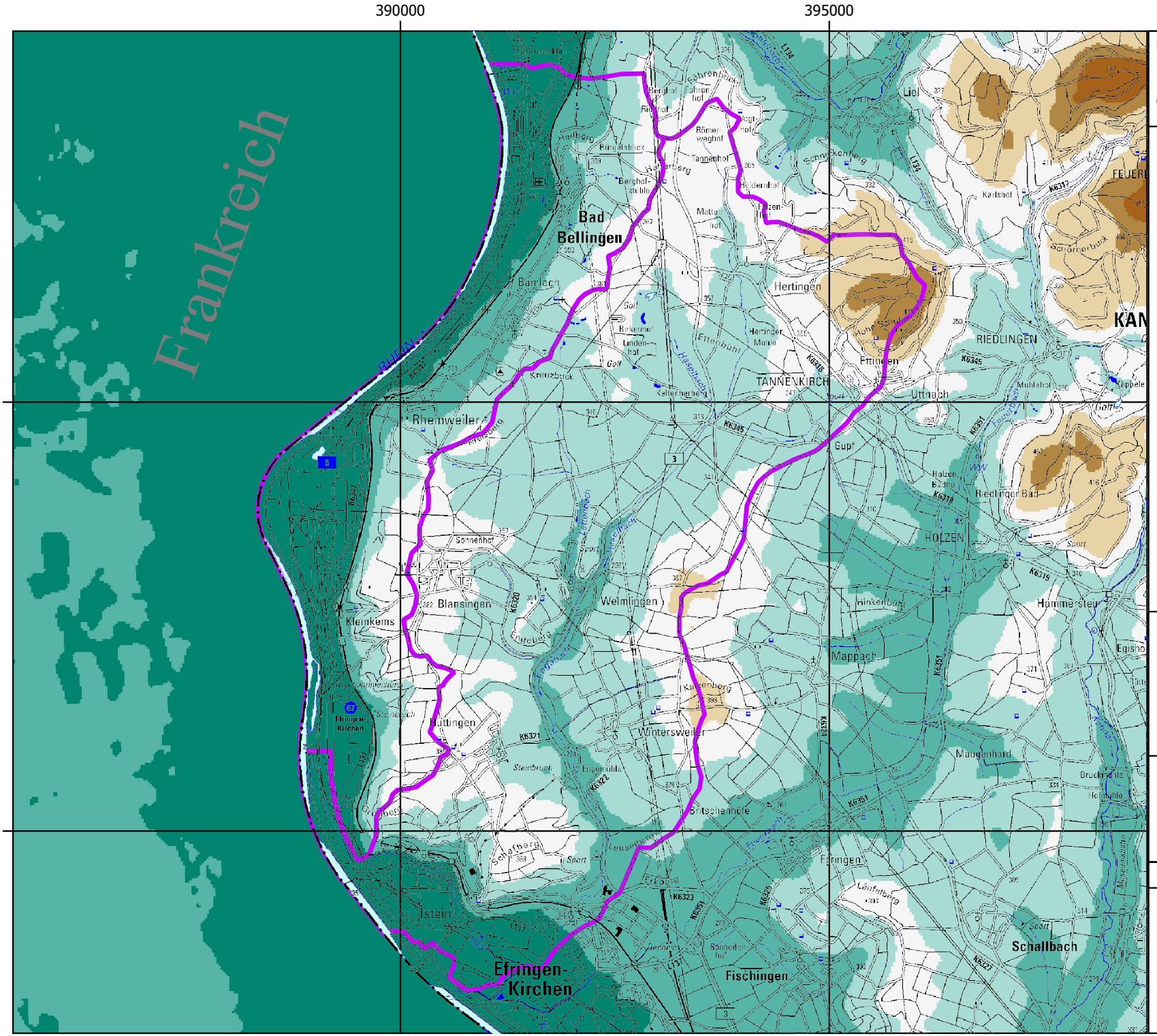
9.1.2.7 Hydrologische Bodenklassen

9.1.2.8 Verteilung der Curve-Numbers

9.1.2.9 Kumulierte Abflusshöhen

9.1.2.10 Abflussbeiwerte

9.1.2.11 Variante 1 – Zwischenbegrünung (Rebflächen)



Darstellungstitel:

Fall 2: Übersichtskarte und digitales Geländemodell

Einzugsgebiete

Geländehöhe [m NN]

- 200 - 250
- 250 - 300
- 300 - 350
- 350 - 400
- 400 - 450
- 450 - 500
- > 500

EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

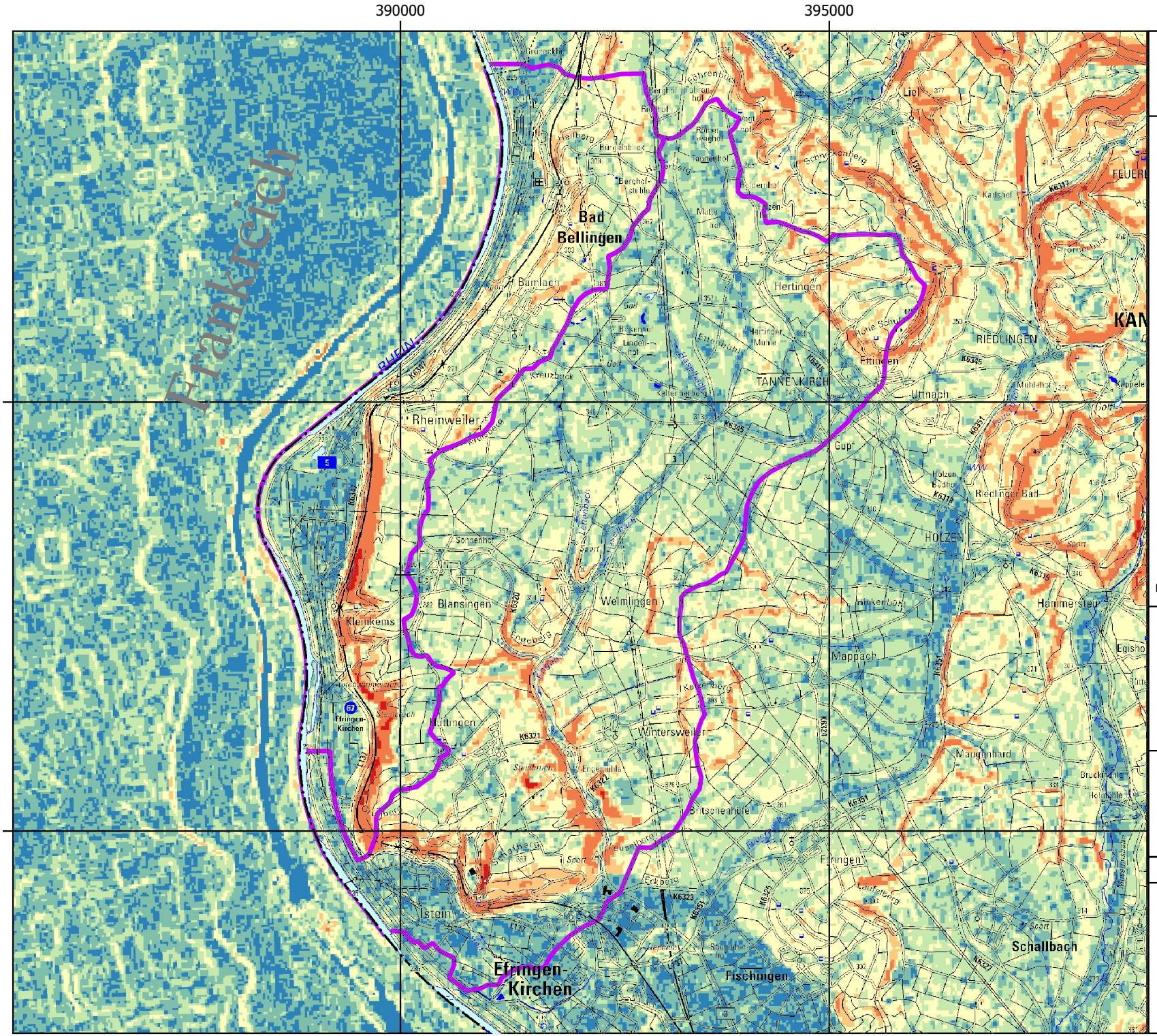
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.2.1

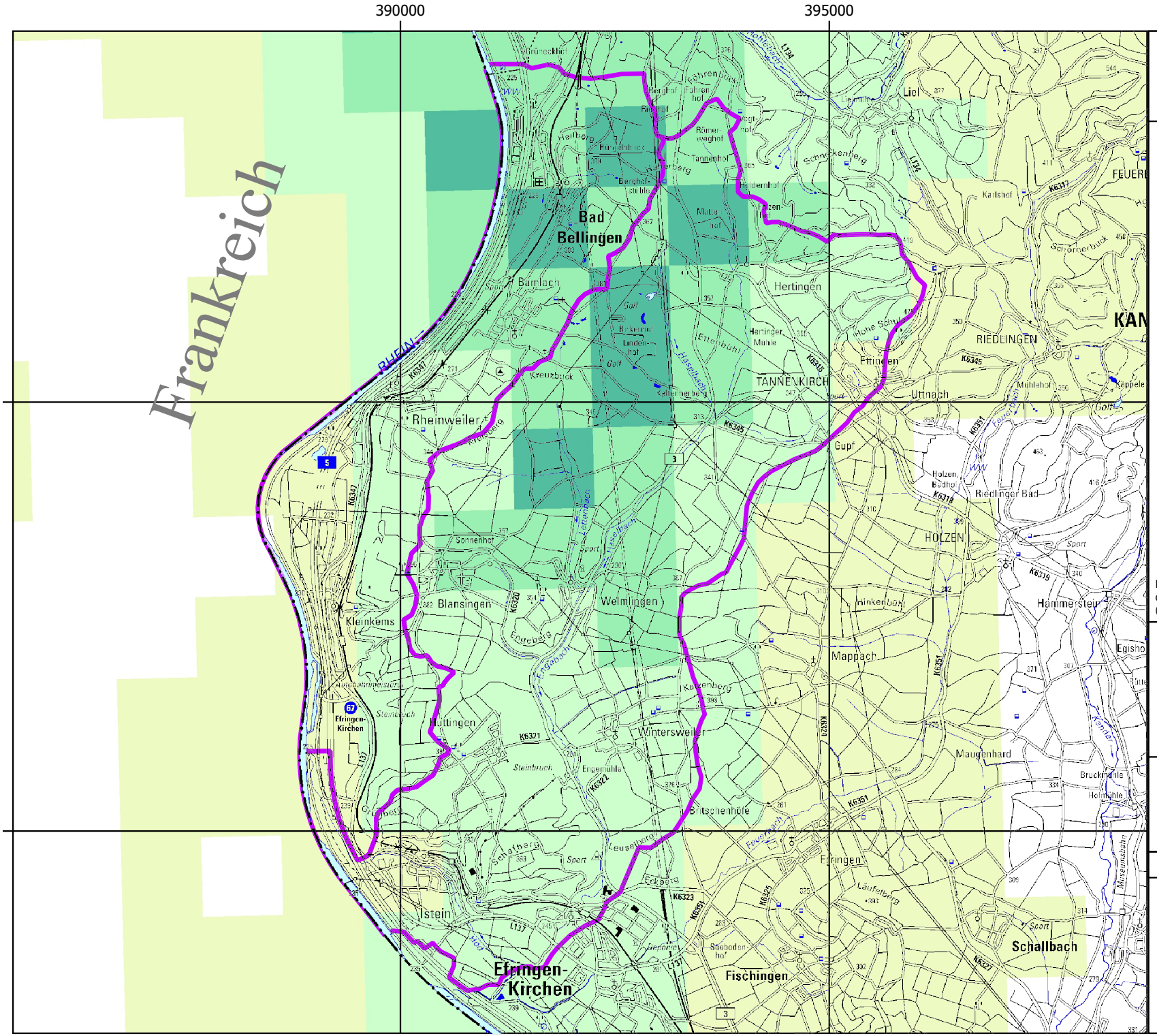
N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


390000
395000
5285000
5280000
Frankreich
Bad Bellingen
Rheinweiler
Bamlach
Hertingen
RIEDLINGEN
TANNENKIRCH
Uttnach
Gupf
Blansingen
Kleinkems
Welmlingen
HOLZEN
Hammerstein
Mappach
Efringen-Kirchen
Lutzingen
Wintersweiler
Maugenhard
Istein
Fischingen
Schallbach
Liel
Karlshof
Ettingen
Riedlinger Bad
Sonnenhof
Brittscheuhöfe
Darstellungstitel:
Fall 2: Hangneigung
Einzugsgebiete
Hangneigung [%]
0 - 2
2 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 60
60 - 90
EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.2.2
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 2: Niederschlagsverteilung

Einzugsgebiete

Niederschlag [mm] zum Extremereignis 07.06.2015 - 20 bis 21 Uhr

- < 1
- 1 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40

Datengrundlage: Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

Hydor Consult GmbH

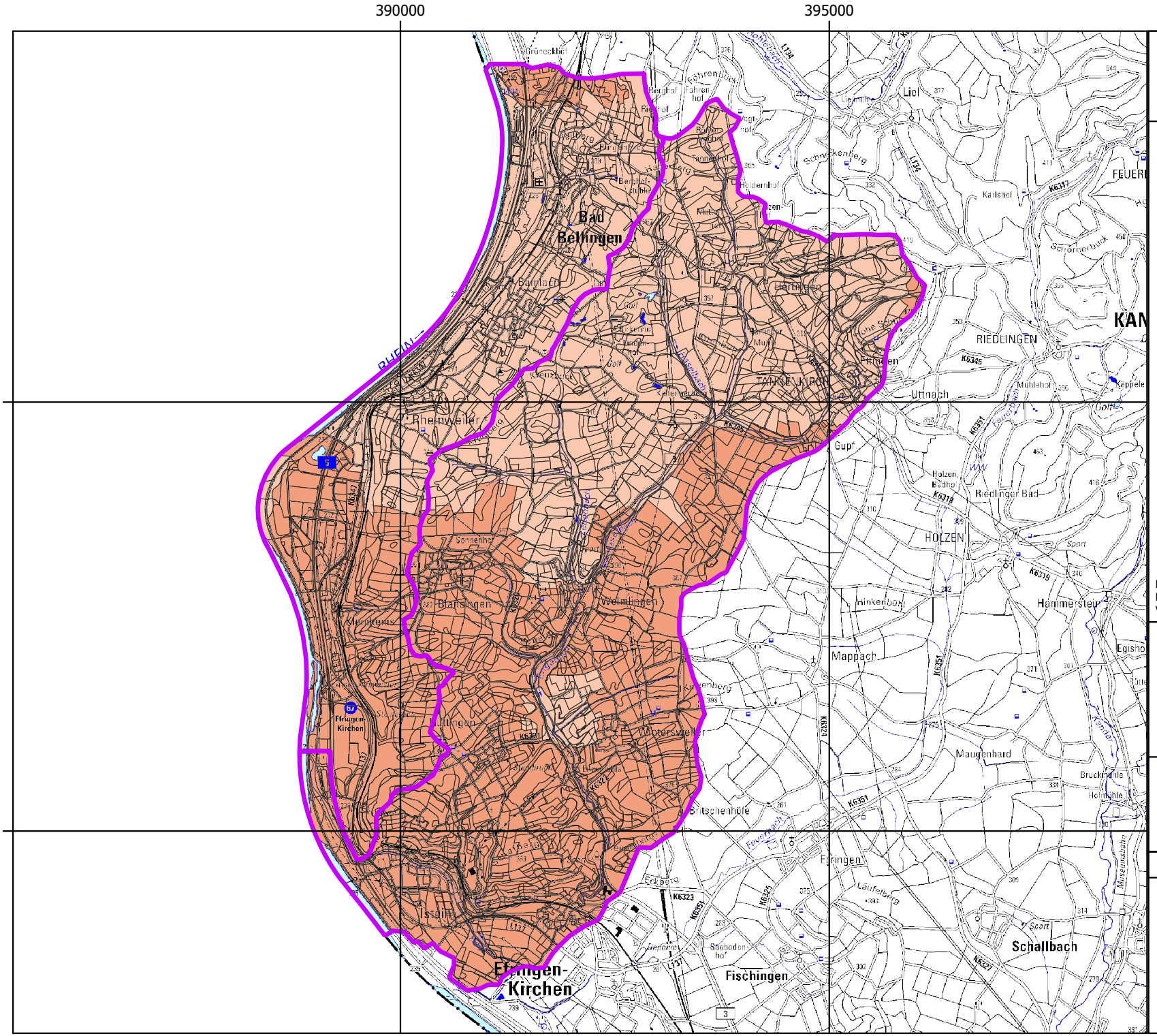
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.2.3

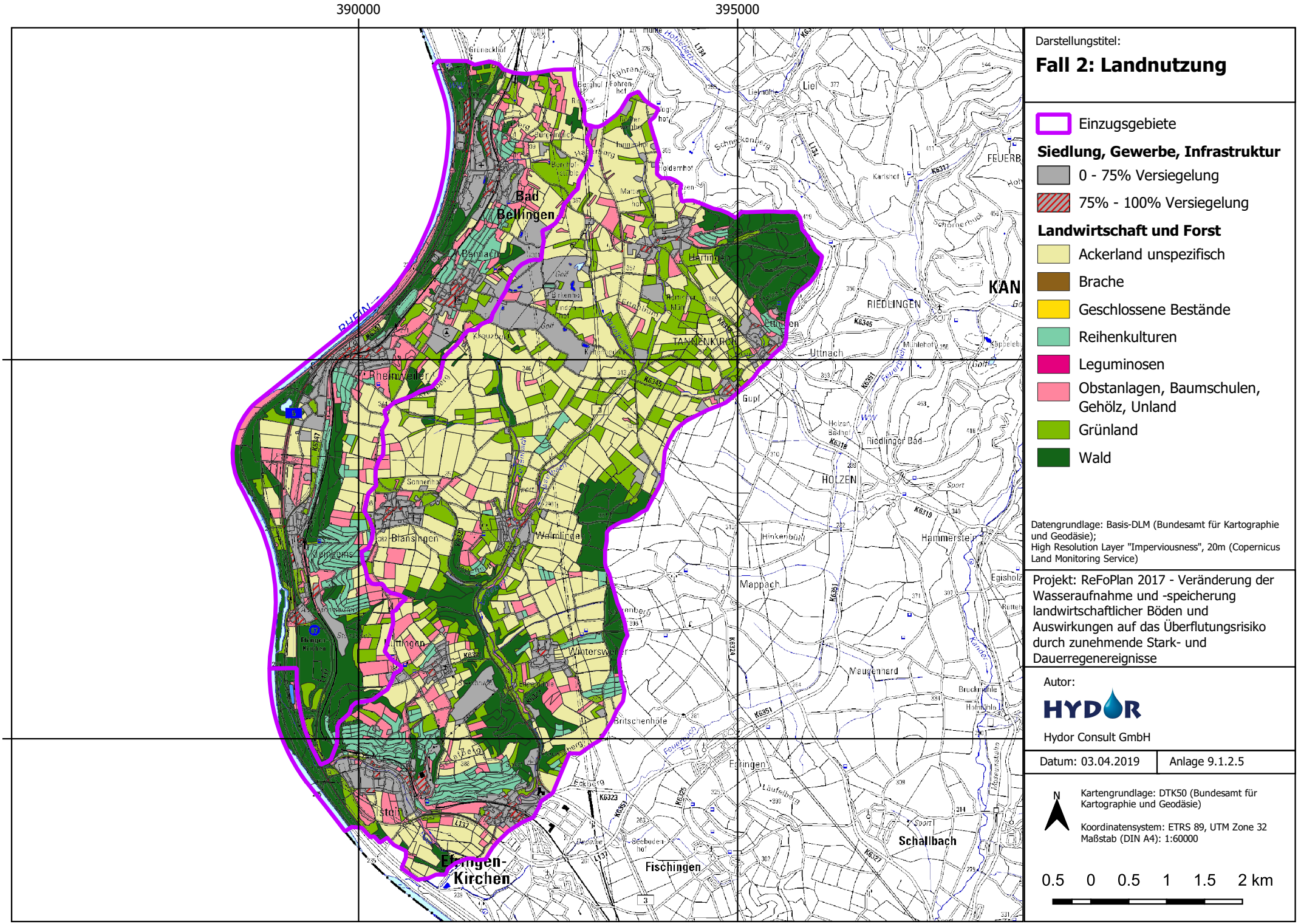
N

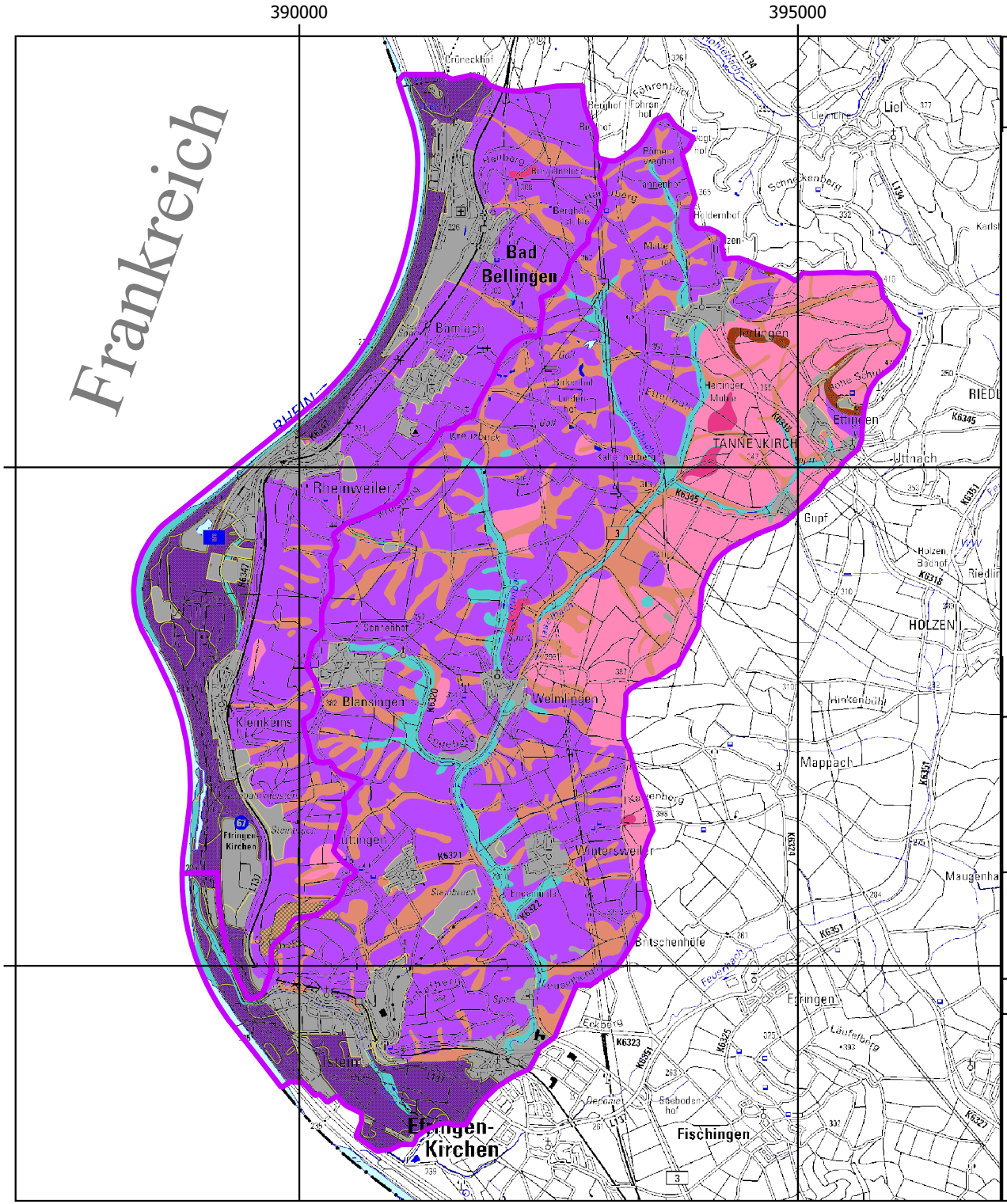
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


390000
395000
5285000
5280000
Bad Bellingen
Rheinweiler
Blansingen
Istein
Efringen-Kirchen
Fischingen
Schallbach
Mappach
Maugenhard
HOLZEN
RIEDLINGEN
Riedlinger Bad
Uttnach
Liel
Hammerstein
Wolfenweiler
Britschenhöfe
Tannenkirch
Darstellungstitel:
Fall 2:
Vorfeuchteverhältnisse
Einzugsgebiete
Differenz der Vorregenindizes
VN akt - VN mit [mm]
-30 - -20
-20 - -10
-10 - 0
0 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 40
40 - 50
>50
Datengrundlage: Tageswerte aus historischen stündlichen RADOLAN-Rastern der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.2.4
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


390000
395000
5285000
5280000
Bad Bellingen
Rheinweiler
Blansingen
Efringen-Kirchen
Fischingen
Schallbach
Liel
RIEDLINGEN
TANNENKIRCH
HOLZEN
Mappach
Maugenhard
Hammerstein
Riedlinger Bad
Uttnach
KAN
Darstellungstitel:
Fall 2: Landnutzung
Einzugsgebiete
Siedlung, Gewerbe, Infrastruktur
0 - 75% Versiegelung
75% - 100% Versiegelung
Landwirtschaft und Forst
Ackerland unspezifisch
Brache
Geschlossene Bestände
Reihenkulturen
Leguminosen
Obstanlagen, Baumschulen, Gehölz, Unland
Grünland
Wald
Datengrundlage: Basis-DLM (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie);
High Resolution Layer "Imperviousness", 20m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.2.5
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 2: Bodenkundliche Einheiten BK50 BW

Bodenkundliche Einheiten

- Gley, Auengley, Quellengley
  aus Auensand/Auenlehm, Sandlöss/Löss
- Kolluvium, z. T. über Braunerde und Parabraunerde
  aus Abschwemmmassen über Fließerden
- Braunerde, Pelosol-Braunerde und Pseudogley-Braunerde
  aus Fließerden, z. T. Schwemm- und Hochflutlehm
- Parabraunerde (vorwiegend) aus Löss und Sandlöss,
  z.T. aus lösslehmreichen Fließerden oder Hangschutt
- Pararendzina, Pelosol-Pararendzina, Braunerde-Pararendzina
  aus Fließerden und Hangschutt, tw. aus Rutschmassen
- Pararendzina aus Hochwasserablagerung,
  Schwemmschutt, Fluss- und Schmelzwasserschottern
- Pelosol, Braunerde-Pelosol und Pseudogley-Pelosol
  aus Fließerden, untergeordnet aus Schwemmschutt
- Gestörtes Gelände: Ursprüngliche Böden häufig stark verändert
- Keine Bodendaten: Siedlung/Tagebau/Gewässer

Datengrundlage: BK50 BW (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau BW)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

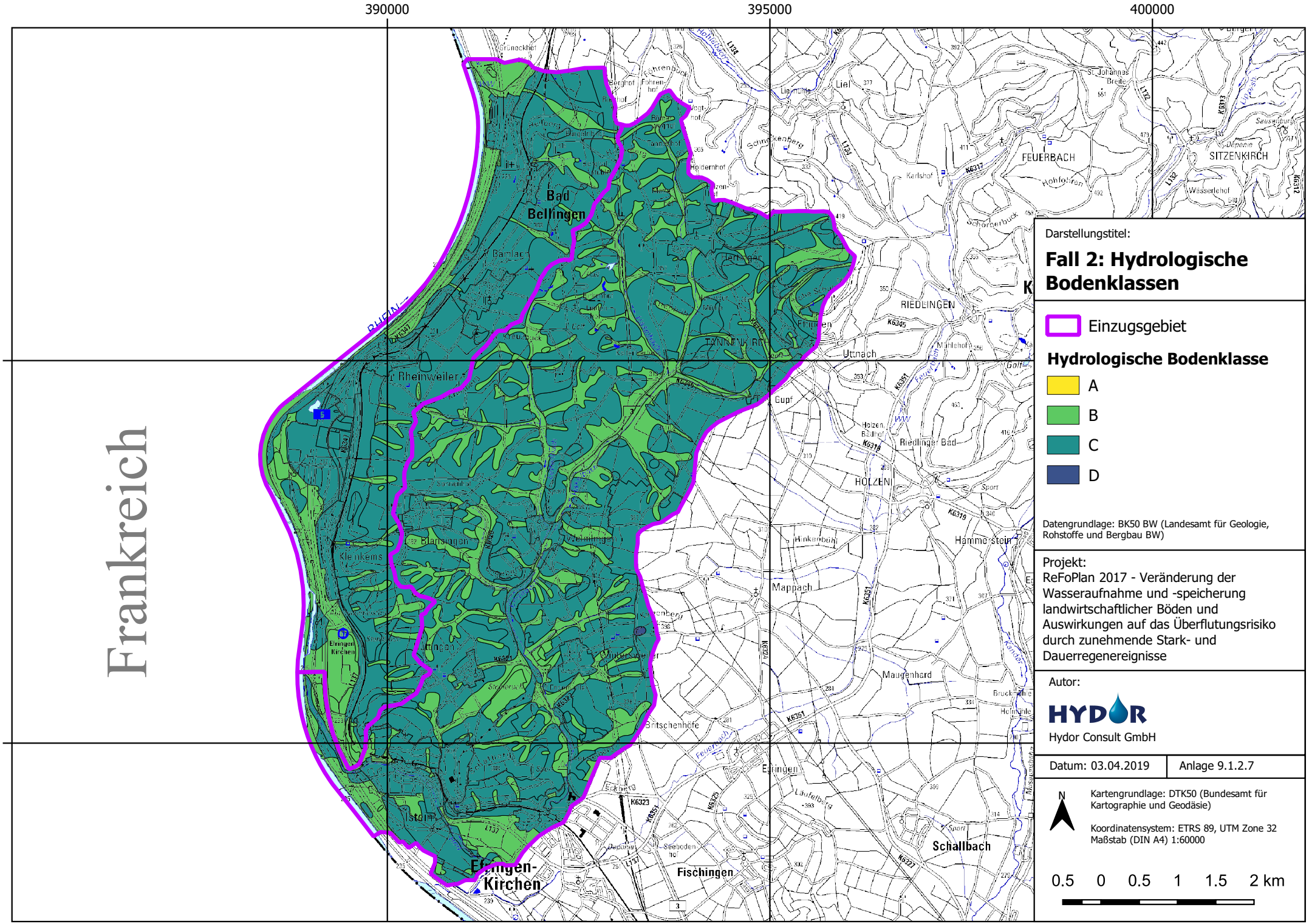
Datum: 03.04.2019	Anlage 9.1.2.6

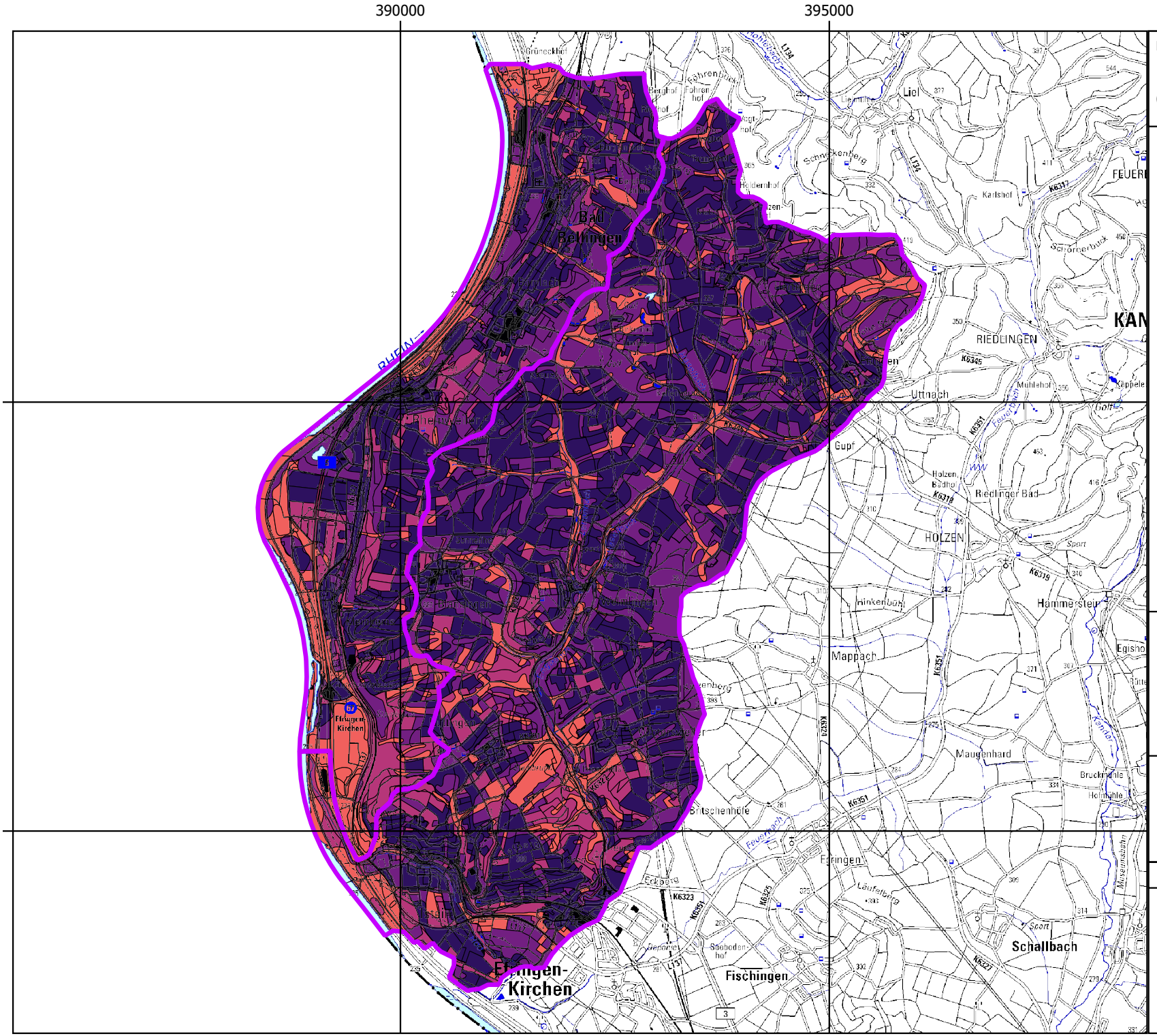
N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


390000
395000
400000
5285000
5280000
Frankreich
Bad Bellingen
Rheinweiler
Efringen-Kirchen
Fischingen
Schallbach
RIEDEINGEN
HOLZEN
FEUERBACH
SITZENKIRCH
Darstellungstitel:
Fall 2: Hydrologische Bodenklassen
Einzugsgebiet
Hydrologische Bodenklasse
A
B
C
D
Datengrundlage: BK50 BW (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau BW)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.2.7
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:60000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 2: Verteilung der Curve-Numbers

Einzugsgebiete

Bodenfeuchteabhängige Curve-Number [-]

- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

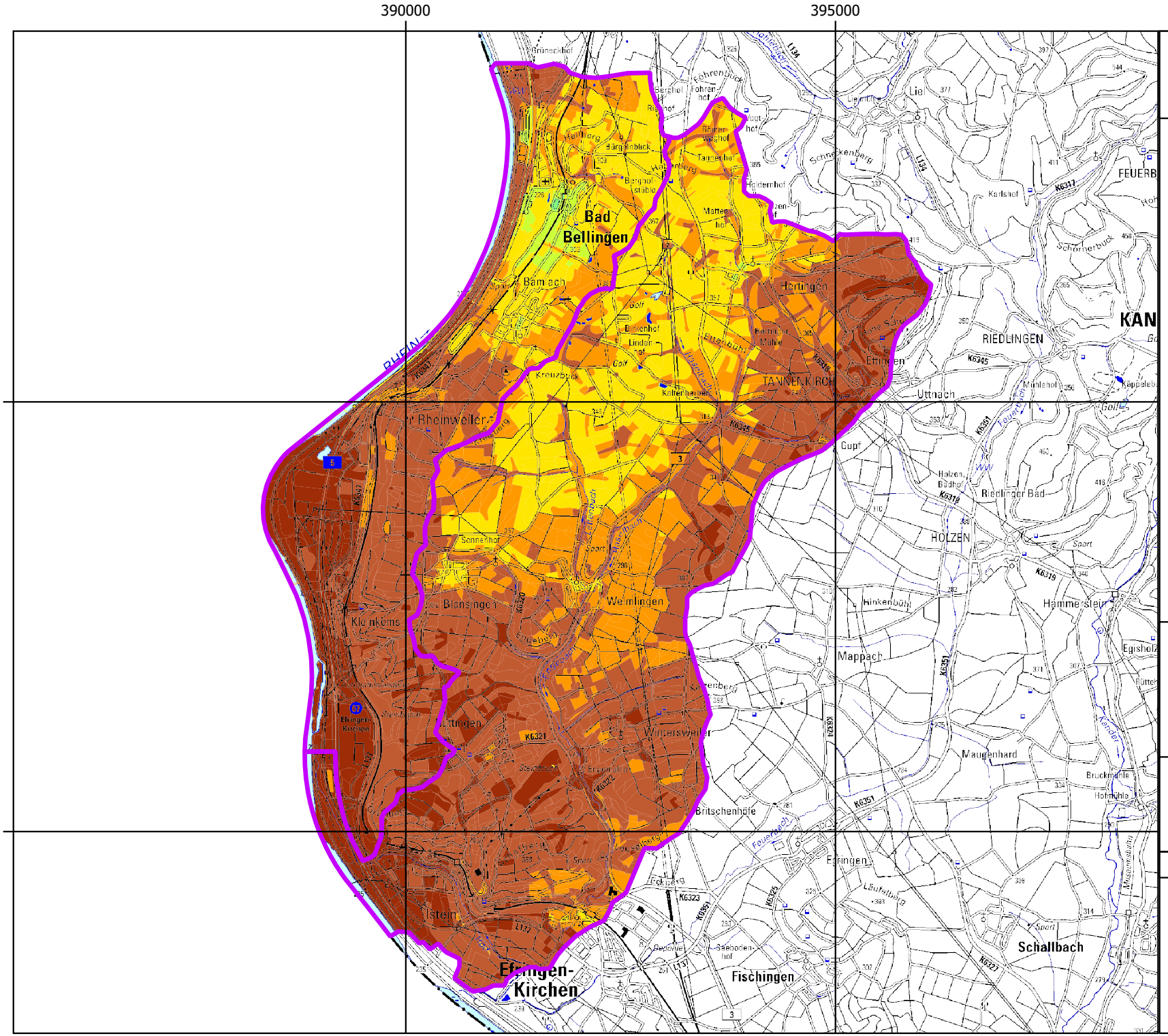
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.2.8

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4): 1:60000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 2: Kumulierte Abflusshöhen

Einzugsgebiete

Direktabfluss [mm/dt] zum Extremereignis 07.06.2015 - 20 bis 21 Uhr

- 0 - 1
- 1 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 80
- 80 - 100
- 100 - 120
- 120 - 140
- >140

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

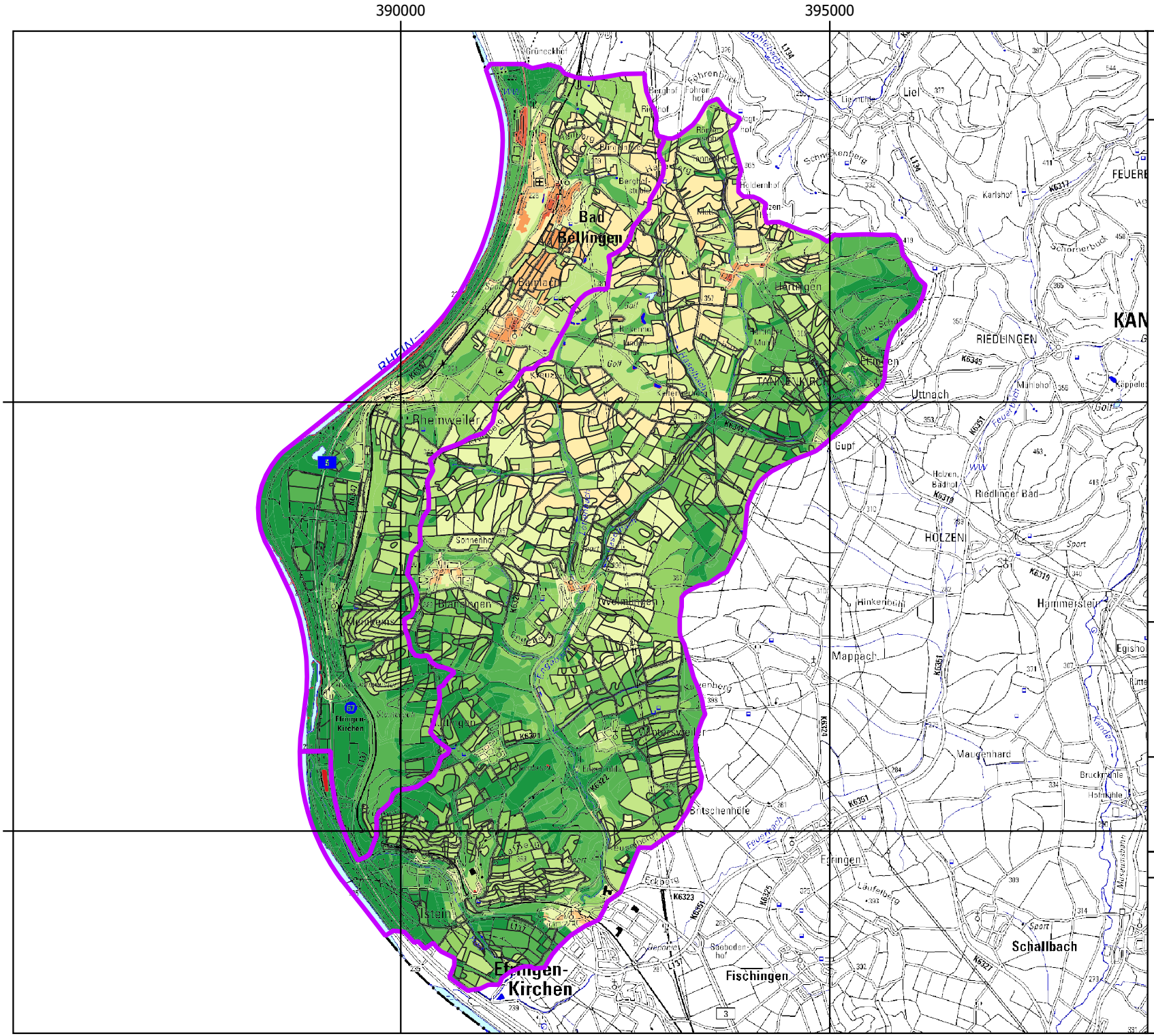
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.2.9

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:60000

0 1 2 km



Darstellungstitel:

Fall 2: Abflussbeiwerte

Einzugsgebiete

Ackerland

Beiwert Direktabfluss [%] zum Extremereignis 07.06.2015 - 20 bis 21 Uhr

- < 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- > 90

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

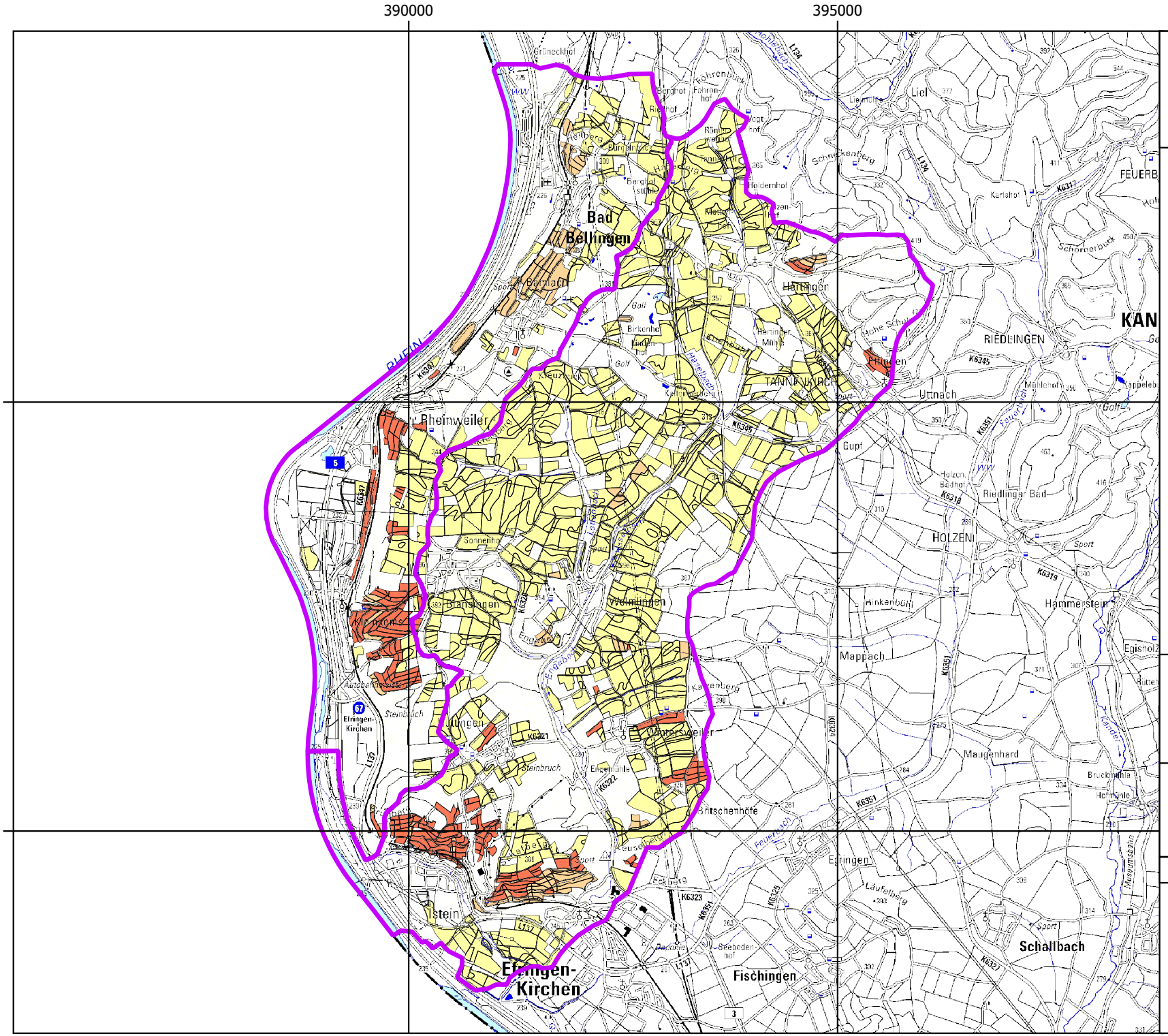
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.2.10

N

Kartengrundlage: TK 200
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten bildlich wiedergegeben
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32

Maßstab (DIN A4) 1:75000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


390000
395000
5285000
5280000
Bad Bellingen
Rheinweiler
Efringen-Kirchen
Fischingen
Schallbach
RIEDLINGEN
HOLZEN
Hammerstein
Mappach
Maugenhard
Egringen
Istein
Blansingen
Huttingen
Britschenhöfe
Utnach
Liel
Darstellungstitel:
Fall 2: Variante 1 - Zwischenbegrünung (Rebflächen)
Einzugsgebiet
Ackerland
Verminderung der Abflusshöhe [%]
< 2
2 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 50
> 50
Erläuterung:
Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0
Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung
Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.2.11
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km

9.1.3 Fall 3: Simbach

9.1.3.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell

9.1.3.2 Hangneigung

9.1.3.3 Niederschlagsverteilung

9.1.3.4 Vorfeuchteverhältnisse

9.1.3.5 Landnutzung

9.1.3.6 Bodenarten ÜBK25

9.1.3.7 Hydrologische Bodenklassen

9.1.3.8 Verteilung der Curve-Numbers

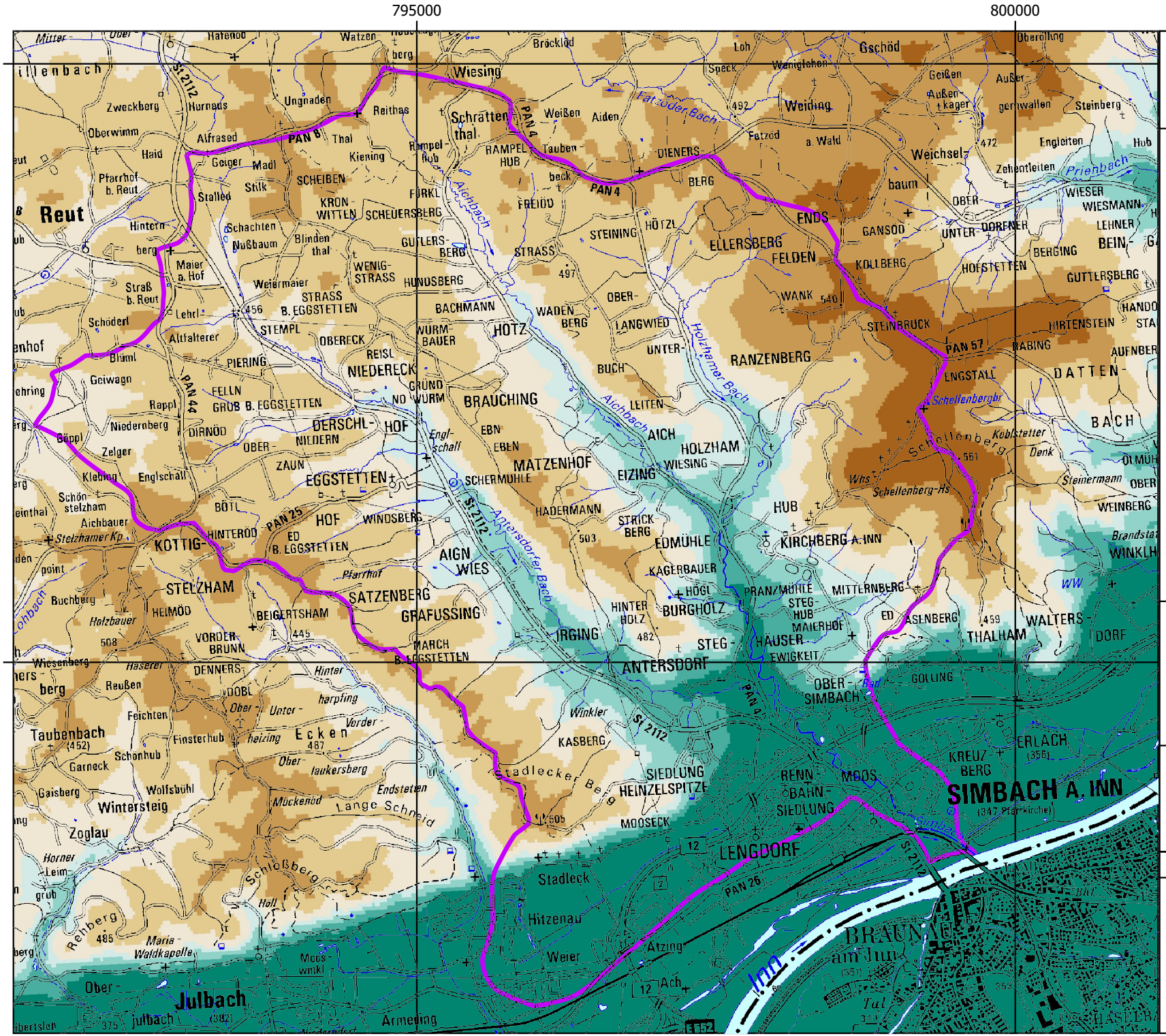
9.1.3.9 Kumulierte Abflusshöhen

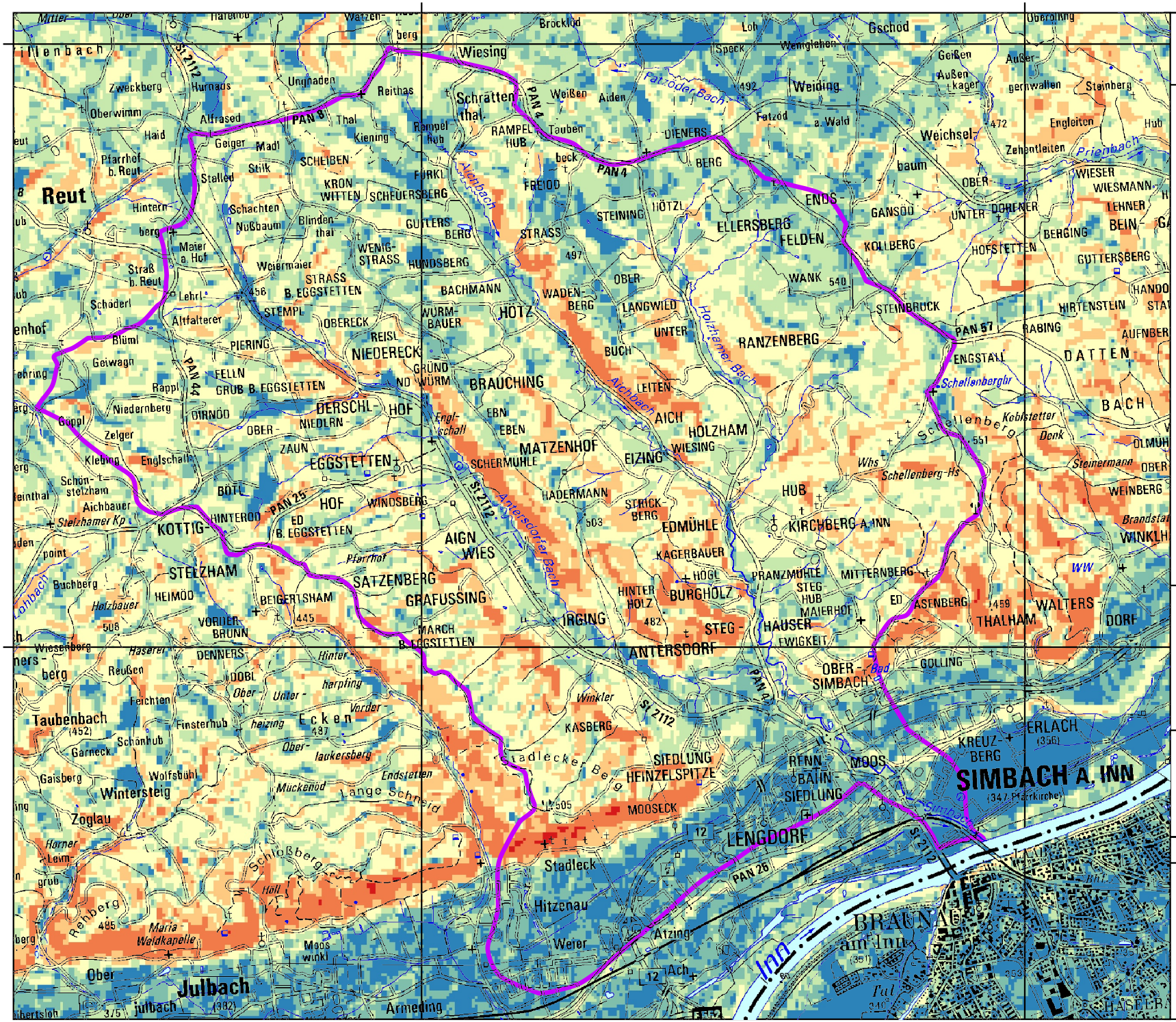
9.1.3.10 Abflussbeiwerte

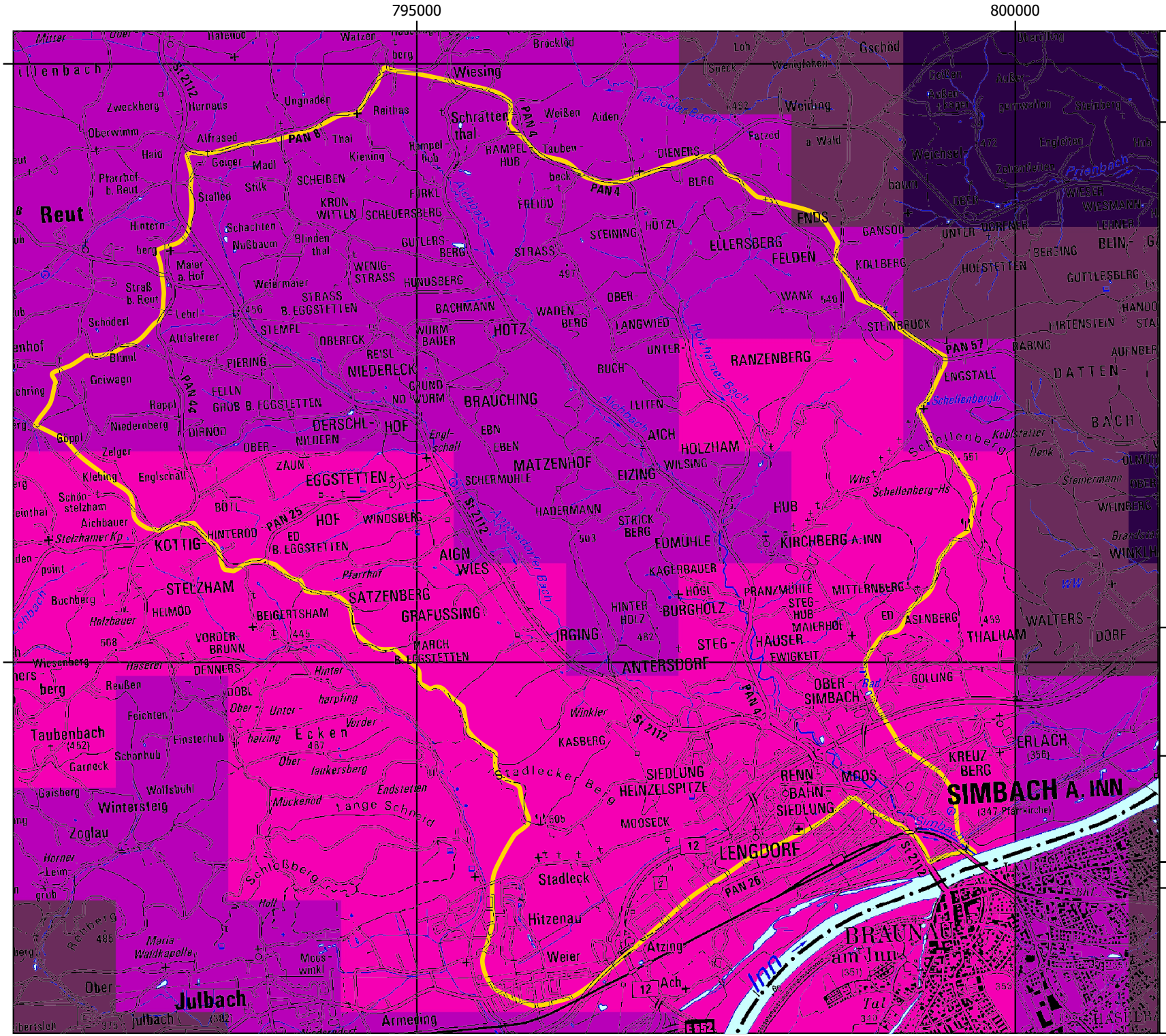
9.1.3.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung

9.1.3.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung

9.1.3.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat


795000
800000
5360000
5355000
Reut
Wiesing
Schratten thal
Weiding
Weichselbaum
Ellersberg
Felden
Ends
Steinbruck
Ranzenberg
Hotz
Brauching
Matzenhof
Eggstetten
Eizing
Holzham
Aich
Kirchberg a. Inn
Edmühle
Burgholz
Irging
Antersdorf
Steg-Häuser
Oberimsbach
Thalham
Waltersdorf
Stelzham
Kottig-Hof
Satzenberg
Grafussing
Aign Wies
Niedereck
Derschl-Hof
Pierling
Langwied
Ranzenberg
Datten-bach
Taubenbach
Wintersteig
Zoglau
Julbach
Ecken
Stadleck
Hitzenau
Lengdorf
Simbach a. Inn
Braunau am Inn
Inn
Aichbach
Holzhamer Bach
Antersdorfer Bach
Stadlecker Berg
Schellenberg
Prienbach
St 2112
PAN 4
PAN 8
PAN 44
PAN 25
PAN 57
PAN 26
Darstellungstitel:
Fall 3: Übersichtskarte und digitales Geländemodell
Einzugsgebiet
Geländehöhe [m NN]
< 380
380 - 400
400 - 420
420 - 440
440 - 470
470 - 500
500 - 530
530 - 580
Datengrundlage: EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.3.1
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000
500 0 500 1000 m


795000
800000
5360000
5355000
Reut
Wiesing
Schratten thal
Weiding
Weichsel
Patzoder Bach
Aichbach
Holzhamer Bach
Prienbach
ENDS-
ELLERSBERG
FELDEN
RANZENBERG
HÖTZ
BRAUCHING
NIEDERECK
MATZENHOF
EGGSTETTEN
AICH
HOLZHAM
EIZING
KIRCHBERG A. INN
EDMÜHLE
KOTTIG-
STELZHAM
SATZENBERG
GRAFUSSING
AIGN
WIES
IRGING
ANTERSDORF
BURGHOLZ
OBER-SIMBACH
SIMBACH A. INN
KREUZ-BERG
LENGDORF
SIEDLUNG HEINZELSPITZE
Stadlecker Berg
Stadleck
Hitzenau
Julbach
Armening
Taubenbach
Wintersteig
Zoglau
Ecken
Inn
BRAUNAU am Inn
St 2112
PAN 4
PAN 8
PAN 44
PAN 25
PAN 57
PAN 2
Darstellungstitel:
Fall 3: Hangneigung
Einzugsgebiet
Hangneigung [%]
0 - 2
2 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 60
60 - 80
Datengrundlage: EU-DEM v1.1 (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.3.2
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000
500 0 500 1000 m



Darstellungstitel:

Fall 3: Niederschlagsverteilung

Einzugsgebiet

Niederschlag [mm] zum Extremereignis 31.05.2016 - 6 Uhr bis 01.06.2016 - 17 Uhr

- 120 - 135
- 135 - 150
- 150 - 165
- 165 - 185

Datengrundlage: Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR
Hydor Consult GmbH

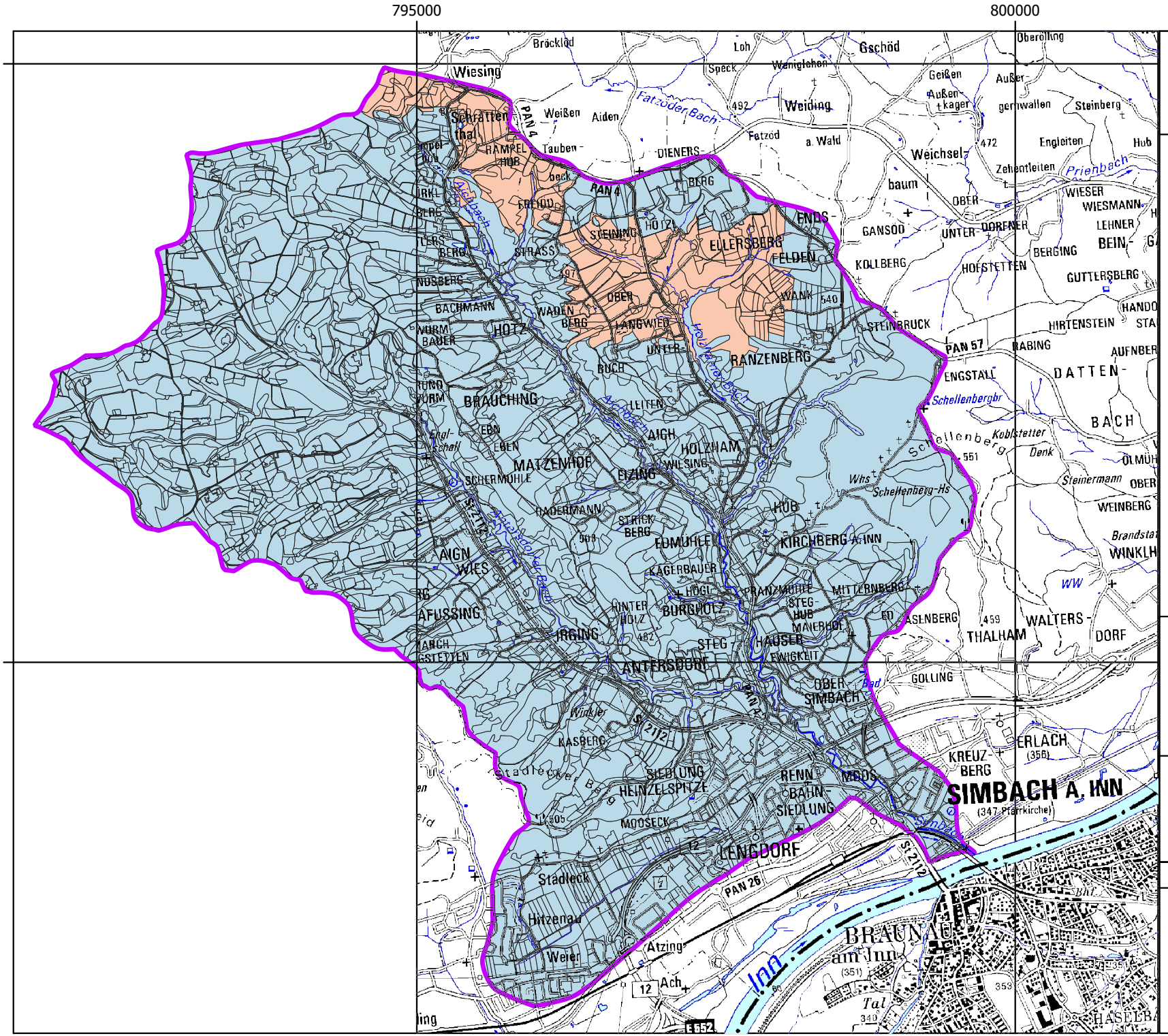
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.3.3

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:50000

500 0 500 1000 m



Darstellungstitel:

Fall 3: Vorfeuchteverhältnisse

Einzugsgebiet

Differenz der Vorregenindizes VN akt - VN mit [mm]

- -30 - -20
- -20 - -10
- -10 - 0
- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

Datengrundlage: Tageswerte aus historischen stündlichen RADOLAN-Rastern der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

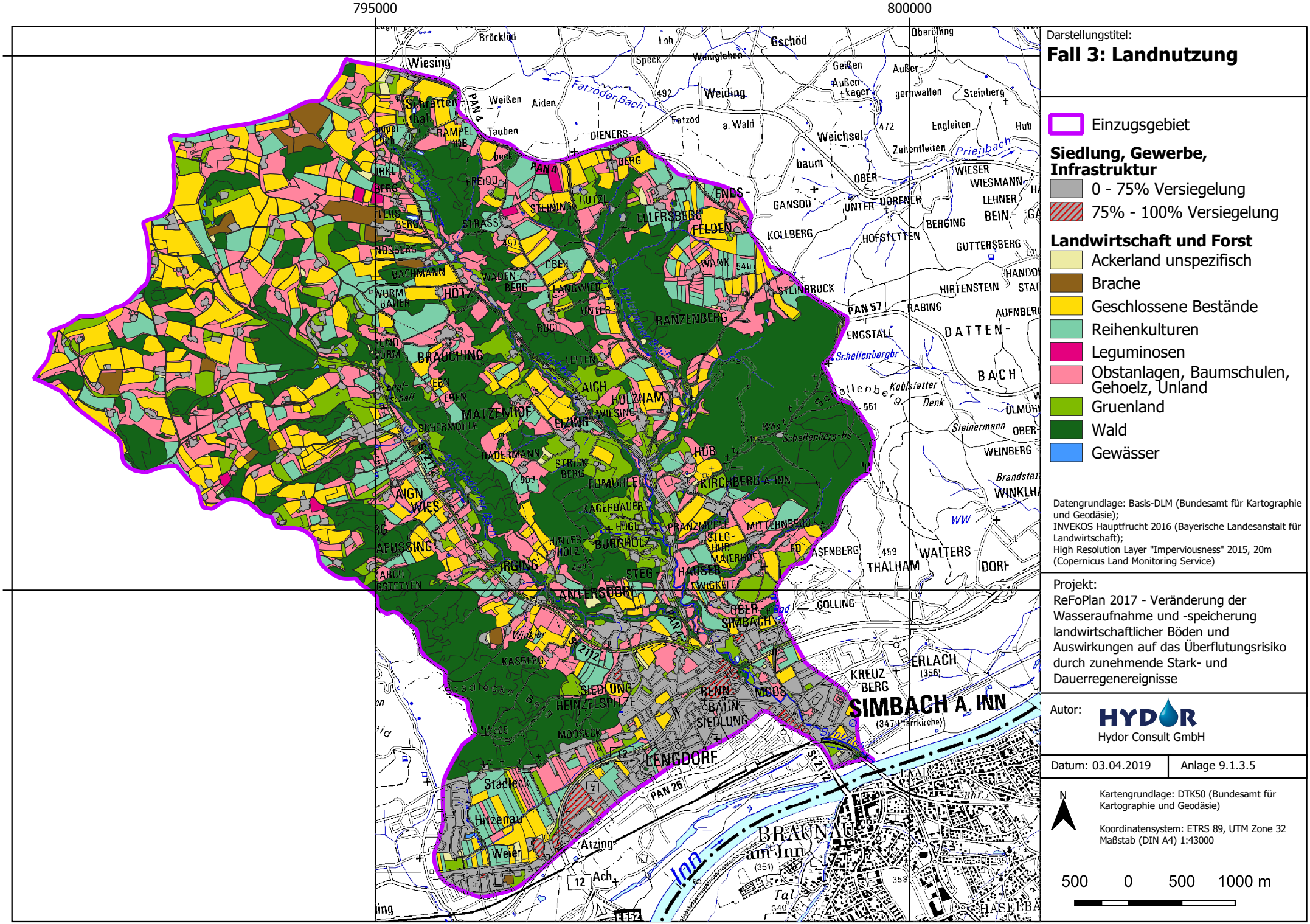
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.3.4

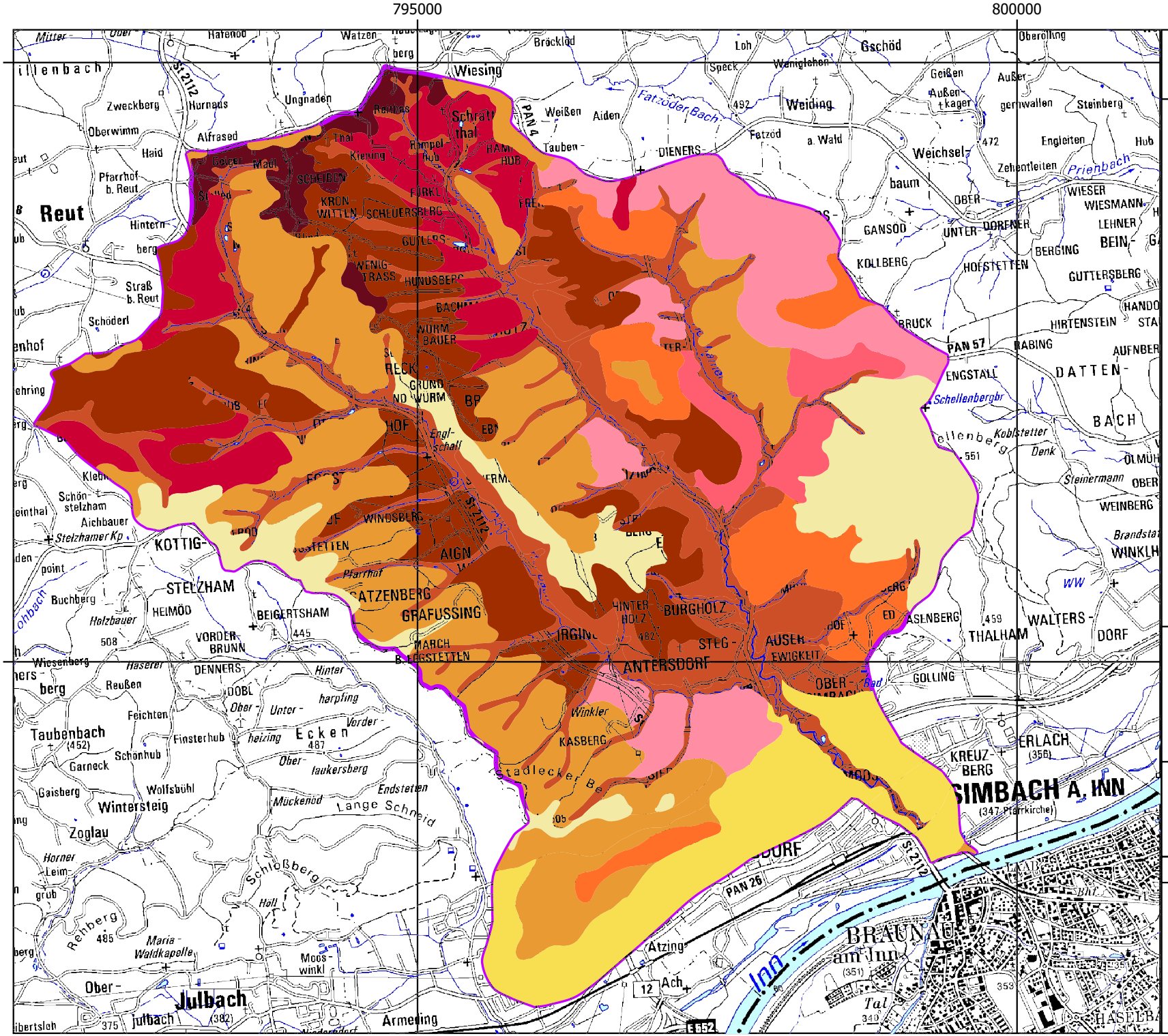
N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:50000

500 0 500 1000 m


795000
800000
5360000
5355000
Darstellungstitel:
Fall 3: Landnutzung
Einzugsgebiet
Siedlung, Gewerbe, Infrastruktur
0 - 75% Versiegelung
75% - 100% Versiegelung
Landwirtschaft und Forst
Ackerland unspezifisch
Brache
Geschlossene Bestände
Reihenkulturen
Leguminosen
Obstanlagen, Baumschulen, Gehoelz, Unland
Gruenland
Wald
Gewässer
Datengrundlage: Basis-DLM (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie);
INVEKOS Hauptfrucht 2016 (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft);
High Resolution Layer "Imperviousness" 2015, 20m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.3.5
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000
500 0 500 1000 m



Darstellungstitel:

Fall 3: Bodenarten ÜBK25

Bodenarten

- Einzugsgebiet
- Kiessand-Sandkies
- Lehm über Sand-/Schluffkies
- Lehmsand-Sandlehm
- Schluff-Lehm
- Lehm
- Lehm über Lehm-Tonschluff
- Sandlehm-Schluffton
- Lehm-Schluffton
- Lehm-Tonschluff
- Lehm über Ton

Datengrundlage: ÜBK25 BY (Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH

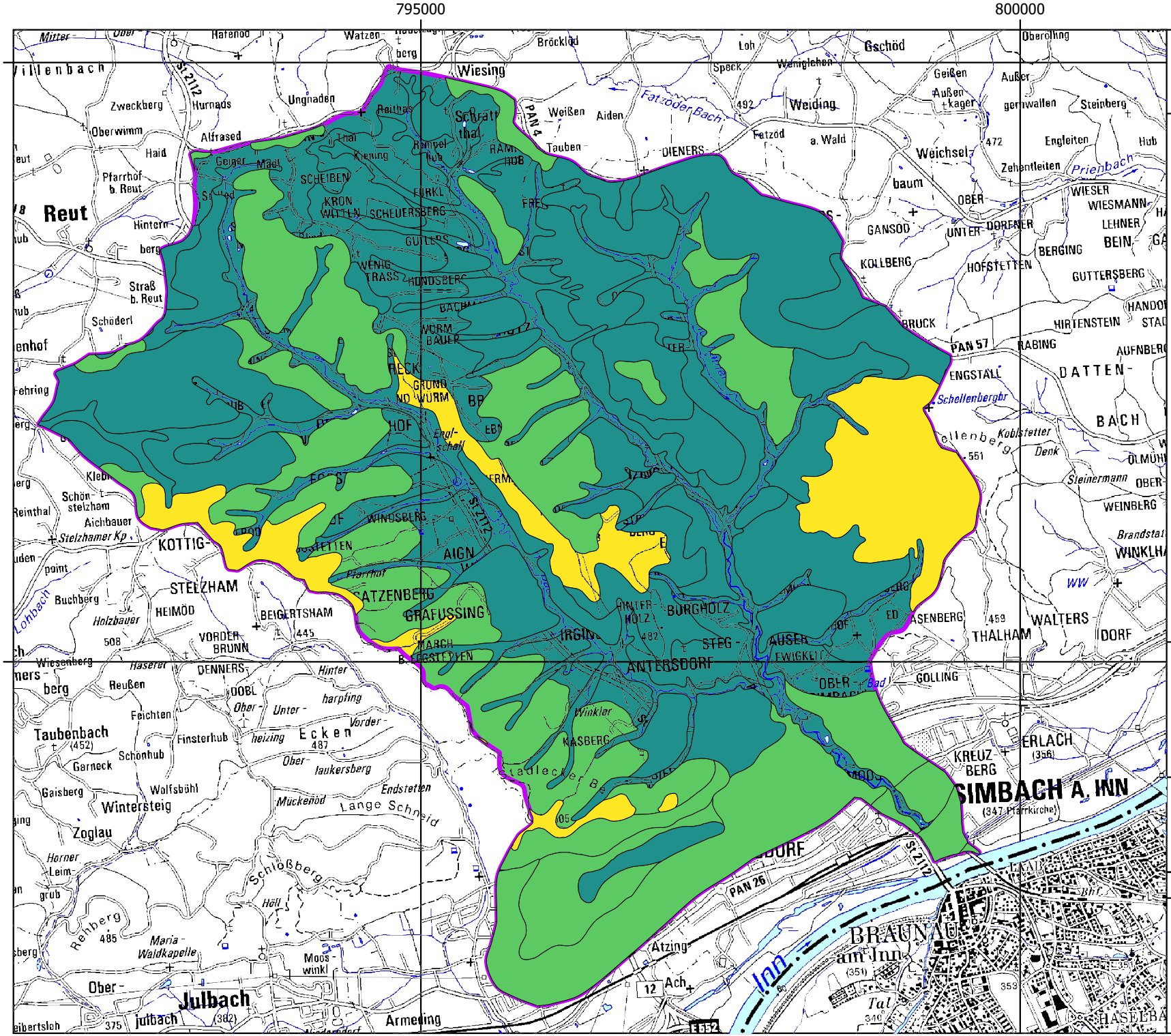
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.3.6

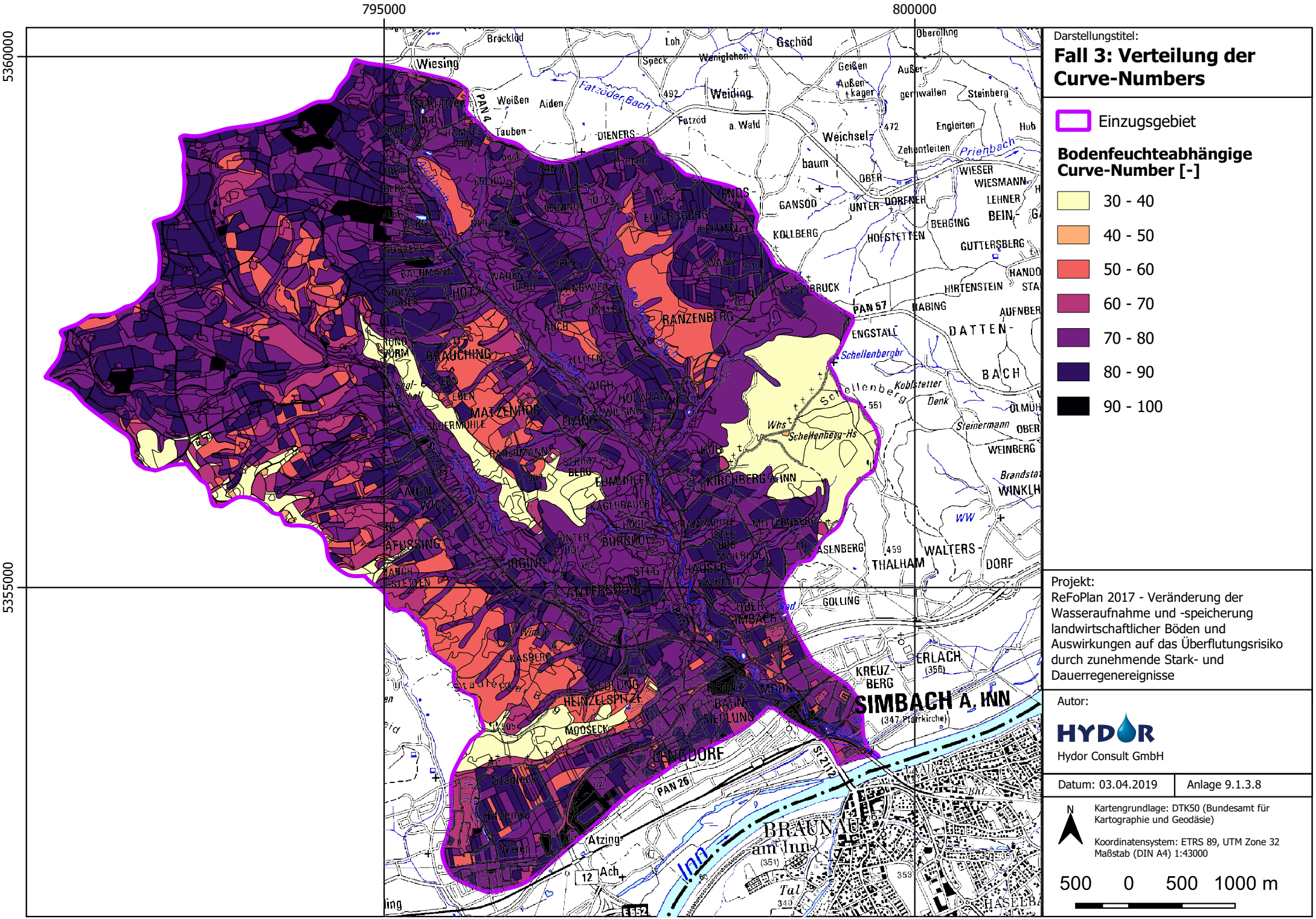
N

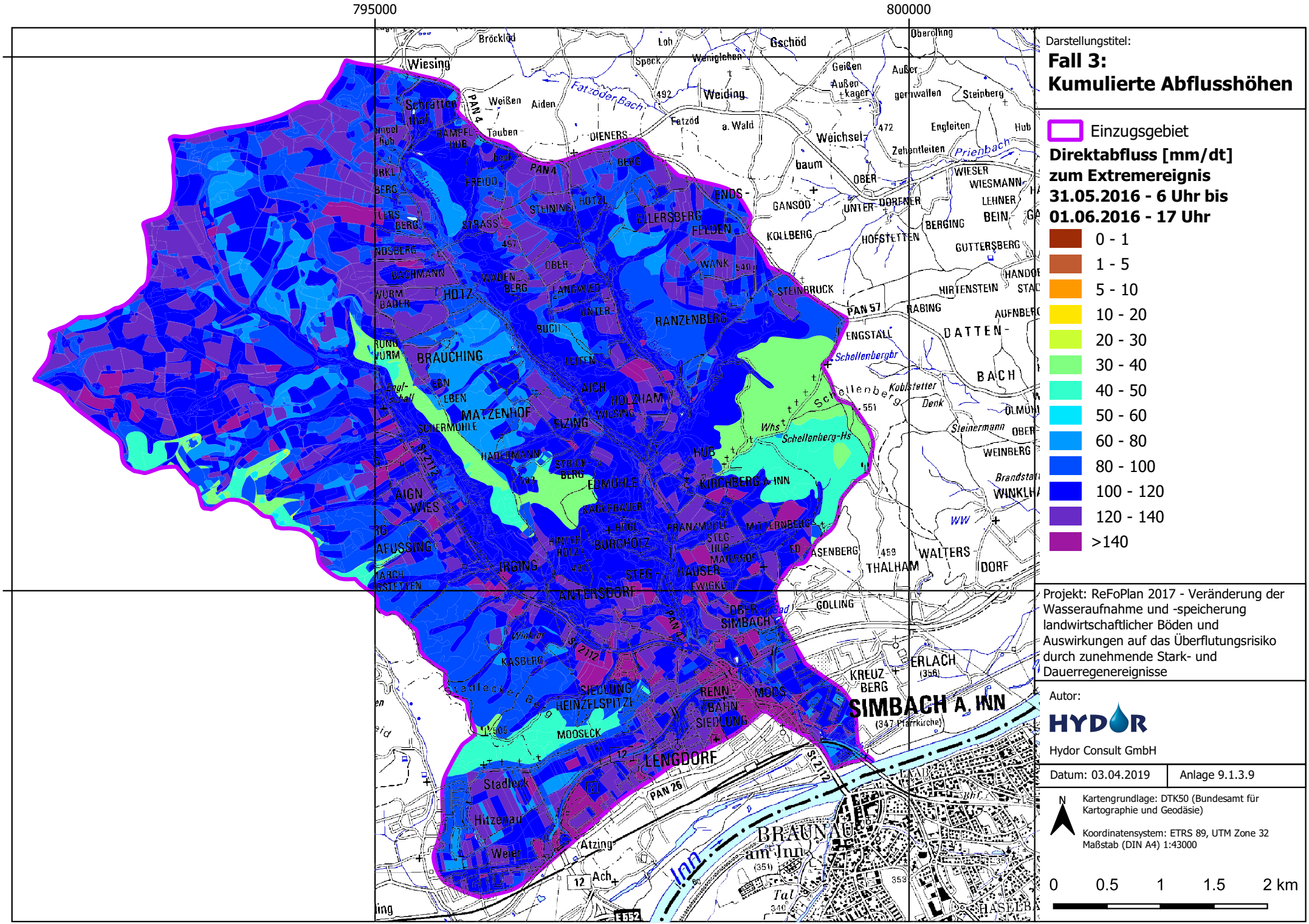
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

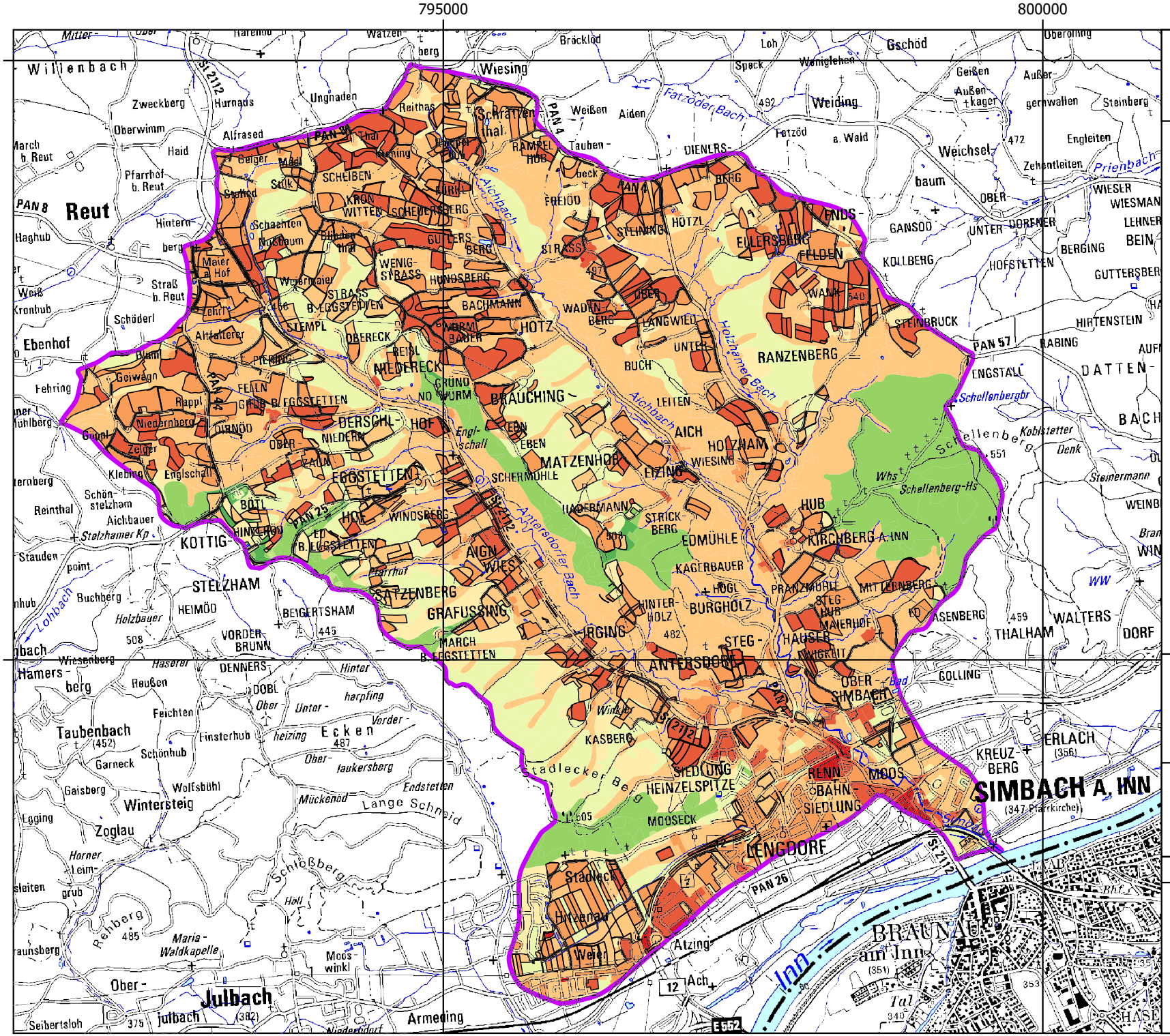
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000

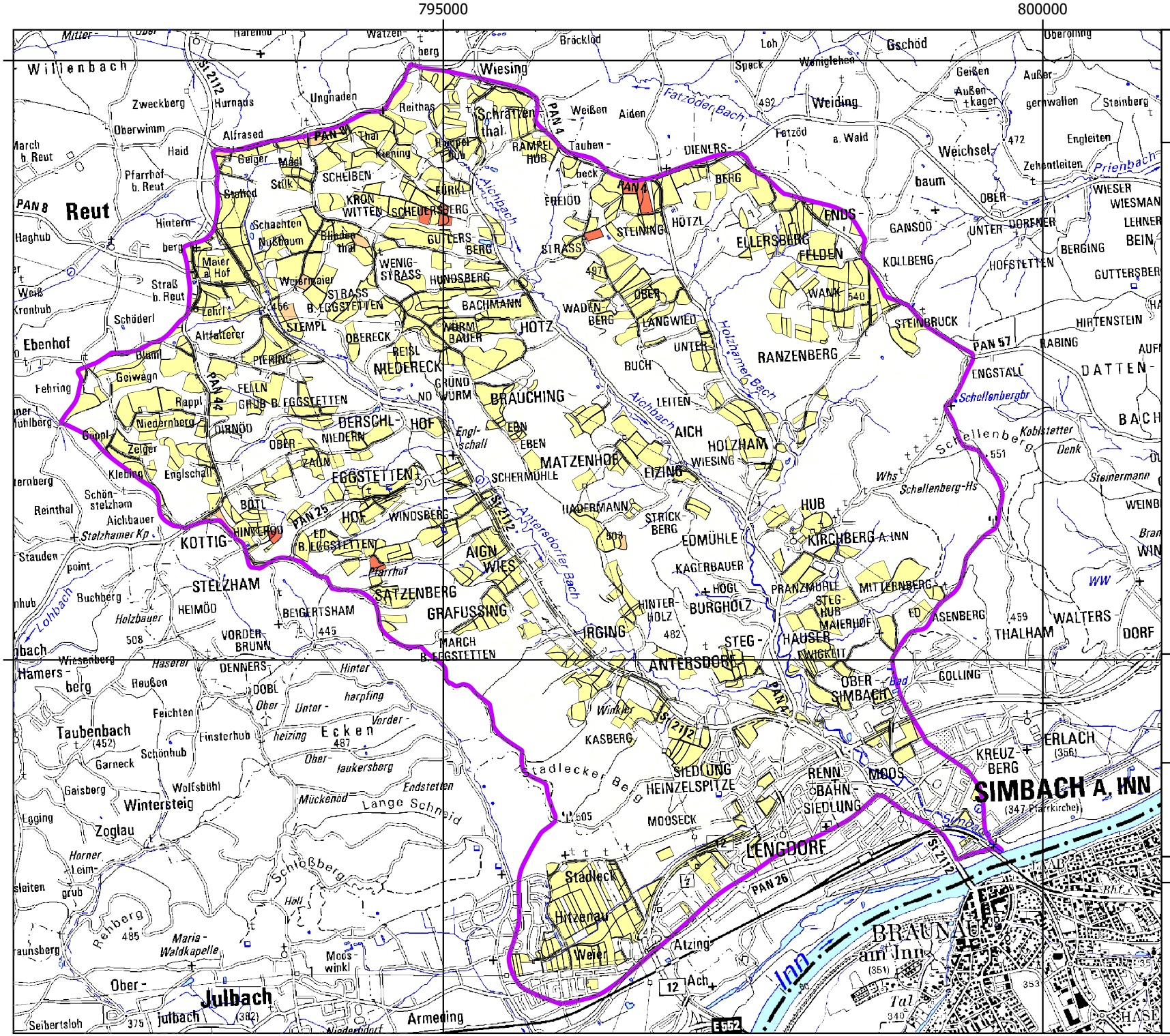
500 0 500 1000 m

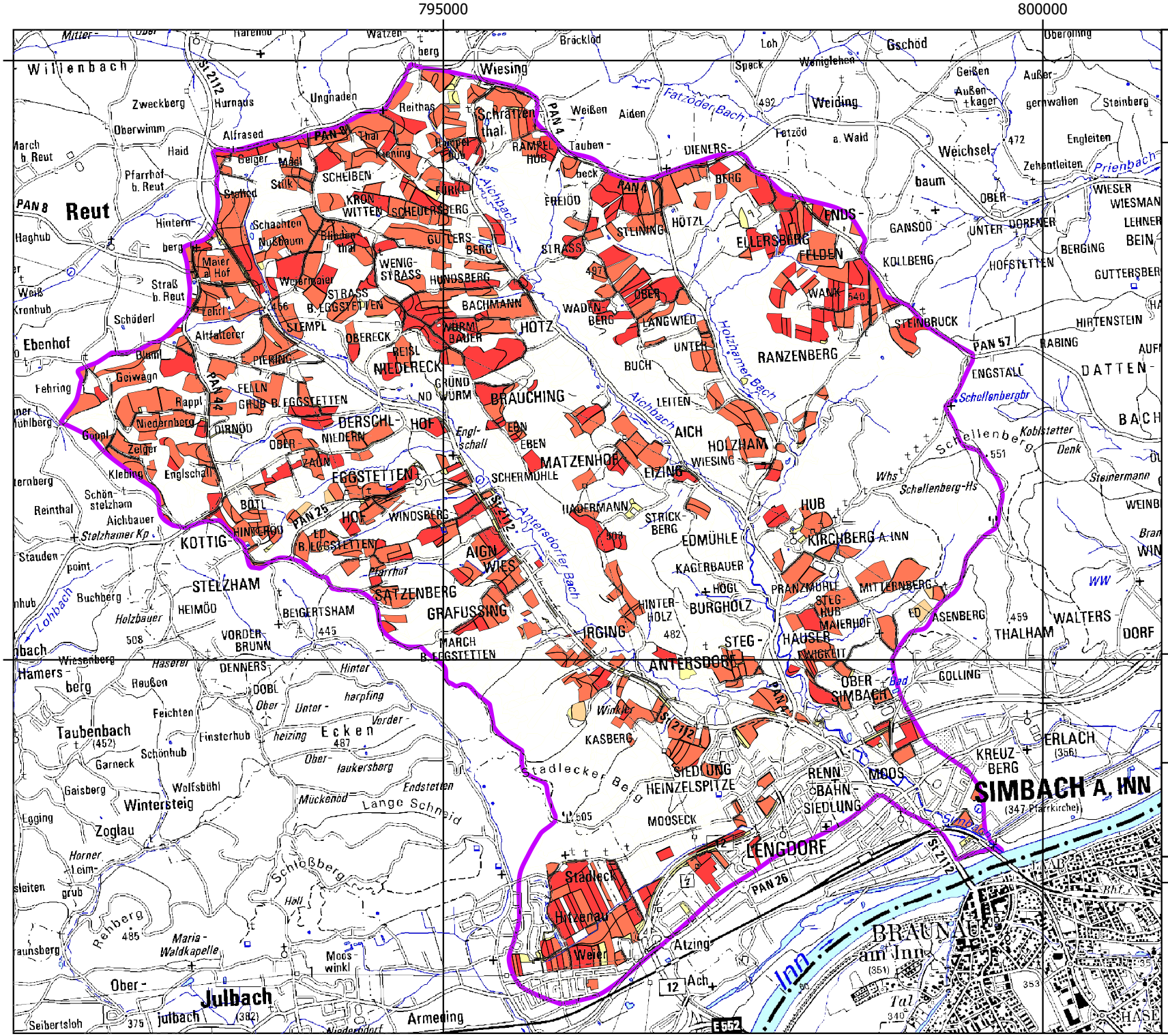

795000
800000
5360000
5355000
Wiesing
Reut
Weiding
Weichselbaum
Gschöd
Fatzoder Bach
Prienbach
Ungnaden
Alfrased
Zweckberg
Hurnads
Oberwimm
Pfarrhof b. Reut
Straß b. Reut
Schöderl
Hintern-berg
SCHEIBEN
KRON WITTEN
SCHEUERSBERG
FURKL
GUTLERS
WENG
TRASS
HUNDSBERG
WORM BAUER
HOF
GRUNDWURM
WINDSBERG
KOTTIG-AIGN
STELZHAM
HEIMÖD
GRAFUSSING
BURGHOLZ
ANTERSDORF
IRGIN
STEG
AUSER
Stelzhamer Kp
Lohbach
Buchberg
Holzbauer
Schönstelzham
Aichbauer
Reinthal
Taubenbach
Garneck
Schönhub
Finsterhub
Gaisberg
Wintersteig
Wolfsbühl
Zoglau
Ecken
Mückenöd
Lange Schneid
Endstetten
Schloßberg
Julbach
Armeding
Maria Waldkapelle
Moos-winkl
Atzing
Ach
Inn
BRAUNAU am Inn
SIMBACH A. INN
(347 Pfarrkirche)
KREUZBERG
ERLACH
WALTERS-DORF
THALHAM
GOLLING
ENGSTALL
DATTEN-BACH
HOFSTETTEN
GUTTERSBERG
WIESER
WIESMANN
LEHNER
BEIN
BERGING
GANSOD
KOLLBERG
BRUCK
HIRTENSTEIN
RABING
WEINBERG
OLMÜH
WINKLH
Schellenbergbr
Kobistetter Denk
Steinermann
Brandstatt
Fetzöd
a. Wald
Engleiten
Zehentleiten
Steinberg
Außerkager
Geißen
Außergernwallen
Oberolling
Loh
Speck
Wenigleiten
Bröcklöd
Watzenberg
Hafenod
Mitter
Ober
Villenbach
St 2112
St 2117
PAN 4
PAN 57
PAN 26
Tauben
Aiden
Weißen
Rampel hub
Schratt thal
Reithas
Thal
Kleming
Geiger
Mädl
Haid
Hub
Baum
Ober
Unter
Dorfner
Berg
Bein
Ga
Hando
Stal
Aufnberg
Ha
Schön-stelzham
Kleb
Point
Reißen
Haseder
Hinter
Ober-
Unter-
Vorder-
harpfing
heizing
laukersberg
Feichten
Ecken
487
Taubenbach
(452)
Schönhub
Garneck
Finsterhub
Gaisberg
Wintersteig
Wolfsbühl
Zoglau
Horner
Leim-grub
Reinberg
485
Höll
Moos-winkl
Julbach
(382)
375
Armeding
Ach
12
Tal
340
Inn
BRAUNAU am Inn
(351)
353
HASELBA
Wiesenberg
Denners
Doßl
Ober-
Unter-
Vorder-
Hinter
Reißen
Feichten
Finsterhub
Schönhub
Garneck
Gaisberg
Wintersteig
Wolfsbühl
Zoglau
Horner
Leim-grub
Reinberg
485
Maria Waldkapelle


795000
800000
5360000
5355000
Darstellungstitel:
Fall 3: Verteilung der Curve-Numbers
Einzugsgebiet
Bodenfeuchteabhängige Curve-Number [-]
30 - 40
40 - 50
50 - 60
60 - 70
70 - 80
80 - 90
90 - 100
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.3.8
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000
500 0 500 1000 m


795000
800000
5360000
5355000
Darstellungstitel:
Fall 3:
Kumulierte Abflusshöhen
Einzugsgebiet
Direktabfluss [mm/dt]
zum Extremereignis
31.05.2016 - 6 Uhr bis
01.06.2016 - 17 Uhr
0 - 1
1 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 40
40 - 50
50 - 60
60 - 80
80 - 100
100 - 120
120 - 140
>140
Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.3.9
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:43000
0
0.5
1
1.5
2 km
SIMBACH A. INN
BRAUNAU am Inn
Inn
Fatzoder Bach
Prienbach
Schellenbergbr
Schellenberg-Hs
Stadleck
Hitzenau
LENGDORF
ANTERSDORF
IRGING
BRAUCHING
RANZENBERG
ELLERSBERG
FELDEN
KIRCHBERG a. INN
THALHAM
WALTERS DORF
DATTEN-BACH
GOLLING
ERLACH
KREUZ BERG
SIEDLUNG HEINZELSPITZE
RENN-BAHN SIEDLUNG
MOOS
MOOSECK
KASBERG
Stadlecker Berg
PAN 4
PAN 57
PAN 26
St 2112
B 552


795000
800000
5360000
5355000
Reut
Ebenhof
Willenbach
Wiesing
Gschöd
Weiding
Weichselbaum
Prienbach
Fatzöder Bach
Aichbach
Holzhamer Bach
Antersdorfer Bach
Lohbach
Stadlecker Berg
Inn
Schellenberg
Steinberg
Ranzenberg
Eulersberg
Felden
Hötzl
Eggstetten
Matzenhof
Aich
Holzham
Eizing
Kirchberg a. Inn
Edmühle
Kagerbauer
Burgholz
Steg
Antersdorf
Irging
Grafussing
Satzenberg
Stelzham
Kottig
Braucking
Niedereck
Hötz
Langwied
Buch
Ranzenberg
Simbach a. Inn
Braunau am Inn
Julbach
Taubenbach
Wintersteig
Zoglau
Lengdorf
Stadleck
Hirzenau
Weier
Atzing
Ach
Armeding
Kreuzberg
Erlach
Moos
Siedlung
Heinzelspitze
Mooseck
Kasberg
Thalham
Walters
Dorf
Golling
Ober-Simbach
Mitterberg
Pranzmühle
Hub
Maierhof
Hauser
Bahnsiedlung
Renn
Gansöd
Kollberg
Steinbruck
Engstall
Rabing
Hofstetten
Gutternsberg
Hirtenstein
Datten
Bach
Weiser
Wiesmann
Lehner
Bein
Berging
Oberer
Unterer
Endsberg
Strass
Wenigstrass
Hundsberg
Bachmann
Wurmbauer
Obereck
Reibl
Grund
Feiln
Rappl
Niederndorf
Dirnöd
Dorfschlhof
Nilderm
Zaum
Eben
Engl-schall
Schermühle
Haidermann
Strickberg
Hinterholz
Hügl
Stegmühle
Maierhof
Hauser
Wiggrit
Hinterholz
Winkler
Siedlung
Renn
Bahnsiedlung
Moos
Heinzelspitze
Mooseck
Kasberg
Stadleck
Hirzenau
Weier
Atzing
Ach
Armeding
Julbach
Taubenbach
Wintersteig
Zoglau
Ecken
Lengdorf
Simbach a. Inn
Braunau am Inn
Inn
Schellenberg
Steinermann
Koblstetter
Denk
Whs Schellenberg-Hs
Ww
Bad
Golling
Thalham
Walters
Dorf
Asenberg
Mitterberg
Pranzmühle
Hub
Maierhof
Hauser
Wiggrit
Steg
Ober-Simbach
Kreuzberg
Erlach
Moos
Siedlung
Renn
Bahnsiedlung


795000
800000
5360000
5355000
Willenbach
Reut
Ebenhof
Wiesing
Gschöd
Weiding
Weichselbaum
Fatzöder Bach
Aichbach
Prienbach
Holzhamer Bach
Antersdorfer Bach
Lohbach
Stadlecker Berg
Schellenberg
Schellenbergbr
Simbach
Inn
RANZENBERG
BRAUCHING
EGGSTETTEN
MATZENHOF
AICH
HOLZHAM
EIZING
KIRCHBERG A. INN
STELZHAM
SATZENBERG
GRAFUSSING
IRGING
ANTERSDORF
OBER SIMBACH
SIMBACH A. INN
LENGDORF
BRAUNAU am Inn
Julbach
Taubenbach
Wintersteig
Zoglau
Ecken
Stadleck
Hirtenau
Weier
Atzing
Armeding
Ach
Tal
Thalham
Walters Dorf
Erlach
Kreuzberg
Moos
Renn-Bahn-Siedlung
Siedlung Heinzelspitze
Mooseck
Kasberg
Burgholz
Edmühle
Kagerbauer
Pranzmühle
Steg-Hausen
Schermühle
Haidermann
Strickberg
Hinterholz
Irgingleiten
Golling
Asenberg
Mitterberg
Hub
Maierhof
Steinbruck
Ellersberg
Felden
Endstetten
Gansöd
Kollberg
Hofstetten
Guttersberg
Hirtenstein
Rabing
Engstall
Datten
Bach
Schönstelzham
Aichbauer
Reinthal
Stauden
Buchberg
Holzbauer
Heimöd
Beigertsham
Vorderbrunn
Denners
Dobl
Raußen
Hamersberg
Wiesenberg
Haserer
Hinterharpfing
Oberharpfing
Unterharpfing
Vorderharpfing
Feichten
Einsterhub
Schönhub
Garneck
Gaisberg
Egging
Leimgrub
Horner
Rehberg
Maria-Waldkapelle
Schloßberg
Lange Schneid
Mückenöd
Oberlaukersberg
Unterlaukersberg
Moos-winkl
Seibertsloh
Julbach
Ober-julbach
Niederdorf
Hall
Holl
Winkler
Irgingleiten
Aichbauer Kp
Stelzhamer Kp
Pfarrhof
Schellenberg-Hs
Whs
Denk
Steinermann
Kobistetter
Ww
Bad
Ed
Bhf
Kirche
Schule
Friedhof
Sport
Ruine
Kapelle
Turm
Aussichtsturm
Wasserfall
Quelle
Brücke
Tunnel
Steinbruch
Grube
Deponie
Leitung
Grenze
Staatsgrenze
Bezirksgrenze
Gemeindegrenze
Landgrenze
Flughafen
Hubschrauberlandeplatz
Campingplatz
Schutzhütte
Aussichtspunkt
Höhle
Denkmal
Gedenkstein
Grabstein
Kreuz
Bildstock
Wegkreuz
Wegkapelle
Wegkapelle
Wegkapelle



Darstellungstitel:

Fall 3: Variante 2 - Mulchsaat ohne Saatbettbereitung

Einzugsgebiet

Ackerland

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 2
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

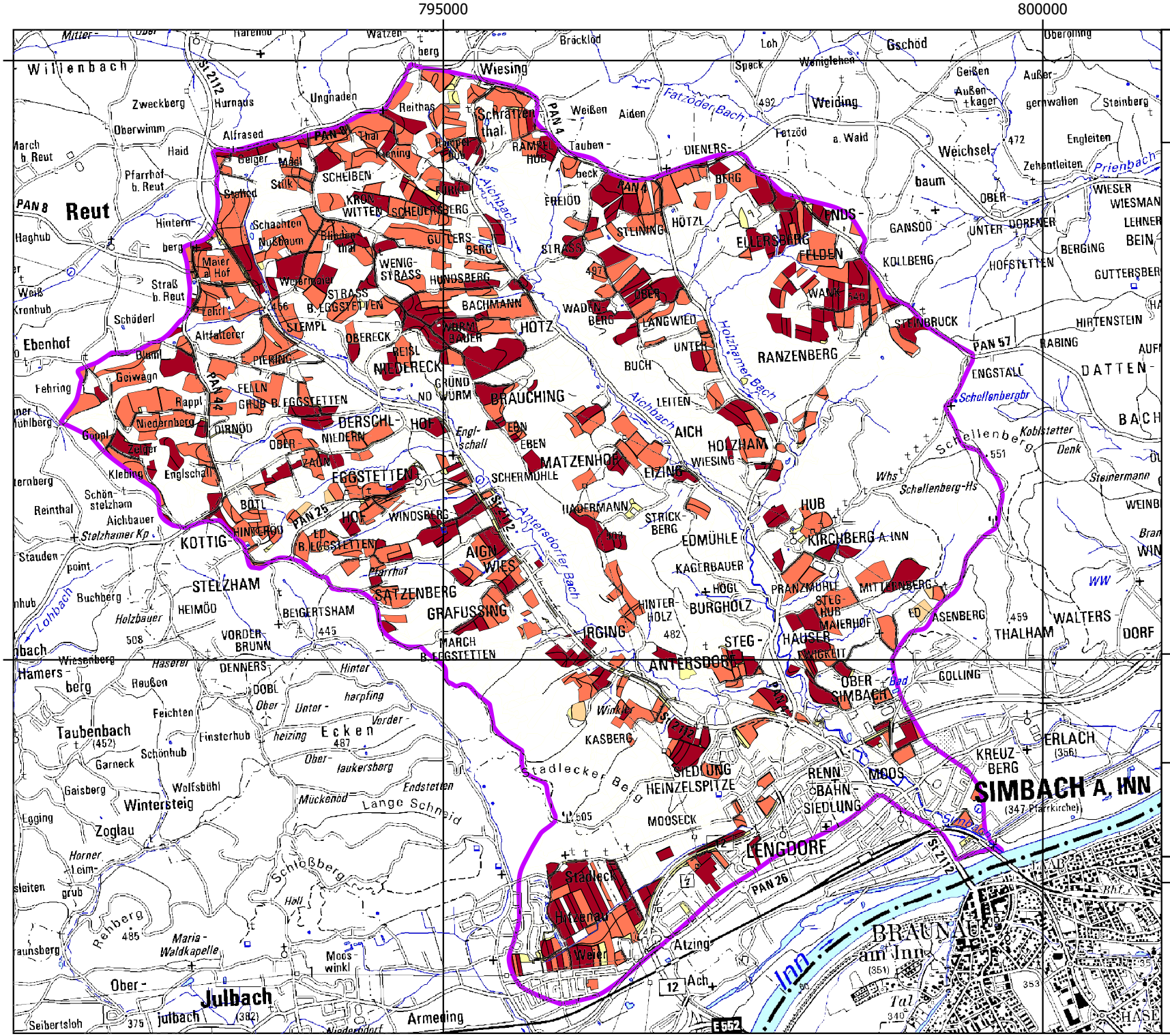
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.3.12

N

Kartengrundlage: DTK 50

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:1:43000

0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 3: Variante 3 - Langjähriges Direktsaat

Einzugsgebiet

Ackerland

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 3
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.3.13

N

Kartengrundlage: DTK 50

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:1:43000

0 0.5 1 1.5 2 km

9.1.4 Fall 4: Wolfsbach/Aichbach

9.1.4.1 Übersichtskarte und digitales Geländemodell

9.1.4.2 Hangneigung

9.1.4.3 Niederschlagsverteilung

9.1.4.4 Vorfeuchteverhältnisse

9.1.4.5 Landnutzung

9.1.4.6 Bodenarten ÜBK25

9.1.4.7 Hydrologische Bodenklassen

9.1.4.8 Verteilung der Curve-Numbers

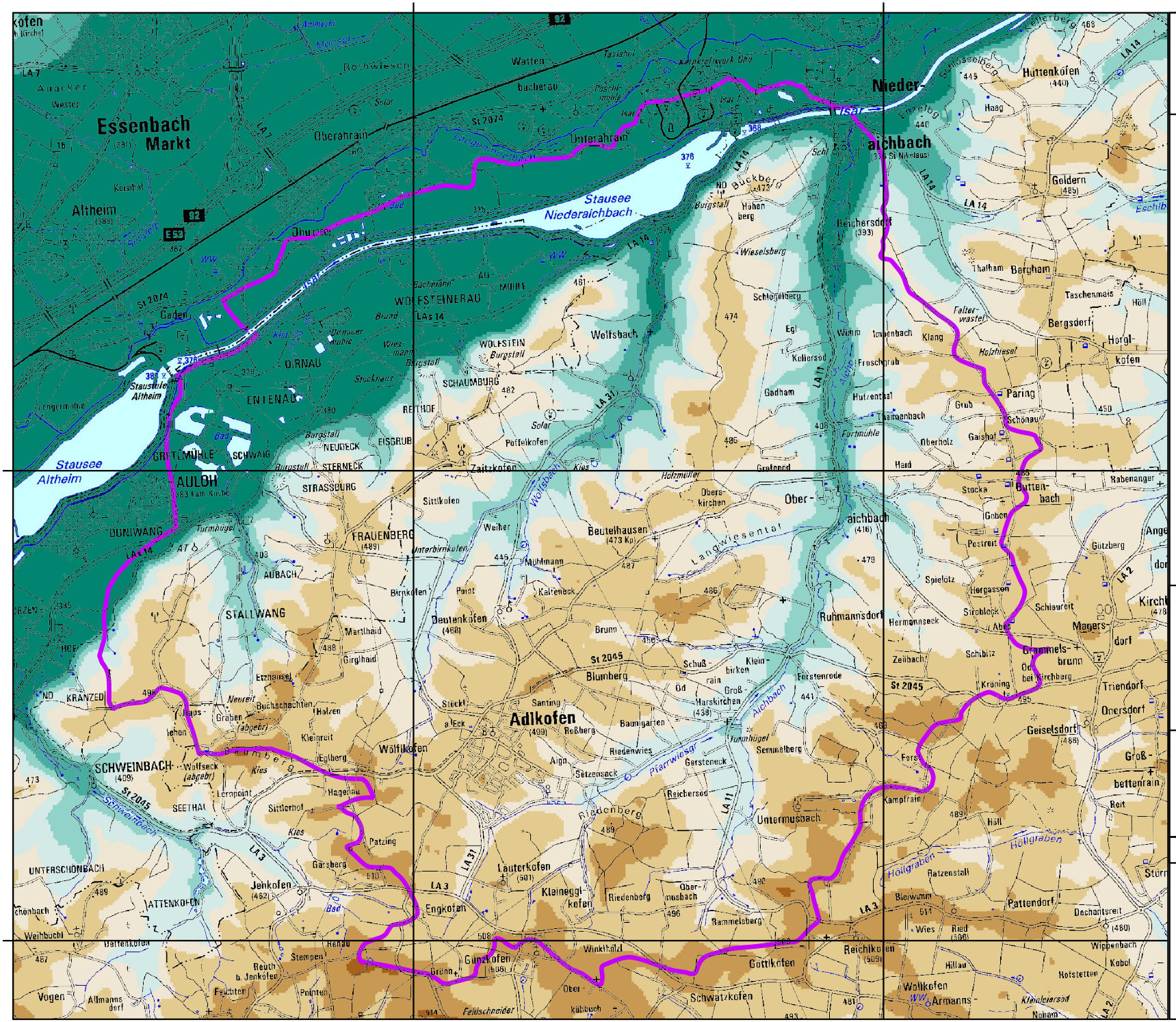
9.1.4.9 Kumulierte Abflusshöhen

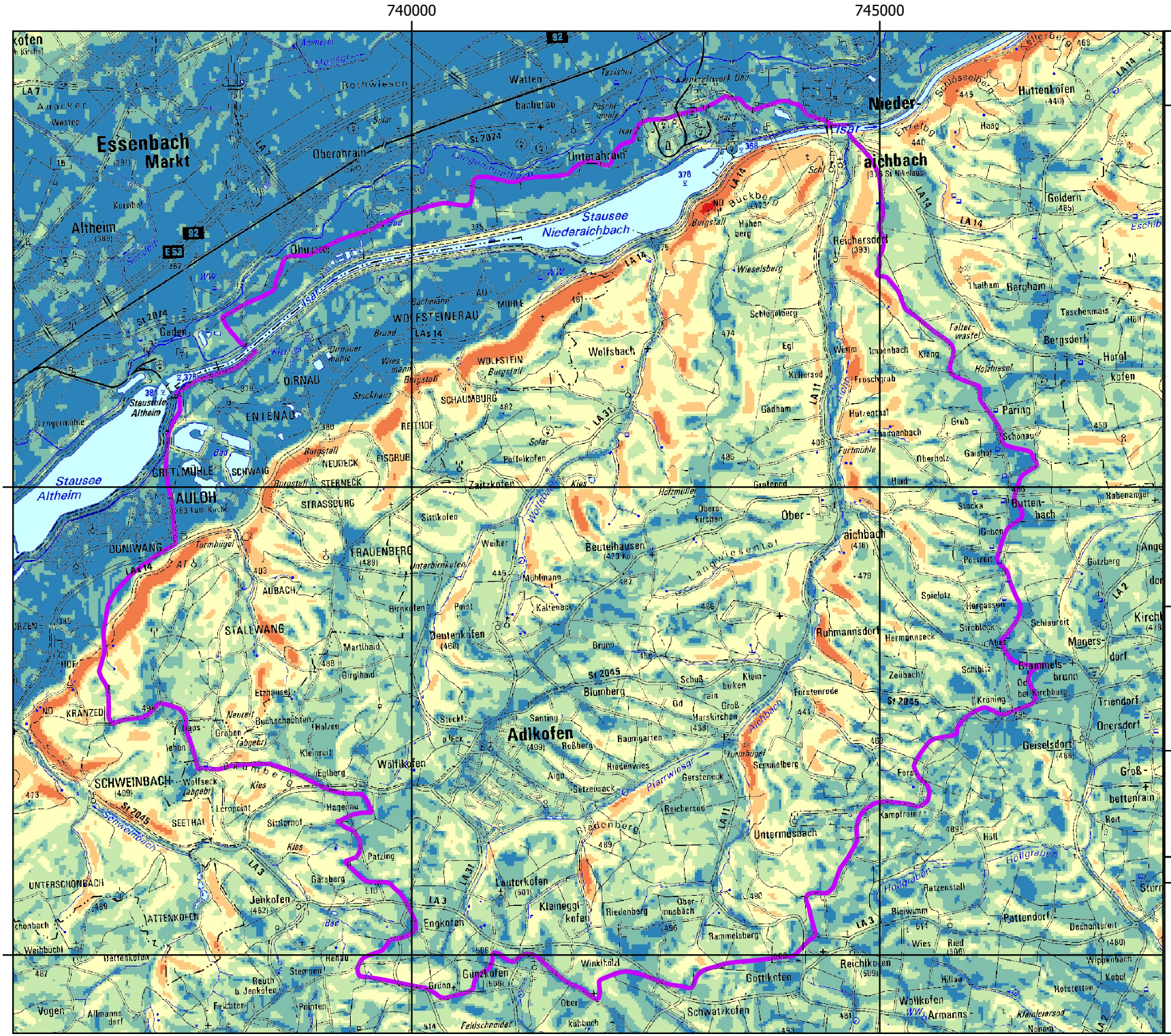
9.1.4.10 Abflussbeiwerte

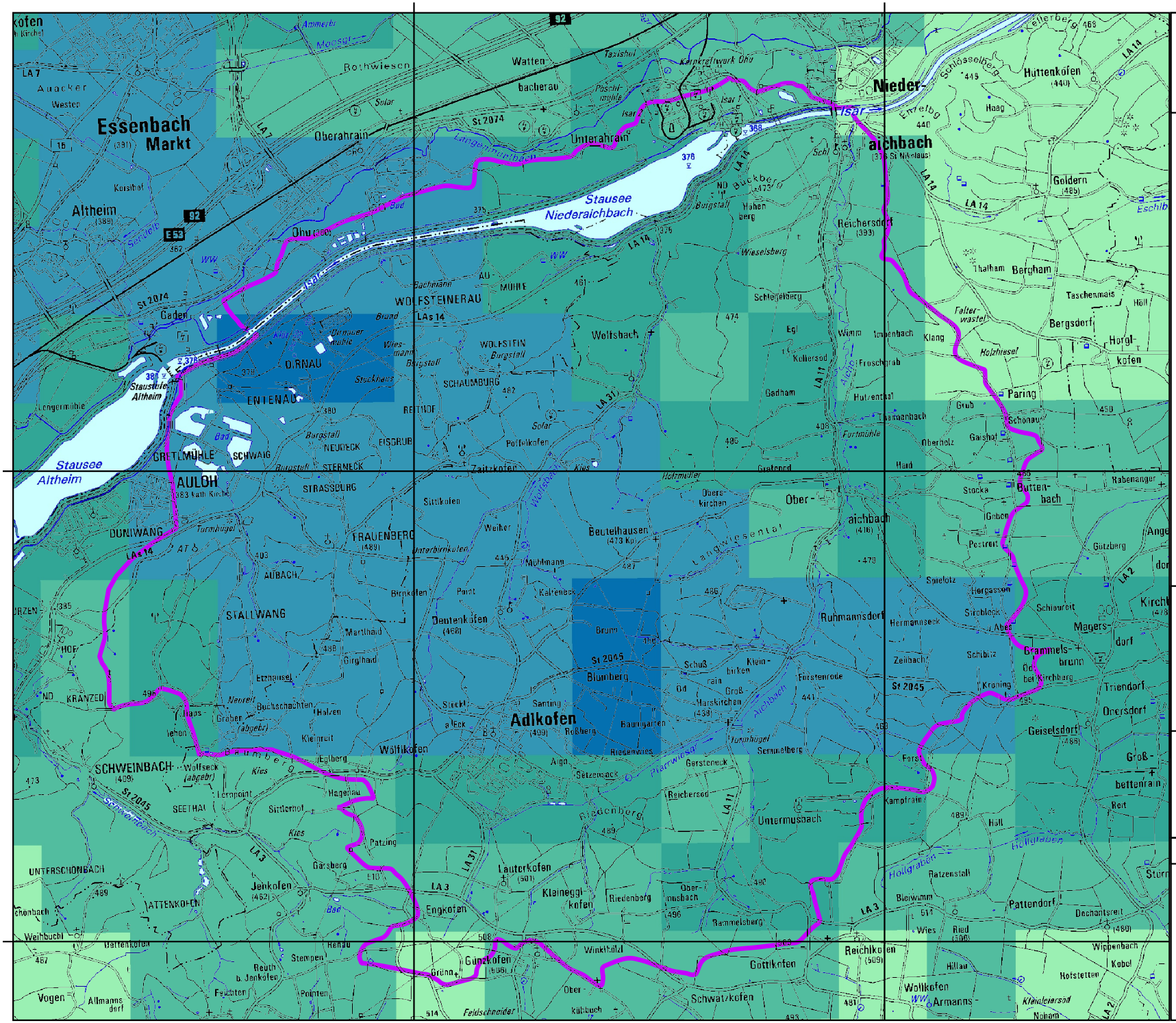
9.1.4.11 Variante 1 – Mulchsaat mit Saatbettbereitung

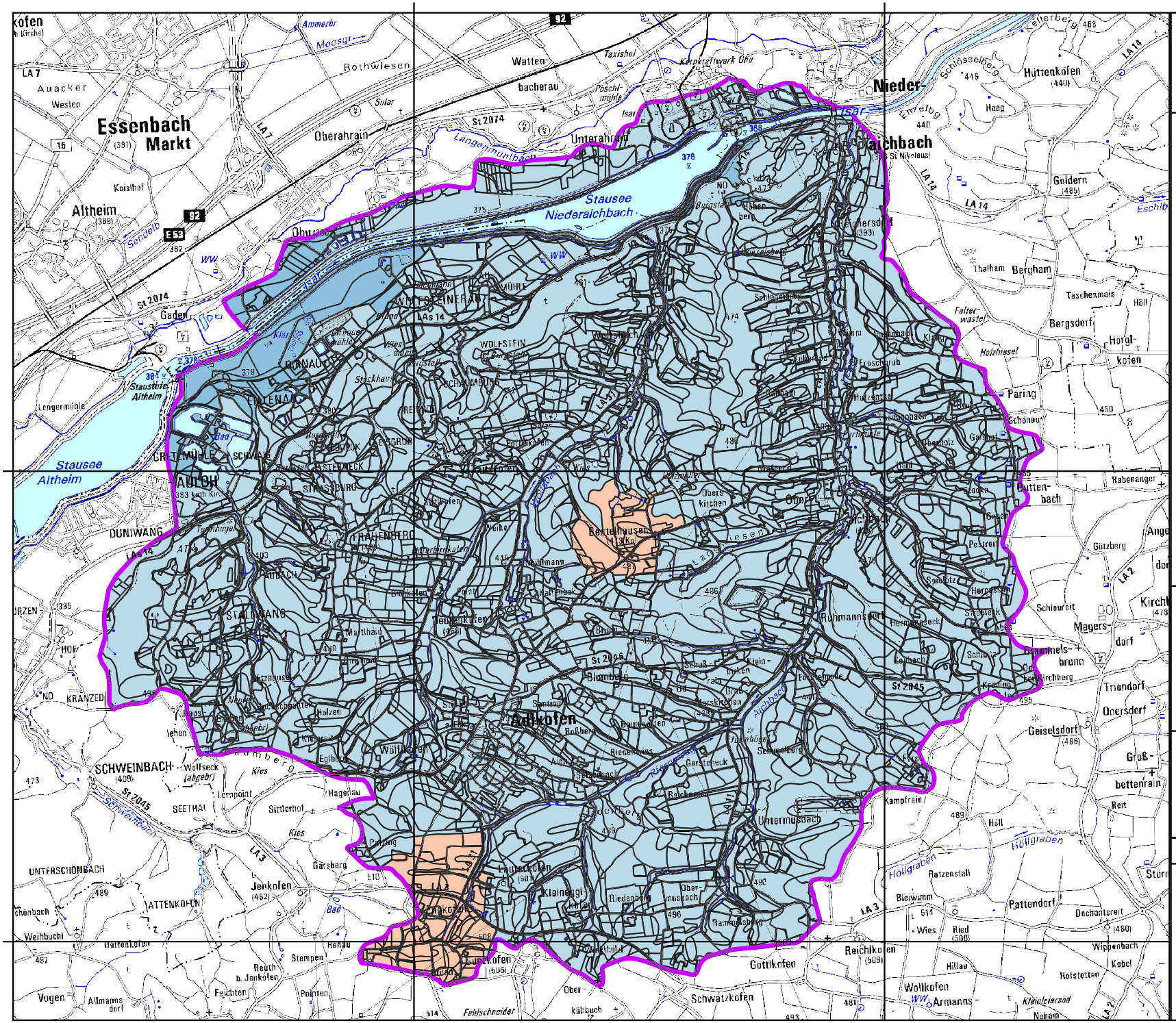
9.1.4.12 Variante 2 – Mulchsaat ohne Saatbettbereitung

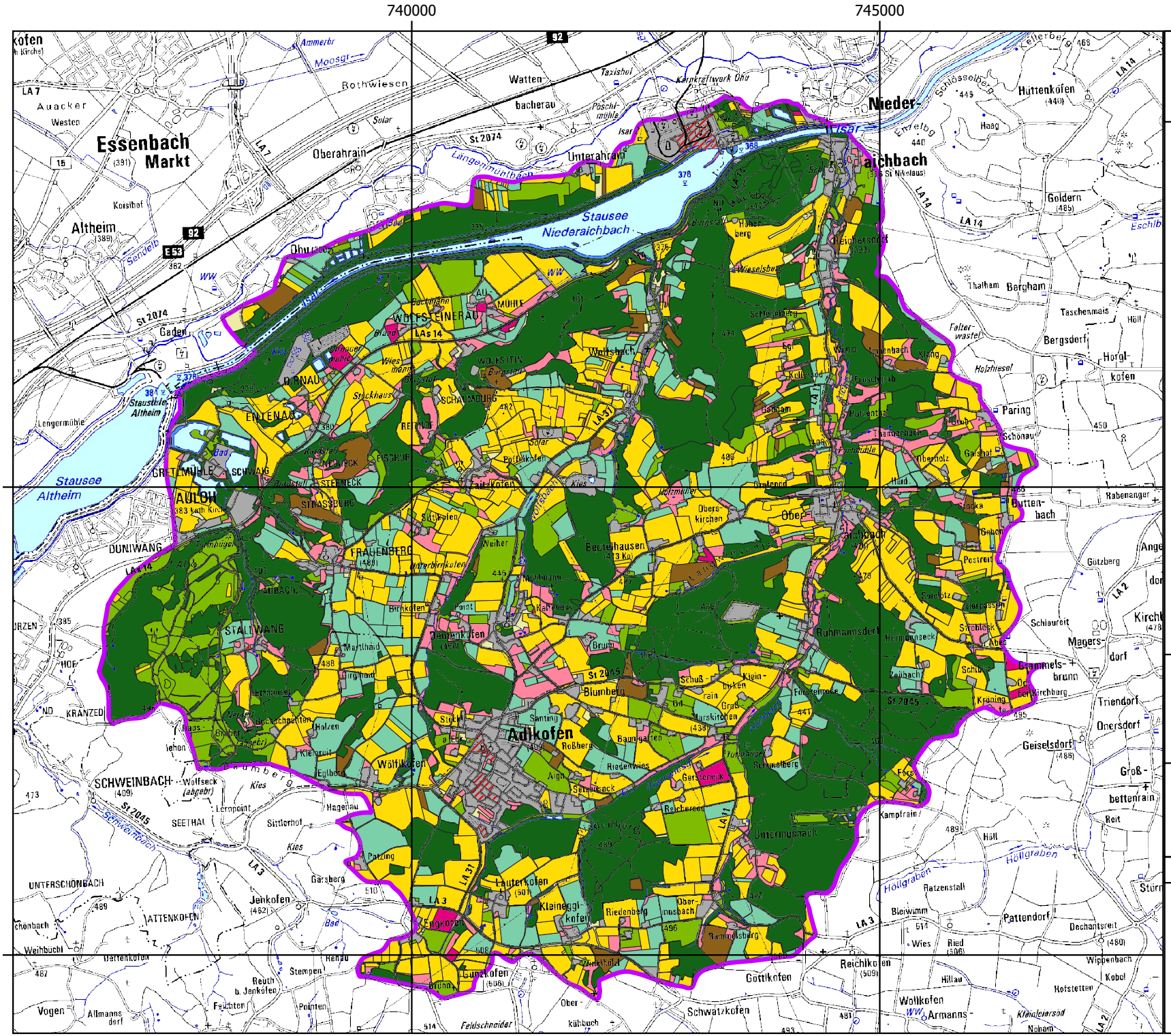
9.1.4.13 Variante 3 – Langjährige Direktsaat


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Stausee
Niederaichbach
Stausee
Altheim
AULOH
DUNLWANG
STALLWANG
FRAUENBERG
Beutelhausen
Adlkofen
SCHWEINBACH
Niederaichbach
Ober-
aichbach
Huttenkofen
Goldern
Bergham
Bergsdorf
Paring
Ruhmannsdorf
Geiselsdorf
Triendorf
Onersdorf
Untermusbach
Lauterkofen
Engkofen
Jenkofen
Gunzkofen
Reichkofen
Gottlkofen
Schwatzkofen
Wolfkofen
Armanns-
Patzing
Wolfsbach
Langwiesental
Aichbach
Holzgraben
Pfarrwiesgr
Riedenberg
Schweinbach
Buchberg
Isar
Oberahrain
Unterahrain
Watten
Rothwiesen
Wolfsteinerau
Schaumburg
Wolfstein
Ornau
Entenau
Gretlmühle
Schwaig
Neudeck
Sternneck
Strassburg
Eisgrub
Rethof
Poffelkofen
Zaitzkofen
Sittlkofen
Obers-
kirchen
Beutenkofen
Kranzedl
Aubach
Marthaid
Girglhaid
Birnkofen
Ettenhausen
Buchschachten
Holzen
Kleinreit
Egiberg
Wolfseck
Lernpoint
Seethal
Sittlernot
Hagenau
Unterschonbach
Attenkofen
Weihbuchl
Reuth
b. Jenkofen
Stempen
Feichten
Vogen
Allmanns
dorf
Pointen
Feldschneider
Ober-
kühbuch
Winkhölzl
Grün
Ried
Setzensack
Aign
Gerstneck
Riedenwies
Baumgarten
Roßberg
Santing
Stockt
Blumberg
Schuß-
Klein-
birken
Groß-
Harskirchen
Fürstenrode
Zeilbach
Schibitz
Kröning
Grammels-
brunn
Ob.
bei Kirchberg
Magers-
dorf
Hermannseck
Sirobleck
Abes
Hergassen
Spielotz
Postrent
Gobon
Stocka
Butten-
bach
Rabenanger
Gützberg
Ange
Kirchl
Hard
Oberholz
Gaishof
Grub
Froschgrub
Kollersod
Egl
Wimm
Imbenbach
Klang
Holzhiesel
Falter-
wastel
Taschenmais
Höll
Horgl-
kofen
Thalham
Reichersdorf
Schlegelsberg
Wieselsberg
Hohen
berg
Burgstall
Gadham
Hutzenthal
Thannenbach
Fortmühle
Schönau
Kamptrain
Reit
Groß-
bettenrain
Hollgraben
Ratzenstall
Bleiwimm
Pattendorf
Dechantsreit
Rammelsberg
Wies
Ried
Hillau
Wippenbach
Kobol
Hotstetten
Kleinleiarsdl
Noham
Haag
Schlossberg
Eschlb
Gaden
Mühle
Burgstall
Stauwehr
Altheim
Kies
Kies
Kies
Kies
St 2074
St 2045
St 2045
LA 14
LA 14
LA 14
LA 14
LA 11
LA 11
LA 31
LA 31
LA 3
LA 3
LA 3
LA 2
LA 2
LA 7
LA 7
92
92
E 53
ND Buckberg
(473)
Darstellungstitel:
Fall 4: Übersichtskarte und digitales Geländemodell
Einzugsgebiet
Geländehöhe [m NN]
< 400
400 - 420
420 - 440
440 - 460
460 - 480
480 - 500
500 - 520
520 - 540
Datengrundlage: EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.4.1
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Stausee
Niederaichbach
Stausee
Altheim
Adlkofen
Niederaichbach
Darstellungstitel:
Fall 4: Hangneigung
Einzugsgebiet
Hangneigung [%]
0 - 2
2 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 60
60 - 80
Datengrundlage: EU-DEM v1.1, 25m (Copernicus Land Monitoring Service)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.4.2
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Oberahrain
Unterahrain
Stausee
Niederaichbach
Isar
Niederaichbach
Ohustausee
Stausee
Altheim
Staustufe
Altheim
WOLFSTEINERAU
WOLFSTEIN
DIRNAU
ENTENAU
SCHAUMBURG
Wolfsbach
GRETLMÜHLE
SCHWAIG
AULOH
STRASSBURG
DUNIWANG
TRAUENBERG
Beutelhausen
Ober-
aichbach
STALLWANG
Adlkofen
Ruhmannsdorf
SCHWEINBACH
Wolfikofen
Untermusbach
Jenkofen
Engkofen
Lauterkofen
Kleineggl-
kofen
Gunzkofen
Reichlkofen
Gottlkofen
Schwatzkofen
Wollkofen
Armanns-
Huttenkofen
Goldern
Reichersdorf
Thalham
Bergham
Bergsdorf
Paring
Buttenbach
Mayersdorf
Brammelsbrunn
Triendorf
Geiselsdorf
Großbettenrain
Pattendorf
Wippenbach
Hofstetten
Holzhiesel
Falterwastel
Froschgrub
Hutzenthal
Gadham
Oberholz
Garshof
Schonau
Holzmüller
Holzgraben
Langwiesental
Aichbach
Pfarrwiesen
Feldschneider
Darstellungstitel:
Fall 4:
Niederschlagsverteilung
Einzugsgebiet
Niederschlag [mm]
zum Extremereignis
29.05.2016 - 18 bis 20 Uhr
< 1
1 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 40
40 - 50
50 - 70
70 - 90
Datengrundlage: Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe, GIS-lesbar, Version V001 (Deutscher Wetterdienst)
Projekt:
ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse
Autor:
HYDOR
Hydor Consult GmbH
Datum: 03.04.2019
Anlage 9.1.4.3
N
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000
0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Oberahrain
Unterahrain
Stausee
Niederaichbach
Niederaichbach
Stausee
Altheim
Aulohr
Adlkofen
Ruhmannsdorf
Beutelhausen
Oberskirchen
Schweinbach
Jenkofen
Laufkofen
Kleineggl
Lenzkofen
Wolfstein
Wolfsteinerau
Gretlmühle
Donauau
Entenau
Schalkham
Stallwang
Duniwang
Traubenberg
Wölflkofen
Untermusbach
Reichkofen
Göttkofen
Schwatzkofen
Wollkofen
Armanns
Pattendorf
Geiselsdorf
Niederaichbach
Hüttenkofen
Goldern
Bergham
Thalham
Paring
Buttenbach
Magersdorf
Triendorf
Onersdorf
Großbettenrain
Hofstetten
Wippenbach
Kobel
Dechantsreit
Ratzenstall
Bleiwimm
Ried
Wies
Hölgraben
Aichbach
Schlierbach
Kammelsbrunn
Kirchberg
Gützberg
Rabenanger
Schlierreit
Herrnsdorf
Herrnsdorfeck
Schlierbach
Kreuzing
Kirchberg
Reit
Kampfrain
Hill
Hillau
Hofstetten
Kobel
Wippenbach
Dechantsreit
Pattendorf



Darstellungstitel:

Fall 4: Landnutzung

Einzugsgebiet

Siedlung, Gewerbe, Industrie

- 0 - 75% Versiegelung
- 75% - 100% Versiegelung

Landwirtschaft und Forst

- Ackerland unspezifisch
- Brache
- Geschlossene Bestände
- Reihenkulturen
- Leguminosen
- Obstanlagen, Baumschulen, Gehoelz, Unland
- Gruenland
- Wald

Datengrundlage: Basis-DLM 2015 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie);
INVEKOS Hauptfrucht 2016 BY (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft);
High Resolution Layer "Imperviousness", 20m (Copernicus Land Monitoring Service)

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

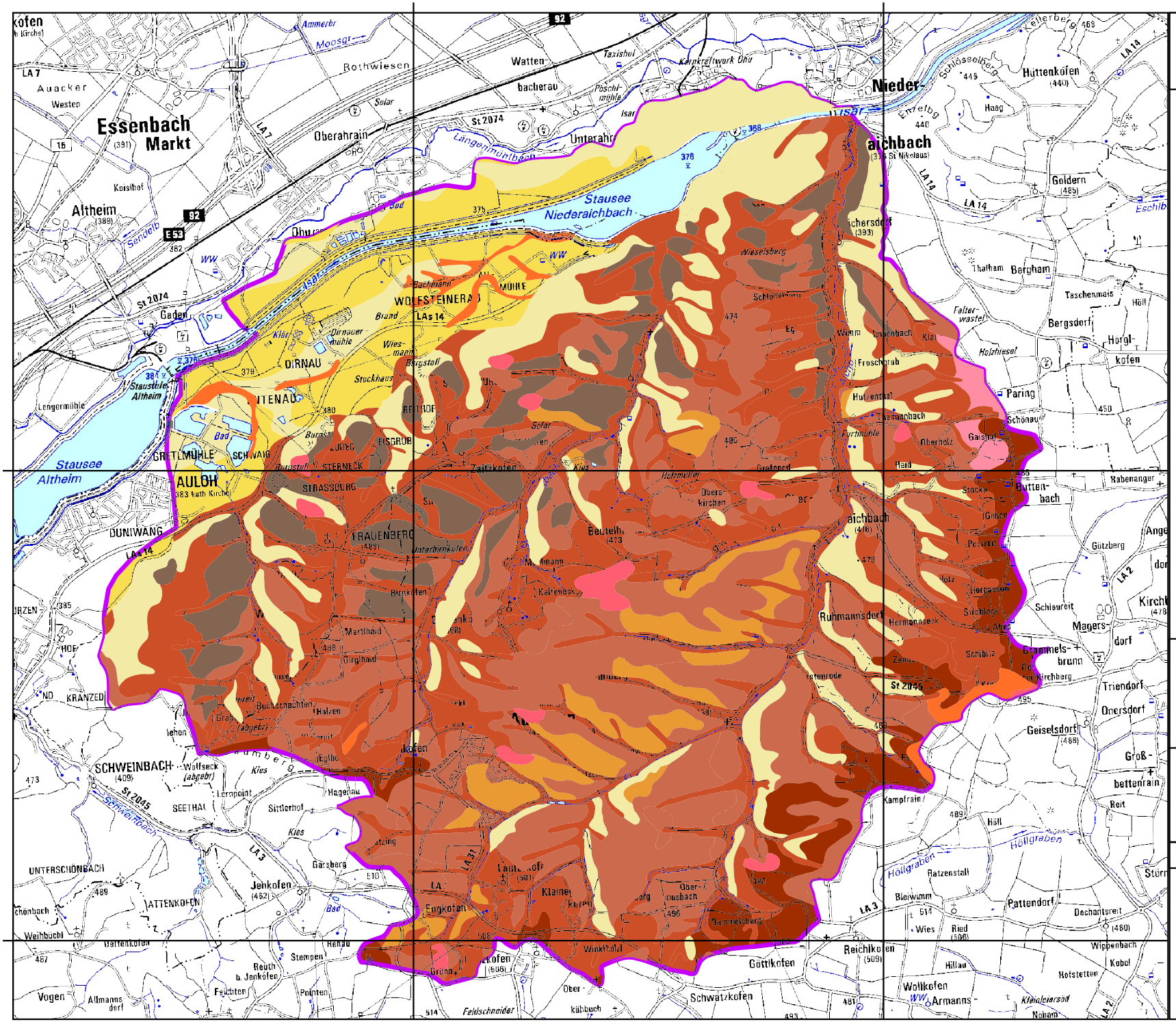
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.4.5

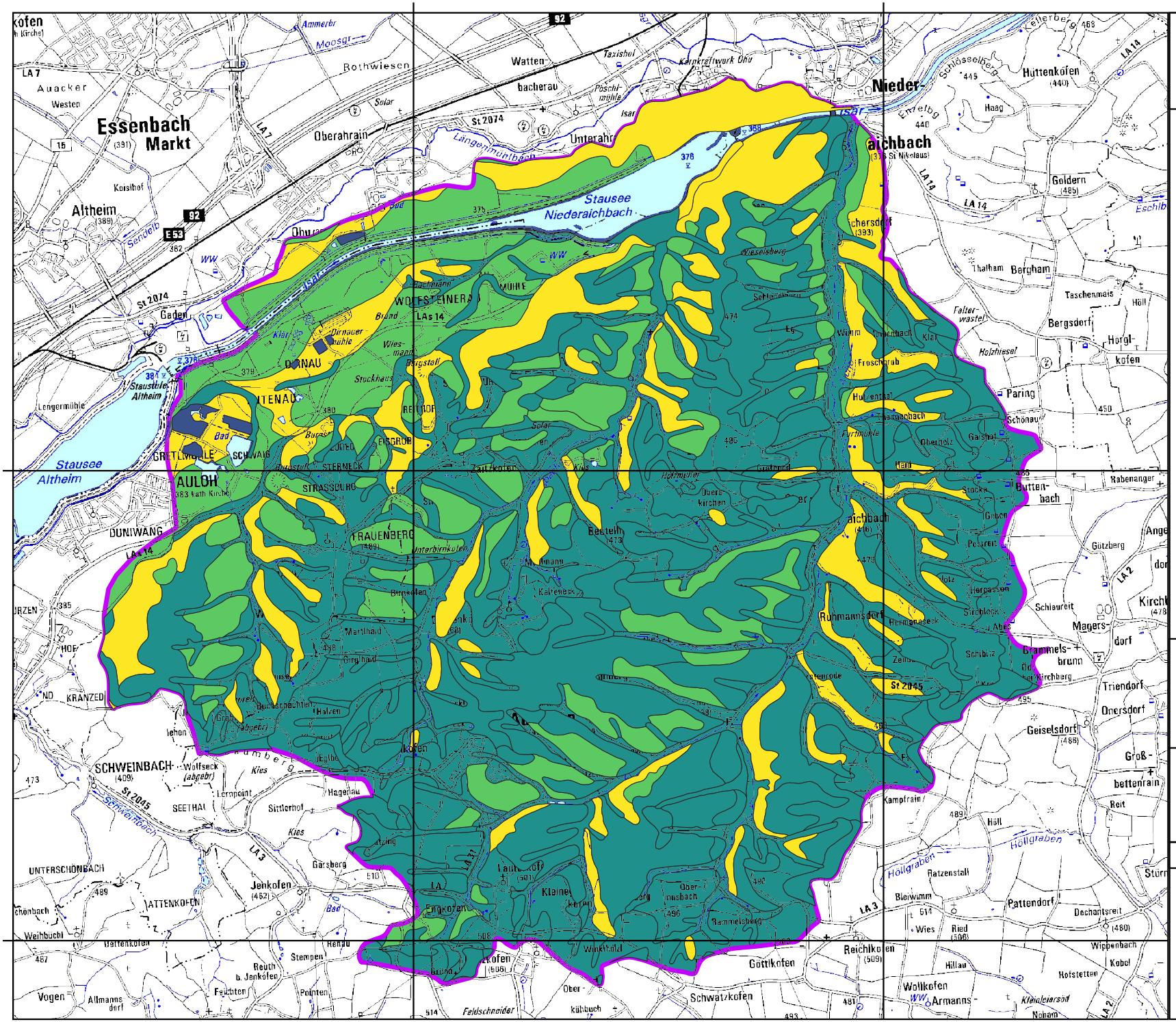
N

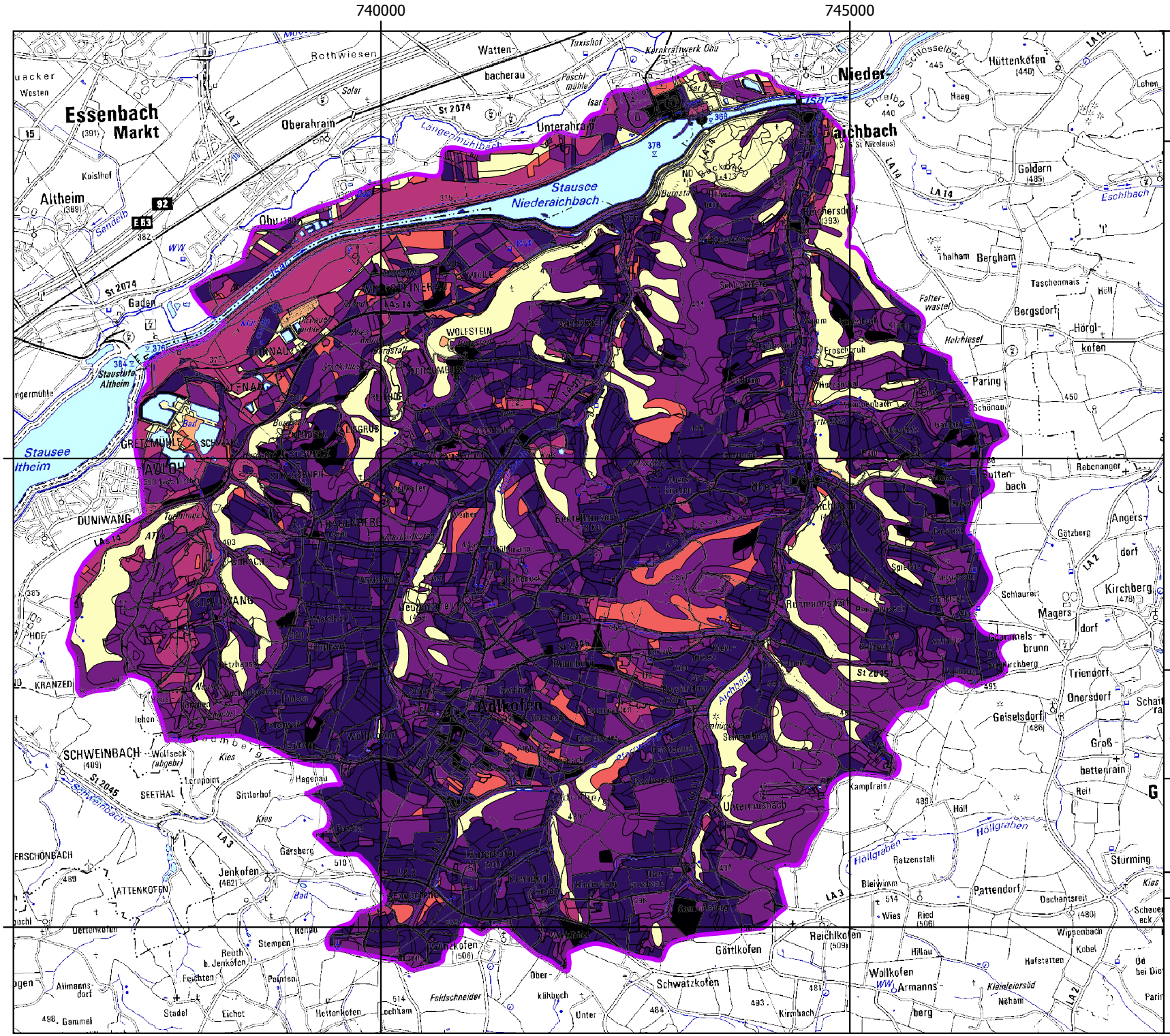
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

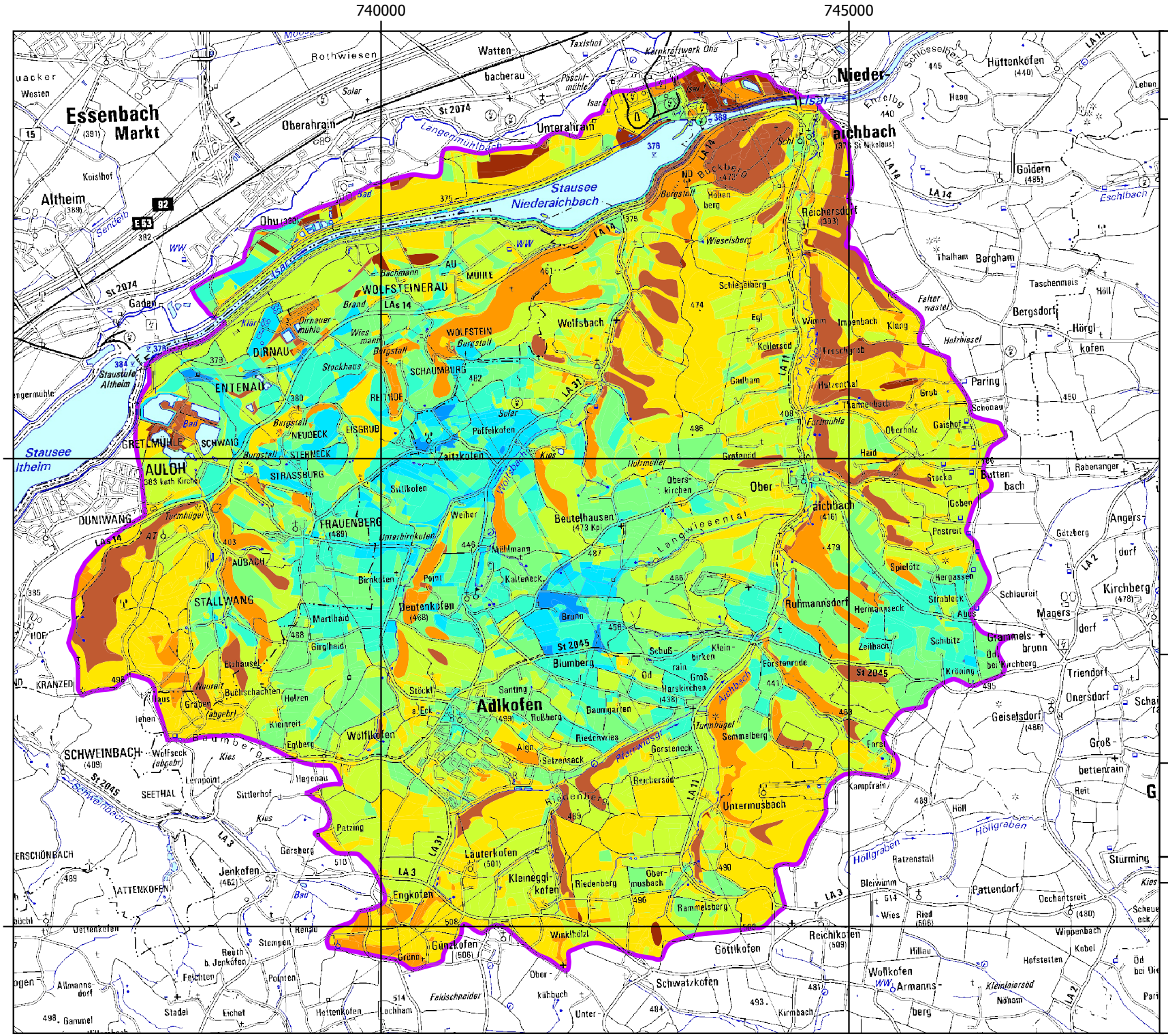
Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Oberahrain
Unterahrain
Niederaichbach
Stausee
Niederaichbach
Stausee
Altheim
DIRNAU
AULDH
GRETLMÜHLE
SCHWAIG
STRASSBURG
STERNECK
TRAUENBERG
DUNIWANG
SCHWEINBACH
Jenkofen
Engkofen
Ruhmannsdorf
Geiselsdorf
Reichlkofen
Schwatzkofen
Wollkofen
Armanns
Pattendorf
Ratzenstall
Hollgraben
Schlossbach
Ammerbr
Moosgr
Langenhornbach
Isar
Sendelb
Kläranl.
Bad
Staustufe
Altheim
Kernkraftwerk Ohu
Taxishof
Paschmühle
Solar
Watten
bacherau
Rothwiesen
Auacker
Westen
Korbhof
Gaden
Langermühle
Dirnauer mühle
Wiesmann
Stockhaus
Burgstall
Bachmann
MÜHLE
WOLFSTEINERAU
RETTHOF
FISCHBUD
Zaitzkofen
Oberskirchen
Unterbirnkofen
Birnkofen
Marthhad
Girglhad
Buchschachten
Halven
Kies
Lernpoint
Sittlerhof
Hagenau
SEETHAL
Wolfseck
(abgebr)
Schwarzbach
UNTERSCHONBACH
ATTENKOFEN
Garsberg
Weihbucht
Dattenkofen
Reuth
b. Jenkofen
Stempen
Feichten
Pointen
Vogen
Allmannsdorf
Feldschneider
Ober-
kühbuch
Grünn
Winkhöfl
Ober-
mühlbach
Kleiner
Laufkofen
Bleiwimm
Wies
Ried
Dechantsreit
Wippenbach
Kobel
Hofstetten
Hillau
Kleinleiarsdf
Nohem
Triendorf
Onersdorf
Großbettenrain
Reit
Kampfrain
Hill
Magersdorf
Brammelsbrunn
Schlaureit
Hermannseck
Schlotz
Kirchberg
Gützberg
Buttenbach
Rabenanger
Paring
Holzhiesel
Falterwastel
Froschgrub
Hulzenthal
Furtmühle
Oberholz
Gaishof
Bergham
Thalham
Taschenmais
Bergsdorf
Horglkofen
Goldern
Eschlb
Haag
Hüttenkofen
Schlösselberg
Einelbg
Wieselsberg
Schlotenbrunn
Wimm
Imsenbach
Klar
Eg
Nieder
aichbach
Beutelh
Obersdorf
Ange
Kirchl
Sirchlee
Aues
Schlotz
Zeller
Ostenrode
Hergasser
Pesterer
Graben
Stocka
Hard
Gratenod
Kalteneck
Mühlanger
Lehen
Kranzedt
Hof
Ammerberg
Ammerbr
Ammerbr
Ammerbr


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Oberahrain
Unterahrain
Stausee
Niederaichbach
Stausee
Altheim
DONAU
AULOH
GRETLMÜHLE
SCHWAIG
STRASSCHG
TRAUENBERG
DUNIWANG
SCHWEINBACH
SEETHAL
UNTERSCHONBACH
ATTENKOFEN
Jenkofen
Engkofen
Kleinei
Ruhmannsdorf
Geiselsdorf
Triendorf
Onersdorf
Pattendorf
Reichlkofen
Wollkofen
Schwatzkofen
Göttlkofen
Paring
Bergham
Thalham
Goldern
Bergsdorf
Hütthenkofen
Niederaichbach
Buttenbach
Magersdorf
Brammelsbrunn
Großbettenrain
Holzhiesel
Falterwastel
Froschgrub
Hulzenthal
Wiesmühle
Dirnauer Mühle
Stauwehr Altheim
Langenmühle
Ranzenbach
Schwaigbach
Holzgraben
Ratzenstall
Pattendorf
Bleiwimm
Ried
Hofstetten
Kobel
Wippenbach
Armanns
Hillau
Nohem
Kleinlaiersdf
Vogen
Allmannsdorf
Reuth b. Jenkofen
Stempen
Feichten
Pointen
Dattenkofen
Weihbucht
Schönbach
Feldschneider
Kühbuch
Ober-
Winkelhölzl
Rammelsberg
Laubkofen
Ober-
mühlbach
Garsberg
Sittlerhof
Lernpoint
Hagenau
Wolfseck
(abgebr.)
Kies
Kies
Halven
Buchschachten
Marthhad
Orthad
Binkofen
Unterbirnkofen
Katzeneck
Beutelh
Ober-
kirchen
Zaitzkofen
Steinmühle
Furtmühle
Gratzmühle
Hofmühle
Wiesmann
Stockhaus
Burgstall
Reithof
Fischgrub
Sternek
Brand
Bachmann
Mühle
Wieselsberg
Schlossberg
Einelbg
Kernkraftwerk Ohu
Taxishof
Pöschlmühle
Solar
Moosgr
Ammerbr
Rothwiesen
Watten
bacherau
Auacker
Westen
Korsthof
Sendelb
Eschlb
Gaden
Ohu
Ww
Isar
Klar
Bad
Burgs
Schwaig
Hof
Kranzedt
Ang
Gützberg
Schlaureit
Herrnsenesch
Schlitz
Zeil
Kirchberg
Ruhmannsdorf
Hölgraben
Dechantsreit
Ried
Wies
Bleiwimm
Ratzenstall
Pattendorf
Hillau
Wollkofen
Armanns
Hofstetten
Kobel
Wippenbach
Nohem
Kleinlaiersdf
Schwatzkofen
Göttlkofen
Reichlkofen


740000
745000
5385000
5380000
Stausee Niederaichbach
Stausee Altheim
Essenbach Markt
Altheim
Oberahrain
Unterahrain
Niederaichbach
Adlkofen
Schweinbach
Jenkofen
Reichlkofen
Wollkofen
Schwatzkofen
Göttlkofen
Pattendorf
Geiselsdorf
Kirchberg
Sutten-bach
Paring
Thalham
Bergham
Bergsdorf
Goldern
Hüttenkofen
Rothwiesen
Watten-bacherau
Essenbach
Altheim
Gaden
Wolfstein
Aulor
Duniwang
Staudwang
Attenkofen
Seethal
Sittlerhof
Jenkofen
Hagenau
Kies
Hüll
Höllgraben
Ratzenstall
Bleiwimm
Sturming
Triendorf
Onersdorf
Groß-bettenrain
Magers-dorf
Angers-dorf
Götzberg
Rabenanger
Rummannsdorf
Utternmuhach
Kampfrain
Reit
Wippenbach
Hafstetten
Hillau
Armanns-berg
Kienleiersöd
Nöham
Kirmbach
Unter-kühbach
Feldschneider
Lochham
Heltenkofen
Eichet
Stadel
Reuth b. Jenkofen
Stempen
Pointen
Feichten
Attmanns-dorf
Gammel
Ober-
Unter
Lauterkofen
Kleinegrub
Ober-mushach
Baumberg
Wolfseck (abgebr.)
Ternpoint
Gärsberg
Ersch-onbach
Wies
Ried
Schönau
Froschgrub
Holzhiesel
Folter-wastel
Taschenmais
Hell
Hörgl-kofen
Gammels-brunn
Schlauren
Kirchberg
Eschlbach
Langenhuhlbach
Schlesselbach
Isar
Kernkraftwerk Ohu
Staustufe Altheim
Sendelb
Solar
Poschl-mühle
Taxishof
Haag
Lohen
Ennelbg
Burgstall
Ober-
Mühlham
Bad
Kies
Ziegelstadl
Lagrub
Gretlmühle
Schwaig
Stockhaus
Kiesgrube
Fraßenberg
Ruben
Hofer
Kranzed
Lehen
Wolfseck (abgebr.)
Ternpoint
Hagenau
Sittlerhof
Seethal
Schweinbach
Ersch-onbach
Attenkofen
Jenkofen
Gärsberg
Kies
Bad
Reuth b. Jenkofen
Stempen
Pointen
Feichten
Attmanns-dorf
Stadel
Eichet
Heltenkofen
Lochham
Feldschneider
Ober-kühbach
Unter
Kirmbach
Schwatzkofen
Armanns-berg
Wollkofen
Reichlkofen
Göttlkofen
Kienleiersöd
Nöham
Hillau
Hafstetten
Wippenbach
Kobel
Pattendorf
Dachantsreit
Bleiwimm
Ratzenstall
Sturming
Triendorf
Onersdorf
Groß-bettenrain
Geiselsdorf
Kirchberg
Magers-dorf
Angers-dorf
Götzberg
Rabenanger
Sutten-bach
Paring
Thalham
Bergham
Bergsdorf
Goldern
Hüttenkofen
Froschgrub
Holzhiesel
Folter-wastel
Taschenmais
Hell
Hörgl-kofen
Gammels-brunn
Schlauren
Eschlbach
Langenhuhlbach
Schlesselbach
Isar
Kernkraftwerk Ohu
Staustufe Altheim
Sendelb
Solar
Poschl-mühle
Taxishof
Haag
Lohen
Ennelbg
Burgstall
Ober-
Mühlham
Bad
Kies
Ziegelstadl
Lagrub
Gretlmühle
Schwaig
Stockhaus
Kiesgrube
Fraßenberg
Ruben
Hofer
Kranzed
Lehen
Baumberg



Darstellungstitel:

Fall 4: Kumulierte Abflusshöhen

Einzugsgebiet

Direktabfluss [mm/dt] zum Extremereignis 29.05.2016 - 18 bis 20 Uhr

- 0 - 1
- 1 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 80
- 80 - 100
- 100 - 120
- 120 - 140
- >140

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

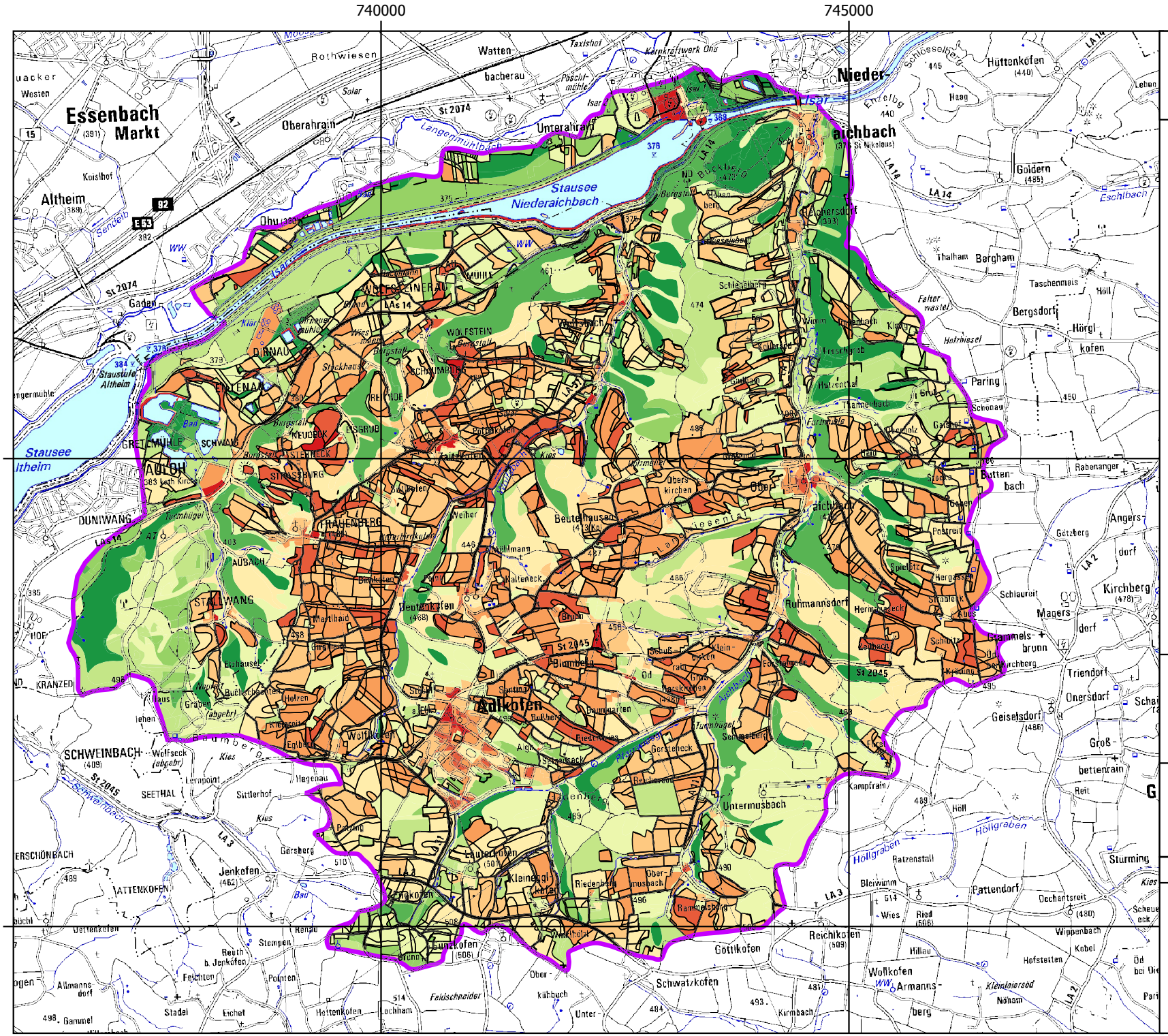
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.4.9

N

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km



Darstellungstitel:

Fall 4: Abflussbeiwerte

Einzugsgebiet

Ackerland

Beiwert Direktabfluss [%] zum Extremereignis 29.05.2016 - 18 bis 20 Uhr

- < 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- > 90

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

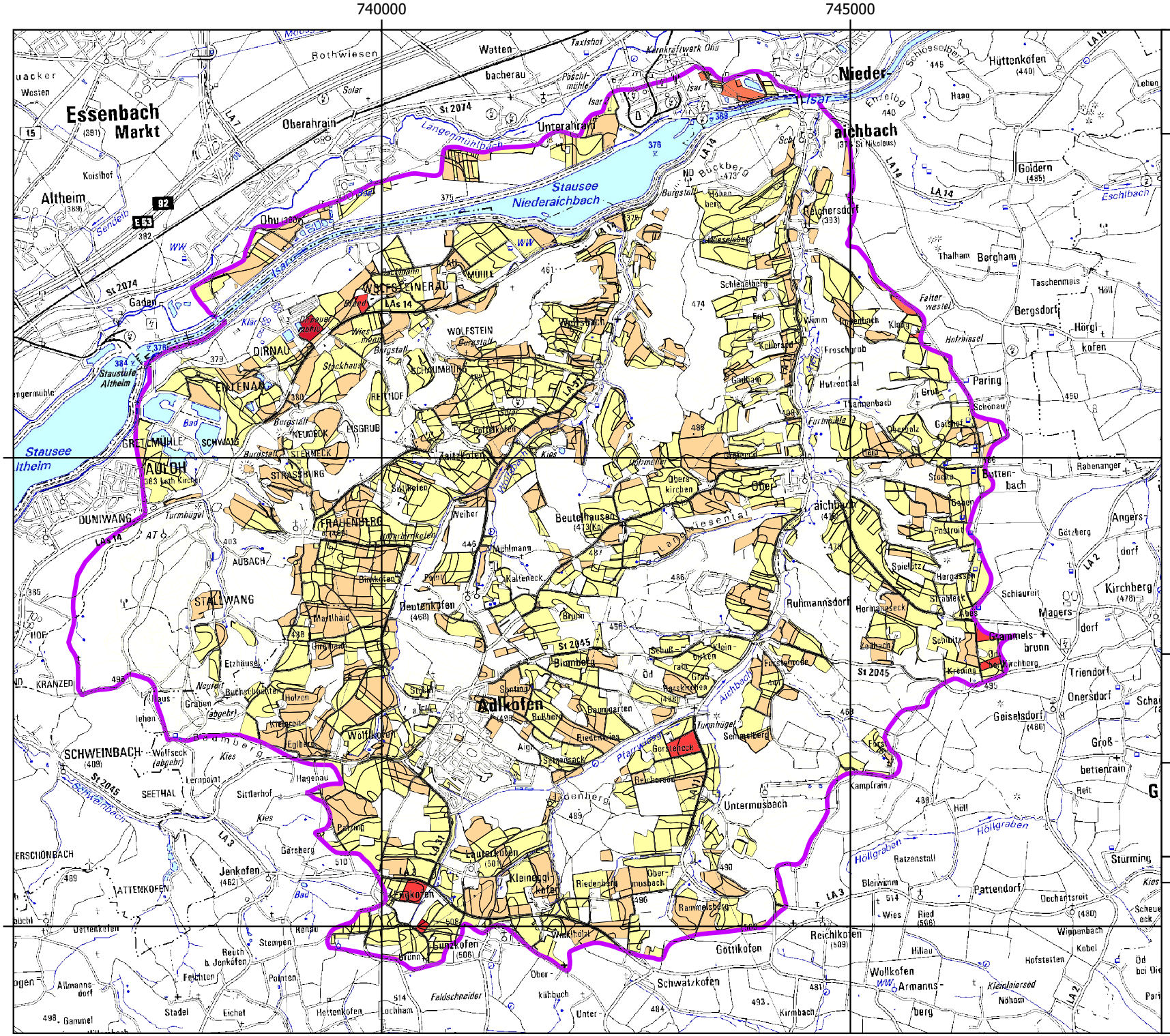
Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.4.10

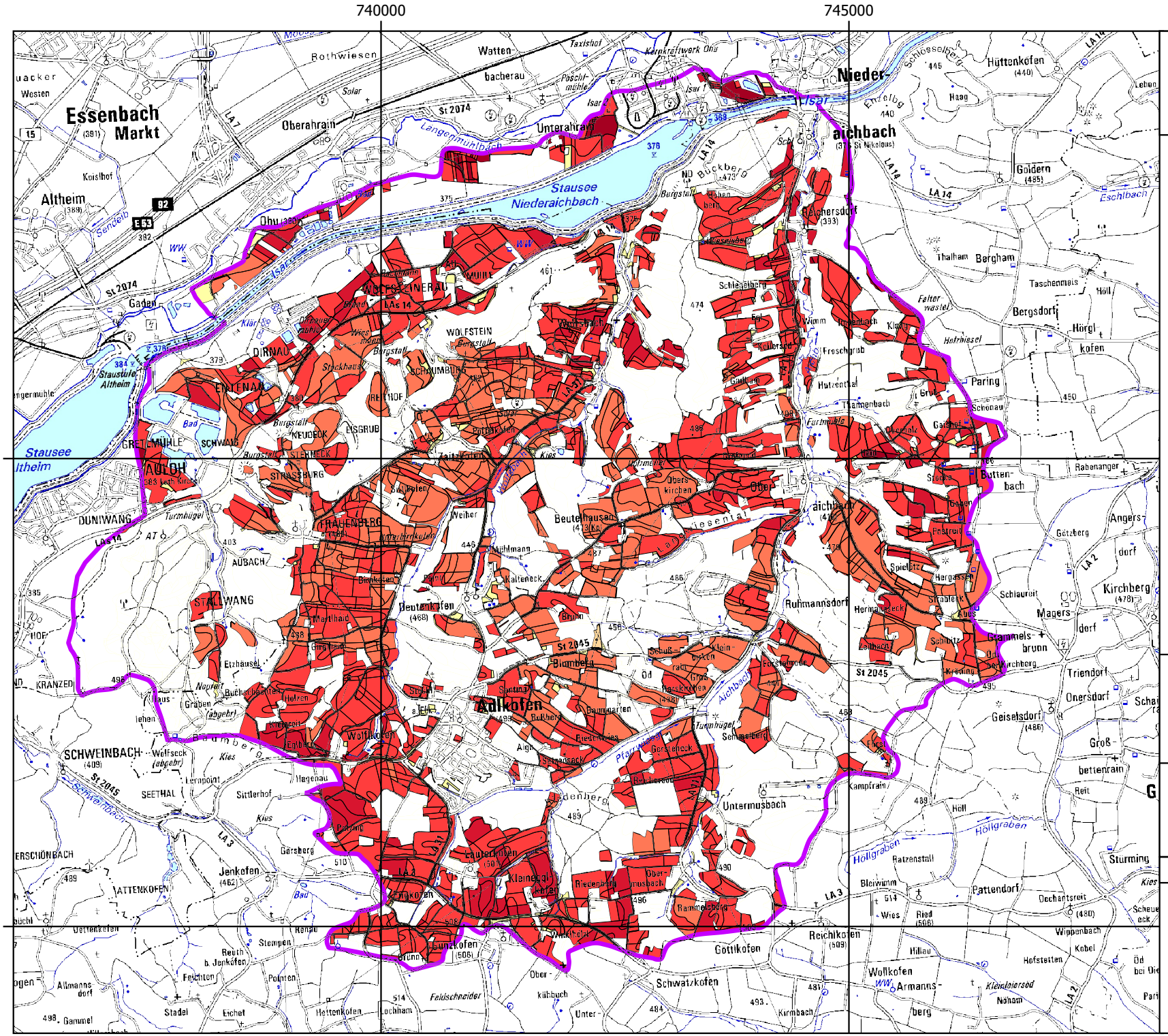
N

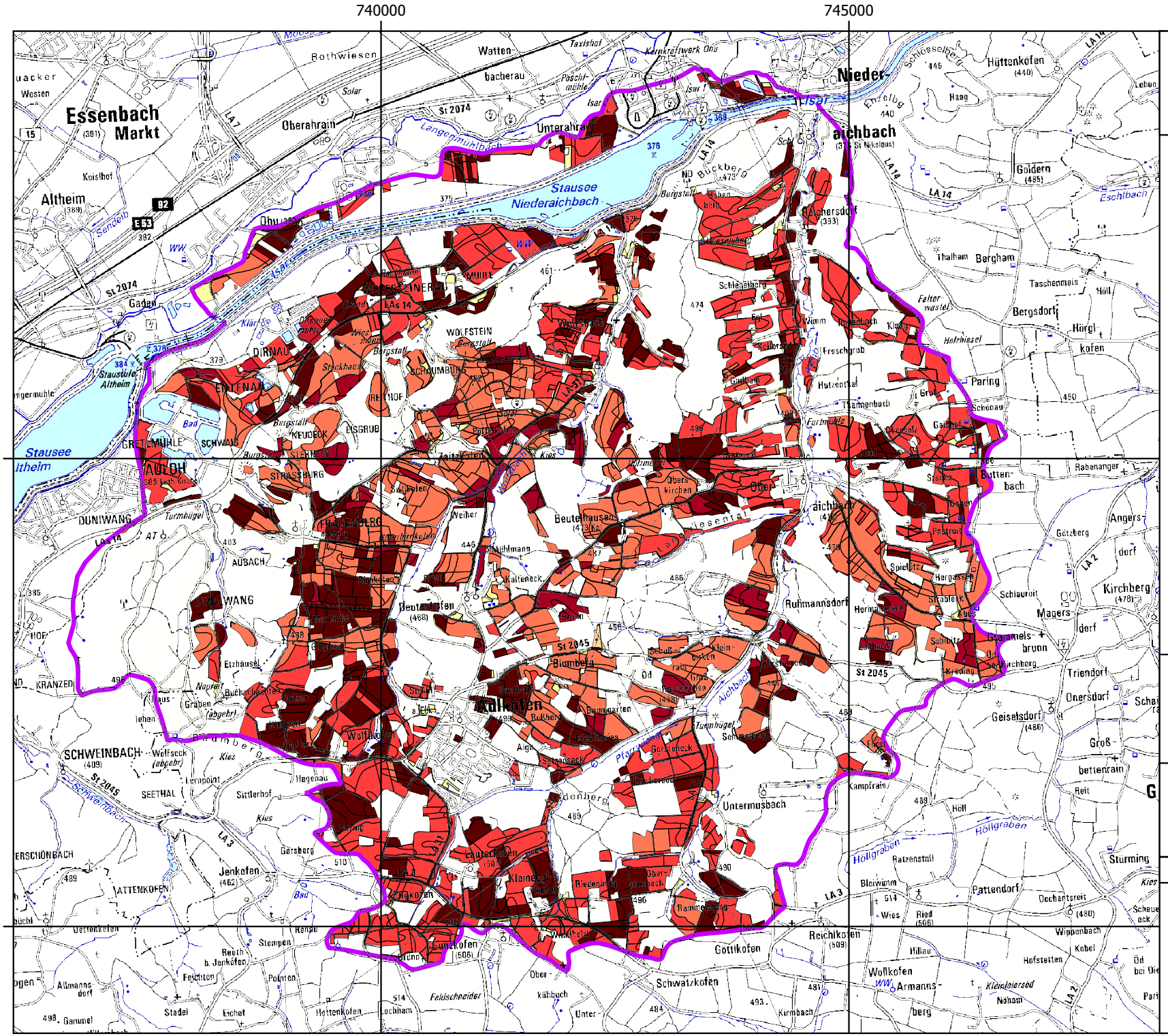
Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

0.5 0 0.5 1 1.5 2 km


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Stausee
Niederaichbach
Niederaichbach
Oberahrain
Unterahrain
Bothwiesen
Watten
bacherau
Wolfstein
Dirnau
Ehlenam
Gretlmühle
Aulohe
Stausee
Altheim
Staustufe
Altheim
Frauenberg
Beutenhausen
Beutenkofen
Stallwang
Schweinbach
Seethal
Adlkofen
Aichbach
Ruhmannsdorf
Untermusbach
Geiselsdorf
Triendorf
Onersdorf
Magersdorf
Kirchberg
Pattendorf
Reichlkofen
Gottlkofen
Schwatzkofen
Wolfkofen
Armannsberg
Jenkofen
Lauterkofen
Kleineggl-
kofen
Lengkofen
Lunzkofen
Ober-
musbach
Ober-
kühbuch
Unter-
kühbuch
Ratzenstall
Bleiwimm
Hollgraben
Aichbach
Schwarzbach
Pfarrwiesgraben
Langenmühlbach
Isar
Kernkraftwerk Ohu
St 2074
St 2045
LA 14
LA 3
LA 2
LA 7
E 53
92
15
Ohu
Gaden
Wolfsteinerau
Mühle
Schaumburg
Rettlhof
Keudeck
Sternneck
Eisgrub
Schwaig
Straßburg
Dunzwang
Turmhügel
Aubach
Etzhausen
Graben
Buchenbüchlhof
Holzen
Kranzed
Hof
Kies
Baumberg
Wolfseck
Ternpoint
Sittlerhof
Hagenau
Gänsberg
Erschönbach
Attenkofen
Reuth
b. Jenkofen
Stempen
Pointen
Feichten
Stadel
Eichet
Hettenkofen
Lochham
Feldschneider
Allmannsdorf
Gammel
Kirmbach
Wippenbach
Hofstetten
Hillau
Knöbl
Ödbei Gie
Kleinloiersod
Nöham
Hüttenkofen
Haag
Schlossleiten
Eschlbach
Göldern
Thalham
Bergham
Taschenmais
Bergsdorf
Hörgl
Paring
Thannenbach
Gaishof
Rabenanger
Buttenbach
Angersdorf
Götzberg
Kirchberg
Schlauroit
Hermannseck
Schabetsberg
Grammelsbrunn
Kreuzing
Leithach
Schmutz
Spielbichl
Hargassen
Stocka
Oberkirchen
Ödenkirchen
Weiher
Mühlmann
Kalteneck
Birkleiten
Martlhaid
Girnhaid
Brunn
Schuß-
rackern
Klein-
rackern
Groß-
rackern
Baumgarten
Buchet
Aigen
Schmiedsack
Gerstleneck
Reichenau
Kampfrain
Reit
Großbettenrain
Holl
Sturming
Dechantsreit
Ried
Wies
Rammelsberg
Riedenberg
Lengkofen
Wimm
Froschgrub
Kolbersee
Schlegelberg
Wiesselberg
Burgstall
Hofwiesel
Falterwasel
Ödenholz
Furtmühle
Kies
Wehr
Wehr
Bad
Bad
Sand
Sand
Kies
Kies
Kies


740000
745000
5385000
5380000
Essenbach
Markt
Altheim
Stausee
Niederaichbach
Niederaichbach
Aiterhofen
Aiterhofen
Aiterhofen



Darstellungstitel:

Fall 4: Variante 3 - Langjährige Direktsaat

Einzugsgebiet

Verminderung der Abflusshöhe [%]

- < 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 50
- > 50

Erläuterung:

Die Verminderung wurde folgendermaßen berechnet:
Abweichung [%] = 100 * (Q1 - Q0) / Q0

Q1: Direktabflüsse [mm] mit Betrachtung der Variante 3
Q0: Direktabflüsse [mm] der Referenz ohne Betrachtung alternativer Bewirtschaftung

Projekt: ReFoPlan 2017 - Veränderung der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse

Autor:

HYDOR

Hydor Consult GmbH

Datum: 03.04.2019 | Anlage 9.1.4.13

Kartengrundlage: DTK50 (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

Koordinatensystem: ETRS 89, UTM Zone 32
Maßstab (DIN A4) 1:55000

9.2 Anlage 9.2 Fragebogen

24.05.2018

Erhebung im Rahmen des Projektes:

Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse (FKZ 3717 48 242 0)

Das Umweltbundesamt hat im Januar 2018 die Studie „*Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse*" in Auftrag gegeben. Auftragnehmer ist die BiPRO GmbH München (Part of Ramboll) in Kooperation mit dem Ingenieurbüro für Ökologie und Landwirtschaft (IfÖL) aus Kassel sowie der HYDOR Consult GmbH aus Berlin.

Ziel der Studie ist es, den Einfluss der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf das Wasserinfiltrationsvermögen landwirtschaftlicher Böden und den oberirdischen Abfluss im Hinblick auf zukünftig häufiger und stärker auftretende Extremwetterereignisse herauszuarbeiten. Daraus sollen Empfehlungen für effektive Bodenschutzmaßnahmen und geeignete Fördermaßnahmen für standorangepasste Bewirtschaftungsformen zur Verminderung von oberirdischem Abfluss und Überflutungen abgeleitet werden. Weiterhin soll eine Skizze des Handlungsbedarfs auf verschiedenen Ebenen (Bund, Länder, Kommunen) zur Stärkung des Vorsorgegedankens erstellt werden, um das Überflutungsrisiko bei Stark- und Dauerregenereignissen zu vermindern.

Wichtig für die Einführung geeigneter Bodenschutzmaßnahmen sind neben Förderprogrammen für Agrar-, Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen auch rechtliche Grundlagen dar. In diesem Rahmen wurden durch den Auftragnehmer die aktuell geltenden Rechtsnormen und Fördermaßnahmen auf EU-, Bundes- und Länderebene gesammelt und auf ihren Beitrag zum Bodenschutz, insbesondere zur Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit und -speicherung, zusammengestellt und bewertet. Durch diese Erhebung sollen bestehende Regelungslücken und Umsetzungsdefizite aufgedeckt und Handlungsoptionen entwickelt werden, mit dem Ziel, Vorschläge für neue und effektive Fördermaßnahmen und rechtliche Steuerungsinstrumente zu erarbeiten. Besondere Berücksichtigung kommt dabei der Anpassung und Präzisierung der guten fachlichen Praxis (gfP) in der Landwirtschaft (§ 17 BBodSchG)[1] zu.

Wir haben bereits eine umfangreiche Recherche durchgeführt, um die bestehenden Fördermaßnahmen und rechtlichen Grundlagen auf Bundes- und Länderebene zu identifizieren.

Wir möchten Sie hiermit bitten, uns bei der Sammlung der benötigten Informationen zu unterstützen, indem Sie die von uns recherchierten Informationen noch

[1] https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/__17.html

ergänzen und auch die weiteren Fragen des Fragebogens soweit möglich beantworten. Die von uns für Ihr Bundesland zusammen gestellten Fördermaßnahmen und rechtlichen Grundlagen sind in diesem Fragebogen bei den entsprechenden Fragen bereits aufgelistet, wobei wir Sie bitten möchten, die Zusammenstellung entsprechend Ihres Kenntnisstandes zu korrigieren bzw. zu ergänzen.

Die Projektergebnisse werden Ihnen selbstverständlich beim Abschluss des Projektes zur Verfügung gestellt.

Bitte senden Sie Ihre Antwort bis zum **29.06.2018** per E-Mail an ez@ramboll.com

Falls Sie Rückfragen beim Ausfüllen des Fragebogens haben sollten, stehen Ihnen Herr Florian Senoner (fse@ramboll.com, 089/978970164) oder Frau Elisabeth Zettl (ez@ramboll.com, 089/978970138) von der BiPRO GmbH München (Part of Ramboll) gerne zur Verfügung.

Wir bedanken uns im Voraus für Ihre Mühe.

Kontaktdaten:

Name:

Institution:

Abteilung:

Adresse:

Telefonnummer - Kontaktperson:

E-Mail - Kontaktperson:

Teil A: Fördermöglichkeiten

Frage 1: Das Projekt beinhaltet die Identifizierung von Fördermöglichkeiten auf EU-, Bundes-, Länder- und Gemeindeebene, welche die Wasseraufnahme und Wasserspeicherung von Böden mittelbar oder unmittelbar verbessern bzw. erhalten. Fördermaßnahmen basieren im Gegensatz zu gesetzliche Grundlagen (siehe Teil B) auf freiwilliger Teilnahme und sind nur dann umsetzungspflichtig, wenn sich Landwirte aktiv für die jeweiligen Programme bewerben und eine finanzielle Entschädigung für den anfallenden Mehraufwand in Anspruch nehmen.

Welche relevanten Förderprogramme zur Verbesserung der Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden sind Ihnen bekannt? Bitte diese kurz auflisten und zu jedem Förderprogramm einen entsprechenden Link oder ein Word/PDF-Dokument beifügen! (ggf. bitte weitere Zeilen hinzufügen)

a) auf Länderebene

Förderprogramm	Zeit	Maßnahme	Projektrelevante Inhalte
...			

3

...	

b) auf Gemeindeebene

Förderprogramm	Zeit	Maßnahme	Projektrelevante Inhalte
...			
...			

Frage 2: Können Sie für als für das Thema **besonders relevant**[2] erachtete **Maßnahmen** (von den oben bereits aufgeführten Maßnahmen) zur Verbesserung der Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Böden **Angaben zu der Anzahl der Antragsteller, der betroffenen Fläche sowie der vergebenen jährlichen Fördersumme machen** (ggf. bitte weitere Zeilen hinzufügen)?

Relevante Maßnahme	Anzahl Antragsteller	Geförderte Fläche (gesamt)	Fördersumme (gesamt)
...			
...			
...			

[2] Relevanz der Fördermaßnahmen festgelegt durch den Bezug der Maßnahmen zur mittelbaren oder unmittelbaren Verbesserung bzw. des Erhalts der Wasseraufnahme und -speicherung von Böden im vorliegenden Förderprogramm. Z.B. Begrünung im Acker- und Gartenbau (mit oder ohne vorgegebene Begrünungsmischung), Winterbegrünung, Reduzierte Bodenbearbeitung mit Strip-Till, Einführung Ökolandbau in zweijähriger Umstellung bzw. Beibehaltung Ökolandbau.

Frage 3: Wurden bzw. werden die in Frage 1 bzw. 2 gelisteten Fördermaßnahmen auf ihre Wirkung hin kontrolliert? Können Sie uns hierzu Angaben zu den verwendeten **Kontrollmethoden/Instrumenten** sowie zu den **Zeiträumen und Häufigkeiten der Kontrolle** machen?

Falls sich die Kontrollmethoden/Instrumente nur auf bestimmte Fördermaßnahmen beziehen, geben Sie die Kontrollmethoden bitte je relevanter Fördermaßnahme an.

1. Förderprogramm / Fördermaßnahme

Kontrollmethode/Instrument:

Zeitraum:

Umfang und Häufigkeit der Kontrolle:

2. Förderprogramm / Fördermaßnahme

5

Kontrollmethode/Instrument:

Zeitraum:

Umfang und Häufigkeit der Kontrolle:

3. Förderprogramm / Fördermaßnahme

Kontrollmethode/Instrument:

Zeitraum:

Umfang und Häufigkeit der Kontrolle:

4. Förderprogramm / Fördermaßnahme

Kontrollmethode/Instrument:

6

Zeitraum:

Umfang und Häufigkeit der Kontrolle:

Falls die in Frage 1 bzw. 2 gelisteten Fördermaßnahmen nicht auf ihre Wirkung hin kontrolliert werden, können Sie dies bitte begründen?

Frage 4: Welche Hemmnisse bezüglich der Umsetzung der Fördermaßnahmen gibt es aus Ihrer Sicht seitens der Landwirtschaft?

Frage 5: Welche Hemmnisse bezüglich der Durchführung von Wirkungskontrollen der Maßnahmen bestehen seitens der Behörden?

Frage 6: Sind Ihnen neue/innovative Ansätze auf Länder- und / oder Gemeindeebene bekannt, welche mittelbar oder unmittelbar die Wasseraufnahme und Wasserspeicherung von Böden verbessern bzw. erhalten, die noch nicht durch ein Förderprogramm abgedeckt werden? Falls ja, können

7

Sie diese bitte kurz beschreiben und, falls verfügbar, einen Link oder ein word/pdf-Dokument hinzufügen?

Frage 7: Welche Hemmnisse bestehen bezüglich der Umsetzung neuer/innovativer Ansätze? Können Sie diese bitte kurz beschreiben?

Frage 8: Welchen Verbesserungsbedarf bei der Förderung von Maßnahmen für die Verbesserung bzw. den Erhalt der Wasseraufnahme und -speicherung von Böden gibt es aus Ihrer Sicht und Erfahrung? Können Sie diesen bitte kurz beschreiben?

8

Frage 9: Die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft ist in § 17 des BBodSchG definiert.

Die nach Landesrecht zuständigen landwirtschaftlichen Beratungsstellen sollen bei ihrer Beratungstätigkeit die Grundsätze der guten fachlichen Praxis nach Absatz 2 (Grundsätze der guten fachlichen Praxis) vermitteln. Zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis gehört insbesondere, dass

1. die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen hat;
2. die Bodenstruktur erhalten oder verbessert wird;
3. Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden;
4. Bodenabträge durch eine standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung, möglichst vermieden werden;
5. die naturbetonten Strukturelemente der Feldflur, insbesondere Hecken, Feldgehölze, Feldraine und Ackerterrassen, die zum Schutz des Bodens notwendig sind, erhalten werden;
6. die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung erhalten oder gefördert wird und
7. der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird.

Wo sehen Sie Anpassungs-/Präzisierungsbedarf für die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft in Bezug auf die Verbesserung bzw. den Erhalt der Wasserspeicherkapazität von Böden?

9

Frage 10: Im Rahmen dieser Studie werden regionale Analysen zu vergangenen Überflutungsereignissen nach Stark- oder Dauerregenereignissen anhand von mehreren Fallbeispielen durchgeführt. Dabei wird ausgearbeitet, ob und inwieweit das Auftreten von Überflutungen und deren Intensität mit der landwirtschaftlichen Flächennutzung korreliert. **Liegen Ihnen ein oder mehrere Fallbeispiele aus Baden-Württemberg zu vergangenen Überflutungsereignissen nach Stark- oder Dauerregen vor, bei denen Zusammenhänge zwischen der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den Überflutungen bestanden?** Falls ja, können Sie diese bitte kurz beschreiben und, falls verfügbar, einen Link oder ein Word/PDF-Dokument zu den jeweiligen Fallbeispielen beifügen?

10

Teil B: Gesetzliche Grundlagen

Das Projekt beinhaltet weiterhin die Identifizierung von gesetzliche Grundlagen auf Bundes- und Länderebene, welche mittelbar oder unmittelbar die Wasseraufnahme und Wasserspeicherung von Böden verbessern bzw. erhalten.

Frage 1: Welche gesetzlichen Grundlagen sind Ihnen bekannt, welche die Wasseraufnahme und Wasserspeicherung von Böden verbessern bzw. erhalten und für Ihr Bundesland relevant sind? Können Sie diese bitte auflisten und einen Link oder ein Word/PDF-Dokument zu den jeweiligen Rechtsdokumenten Ihrer Antwort beifügen (ggf. bitte weitere Zeilen hinzufügen)?

Gesetzliche Grundlage	Inhalt
...	
...	
...	

Frage 2: Sind Ihnen Umsetzungsdefizite der Landwirte bei der Umsetzung der bodenbezogenen gesetzlichen Grundlagen bekannt? Falls ja, können Sie diese bitte nennen und kurz beschreiben?

Frage 3: Wie wird die Umsetzung von geltenden gesetzliche Grundlagen durch eine Behörde in ihrem Bundesland überprüft? Bitte machen Sie uns hierzu Angaben zu den verwendeten Kontrollmethoden und/oder -instrumenten sowie zu den Zeiträumen der Kontrolle machen. Falls sich die Kontrollmethoden/Instrumente nur auf bestimmte gesetzliche Grundlagen beziehen, könnten Sie dies bitte mit angeben?

Falls dies nicht zutrifft, können Sie dies begründen?

Frage 4: Welche Vorschläge, wie man die Umsetzungskontrollen der gesetzlichen Grundlagen verbessern könnte, gibt es aus Ihrer fachlichen Sicht und Erfahrung?

Frage 5: Welche Rolle spielen Ihrer Erfahrung nach gesetzliche Regelungen für den Erhalt bzw. die Verbesserung der landwirtschaftlichen Nutzung zur Verringerung des Überflutungsrisikos?

9.3 Anlage 9.3 Fragen für Experteninterviews

UBA WALABO - Fragen für Expertengespräche

- Was sind Ihrer Meinung nach die besonders wirksamen Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserinfiltration und Verminderung des Oberflächenabflusses? (Bitte auch bisher noch nicht implementierte Maßnahmen nennen.)
- Welche Indikatoren sind Ihrer Meinung nach geeignet, den Erfolg von Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserinfiltration und Verminderung des Oberflächenabflusses zu erfassen? [bisher z.°B. Erosionsschutzwirkung über den theoretisch berechneten Bodenabtrag (Erosionsmodelle) bewertet (z.°B. aus Literaturdaten + Bodenkarten + Nutzungsdaten)]
- Wo sehen Sie die größten Defizite bei der Maßnahmenumsetzung und wodurch lässt sich die Beteiligung an den AUM verbessern?
- Worin sehen Sie die Schwächen und Stärken der derzeitigen guten fachlichen Praxis in Bezug auf die Wasserinfiltration und eine Verminderung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlichen Böden?
- Wie bewerten Sie die Umsetzung von Regelungen zum Bodenschutz auf Länderebene im Vergleich zur Bundesebene in Bezug auf die Erhöhung der Wasserinfiltration und die Verminderung des Oberflächenabflusses, unter anderem für die Bodenschutz- und Wassergesetze? Wie viel Spielraum sollte Länderbehörden hier zugesprochen werden?
- In welchen Rechtsbereichen sehen Sie das größte Potenzial für eine Erhöhung der Wasserinfiltration und Verminderung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlichen Böden (Bodenschutz, Wassergesetze, AgrarzahlungenVerpflichtungsV und G etc.)? In wieweit sind diese Rechtsvorschriften geeignet, um wesentliche Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserinfiltration umzusetzen? Welche sind für Sie die wichtigsten Ermächtigungsgrundlagen, falls vorhanden?
- Wie müssten bestehende Gesetze angepasst werden, um deren Wirksamkeit zu erhöhen? Sehen Sie hier eine Notwendigkeit für konkrete Inhaltsbestimmungen und darauf basierende Sanktionen?
- Wie ist Ihrer Expertise nach der Kenntnisstand bzw. die Datenverfügbarkeit zur flächendifferenzierten Ermittlung des Oberflächenabflusses sowie daraus ableitbarer Prioritätensetzungen bei der Konzipierung von Maßnahmen in der landwirtschaftlichen Flächenkulisse?