



Abschlussbericht

zum Forschungsprojekt

Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete

Juli 2009



Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

„Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete“

Auftraggeber:



Bezirksregierung Detmold

Das Projekt ist Teil der Anpassungspolitik des Landes Nordrhein-Westfalen und wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen finanziert. Weitere Informationen zum Thema Anpassung an den Klimawandel sowie die Anpassungsstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen finden Sie im Internet unter: www.klimawandel.nrw.de.



Projektbearbeitung:



TU-Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau,
Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
Beethovenstraße 51a
38106 Braunschweig

Professor Dr.- Ing. Günter Meon

Bearbeitung: K. Stein, K. Förster, G. Riedel

Titelbilder (von links oben nach rechts unten):

1. Kreuzapotheke in Delbrück (Foto: S. Hartmann)
2. Vorgarten des Hauses Amselweg 6, Henglar (Foto: S. Savory)
3. Wiese hinter dem Hof Siebentalweg 19, Henglar (Foto: S. Savory),
4. Alter Markt in Delbrück (Foto: S. Hartmann)

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1 Einleitung	3
2 Grundlagen der Modellierung von Starkniederschlagsereignissen	5
2.1 Überblick über die Komponenten des Wasserkreislaufs an Hängen	5
2.1.1 Niederschlag.....	6
2.1.2 Interzeption	7
2.1.3 Evapotranspiration.....	8
2.1.4 Direktabfluss	9
2.1.5 Grundwasserabfluss.....	9
2.2 Teilprozesse der Abflussbildung.....	9
2.2.1 Oberflächenabfluss.....	9
2.2.2 Unterirdischer Abfluss.....	10
2.3 Modellkonzepte	12
2.3.1 Prozessbeschreibungen und Skalenbereiche in der hydrologischen Modellierung.....	14
2.3.2 Räumliche Gliederung hydrologischer Modelle	16
2.4 Aktuelle Untersuchungen zur Starkregenproblematik und ihrer Modellierung	18
2.5 Starkregen im urbanen Raum.....	23
3 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete und des Niederschlagsereignisses im August 2007	27
3.1 Untersuchungsgebiete	27
3.1.1 Geologie	27
3.1.2 Landnutzung und Böden.....	29
3.1.3 Topographie.....	30
3.2 Starkniederschläge im August 2007	30
3.2.1 Synoptische Ausgangslage	30
3.2.2 Vergleich der beobachteten Niederschlagshöhen.....	33
4 Anwendung und Beurteilung unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete.....	36
4.1 Rekonstruktion des historischen Starkregenereignisses vom 09.August 2007	36
4.1.1 Presseberichte.....	37
4.1.2 Feuerwehreinsätze	37
4.1.3 Bevölkerungsbefragung.....	39
4.2 Gebietsbegehung.....	49
4.2.1 Abflusshindernisse und Gebietsbesonderheiten	49
4.2.2 Modellparameterermittlung und Unsicherheitsbetrachtung am Beispiel der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.....	51
4.2.2.1 Material und Methoden	52
4.2.2.2 Auswertung	53
4.2.2.3 Ergebnisse und Diskussion	54

4.3	Hydrologische Modellierung.....	59
4.3.1	Ermittlung der Fließwege aus digitalen Geländedaten.....	60
4.3.1.1	Synthetisches Gewässernetz.....	60
4.3.2	Simulation des Starkregeneignisses im August 2007	65
4.3.2.1	Wahl eines geeigneten hydrologischen Modells.....	65
4.3.2.2	Aufbau des Modellsystems	71
4.3.2.3	Parametrisierung.....	79
4.3.2.4	Eingabe der Niederschlagsdaten.....	81
4.3.2.5	Starten des Rechenlaufs.....	82
4.3.2.6	Sensitivitätsanalyse.....	83
4.3.2.7	Simulationsergebnisse und Diskussion	84
4.3.2.8	Unsicherheiten bei der Modellanwendung.....	89
4.3.2.9	Validierung der Simulationsergebnisse.....	90
4.3.3	Belastungsszenarien mit Bemessungsniederschlägen	91
4.3.3.1	KOSTRA-DWD-2000 Niederschlagsdaten	91
4.3.3.2	Auswahl der Dauer der Belastungsniederschläge für die Modellanwendung	95
4.3.3.3	Niederschlagsverteilung.....	96
4.3.3.4	Ergebnisse und Diskussion.....	97
4.4	Hydraulische Simulation.....	100
4.4.1	Verwendete Modellsysteme.....	100
4.4.1.1	Hydro_as-2d.....	101
4.4.1.2	CASC2D.....	103
4.4.1.3	FloodArea.....	104
4.4.1.4	Vergleich der Modelle	105
4.4.2	Datenaufbereitung	106
4.4.2.1	Optionale Ausdünnung von Rasterdaten	106
4.4.2.2	Vorbereiten eines Berechnungsnetzes.....	107
4.4.3	Schnittstelle zwischen Abflussberechnung und Wasserstandsberechnung.....	109
4.4.4	Modellanwendung.....	110
4.4.4.1	Hydro_as-2d.....	110
4.4.4.2	FloodArea.....	115
4.4.4.3	CASC2D.....	116
4.4.5	Ergebnisse der hydraulischen Simulation.....	116
4.4.5.1	Hydro_as-2d.....	116
4.4.5.2	FloodArea.....	120
4.4.5.3	CASC2D.....	123
4.4.5.4	Vergleich der berechneten Wasserstände aus FloodArea und Hydro_as-2d	125
4.4.6	Simulation synthetischer Ereignisse	127
4.4.7	Zusammenfassung und Diskussion.....	129
4.5	Vorschläge zur Darstellung der Ergebnisse der Einzelmethode in Starkregengefahrenkarten	131
4.6	Bewertung der Methoden und Empfehlungen für die Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete.....	134
5	Ausblick.....	138

Literaturverzeichnis	140
Tabellenverzeichnis.....	148
Abbildungsverzeichnis.....	149
Abkürzungen und Symbole	152
A. Anhang	A-1
Kartenanlage	A-19

Zusammenfassung

Der Gegenstand der vorliegenden Beauftragung war die Untersuchung von Möglichkeiten zur Erstellung von Gefahrenkarten in von Starkregen gefährdeten Gebieten. Als Pilotgebiete wurden die Gebiete Ahden/Büren, Delbrück sowie Henglarn (Lichtenau) im Landkreis Paderborn festgelegt. In diesen drei Untersuchungsgebieten traten bei einem Starkregenereignis im August 2007 hohe Schadenssummen auf.

Es wurden Techniken und Verfahren zur Berechnung von Fließwegen und Hochwasserereignissen an Hängen zusammengestellt. In einem nächsten Schritt wurden geeignete Methoden auf Grundlage der vorliegenden Daten angewendet und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erstellung von Gefahrenkarten erprobt und gegenübergestellt. Wegen der häufig fehlenden Vergleichsdaten mussten die Ergebnisse der einzelnen Methoden sorgfältig auf ihre Plausibilität hin untersucht werden. Teilweise wurde eine gute Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit Beobachtungen erzielt.

Die angewendeten Methoden umfassten

- die Rekonstruktion des Starkregenereignisses anhand von Anwohner- bzw. Feuerwehraussagen und Presseberichten,
- eine Gebietsbegehung mit der Aufnahme von abflussrelevanten Strukturen und der Messung der hydraulischen Leitfähigkeit an ausgewählten Stellen,
- die Ermittlung von Fließwegen anhand eines Digitalen Geländemodells,
- die Quantifizierung des Abflusses mit Hilfe eines hydrologischen Modells, sowie
- eine zweidimensionale hydraulische Modellierung der Wasserspiegellagen.

Die Anwohner- und Feuerwehrbefragung in den Untersuchungsgebieten lieferte detaillierte Informationen zu den Fließwegen und Schadensschwerpunkten bei dem Ereignis. Bei der Gebietsbegehung konnten Bereiche mit Gefahrenpotential festgestellt werden. Die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit zeigte die hohe räumliche Variabilität dieses Parameters, die unter anderem die Unsicherheit der Modellergebnisse beeinflusst. Durch die Auswertung der Befragung und anhand von Bildmaterial, das von Betroffenen zur Verfügung gestellt wurde, konnten die generierten Fließwege sowie die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung verifiziert werden. In den ländlicheren Gebieten Ahden und Henglarn stimmten die synthetischen mit den beobachteten Fließwegen sehr gut überein. Die Modellergebnisse für die Höhe und den zeitlichen Verlauf des Oberflächenabflusses waren weitestgehend realistisch. Die Modellanwendung mit Bemessungsniederschlägen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Dauern zeigte, dass in den untersuchten Oberläufen bzw. Oberhängen die größten Scheitelabflüsse bei kurzen Regendauern (30 bis 60 Minuten) mit hohen Intensitäten zu erwarten sind.

Für die Abbildung der komplexen Prozesse bei der Entstehung von Überschwemmungen als direkte Folge von Starkregenereignissen konnte keine der Methoden als „bestgeeignet“ identifiziert werden. Darüber hinaus wurde deutlich, dass nicht in allen Fällen alle Verfahren gleichermaßen anwendbar sind. Als Gründe dafür sind zum einen die starke Abhängigkeit der Methoden von der Verfügbarkeit und Güte der Eingangsdaten zu nennen. Daneben stellte sich heraus, dass der Erstellung von Gefahrenkarten immer eine Einzelfallbetrachtung vorausgehen muss. Die Verwendung mehrerer

Methoden diente dem Ergebnisvergleich im Sinne einer Plausibilitätskontrolle einerseits und der Informationsverdichtung andererseits.

Ausblickend wird neben einer verbesserten Dokumentation von Ereignissen eine großflächige Identifizierung besonders exponierte Bereiche empfohlen. Dazu schlagen wir für weitergehende Forschungen die Entwicklung eines Verfahrens vor, welches auf standardisierten Gefahrenindizes beruht. Mit verbesserten Methoden zur Erstellung von Gefahrenkarten, gut dokumentierten Ereignissen sowie einem Bewertungskonzept zur Abschätzung der Überschwemmungsgefahr infolge Starkregen könnte eine systematische Kartierung gefährdeter Bereiche ähnlich wie bei den Gefahrenkarten an Fließgewässern erfolgen. Darauf aufbauend könnte die Erstellung von Risiko- und Risikomanagementkarten unter Berücksichtigung potenzieller Schäden sowie Konzepte zur Schadensminimierung erfolgen.

1 Einleitung

Am 9. und 10. August 2007 kam es in Ostwestfalen-Lippe zu ungewöhnlich starken Niederschlagsereignissen, die in Siedlungsbereichen erhebliche Schäden verursacht haben. Im Stadtgebiet Delbrück wurden innerhalb von vier Stunden 137 mm Niederschlag gemessen, die durch das Kanalnetz der Stadt nicht abgeführt werden konnten. Das führte zu erheblichen Überschwemmungen im Stadtgebiet. Sämtliche verfügbaren Einsatzkräfte der Feuerwehr, des THW und des DRK waren vor Ort. Dennoch liefen laut Zeitungsberichten etwa 100 Keller voll Wasser. Zahlreiche Hauseigentümer und Mieter hatten Wasserschäden zu beklagen, die insgesamt auf 25 Millionen Euro beziffert wurden. Weitere Schäden waren in Folge der Niederschläge durch Hangabflüsse im ländlichen Raum zu verzeichnen. Oberhalb der Orte Henglarn (Stadt Lichtenau) und Ahden (Stadt Büren) bildeten sich wild abfließende, schlammführende Wasserläufe auf landwirtschaftlichen Flächen, die talwärts in die Ortschaften strömten und zahlreiche Keller überfluteten.

Als Starkregen werden Niederschläge hoher Intensität bezeichnet, die vor allem im Zusammenhang mit Gewittern auftreten. Eine einheitliche Definition existiert nicht, da Starkregen in verschiedenen Klimazonen unterschiedlich abzugrenzen sind (Baumgartner und Liebscher 1995). Fällt Starkregen auf ein räumlich eng begrenztes Gebiet mit hohem Direktabflusspotenzial, kann daraus eine sogenannte Sturzflut entstehen. Starkregenereignisse kommen meist unverhofft und verursachen innerhalb kürzester Zeit große Schäden. Die Bevölkerung und Einsatzkräfte haben nur sehr wenig Zeit um zu reagieren und Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Wegen der kurzen möglichen Reaktionszeiten sind präventive Hochwasserschutzmaßnahmen notwendig. Aktuelle Studien zum Klimawandel in Europa zeigen einen zunehmenden Trend bei der Häufigkeit von Extremwetterereignissen (Bartels et al. 2005, Fricke 2002). Neben längeren, warmen Trockenperioden zählen dazu auch Unwetter mit Niederschlägen hoher Intensität. Für den Nordwesten Deutschlands wird in einer Studie des Deutschen Wetterdienstes (Malitz, 2005) eine deutliche Zunahme der Starkregenereignisse vorausgesagt.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass ein vermehrtes Auftreten von Ereignissen, wie sie im August 2007 im Kreis Paderborn zu beobachten waren, in der Zukunft nicht auszuschließen ist und eine Kenntnis der damit verbundenen Gefahren essentielle Voraussetzung für ein qualifiziertes Einsatzmanagement darstellt. Allerdings existieren im Gegensatz zu Überschwemmungen durch Flusshochwässer für Starkregenereignisse keine abgestimmten Verfahren der Gefahrenanalyse (Castro et al., 2008). Die Schwierigkeiten bestehen in der meist unzureichenden Dokumentation historischer Abflussprozesse infolge von Starkregenereignissen, da Niederschlags- und Abflussdaten auf der erforderlichen Raum- und Zeitskala durch konventionelle Messnetze nicht erhoben werden können (Borga et al., 2008). Eine effektive Vorsorge und Gefahrenabwehr im Ereignisfall ist jedoch nur dann möglich, wenn die Entscheidungsträger und die Bevölkerung über mögliche Gefährdungen informiert sind und wissen, wie sie auf diese reagieren können (LAWA, 2006).

Das Projekt „Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete“ ist eine Pilotstudie, in deren Rahmen anhand von exemplarischen Gebieten die Abflussereignisse in Folge des Starkregens vom August 2007 nachgebildet werden sollen. Der internationale Stand der Forschung zur Starkregenproblematik

und ihrer Modellierung ist durch eine ausführliche Literaturrecherche zusammenzufassen. Es sollen mehrere Ansätze zur Abschätzung der Hochwassergefahr durch Oberflächenabfluss infolge von Starkregenereignissen entwickelt, getestet und ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf Eignung, Datenbedarf, Unsicherheiten, Aufwand und Übertragbarkeit auf größere Gebiete bewertet werden. Es ist Ziel der Untersuchungen, die Möglichkeiten, die die einzelnen Methoden bieten, sowie deren Einschränkungen aufzuzeigen und daraus Empfehlungen für eine Gefahrenanalyse abzuleiten. Der hydrologischen und hydraulischen Simulation soll dabei eine zentrale Bedeutung zukommen. In den Pilotgebieten Delbrück, Ahden und Henglar soll eine Identifizierung von Gefahrengebieten anhand topographischer, geologischer und pedologischer Kenngrößen erfolgen. Die Ergebnisse sollen Form von Gefahrenkarten dargestellt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird das Hauptaugenmerk auf die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration gelegt, da diese entscheidend das Auftreten von wild, das heißt unkontrolliert außerhalb des Fließgewässerbetts, des Vorlandes oder des Entwässerungssystems im urbanen Bereich abfließenden Wässern beeinflussen. Der Abfluss im Gewässer kann im Hochwasserfall zwar auch beachtliche Schäden verursachen, sein Verhalten ist aber in der Regel gut beschrieben und oft durch Pegelbeobachtungen dokumentiert. Weiterhin existieren bereits Hochwassergefahrenkarten, die die potenziellen Überschwemmungsgebiete ausweisen. Aus diesem Grund soll Hochwasser im Sinne von ausufernden Gewässern nicht Bestandteil der Untersuchungen sein. Für wild abfließendes Wasser gibt es dagegen weder zu Fließwegen noch zu Wasserständen Aufzeichnungen. Daher besteht hier besonderer Forschungsbedarf, um in Zukunft die von Starkregen ausgehenden Gefahren besser einschätzen zu können. Die Problematik der Starkregenvorhersage und damit verbundene meteorologische Betrachtungen sind nicht Bestandteil dieses Projektes. Hierzu sei auf einschlägige Literatur wie z. B. Collier (2007) verwiesen.

Dieser Bericht gibt in Kapitel 2 einen detaillierteren Überblick über Prinzipien der Modellierung von Abflussprozessen an Hängen (2.1 bis 2.3) und stellt den aktuellen Stand der Forschung zur Starkregenproblematik und ihrer Modellierung (2.4) sowie zu Starkregen im urbanen Raum (2.5) vor. In Kapitel 3 werden die Untersuchungsgebiete und das Niederschlagsereignis vom 9. August 2007 näher beschrieben. Die Vorstellung unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung der Starkregengefährdung erfolgt in Kapitel 4, wobei die Anwendung der Einzelmethoden in den Pilotgebieten in den Kapiteln 4.1 bis 4.4 ausführlich beschrieben wird. Vorschläge und Empfehlungen zur Darstellung der Ergebnisse in Starkregengefahrenkarten werden in Kapitel 4.5 gegeben. In Kapitel 4.6 erfolgt eine komprimierte Gegenüberstellung und kritische Bewertung der Methoden. Hier werden auch Empfehlungen für die Anwendung und Kombination ausgesprochen. Kapitel 5 und 6 geben einen Ausblick und eine Zusammenfassung. Das Literaturverzeichnis, der Anhang und die Kartenanlage bilden Kapitel 7, 8 und 9.

2 Grundlagen der Modellierung von Starkniederschlagsereignissen

Die Leistungsfähigkeit moderner Computer erlaubt zunehmend eine flächendetaillierte Simulation der hydrologisch-hydraulischen Dynamik von Hochwasserereignissen. Es stehen zahlreiche räumliche Daten für die Modellierung zur Verfügung, wie etwa von Satellitendaten abgeleitete Landnutzungsdaten und genaue digitale Geländemodelle. Rechnerische Ergebnisse sind mit verhältnismäßig wenig Aufwand zu erzielen (Blöschl, 1996). Auch für die Untersuchung von Starkregenhochwasser spielen Simulations- und Modellierungstechniken eine wichtige Rolle.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Komponenten des Wasserkreislaufs an Hängen vorgestellt, die für die Entstehung von Überschwemmungen infolge von Starkregenereignissen potenziell von Bedeutung sind. Dabei wird insbesondere auf die Teilprozesse der Abflussbildung eingegangen. Weiterhin wird die Problematik der Skalenabhängigkeit der Prozessbeschreibung und der räumlichen Gliederung bei der Simulation von hydrologisch-hydraulischen Prozessen erläutert. Abschließend werden aktuelle Untersuchungen zur Starkregenproblematik und Anwendungen im urbanen Raum vorgestellt.

2.1 Überblick über die Komponenten des Wasserkreislaufs an Hängen

Ähnlich wie der globale Wasserkreislauf setzt sich auch der Wasserkreislauf an Hängen aus den Hauptkomponenten Niederschlag, Interzeption, Evapotranspiration und Abfluss zusammen. Diese Prozesse können in weitere Unterprozesse unterschieden werden, die parallel ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen (Abbildung 2.1). Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten des Wasserkreislaufs aufgeführt und Ansätze für deren Nachbildung in hydrologischen Modellen vorgestellt.

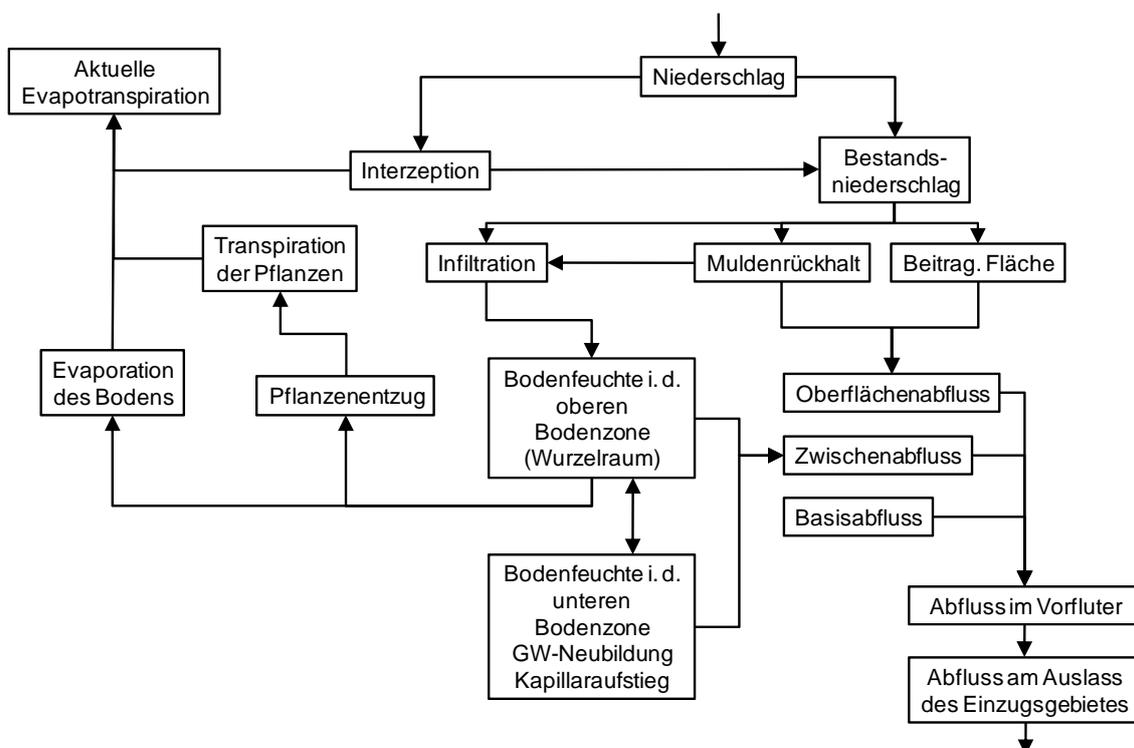


Abbildung 2.1: Die wesentlichen Komponenten des Wasserkreislaufs in ländlichen Gebieten und deren Interaktionen, nach Bronstert (1994).

2.1.1 Niederschlag

Unter Niederschlag versteht man jede flüssige oder feste, aus kondensiertem Wasser gebildete und herabfallende Ausscheidung aus Wolken und Nebel (Häckel, 1999). Nach dem Entstehungsprozess wird in fallenden, abgesetzten und abgefangenen Niederschlag unterschieden. Man unterscheidet Niederschläge weiterhin in zyklonische Niederschläge (die vielfach an Fronten gebunden sind), orographische Niederschläge und konvektive Niederschläge (Baumgartner und Liebscher 1996). Daneben ist eine Klassifizierung nach Niederschlagshöhe und Intensität in Landregen und Schauer möglich.

Für Starkregen ist eine allgemeine Definition nicht möglich, da diese für die verschiedenen Klimazonen variiert (Baumgartner und Liebscher 1996). Nach DIN 4049 wird Starkniederschlag als der Niederschlag definiert, der im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe Niederschlagsintensität hat und damit selten auftritt, z.B. im Mittel höchstens zweimal jährlich (Bartels et al., 1997). Nach der Festlegung des Deutschen Wetterdienstes sind Starkregen Niederschläge, die in der Zeiteinheit folgende Mindestwasserhöhen bringen (Baumgartner und Liebscher 1996):

$$N = \sqrt{5t - \left(\frac{t}{24}\right)^2}, \quad (2.1)$$

wobei N der Niederschlag in mm und t die Dauer des Regens in Minuten darstellen. In Tabelle 2.1 sind für verschiedene Niederschlagsdauern die nach Gleichung 2.1 berechneten Starkregenhöhen aufgeführt.

Tabelle 2.1: Starkregenhöhen in Abhängigkeit von der Regendauer, berechnet nach Gleichung 2.1.

Regendauer t [min]	Mindest-Regenhöhe [mm]
5	5,0
10	7,1
20	10,0
60	17,1
1440	60,0

Lange Niederschlagszeiten führen sowohl in kleinen als auch in großen Einzugsgebieten zu Hochwässern, während kurze Niederschläge in großen Einzugsgebieten meist keine Hochwässer auslösen (Blöschl, 1996). Dies ist größtenteils auf die Anfangsverluste zurückzuführen: In großen Einzugsgebieten wird ab dem Beginn eines Niederschlagsereignisses eine längere Zeitdauer benötigt um die Retentionskapazität zu füllen, da es erstens mehr Retentionsräume (wie z.B. Seen) gibt als in kleinen Einzugsgebieten und zweitens die Intensität des Gebietsniederschlags geringer ist.

Nach Mück (2000) gelten Niederschläge, die mit hohen Intensitäten über einen relativ langen Zeitraum (in einer Größenordnung von wenigen Stunden) eine Fläche überregnen als maßgebende Größe für die Entstehung von Sturzfluten ("flash floods"). Von einer Sturzflut spricht man, wenn innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden nach einem starken Regenereignis, einem Deich- oder Dammbbruch oder dem Bruch einer Barriere (Erdbeben, Eisdamm) plötzlich große Wassermassen ein Gebiet überfluten (Castro et al., 2008).

Die Mehrheit der Sturzfluten wird durch konvektive Niederschlagsereignisse ausgelöst, deren hohe Intensitäten durch schnelle Hebung von Luftmassen innerhalb des Ereignisses begründet werden können. Daneben sind die Dauer der hoch intensiven Niederschläge und damit die Verweilzeit eines konvektiven Niederschlagsystems über einem geographischen Ort für das Auftreten von Sturzfluten entscheidend. Die Hauptursache für quasi-stationäre konvektive Niederschlagsereignisse ist die Entwicklung neuer Niederschlagszellen an den Rückseiten vorangegangener konvektiver Zellen (Mück, 2000). Die minimale Niederschlagshöhe, die nötig ist, um eine Sturzflut zu verursachen, hängt dabei von den hydrologischen Randbedingungen ab, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

2.1.2 Interzeption

Die Interzeption ist der Prozess der zeitweisen Speicherung eines Teils des Niederschlags an der Vegetationsoberfläche. Sie kann insbesondere bei dichten und ganzjährigen Pflanzenbeständen einen großen Anteil des Freilandniederschlags vor dem Erreichen der Bodenoberfläche zurückhalten (Bronstert, 1994). Die Interzeption trägt vor allem zu Beginn eines Niederschlagsereignisses zur Verminderung des hochwasserwirksam zum Abfluss kommenden Wasservolumens bei (Baumgartner und Liebscher 1996). Der Interzeptionsvorgang kann als Speicherfüllung und anschließende Entleerung abstrahiert werden. Derzeit basieren alle Interzeptionsmodelle auf einem Speicheransatz mit Zufluss durch den Niederschlag und Abfluss durch Durchtropfen, Stammabfluss und Verdunstung (Hoffmann 1992, zitiert in Bronstert 1994). Im Folgenden werden zwei häufig verwendete Modelle vorgestellt:

- Überlauf-Modell

Der Interzeptionsprozess wird aufgefasst als Füllung und Entleerung eines Speichers mit konstanter Aufnahmekapazität (Bronstert, 1994). Falls der aktuelle Inhalt des Interzeptionsspeichers C_{veg} die Speicherkapazität der Vegetationsdecke S_{veg} erreicht, fällt zusätzlicher Niederschlag vollständig auf die Bodenoberfläche, der Speicher läuft über:

$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = I_N - Q_{INTab} - IV_{act} \quad (2.2)$$

mit $\frac{\partial C_{veg}}{\partial t}$ = Änderungsrate des Interzeptionsspeicherinhalts über die Zeit [LT^{-1}]

I_N = Intensität des Freilandniederschlags [LT^{-1}]

Q_{INTab} = Abfluss aus dem Interzeptionsspeicher [LT^{-1}]

IV_{act} = Interzeptionsverdunstung [LT^{-1}].

Die Intensität des Bestandsniederschlags I_{Net} ist bei Überschreitung der Speicherkapazität S_{veg} identisch mit dem Abfluss aus dem Interzeptionsspeicher Q_{INTab} . Nicht berücksichtigt wird die Abhängigkeit des durchtropfenden Niederschlags von der Niederschlagsintensität und dem Füllgrad des Interzeptionsspeichers. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass nur ein Parameter (die Speicherkapazität der Vegetationsdecke) notwendig ist, für den vergleichsweise viele Messwerte vorliegen (Bronstert, 1994).

- *Modell von Hoyningen-Huene*

Hoyningen-Huene stellt mittels Regressionsberechnungen einen Zusammenhang zwischen dem Speicherinhalt C_{veg} und der Niederschlagsmenge je Ereignis N_0 sowie dem Blattflächenindex BFI her (N_0 und BFI jeweils in mm). Dieses Modell eignet sich nicht zur zeitlichen Auflösung des Interzeptionsprozesses während eines Ereignisses, sondern nur zur Ermittlung der interzeptierten Wassermenge über das ganze Ereignis (Bronstert, 1994). Die Regressionsbeziehung lautet:

$$C_{veg} = -0.42 + 0.245 \cdot N_0 + 0.2 \cdot BFI - 0.0111 \cdot N_0^2 + 0.0271 \cdot N_0 \cdot BFI - 0.0109 \cdot BFI^2. \quad (2.3)$$

C_{veg} wird wie beim Überlaufmodell durch einen Maximalwert S_{veg} begrenzt, der sich ebenfalls über eine Regressionsbeziehung in Abhängigkeit des BFI berechnen lässt.

Für $N_0 > N_{gr}$ gilt:

$$I_N = 0.935 + 0.498 \cdot BFI - 0.00575 \cdot BFI^2 \quad (2.4)$$

mit $N_{gr} (Grenzregen) = 11.05 + 1.223 \cdot N_0 \cdot BFI$.

Für das in diesem Projekt angewendete Modell wurde die Interzeption nach Hoyningen-Huene abgeschätzt, da sich diese Gleichung besonders für landwirtschaftliche Flächen eignet, die den größten Teil der untersuchten Einzugsgebiete ausmachen.

Mittelfristige saisonale Schwankungen der Interzeption sind meist mit dem jahreszeitlich bedingten Entwicklungszustand der Vegetation verknüpft. Aufgrund der dynamischen Phänologie spielt dies bei landwirtschaftlichen Flächen eine besonders große Rolle (Fritsch, 2001). Da die Bestimmung des Blattflächenindexes tatsächlich sehr aufwendig ist, wird häufig auf Literaturwerte zurückgegriffen (z.B. Breuer et al. 2003).

2.1.3 Evapotranspiration

Die aktuelle Gesamtverdunstung ET_{act} wird nach Dyck (1980) in die drei Komponenten Evaporation des Bodens EV_{act} , Pflanzentranspiration TR_{act} und Interzeptionsverdunstung IV_{act} aufgeteilt:

$$ET_{act} = EV_{act} + TR_{act} + IV_{act}. \quad (2.5)$$

Grundsätzlich ist bei allen drei Komponenten zwischen der potentiellen Rate (maximale Rate bei optimaler Wasserverfügbarkeit) und der aktuellen Rate (entsprechend der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit) zu unterscheiden. Bedingt durch die hohe Luftfeuchtigkeit bei Starkregenereignissen spielt die Evapotranspiration hier eine untergeordnete Rolle und wird bei der Ereignissimulation meist nicht betrachtet. Bei Kontinuumsimulationen ist dieser Prozess aber von großer Bedeutung.

2.1.4 Direktabfluss

Der Direktabfluss als Summe aus Oberflächen- und Zwischenabfluss kennzeichnet das zusätzlich zu der schon vor dem Niederschlagsereignis im Gerinne vorhandene Wasserführung abfließende Wasservolumen. Er ist der Teil des Wassers, der nur mit geringer Zeitverzögerung den Vorfluter erreicht (Baumgartner und Liebscher 1996). Auf die einzelnen Prozesse der Abflussbildung wird in Kapitel 2.2 eingegangen.

2.1.5 Grundwasserabfluss

Hat das Wasser entweder direkt oder teilweise über Zwischenabfluss das Grundwasser erreicht, bewegt es sich, dem größten Gefälle des gesättigten Bodenwasserbereichs folgend, als Grundwasserabfluss dem Vorfluter zu und trägt hier zur Bildung des Abflusses im Vorfluter bei. Die Fließzeit des Grundwassers ist deutlich länger als die des Zwischenabflusses und setzt daher mit einer erheblichen Verzögerung ein (Baumgartner und Liebscher 1996). Da bei der Entstehung von Überschwemmungen infolge von Starkregenereignissen der Grundwasserabfluss kaum von Bedeutung ist, wird er in den folgenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

2.2 Teilprozesse der Abflussbildung

Abflussbildung nennt man den Prozess der räumlichen Aufteilung des Niederschlags auf mehrere Abflusspfade. Die für die Hangskala bedeutsamen Abflussbildungsprozesse sind geprägt durch die Heterogenität des Untergrunds und die Variabilität der kleinräumig wechselnden Feuchtebedingungen (Mendel, 2000). Heterogenität und Variabilität sorgen dafür, dass die Reaktion eines Hangs auf ein Niederschlagsereignis immer eine integrale Reaktion verschiedener, ineinander übergehender Fließmechanismen darstellt. Die schematische Zuordnung von Wasseranteilen nach der Reaktionszeit der Abflusskomponenten in Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss, wie in Kapitel 2.1 erläutert, ist auf der Hangskala nicht ausreichend. Für die Modellbildung müssen daher die tatsächlichen Mechanismen der Abflussentstehung erfasst werden (Gutknecht, 1996). Im Folgenden werden die wichtigsten Fließprozesse erläutert.

2.2.1 Oberflächenabfluss

Für den Begriff Oberflächenabfluss existieren verschiedene Terminologien. Die Definition nach Maniak (2005) beschreibt den Oberflächenabfluss als denjenigen Anteil des Niederschlags, der oberflächlich dem nächsten Vorfluter zufließt. Horton (1933) definiert Oberflächenabfluss wie folgt: "Unter Vernachlässigung der Interzeption durch Vegetation ist Oberflächenabfluss der Teil des Niederschlags, der nicht durch Infiltration in die Bodenzone übertritt". Generell können vier Haupttypen des Oberflächenabflusses unterschieden werden:

1. *Horton´scher Oberflächenabfluss (Infiltration-Excess Overland Flow)*

Horton´scher Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die aktuelle Infiltrationsrate eines Bodens übersteigt, der Boden also aufgrund der Infiltrationseigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt das anfallende Niederschlagswasser nicht oder nicht mehr vollständig aufnehmen kann (Horton, 1933). Voraussetzungen sind im humiden Klimabereich sehr hohe Niederschlagsintensitäten oder Böden mit schlechten Infiltrationseigenschaften. Schlechte Infiltrationseigenschaften sind z. B. gebunden an insgesamt geringe Durchlässigkeit des Bodens, Verschlämmung der Bodenoberfläche, anthropogene Verdichtungen (Versiegelung) des Oberbodens oder das Fehlen gut angebundener Makroporen (Bronstert, 1994).

2. *Verzögerter Horton´scher Oberflächenabfluss (Delayed Hortonian Overland Flow)*

Wenn die Niederschlagsintensität geringer oder der Boden durchlässiger ist, kann der Boden vorerst noch sämtliches Wasser aufnehmen. Aufgrund der Befeuchtung des Bodens nimmt die Infiltrationsrate jedoch ab, und damit entsteht verzögerter Horton´scher Oberflächenabfluss (Mendel, 2000). Dies ist typisch für Böden mit hohem Gehalt an quellfähigen Tonmineralen. In diesem Fall ist die Infiltration in trockenem Zustand hoch (Infiltration entlang von Schwundrissen), in feuchtem Zustand jedoch sehr gering (Gerits et al., 1990).

3. *Return flow*

In den Boden infiltriertes Wasser, das nach einer kurzen unterirdischen Fließstrecke wieder an die Oberfläche austritt, wird als Return flow bezeichnet. Konzentriert tritt das Wasser aus bevorzugten Fließwegen wie großen Bodenröhren (auch Dränrohren) oder Makroporen aus. Diffus tritt das Wasser als Folge von Gefällewechselln im Hang oder durch Ausstreichen von Verdichtungshorizonten aus (Mendel, 2000).

4. *Sättigungsflächenabfluss (Saturation Overland Flow)*

Sättigungsflächenabfluss entsteht, wenn die Speicherkapazität des Bodens komplett erschöpft ist, so dass alles im Anschluss zugeführte Wasser unabhängig von der Niederschlagsintensität oberflächlich abfließt (Kirkby, 1980). Sättigungsflächenabfluss ist der typische Abflussentstehungsprozess in humiden Klimabereichen, also auch in Mitteleuropa. Durch laterale Fließprozesse in den Hängen und/oder durch oberflächennahes Grundwasser bilden sich am Hangfuß bzw. in der Nähe der Vorfluter fast oder vollständig gesättigte Flächen, die bei Niederschlag zu direktem Abfluss führen (Bronstert, 1994).

2.2.2 Unterirdischer Abfluss

Eine schnelle unterirdische Abflussreaktion auf ein Niederschlagsereignis ist nicht ausschließlich an schnelle unterirdische Fließprozesse gebunden. Sie kann ihre Ursache auch in der schnellen (d. h. ereigniswirksamen) hydraulischen Reaktion eines zusammenhängend gesättigten Wasserkörpers auf infiltrierendes Niederschlagswasser haben (Fritsch, 2001). Als Zwischenabfluss (Interflow), auch hypodermischer Abfluss genannt, wird in diesem Zusammenhang der Teil des Sickerwassers bezeichnet, der sich nach der Infiltration lateral durch die oberen Bodenzonen bewegt bis er einen Vorfluter erreicht oder wieder an die Oberfläche exfiltriert (Mendel, 2000).

Fließprozesse im Boden und oberflächennahen Untergrund werden unter dem Begriff unterirdischer Abfluss zusammengefasst (Mendel, 2000). Hierzu zählt man:

1. *Matrixfließen*

Die Bodenmatrix mit Mikro- und Mesoporen (Porendurchmesser $\leq 10^{-3}$ mm) ist für die Speicherung des Wassers durch Kapillar- und Adsorptionskräfte sowie für die langsame Sickerbewegung verantwortlich. Infiltriertes Wasser kann lateral über Schichten mit geringer Durchlässigkeit abfließen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind (Mendel, 2000):

- Große durchströmte Querschnittfläche wegen geringer Fließgeschwindigkeit (daher trägt nur der untere Teil eines Hanges zum Matrixfließen bei),
- hohe hydraulische Leitfähigkeit der oberen Schicht und
- deutlich höhere Niederschlagsintensität als Leitfähigkeit der stauenden Schicht.

Die Geschwindigkeit der Wasserbewegung hängt von der Durchlässigkeit des Bodens ab, die durch Körnung und Porosität bestimmt wird. Bei feuchtem Boden ist die Durchlässigkeit wegen der größeren am Fließprozess beteiligten Querschnittfläche höher als bei trockenem Zustand (Scherrer, 1997).

2. *Fluss in bevorzugten Fließwegen (Flow in preferential pathways)*

Bevorzugte Fließwege im Untergrund können sowohl diskrete Fließwege (Makroporen) als auch diffuse Bereiche hoher Durchlässigkeit sein. Fritsch (2001) unterscheidet Fluss in bevorzugten Fließwegen in:

a) Makroporenfluss

Als Makroporen werden Hohlräume im Boden bezeichnet, die von abgestorbenen Pflanzenwurzeln, Schwundrissen, Tiergängen wie Wurmröhren u.v.m. stammen (Scherrer, 1997). Die durchgängigen und vernetzten Grobporen mit 10^{-3} mm bis 10 mm Durchmesser sind für die schnelle Versickerung von Bedeutung (Mendel, 2000). Es können hohe Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2 cm s^{-1} auftreten (Mosley, 1982). Die Geschwindigkeiten hängen stark vom Aufbau der Böden, ihrer Feuchte und der Beschaffenheit der Makroporen ab (Durchmesser, Kontinuität sowie Interaktionen mit der umgebenden Matrix). Wasserflüsse in Makroporen können im Gegensatz zu Wasserflüssen in der Bodenmatrix bedeutend zur Abflussspitze in Vorflutern beitragen (Mosley, 1982). Bei guter lateraler Vernetzung stellen Makroporen auch in hangabwärtiger Richtung sehr effektive Leitbahnen für den Wassertransport dar (Beven und Germann, 1982).

b) Fließen durch große Bodenröhren (Pipe Flow)

Hierbei handelt es sich um den vereinzelt beobachteten Sonderfall des Bodenröhrenfließens durch extrem große Hohlräume („pipes“). Solche Hohlräume sind die Folge von Feinmaterialauswaschungen und Tieraktivitäten (z. B. Mäuse), oder sind auf abgestorbene Wurzeln zurückzuführen. Für „pipes“ gilt ein Durchmesser von > 10 mm. Eine allgemein akzeptierte Grenze zwischen Makroporen und „pipes“ gibt es aber nicht. Die meisten der Makroporeneigenschaften treffen auch für „pipes“ zu, weswegen sie oft auch zu den Makroporen gezählt werden (Mendel, 2000). Es wird beobachtet, dass das Wasser aus

„pipes“ an Unterhängen, Gefälleklicken und Stellen, wo ein Wechsel der Bodeneigenschaften auftritt, als Return flow wieder an die Oberfläche tritt.

3. *Versatz alten Wassers durch Druckübertragung (Piston Flow)*

Dieser Abflussbildungsprozess wird durch Druckübertragung von vorfluterfernen Standorten auf den vorfluternahen Hang-Grundwasserkörper auch über eingeschlossene Luft gesteuert (Mendel, 2000). In Kombination mit hydraulischen Modellen und tracerhydrologischen Verfahren wird damit der als Hochwasser im Vorfluter erscheinende, schnell reagierende große Anteil alten Wassers erklärt.

4. *Abfluss aus Grundwasserhügeln (-rücken) in der Talaue (Groundwater Ridging)*

Dieser Abflussprozess wird ausschließlich im Talauenbereich beobachtet, wobei in vorfluternahen Talaquiferen gespeichertes Grundwasser ausgedrückt wird. Die Ursache hierfür ist der Anstieg der Kapillarsaumgrenze vorfluternaher Böden bei einem Niederschlagsereignis. Der daraus resultierende Anstieg des hydraulischen Gradienten führt zu einem erhöhten Grundwasserabfluss in den Vorfluter (Cloke et al., 2006). Bei Starkregenereignissen und vorfluterfernen Regionen spielt Groundwater Ridging keine bedeutende Rolle (Mendel, 2000).

2.3 Modellkonzepte

Im Bereich der hydrologischen Modellierung sind zahlreiche Modellkonzepte zur Bearbeitung verschiedener Fragestellungen entwickelt worden. Neben Niederschlag-Abflussmodellen und Wasserhaushaltsmodellen sind in der quantitativen Hydrologie Strömungsmodelle und Wasserstandsmodelle zur Abschätzung von Überschwemmungen und Grundwassermodelle zu nennen (Giertz, 2004). Weitere Modelltypen, die neben Wasserflüssen auch Stoffflüsse betrachten, sind Bodenerosionsmodelle und Modelle zur Simulation des Austrags und der Dynamik von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln. Häufig sind auch verschiedene Modellansätze in einem Modellsystem integriert, da viele Prozesse miteinander gekoppelt ablaufen.

Im Allgemeinen werden hydrologischen Modelle in deterministische und stochastische Modelle unterschieden.

1. *Deterministische Modelle*

Prinzipiell lassen sich bei der Simulation des Systemverhaltens mit deterministischen Modellen zwei Klassen unterscheiden: Modelle, die das Verhalten imitieren („black box“-Modelle) und Modelle, die die Wirkungsstruktur des Systems nachbilden, um das Verhalten zu erzeugen („white box“-Modelle) (Gattke, 2006). In Tabelle 2.2 werden Eigenschaften der beiden Ansätze zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Modellierungsstrategien und ihre prinzipiellen Eigenschaften (nach Gattke, 2006).

black box Modell	white box Modell
beschreibend	erklärend
Kalibrierung	Parametrisierung
empirisch	physikalisch basiert
räumlich zusammenfassend ("lumped")	räumlich verteilt ("distributed")
integriert	differenziert
verhaltensorientiert	prozessorientiert
interpolierend	extrapolierend

Einen Kompromiss zwischen den physikalisch basierten Prozessmodellen („white box“) und den „black box“-Modellen stellen die konzeptionellen Modelle („grey box“-Modelle) dar. Die Modellstruktur orientiert sich weitgehend an Abflussprozessen im Einzugsgebiet, verzichtet jedoch auf die vollständige Verwendung der hydrodynamischen Grundgleichungen. Häufig stützen sich die Modellkonzepte nur auf die Kontinuitätsgleichung und verwenden Analogien (z.B. Einzellinearspeicher) für die Beschreibung der Prozesse. Durch diese Vereinfachungen wird eine gröbere räumliche und zeitliche Diskretisierung möglich als bei den „white box“-Modellen. Oftmals bestehen Modelle sowohl aus physikalischen als auch aus konzeptionellen Bausteinen, was eine eindeutige Klassifizierung schwierig macht (Gattke, 2006).

2. Stochastische Modelle

Bei stochastischen Modellen werden zur Beschreibung hydrologischer Phänomene Verfahren der mathematischen Statistik angewendet. Man unterscheidet zwischen probabilistischen Verfahren für reine Zufallsprozesse (z. B. Häufigkeitsanalysen zur Bestimmung des Auftretens bestimmter Hochwässer) und rein stochastischen Verfahren für nicht rein zufällige (zeitabhängige) Prozesse. Die rein stochastischen Verfahren lassen sich weiter unterteilen in Korrelations- und Regressionsanalysen, Zeitreihenanalysen und Simulationsverfahren zur Synthese von Zeitreihen. Stochastische Modellierungsansätze besitzen aufgrund ihrer Parameterbeschreibung über statistische Verteilungsfunktionen Vorteile in der Betrachtung der Unsicherheit von Parameterwerten auf unterschiedlichen Raumskalen. Dies ist wichtig, wenn die Zufälligkeit des untersuchten Prozesses so groß ist, dass deterministische Berechnungen wenig Aussagekraft besitzen (Bongartz, 2001). Im Allgemeinen existieren für die Oberflächenabflüsse bei Starkregenereignissen keine Beobachtungsreihen, was eine Anwendung von stochastischen Modellen ausschließt. Im Rahmen des Projektes zur Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete wurde für hydrologische Simulationen das deterministische, physikalisch basierte Modell KINEROS2 verwendet. Eine ausführliche Modellbeschreibung erfolgt in Kapitel 4.3.2.1.

2.3.1 Prozessbeschreibungen und Skalenbereiche in der hydrologischen Modellierung

In der Modelltheorie von Niederschlag-Abflussmodellen unterscheidet man die Begriffe Belastungsbildung, Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf.

Die *Belastungsbildung* (Regen und Schneeschmelze) als Prozess der räumlich-zeitlichen Verteilung der Belastung ist Ursache der Abflussbildung. Bei der Modellierung der Belastungsbildung werden i.d.R. aus gemessenen Punktniederschlägen Flächenmittel gebildet, neuerdings auch durch Fernerkundungsdaten von Bodenradar und Satelliten. Die Prozesse der *Abflussbildung* müssen in der Aufgabenstellung angepassten zeitlichen und räumlichen Maßstabsbereichen (Skalen) beobachtet und modelliert werden. Die Begriffe Mikro-, Meso- und Makroskala werden problembezogen unterschiedlich definiert. Die Maßstabsbereiche beginnen mikroskalig bei der Bodenpore, dem Bodenkompartiment (z. B. Stechzylinderprobe) oder dem Lysimeter. Mesoskalig schließen sich die verschiedenen Beregnungs-, Untersuchungs-, oder Teilgebietsflächen (z. B. Hangfläche) bis zum kleinen Einzugsgebiet an, und enden makroskalig beim großen Einzugsgebiet. Um bestimmte Prozesse auf einer vorgegebenen Raumskala modellieren zu können, muss dementsprechend die korrespondierende Zeitskala gewählt werden. Für räumlich hoch aufgelöste Modelle resultieren hieraus Einschränkungen für die maximale Größe der Zeitschrittweite. So ist z.B. eine räumlich detaillierte Modellierung der Wasserbewegung auf Hangflächen infolge von Horton'schem Oberflächenabfluss auf Tagesschrittbasis nicht möglich (Gattke, 2006). In Abbildung 2.2 sind die räumlichen und zeitlichen Skalenbereiche einiger hydrologischer Prozesse dargestellt.

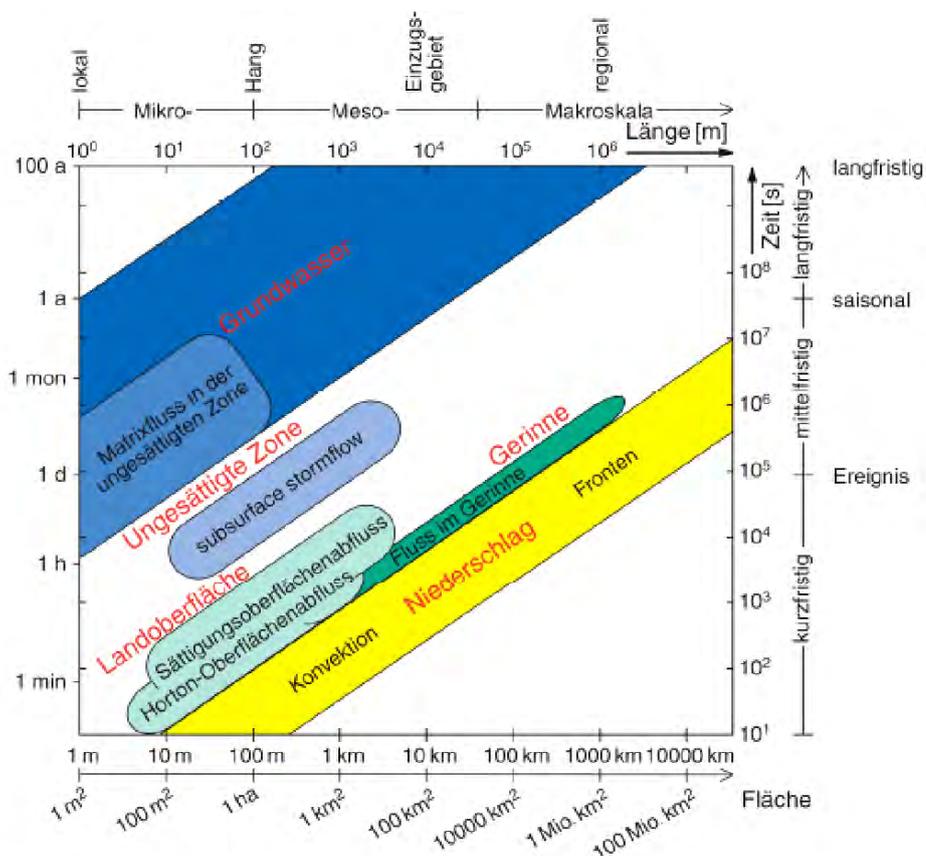


Abbildung 2.2: Charakteristische Raum- und Zeitskalen einiger hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung, aus Fritsch (2001).

Die Wirkung der Abflussbildung ist die *Abflusskonzentration*. Dieser Begriff ist definiert als Sammlung des abflusswirksamen Niederschlags in die Abflussganglinie aus einem Einzugsgebiet (Baumgartner und Liebscher 1996). Der Abfluss sammelt sich am Ort der Entstehung zunächst in kleinen, meist intermittierenden Rinnsalen (Erosionsrinnen, Ackerfurchen, Senken, Gräben oder Hohlwegen) und bodeninneren Fließbahnen und danach in einem perennierenden Gerinne (Bach, Fluss, Strom), das typischerweise mit der ungesättigten und gesättigten Bodenzone kurzgeschlossen ist. Als *Wellenablauf* bezeichnet man den Prozess des Durchflusses einer Welle und die Dämpfung der Scheitelabflüsse entlang eines offenen Gerinnes als Folge der Zuflüsse (Wirkung der Abflussbildung) sowie von Eigenschaften des Gerinnes und des Vorlandes (Gefälle, Querschnitt, Sohlenrauigkeit). Zur Quantifizierung werden z.B. einfache Speicherübertragungsfunktionen oder Differentialgleichungen auf der Grundlage hydrodynamischer Gesetze verwendet. Weitere Begriffe hierfür sind Abflusstransformation oder „flood routing“ (Mendel, 2000).

Im Allgemeinen basieren die einzelnen prozessbeschreibenden Gleichungen hydrologischer Modelle auf dem Prinzip der Kontinuität (Massenerhaltung), wonach gilt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p - i \quad (2.6)$$

mit h = hydraulische Höhe zum Zeitpunkt t an der Position x [L]

x = Raumachse entlang der Fließrichtung [L]

q = volumetrischer Wasserfluss pro Querschnittfläche [$L^{-2} T^{-1}$]

p = Niederschlagsrate [$L T^{-1}$]

i = Infiltrationsrate [$L T^{-1}$].

Die Summe der Zustandsänderungen ist gleich der Summe der Systemein- und -ausgaben innerhalb eines Zeitschritts. Daher wird nicht nur der Systemzustand, sondern auch seine zeitliche Änderungsrate zur modellbildenden Größe (Gattke, 2006). Modelle, die neben der Kontinuitätsgleichung auch den Impulserhaltungssatz und den Energieerhaltungssatz in einem gekoppelten Gleichungssystem berücksichtigen, werden auch als hydraulische Modelle bezeichnet. Häufig wird der Niederschlags-Abflussprozess als hydrologischer und der Abfluss im offenen Gerinne als hydraulischer Prozess beschrieben (Zoppou, 2001). Die Lösung der Modellgleichungen erfolgt zum überwiegenden Teil anhand von numerischen Diskretisierungsansätzen, wie z.B. durch die Methode der Finiten Differenzen oder Finiten Elemente. Analytische Lösungen sind nur für sehr einfache Probleme verfügbar. Der Ansatz der Finiten Differenzen ist der am häufigsten verwendete, da er für beliebige partielle Differentialgleichungen geeignet ist. Man unterscheidet zwischen expliziten und impliziten Verfahren. In expliziten Verfahren wird die unbekannte Variable im nächsten Zeitschritt für alle Raumschritte auf Grundlage der Werte des aktuellen Zeitschrittes berechnet. Dadurch entsteht eine große Anzahl einfacher linearer Gleichungen, anhand derer direkt die Unbekannte für den nächsten Zeitschritt bestimmt werden kann. Bei impliziten Verfahren wird ein Gleichungssystem unter Miteinbeziehung bekannter sowie unbekannter Variablen und der Randbedingungen aufgestellt. Dadurch entsteht ein Gleichungssystem aus gekoppelten simultanen Gleichungen, das gelöst werden kann. Eine ausführliche Darstellung numerischer Verfahren geben z. B. Schwarz und Köckler (2006). Der Vorteil von impliziten Verfahren gegenüber expliziten Verfahren ist ihre Stabilität. Dadurch ist der Anwender bei der Zeitschrittwahl weniger eingeschränkt. Bei expliziten Verfahren ist die wesentliche Voraussetzung für numerische Stabilität, dass der Zeitschritt kleiner ist als die Zeit, die eine

ablaufende Welle im Kanal benötigt, um den gewählten Wegschritt zu durchlaufen. Die Einhaltung eines Stabilitäts-Kriteriums (z. B. Courant-Kriterium) ist daher erforderlich. Da der Oberflächenabfluss bei Starkregen durch stark instationäre Abflüsse gekennzeichnet ist, sind kleine Zeitschritte erforderlich, um das Abflussverhalten adäquat zu beschreiben (Zoppou, 2001).

2.3.2 Räumliche Gliederung hydrologischer Modelle

Aufgrund der räumlichen Heterogenität der hydrologischen Prozesse sollten Prozessmodelle und prozessorientierte konzeptionelle Modelle eine adäquate räumliche Gliederung des Untersuchungsgebiets ermöglichen (Gattke, 2006). Die fundamentalen Bausteine eines räumlichen Modells stellen seine Modellelemente dar. Sie sind die kleinsten räumlich homogenen Einheiten, deren variable Verteilung im Untersuchungsgebiet die Repräsentation der räumlichen Heterogenität ermöglicht. Es gibt drei Möglichkeiten, die natürliche räumliche Heterogenität zu berücksichtigen:

- die Nutzung flächenvariabler hydrometeorologischer Eingangsgrößen (Niederschlag, Temperatur etc.),
- die Verwendung unterschiedlicher Modellansätze für in ihrem Verhalten anders wirkende Teilgebiete (z. B. Stadtgebiete, Ackerflächen) und
- die Verwendung unterschiedlicher Parameter bei gleichen Modellansätzen für unterschiedlich reagierende Teilgebiete (z. B. Verdunstung von Wald und landwirtschaftlichen Flächen).

Insbesondere konzeptionelle Modelle beschreiben die vertikalen (Abflussbildung) und lateralen Prozesse (Abflusskonzentration, Wellenablauf) meist getrennt. Dadurch wird die Komplexität mehrdimensionaler Betrachtungen der Wasserbewegung in der wechselfeuchten Bodenzone reduziert. Es existieren drei grundlegende digitale Darstellungsweisen der Geländeoberfläche:

- Höhendaten in Form regelmäßiger Raster
- Linienhafte Höheninformationen
- Punkte mit xyz-Koordinaten in unregelmäßigen Abständen

Aus diesen drei Darstellungsweisen lassen sich vier grundlegende Raumgliederungen hydrologischer Modelle ableiten:

- Regelmäßige Raster, am häufigsten verwendete Diskretisierung, z. B. MIKE SHE (Christiaens und Feyen, 2002)
- Auf Konturen basierend, z. B. THALES (Blöschl und Grayson, 2002)
- TIN - Triangular Irregular Network, z. B. SHIFT (Blöschl und Grayson, 2002)
- Hangelemente und Gewässerabschnitte bis hin zu Einzugsgebieten, z. B. KINEROS2 (Woolhiser et al., 1990)

Rasterbasierte Modelle ermöglichen mit wenig Bearbeitungsaufwand meist eine feinere räumliche Auflösung als Modelle, die Polygon-Hangelemente verwenden. Wesentliche Nachteile rasterbasierter Modelle sind die rein geometrische Festlegung der Einheitsflächen ungeachtet der Gebietseigenschaften und die Tatsache, dass die Rechendauer mit höherer Auflösung in der Regel stark zunimmt. Die Dreiecksvermaschung (TIN) ist die effizienteste Form der Oberflächengliederung bezüglich des Speicherbedarfs und der geometrischen Genauigkeit. Nachteilig ist, dass die Berechnung von topologischen Relationen, Distanzen und Flächengrößen wesentlich komplexer ist als beim Raster (Gattke, 2006). Bei Modellen, die eine Gebietseinteilung auf Grundlage von Hangelementen vornehmen, kann die räumliche Auflösung an die Variabilität der Eingangsdaten angepasst werden. Hangelement-basierte Modelle zeichnen sich meist durch eine geringere Rechendauer aus. Der Aufwand bei der Parametrisierung steigt aber mit der Anzahl der Einheitsflächen stark an.

Blöschl (1996) vergleicht vier Modelle mit unterschiedlicher Flächengliederung, die auf Quadratrastern (DISTFW), Dreieckselementen (SHIFT), Hangelementen (KINEROS) und Höhengichtlinien (THALES) basieren. Die hydrologisch/hydraulischen Ansätze in den vier Modellen waren ähnlich: Oberflächenfließen und Gerinneabfluss wurden durch die Kontinuitätsgleichung, die kinematische Näherung für die Impulsgleichung sowie den Reibungsansatz nach Manning-Strickler beschrieben. Die Modelle wurden auf ein 9 ha großes Einzugsgebiet in Oklahoma angewendet. Die Unterschiede zwischen den berechneten Abflusswellen waren relativ groß (bis zu 30 % für den Scheiteldurchfluss und bis zu 37 % für die Zeit bis zum Scheitel). Die schnellste Reaktion wurde mit dem Höhengichtenmodell berechnet, da der Wassertropfen dem kürzesten Weg hangabwärts folgt (Falllinie). Die langsamste Reaktion wurde mit dem Rastermodell berechnet, da der Wassertropfen nicht der Falllinie, sondern einem längeren Weg zu einem der acht Nachbarelemente folgt. Insgesamt zeigte der Modellvergleich, dass die Struktur der räumlichen Diskretisierung die berechneten Abflüsse stark beeinflusste. Die geeichten Modellparameter hingen ebenfalls stark von der Modellstruktur ab. Eine optimale Modellkomplexität wurde sowohl von der Fragestellung als auch von den verfügbaren Daten beeinflusst. Dies bedeutet für die flächendifferenzierte Modellierung, dass keine wesentlich feinere räumliche Auflösung notwendig ist, als hydrologische Daten vorliegen (Blöschl, 1996).

Eine Modellauswahl muss in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und der Datenverfügbarkeit vorgenommen werden. Wenn es das Ziel ist, eine flächenbezogene Aussage zu treffen, bieten sich Rastermodelle eher an als Vektormodelle, die prädestiniert für Zielpunktaussagen sind.

2.4 Aktuelle Untersuchungen zur Starkregenproblematik und ihrer Modellierung

In Rahmen von Untersuchungen verschiedener Autoren wurden diverse Niederschlag-Abflussmodelle für die Starkregenproblematik entwickelt und angewendet, die sich in der Beschreibung der Abflussprozesse, der Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der Modellparameter sowie der zeitlichen Auflösung abhängig von der betrachteten Skala stark unterscheiden. Im Folgenden wird eine Übersicht über aktuelle Untersuchungen zur Starkregenproblematik gegeben. Dabei wurde eine Unterteilung in drei Skalenbereiche vorgenommen und beispielhaft zu jeder Skala eine Untersuchung detaillierter beschrieben.

1. Einzugsgebietskala (> 1000 km²)

Bei Einzugsgebietsgrößen von 100 km² bis mehr als 1000 km² sind nach Torres (1992) räumlich zusammenfassende ("lumped") Modelle aufgrund ihres geringen Datenbedarfs besser geeignet als räumlich verteilte, physikalische Modelle. Wenn nur wenig relevante Daten, wie die räumliche Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit oder der Anfangswassergehalt des Bodens vorhanden sind, lassen sich mit diesen Modellen oft realistischere Vorhersagen treffen als mit verteilten Modellen. Grundlage des von Torres (1992) entwickelten Modellansatzes ist das Einheitsganglinienverfahren ("Unit Hydrograph approach"), mit dem die Abflusspende anhand einer linearen Transferfunktion aus dem effektiven Niederschlag berechnet wird. Nach Johnson (2000) wird dieses Verfahren oft angewendet, da es sich um eine relativ einfache Methode handelt, für die die benötigten Daten gut verfügbar sind und die sich vor allem für unbeobachtete Einzugsgebiete eignet. Ein Nachteil des Einheitsganglinienverfahrens ist, dass es linear und zeitinvariant ist. Weiterhin werden die Gebietseigenschaften für das gesamte Einzugsgebiet als einheitlich angenommen. Weist z. B. die hydraulische Leitfähigkeit räumliche Heterogenität auf, kann die Berechnung der Infiltration zu unrealistischen Resultaten führen. Da der Niederschlag ebenfalls nicht räumlich differenziert betrachtet wird, muss die Skala des Einzugsgebiets der Skala des Niederschlags angepasst werden, um zu realistischen Ergebnissen zu gelangen. Bei großen Einzugsgebieten ist daher eine Unterteilung in Teileinzugsgebiete erforderlich (Johnson, 2000).

Untersuchungsbeispiel:

Blöschl et al. (2008) entwickelte anhand einer Fallstudie im Kamp-Einzugsgebiet in Österreich ein Sturzflutvorhersagesystem. Es handelt sich um ein relativ großes Einzugsgebiet (1550 km²) mit Höhenunterschieden von bis zu 700 Metern. Mit dem Modell wurden die Prozesse wie Bodenfeuchteentwicklung und Hangabfluss auf der Elementskala, die der Auflösung des verwendeten Rasters von 1 km² entsprach, formuliert und für 13 Teileinzugsgebiete mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten berechnet. Aufgrund der Berechnung auf der Elementskala wurde die Einzugsgebietscharakteristik gut wiedergegeben. Die Modellierungsstrategie basierte auf dem Konzept der "dominanten Prozesse". Bei diesem wird angenommen, dass im zeitlichen Verlauf des Ereignisses an den verschiedenen Punkten des Einzugsgebiets immer nur eine kleine Anzahl von Prozessen das Abflussgeschehen bestimmt, wie z. B. schneller Oberflächenabfluss infolge von konvektiven Regenereignissen. Für die Generierung des Abflusses im offenen Gerinne wurde ein räumlich zusammenfassendes Modell ("lumped model") verwendet, das anhand von einzelnen

Ereignissen kalibriert und dessen Ergebnisse mit denen eines hydrodynamischen Modells verglichen wurde. Durch diese Kalibrierung wurden die Vorteile beider Modellansätze kombiniert. Die Güte der Modellergebnisse hing stark von der Genauigkeit der Niederschlagsdaten ab. Systematische Fehler in den Niederschlagsdaten führten zu Abweichungen bei den Werten des Bodenwassergehalts und verminderten daher die Exaktheit der Vorhersagen. Bei fünf Sturzflutereignissen betragen die mittleren Fehler der Vorhersagen 10-30 % für die Zeitspanne von 4-24 h. Bei einer Betrachtung über das gesamte Jahr waren die Fehler deutlich geringer. Das System ist seit 2006 beim Vorhersagezentrum des Kamp-Einzugsgebiets in Gebrauch. Die Untersuchung zeigt, dass sich Modelle, die die räumliche Variabilität der Modellparameter und die hydrologischen Prozesse zusammenfassend berücksichtigen, für die Modellierung von Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen in großen Einzugsgebieten eignen.

2. Einzugsgebietsskala (1 km^2 bis $< 1000 \text{ km}^2$)

Für die Vorhersage von Sturzfluten in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten, die vor allem im Mittelmeerraum, z. B. Frankreich (Gaume et al. 2004, Estupina-Borrell 2006), Spanien (López-Avilés 2007, Nicolau 2002) oder Israel (Rozalis 2008), aber auch in den USA, z. B. in Texas (Knebl 2004), Colorado (Johnson 2000), oder New Mexiko (Snell 2002), sowie in ariden Regionen z. B. in Saudi-Arabien (El-Hames 1998), Ägypten (Foody 2004) oder Oman (Al-Qurashi 2008), eine große Rolle spielen, wurden größtenteils räumlich verteilte, physikalisch basierte Modelle entwickelt und angewendet. Die Modelle unterscheiden sich vor allem in der Bestimmung des Bodenwassergehalts und der Berechnung der Infiltration. Neben empirischen Verfahren, wie z. B. der Soil Conservation Service Curve Number Technique (USDA-SCS 1985) werden physikalisch basierte Ansätze wie die Infiltrationsgleichung nach Green und Ampt (1911) oder die Richards-Gleichung (1931) (s. Gleichung 4.14) verwendet.

Bei der SCS-Methode wird für verschiedene Bodengruppen die Infiltrationskapazität anhand des "Curve Number" (CN)-Parameters quantifiziert. Aus den CN-Werten und den Niederschlagsdaten kann über empirische Beziehungen der Abflusskoeffizient berechnet werden (Knebl, 2004). Dieser Ansatz zeichnet sich durch die einfache Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags aus, da der Abflusskoeffizient nur von dem einen Parameter CN abhängt (Gaume et al., 2004).

Für eine detailliertere Beschreibung der Infiltration eignen sich die Ansätze nach Green und Ampt (1911), van Genuchten (1980) oder Richards (1931). Szilagyi (2007) verwendet zur Berechnung der Infiltration die Richards-Gleichung. In dieser Untersuchung wird die Nichtlinearität der Abflussreaktion in kleinen Einzugsgebieten hervorgehoben. Diese konnte nicht allein durch die Vorfeuchte des Bodens und die Anwendung der kinematischen Welle-Gleichung begründet werden. Die Nichtlinearität hat ihre Ursache darin, dass bei hohen Niederschlagsintensitäten Oberflächenabfluss aufgrund der Überschreitung der Infiltrationsrate (Horton'scher Oberflächenabfluss) und durch Sättigung des Bodens (Sättigungsflächenabfluss) schneller auftritt, was sich bei den Ergebnissen der numerischen Simulation in steileren Abflussganglinien und einer kürzeren Abflusskonzentrationszeit ausdrückte (Szilagyi, 2007).

Snell (2002), Vieux (2004), Krysanova et al. (1998) und Liu (2006) betonen die aktuellen Fortschritte in der Entwicklung und praktischen Anwendung von räumlich verteilten Modellen durch den Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS). GIS-Anwendungen ermöglichen eine komfortable

Aufbereitung und Nutzung räumlich verteilter Daten wie Landnutzungs- und Bodendaten sowie die Verwendung digitaler Geländemodelle, aus denen zahlreiche Informationen wie Hangneigung und Fließwege abgeleitet werden können.

Reed et al. (2007) empfehlen den Einsatz von räumlich verteilten Modellen für die Sturzflutvorhersage in unbeobachteten Einzugsgebieten. Die Verwendung von hochaufgelösten Daten, vor allem von Niederschlagsradardaten, kann die Vorlaufzeit von Sturzflutvorhersagen verkürzen und die Unsicherheiten der Modellierung verringern.

Untersuchungsbeispiel:

Estupina-Borrell (2006) entwickelte das deterministische, physikalisch basierte, räumlich verteilte Modell MARINE zur Sturzflutvorhersage in mittleren Flusseinzugsgebieten. Es wurde für mehrere Sturzflutereignisse in unterschiedlichen Einzugsgebieten französischer Flüsse ($\approx 250 \text{ km}^2$) getestet. Datengrundlage waren ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von $50 \times 50 \text{ m}$ und eine Karte der Landnutzung, die aus Satellitenbildern (LANDSAT TM image) abgeleitet wurde. Der Anfangswassergehalt des Bodens wurde indirekt über den Basisabflusses und vorangegangene Niederschläge (Radardaten) abgeschätzt. Die Infiltrationsprozesse wurden mit einem konstanten Abflusskoeffizienten oder dem Green und Ampt-Modell (1911) berechnet. Die hydraulische Modellierung des Abflusses im Fluss erfolgte in einem separaten Modul durch die Lösung der 1D Saint-Venant Gleichung. Innerhalb dieses Moduls wurden Abflussganglinien für einzelne Gewässerquerschnitte generiert. Da es sich um ein Echtzeit-Vorhersagemodell für Sturzflutereignisse handelt, lag der Schwerpunkt auf der Betrachtung des Oberflächenabflusses, wobei aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Prozesses Evapotranspiration, Interzeption und Grundwasserabfluss vernachlässigt wurden. Für die Modellierung des Oberflächenabflusses wurde die kinematische Welle-Gleichung verwendet. Die Anwendung des Modells lieferte hinreichend präzise Ergebnisse für die Vorhersage von Sturzfluten und wird vom nationalen französischen Hochwasservorhersage-Service genutzt. Für exakte Vorhersagen sind allerdings Satellitendaten und Niederschlagsradardaten essentiell.

3. Hangskala ($< 1 \text{ km}^2$)

Die hydrologische Modellierung auf der Hangskala hat sich in den letzten Jahrzehnten stark entwickelt. Nach Bronstert (1999) leitete die steigende Anzahl von experimentellen Felduntersuchungen an Messhängen unter verschiedenen klimatologischen, hydrologischen und pedologischen Bedingungen die Entwicklung und Anwendung von unterschiedlichen hydrologischen Modellen ein (z. B. Kirkby 1980, Dunne 1980, Bork 1980, Zuidema 1985, Gutknecht 1996, Markart et al. 1997, Scherrer 1997, Srinivasan 2002, Sarkar 2008, Gomi 2008). Die Zielsetzung und Motivation der Modellentwicklung lässt sich nach Bronstert (1999) in drei Kategorien zusammenfassen.

- *Entwicklung eines Untersuchungswerkzeugs, mit dem die unterschiedlichen hydrologischen Prozesse und deren Interaktionen auf der Hangskala simuliert werden können.* Diese Werkzeuge dienen einerseits der Analyse und Quantifizierung von experimentellen Messungen, andererseits ermöglichen sie einen tieferen Einblick in ungelöste Fragen der Hanghydrologie, wie z. B. Effekte der Datenvariabilität und Parameterunsicherheiten. Die mathematische Simulation aller von der Topographie abhängigen lateralen Flüsse, wie Oberflächenabfluss, ungesättigtes Fließen durch

die Bodenmatrix, aber auch gesättigtes Fließen über einer undurchlässigen Bodenschicht oder Grundwasserabfluss bedarf einer räumlich und zeitlich detaillierten Modellierung, bei der sowohl die vertikalen als auch die lateralen Fließwege berücksichtigt werden. Für die Simulation von Transportprozessen, die an den lateralen Wasserfluss geknüpft sind, wie Erosion oder der Transport partikulär gebundener Chemikalien, ist darüber hinaus die Implementierung dieser Prozesse im Modell erforderlich. Beispiele für Untersuchungen, in denen entsprechende Modelle entwickelt wurden, sind die von Beven und Germann (1982), Germann (1990), Faeh et al. (1997) und Weiler (2001), die den Fokus auf die Betrachtung des Makroporenflusses und dessen Interaktion mit der Bodenmatrix legen. Zuidema (1985), Anderson und Burt (1990), Freer (1997) sowie Tromp-van Meerveld und Weiler (2008) legten den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen auf die Betrachtung des unterirdischen Abflusses. Die Simulation des Oberflächenabflusses wurde z. B. von Gerits et al. (1990) beschrieben. In dieser Untersuchung wurde der Einfluss des Gefälles, der Länge und der Form (konkav, konvex) des Hanges auf den Oberflächenabfluss herausgestellt. Es wurde unter anderem gezeigt, dass bei konvexen Hängen die Höhe des Oberflächenabflusses zum Hangfuß zunimmt. Liu et al. (2006) entwickelten ein Modell zur Analyse der Bodenerosion an Hängen, in dem sie zwischen Rillenerosion und Flächenerosion unterscheiden, die unabhängig von Infiltration und Oberflächenabfluss generiert wurden. Nearing et al. (2005) vergleichen den Einfluss von Landnutzungs- und Klimaänderung (erhöhte Niederschlagshöhen und -intensitäten) auf die Bodenerosion anhand von Modellanwendungen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass die Änderung von Vegetationsbedeckung und Niederschlagshöhen bzw. -intensitäten größere Auswirkung auf die Bodenerosion als auf den Oberflächenabfluss hat. Außerdem wurde festgestellt, dass sich Landnutzungsänderungen stärker auf die Bodenerosion auswirken als die Erhöhung von Niederschlagshöhen und -intensitäten.

- *Entwicklung operationeller Prognosemodelle zur Anwendung in umwelt- und ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen.* Trotz der anwendungstechnischen Grenzen mehrdimensionaler Modelle, die die Vielzahl der hydrologischen Prozesse berücksichtigen, gibt es aufgrund des Bedarfs nach einer hydrologischen Modellierung und Umweltsystemanalyse, die über die konventionellen Bereiche der Einzugsgebietshydrologie hinaus geht, eine steigende Nachfrage nach operationell einsetzbaren Simulationssystemen auf der Hangskala (Bronstert, 1999). Beispiele für diese Anwendungsbereiche sind die Untersuchungen von hydrologischen Bedingungen, die Bergrutsche verursachen, z. B. Kirnbauer (2000), die Hochwasservorhersage (Sturzflutvorhersage) z. B. Georgakakos (2005); Taramasso et al. (2005) oder Gupta (2006) und die Untersuchung der Interaktion von Oberflächengewässern (Flüsse, Seen) mit Feuchtgebieten und Flussauen, z. B. Hattermann et al. (2006).
- *Grundlage für physikalisch basierte Einzugsgebietsmodelle, deren Flächengliederung vektorbasiert ist.* Kirkby (1980) weist auf die Bedeutung der Hanghydrologie hin, da in hügeligen Regionen 95% des Wassers im Gerinne zuvor über Hänge und deren Böden abgefließen ist. Topographisch strukturierte Landschaften können demnach als ein Mosaik aus Hängen abstrahiert werden. Diese Betrachtungsweise führte zu der Entwicklung von physikalisch basierten, räumlich verteilten Modellen mit einem Hang als kleinste Untereinheit oder Diskretisierungselement. Im Vergleich zu einer rasterbasierten Diskretisierung können diese Modelle auf die spezifische Topographie zugeschnitten werden (s. Kapitel 2.3.2). Beispiel für

Modelle dieser Art ist das Modell Topog Yield (Vertessy et al. 1993) und das von Woolhiser et al. (1990) entwickelte KINEROS2, das in Kapitel 4.3.2.1 näher beschrieben wird.

Untersuchungsbeispiel:

Bronstert (1994) erstellte im Rahmen eines integrierten Forschungsprojekts der Universität Karlsruhe ein Wassertransportmodell für einen Hang (HILLFLOW-2D). Das Gesamtmodell setzt sich modulartig aus drei Teilkomponenten zusammen:

- Die Infiltration wurde als Summe der beiden Komponenten Infiltrationsrate in die Bodenmatrix und Zufluss von der Oberfläche in das Makroporensystem gebildet. Durch diese Zweiteilung gelang es, eine Kompatibilität von Infiltrations- und Matrixfeuchteilemodell zu erreichen. Die in der Natur durch Starkniederschläge zu beobachtenden sehr hohen Infiltrationsraten konnten nachgebildet werden, ohne dass dafür unrealistisch hohe Werte der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens erforderlich wurden.
- Die Feuchtedynamik in der Bodenmatrix erfolgte anstelle der numerischen Lösung der Richards-Gleichung, mithilfe von Fuzzy-Logik-Regeln, was Vorteile in der Rechengeschwindigkeit, Parameteranzahl, rechnerischer Robustheit und Programmierbarkeit mit sich brachte.
- Der Oberflächen- und Zwischenabfluss wurde nach dem Ansatz der kinematischen Welle modelliert. Der Zwischenabflussmodellierung lag die Annahme eines oberflächennahen, hangparallelen Abflusses im Makroporensystem zugrunde. Die Interaktion des Wassergehalts im Makroporensystem mit der Feuchte in der Bodenmatrix wurde nach der ungesättigten Darcy-Gleichung berücksichtigt.

Die Anwendung des HILLFLOW-2D Modells eignet sich für kurze Simulationen von Starkniederschlagsereignissen auf der Hangskala. Der Unterschied in der Oberflächenabflussbildung und Bodenfeuchteverteilung zwischen zeitlich variierenden, hochaufgelösten Niederschlagsintensitäten und konstanten Intensitäten konnte mit dem Modell gut aufgezeigt werden. Die Validierung erfolgte mit gemessenen Oberflächenabfluss- und Infiltrationsganglinien in Hangberegnungsversuchen und zeigte eine gute Übereinstimmung der simulierten mit den gemessenen Werten.

Neben den beschriebenen Modellansätzen existiert eine Vielzahl von hydrometeorologischen Modellen für die Vorhersage von Starkregenereignissen (z. B. Wardah et al. 2008, Taramasso et al. 2005 oder Norbiato et al. 2007). Collier (2007) vergleicht und bewertet Modellsysteme, die für die Vorhersage von Starkregenereignissen angewendet werden. Die Unsicherheiten und Einschränkungen der hydrologischen und meteorologischen Bestandteile der Modellsysteme bestehen in der Verfügbarkeit, Angleichung und Zusammenführung von hochauflösenden Daten. Die Qualität von Hochwasservorhersagen, die auf einer hydrologischen Modellierung basieren, hängt in einem starken Maße von der Qualität von Niederschlagsmessungen und -vorhersagen ab. Daher erfordern Vorhersagesysteme vermehrt Fernerkundungsdaten wie Radardaten, hochauflösende numerische Wettervorhersagemodelle, die Kenntnis der Einzugsgebietscharakteristik vor dem Ereignis (z. B. Vorfeuchte des Bodens), Anfangs- und Randbedingungen des Modells sowie die Erfassung der Unsicherheiten der Modellierung (Collier, 2007).

Borga et al. (2008) empfehlen für die Beobachtung und Kontrolle von Sturzflutereignissen die Re-Analyse von Wetterradardaten anhand von beobachteten Ereignissen, um systematische Messabweichungen und lokale Fehler zu reduzieren, die die operationelle Anwendung von Echtzeit-Vorhersagemodellen beeinträchtigen.

2.5 Starkregen im urbanen Raum

Die Modellierung von Niederschlag-Abflussprozessen in urbanen Gebieten erfordert eine gesonderte Betrachtung, da städtische Strukturen wie versiegelte Flächen und Abwasserbauwerke berücksichtigt werden müssen. Die Bauwerke der Stadtentwässerung können bei Starkregen, der stärker als der Bemessungsregen für die städtischen Entwässerungssysteme ist, überlaufen und versagen. Für die hydrologische Modellierung solcher Gebiete sind daher Detailinformationen zu Abwasserbauwerken und Abwasserteilgebieten erforderlich.

Cuo et al. (2008) unterscheidet drei Haupttypen urbanhydrologischer Modelle: Der erste Typ wird bei ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen und in der kommunalen Planung und Verwaltung eingesetzt. Er wird häufig angewendet, um urbane Überflutungen vorherzusagen und die Lage und Dimensionierung von Hochwasserschutzbauwerken zu planen. Diese Modelle simulieren die Hydrodynamik des Oberflächenabflusses häufig durch die Verwendung der diffusiven Welle-Gleichung. Für die Bestimmung der Fließrichtung und der Lage von Straßen, Abwasserleitungen, Straßenabläufen und Kontrollschächten wird üblicherweise ein Geoinformationssystem mit einem digitalen Geländemodell verwendet. Häufig sind die Modelle aus separaten Modulen für die Berechnung des Oberflächenabflusses und des Abflusses in Kanälen zusammengesetzt, wobei Straßenabläufe und Kontrollschächte die Verknüpfungspunkte der Module bilden. Beispiele für diese Art von Modellen werden von Smith (2006), Schmitt (2004) sowie Fang und Su (2006) gegeben, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird. In den meisten Anwendungen dieser Modelltypen sind Validierungsdaten limitiert, daher kann die Modellqualität nur durch die Verwendung aggregierter Messwerte abgeschätzt werden. Die Anwendungsgebiete dieser Modelle sind hauptsächlich dicht besiedelte Gebiete und Städte. Für "gemischte" Einzugsgebiete (teils natürlich, teils städtisch) sind sie weniger geeignet (Cuo et al., 2008). Beim zweiten urbanhydrologischen Modelltyp werden empirische oder halbempirische Ansätze verwendet. Die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss wird durch empirische Funktionen beschrieben, z. B. durch ein künstliches neuronales Netzwerk (Schmitz und Cullmann, 2008). Diese Modelle eignen sich für die Simulation und Vorhersage von Abflüssen in städtischen Einzugsgebieten, sofern Daten existieren, mit denen die Algorithmen entwickelt werden können (Cuo et al., 2008). Der dritte Modelltyp ist durch konzeptionelle oder halbverteilte Modellansätze gekennzeichnet. Ein Beispiel hierfür ist das Modell MIKE URBAN. Der Einsatz räumlich verteilter hydrologischer Modelle beschränkte sich bisher auf natürliche Einzugsgebiete. Mit der Entwicklung eines räumlich verteilten Modells zur Vorhersage von Sturzfluten in urbanen Gebieten (Snell, 2002) und der Weiterentwicklung des DHSVM Modelles (Cuo et al., 2008) wurde die Anwendung dieser Art von Modellen für städtische Einzugsgebiete vorangebracht.

Zoppou (2001) gibt eine Übersicht über Modellierungsstrategien, Anwendungsbereiche und Unsicherheiten von verschiedenen urbanhydrologischen Modellen. Neben dem Vergleich von Modellen für quantitative Berechnungen werden auch Möglichkeiten der Transportmodellierung von Schadstoffen und deren Bewegung und Transformation durch physikochemische Prozesse aufgezeigt.

Untersuchungsbeispiele:

Im Folgenden werden drei Untersuchungen mit unterschiedlichen Ansätzen zur Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum vorgestellt.

Fang und Su (2006) entwickelten ein hydraulisches Modell für ein urbanes Einzugsgebiet, bei dem der Oberflächenabfluss (z. B. in Gräben und auf Straßen) zweidimensional und der Abfluss in Abwasserkanälen eindimensional simuliert wurde. Mit den Modellergebnissen wurden räumlich verteilte Informationen zum Hochwasserrisiko zur Verfügung gestellt (z. B. Wasserstände, Überschwemmungsgebiete und Fließgeschwindigkeiten während der Überflutungen). Die Gewinnung dieser Informationen ist ein Vorteil von hydraulischen Modellen, da bei der hydrologischen Modellierung die für urbane Gebiete wichtigen räumlich und zeitlich variablen Daten der Wasserspiegellagen und Überschwemmungshöhen nicht berechnet werden können (Fang und Su, 2006). In der Untersuchung gelang die Integration von 1D und 2D-Methoden. Bei der Validierung wurden nur kleine Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Wasserständen festgestellt. Durch die Verwendung eines unregelmäßigen Rasters konnte die Erfassung der komplexen Topographie vereinfacht werden. Ein regelmäßiges Raster hätte durch eine höhere Auflösung an die ungewöhnlichen Geometrien und Umriss angepasst werden müssen. Außerdem wurde die Verknüpfung des Kanalsystems mit dem Oberflächenabfluss realisiert. Für die weitere Entwicklung und Verbesserung des Modells wurde die Verknüpfung mit einem Geoinformationssystem vorgeschlagen, wodurch die Datenerfassung (z. B. die Generierung des Rasters) automatisiert und die Datenaufbereitung (z. B. die Erstellung der Eingangsdateien) verbessert werden können.

Castro et al. (2008) untersuchten im Rahmen des Projekts Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URRBAS) die gesamte Ereigniskette von Sturzregen in besiedelten Bereichen deutschlandweit. Es handelt sich um ein vom Bundesministerium für Forschung (BMBF) gefördertes Projekt unter der Leitung der Ingenieurgesellschaft Hydrotec, Aachen. Ziel des Forschungsvorhabens war es, neue Erkenntnisse über Art, Ausprägung und Häufigkeit sowie Schadensbilder von Sturzregen zu gewinnen, und neben der Darstellung einer regionalen Risikoverteilung ein einsetzbares Vorhersage- und Warnsystem zu erarbeiten (Hatzfeld, 2008).

Es wurde eine Ereignisdatenbank mit 422 Ereignisse, die einen Zeitraum von fast 30 Jahren abdecken, erstellt. 298 Ereignisse (71 %) wurden als Sturzflutereignisse gekennzeichnet. Außerdem beinhaltet die Datenbank Schadensschätzungen auf der Grundlage der erfassten Angaben, die u. a. vom Projektpartner Deutsche Rückversicherung zur Verfügung gestellt wurden. Die erforderlichen Niederschlagsdaten wurden von dem Projektpartner DWD zur Verfügung gestellt.

Anhand von 15 Fallstudien wurden nach einheitlichen Vorgehen Analysen durchgeführt. Diese umfassten meteorologische Untersuchungen, Abfluss-Analysen, eine Bewertung potentieller Schäden, Analysen der Entscheidungen und Aktionen der maßgeblichen Akteure sowie die Erhebung der im

Anschluss getroffenen Maßnahmen. Zur Überflutungsberechnung wurden in URBAS sowohl einfache (rasterbasierte Analysen, z. B. mit SAGA GIS) als auch komplexe Methoden (2D-hydrodynamische Simulation mit vereinfachter Abbildung der Interaktion mit dem Kanalnetz) angewendet und die Ereignisse miteinander verglichen und bewertet. Die Methoden umfassen die Analyse der Fließwege unter Verwendung von digitalen Oberflächen- oder Geländemodellen, eine Analyse auf Basis von Bodeninformationen und -daten, Analysen von potentiellen Versagenspunkten der Kanalisation, der kommunalen Gewässer und von wild abfließendem Wasser, Abfluss- und Überflutungsanalysen mit GIS-gestützten Methoden, Abflussanalysen mit hydrologisch-hydraulischen Methoden und Modellen sowie die Erfassung von besonders verletzlichen Infrastruktureinheiten, wie z. B. Brücken und Bahnschienen. Anhand der Untersuchung, die zu den eingetretenen Schäden durchgeführt wurden, konnten Abschätzungen der bei zukünftigen Sturzfluten zu erwartenden Schäden getroffen werden. Bei zwei Fallstudien wurden zur Niederschlag-Abflussberechnung feinmaschige zweidimensionale hydrodynamischen Abflussberechnungen mit dem Programm Hydro_as-2d durchgeführt (auf das Modell wird in Abschnitt 4.4.1.1 näher eingegangen). Die Grundlage für die Modellierung des Oberflächenabflusses über Straßen und Grundstücke war ein hoch aufgelöstes digitales Geländemodell, das aus Überfliegungsdaten mit einem Raster von 2×2 m unter der Berücksichtigung von Bruchkanten erstellt wurde. Die Simulation mit Hydro_as-2d lieferte Ergebnisse für folgende räumlich detaillierte und zeitabhängige Größen:

- Fließtiefen [m]
- Fließgeschwindigkeiten [m s^{-1}]
- Fließrichtungen
- Wasserstände [mNN]
- Maximal erreichte Wasserstände [mNN] während der gesamten Berechnung
- Überflutungsdauer [h]
- Maximal erreichte Schubspannungen [N m^{-2}]

Abflüsse im Kanalnetz konnten mit Hydro_as-2d nicht direkt simuliert werden. Es war jedoch möglich, einzelne Knotenpunkte als Einläufe in das Kanalnetz zu definieren. Die hydrodynamische Kanalnetzberechnung erfolgte mit dem Modell DYNA. Die einfache Kopplung der beiden Systeme lieferte Erkenntnisse über typische Abflusssituationen und deren Verlauf im urbanen Raum.

In einer weiteren Untersuchung (RisUrSim), die im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes EUREKA durchgeführt wurde, entwickelte Schmitt (2004) ein integriertes Planungs- und Management Tool für die effektive Bewirtschaftung von städtischen Entwässerungs-Systemen. Laut europäischem Standard (EN 752) müssen Kanalnetze je nach Einordnung in die jeweilige Nutzungskategorie (ländliche Gebiete, Wohngebiete, Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete, Unterführungen) für eine 10 bis 50-jährliche Überflutung bemessen sein (Schmitt, 2004). Mit Hilfe eines Modells wurden das hydraulische Leistungsvermögen und das Risiko durch Überflutung infolge von Überlastung des Kanalsystems simuliert. Dabei wurde eine Unterscheidung zwischen oberflächlichen Überflutungen und Überflutungen innerhalb von Gebäuden, die durch hochdrückendes Wasser aus Abwasserleitungen verursacht wurden, vorgenommen. Die Überflutung von Regenwasserkanälen tritt je nach Art des Entwässerungssystems (separate oder kombinierte Kanalnetze) in unterschiedlichen Phasen auf. Wenn private Entwässerungsleitungen ohne Rückflusssicherung an das öffentliche

Kanalnetz angebunden sind, kann der Einstau im Kanalnetz, abhängig vom Niveau des Einlasses im Haus, zu einer Überflutung im Haus führen. In diesem Fall treten Überflutungen innerhalb von Gebäuden auch ohne oberflächliche Überflutungen auf. In derselben Weise können Überflutungen von privaten Grundstücken als Folge von aus Straßenabläufen (Gullys) ausfließendem Wasser entstehen, wenn deren Niveau unterhalb der Wassereinstauhöhe in der Kanalisation liegt. In beiden Fällen kann das Auftreten von Überflutungen durch eine hydrodynamische Kanalnetzrechnung vorhergesagt werden. Dem gegenüber ist die oberflächliche Überflutung von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig (z. B. Straßengefälle, Bordsteinhöhe), die physikalisch schwieriger zu beschreiben und deren Daten oft nicht verfügbar sind. Hinzu kommt, dass aktuelle Simulationsmodelle den Oberflächenabfluss entlang von bevorzugten Fließwegen nicht hinreichend berücksichtigen (Schmitt, 2004). Das Modell RisUrSim wurde entwickelt, um den Anforderungen der Simulation von urbanen Überflutungen zu entsprechen. Der Fokus wurde hierbei auf die unterschiedlichen Oberflächenabflüsse (von Dächern, Straßen, Gehwegen) und deren möglicher Interaktion mit dem überlasteten Kanalnetzsystem gelegt. Das Modell wurde in einem Testgebiet angewendet. Hierbei handelte es sich um ein Teileinzugsgebiet in der Stadt Kaiserslautern, wo in der Vergangenheit bereits Haushalte von Kellerüberflutungen infolge von Starkregen betroffen waren. Zur Modellkalibrierung sollten während eines Niederschlagsereignisses Abflussdaten erhoben werden. Allerdings trat während der Monitoring-Phase kein entsprechendes Ereignis auf, was zu einem Überstau oder einer Überflutung geführt hat. Daher wurden verschiedene Testszenarien mit Hilfe synthetischer Bemessungsregen erzeugt. Ein hoch aufgelöstes digitales Geländemodell wurde erstellt, das nivellierte Straßenquerschnitte, Lage und Höhe von Kontrollschächten und Straßenabläufen, Gehwegen und Bordsteinen sowie Grenzlinien zwischen öffentlichen und privaten Grundstücken enthielt. Das digitalisierte Kanalnetz wurde um private Hausentwässerungen und Straßenabläufe erweitert. Die simulierten Wasserstände in den Kontrollschächten und auf der Straßenoberfläche ließen einen oberflächlichen Abfluss des aus den Kontrollschächten austretenden Wassers in Richtung tiefer liegender Straßenabschnitte erkennen. Diese Modellergebnisse der RisUrSim Software bestätigten somit die realistische Einschätzung der oberflächlichen Überflutungen. Die Verknüpfung der hydraulischen Oberflächenabfluss-Modellierung mit der dynamischen Kanalabflussberechnung erforderte eine spezifische Betrachtung der Massenerhaltung und eine angemessene Wahl der Zeitschritte an den Kopplungspunkten. Zudem wurde für die Simulation des Oberflächenabflusses eine detaillierte physikalische Beschreibung der Oberflächen benötigt. Entsprechend detaillierte Daten stehen nicht generell zur Verfügung, daher empfiehlt Schmitt (2004) eine weiterführende GIS-Entwicklung und Anwendung zu dieser Thematik.

Wie diese Beispiele aus der aktuellen Literatur zeigen, ist die Kopplung von hydraulischen Berechnungen der Wasserausbreitung an der Oberfläche mit Kanalisationsmodellen zur Ermittlung der Überschwemmungsgefährdung in Siedlungsgebieten infolge intensiver Niederschläge Gegenstand mehrerer Forschungsprojekte. Allerdings befinden sich die Methodenansätze derzeit noch im Entwicklungsprozess und sind nicht Stand der Technik. Ein besonderes Problem stellen vor allem die hohen Anforderungen an Gebietsdaten dar, die nicht immer erfüllt werden können.

3 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete und des Niederschlagsereignisses im August 2007

3.1 Untersuchungsgebiete

Das erste Gebiet um Ahden liegt ca. 15 km südwestlich von Paderborn und ist ca. 2,5 km² groß. Das zweite Untersuchungsgebiet in Henglarn erstreckt sich über eine Fläche von ca. 2,7 km² und liegt etwa 13 km südlich von Paderborn. Ca. 14 km nordwestlich von Paderborn befindet sich das dritte Untersuchungsgebiet im Stadtbereich von Delbrück, dessen Fläche ca. 7 km² einnimmt. In Abbildung 3.1 ist die Lage der Untersuchungsgebiete dargestellt.

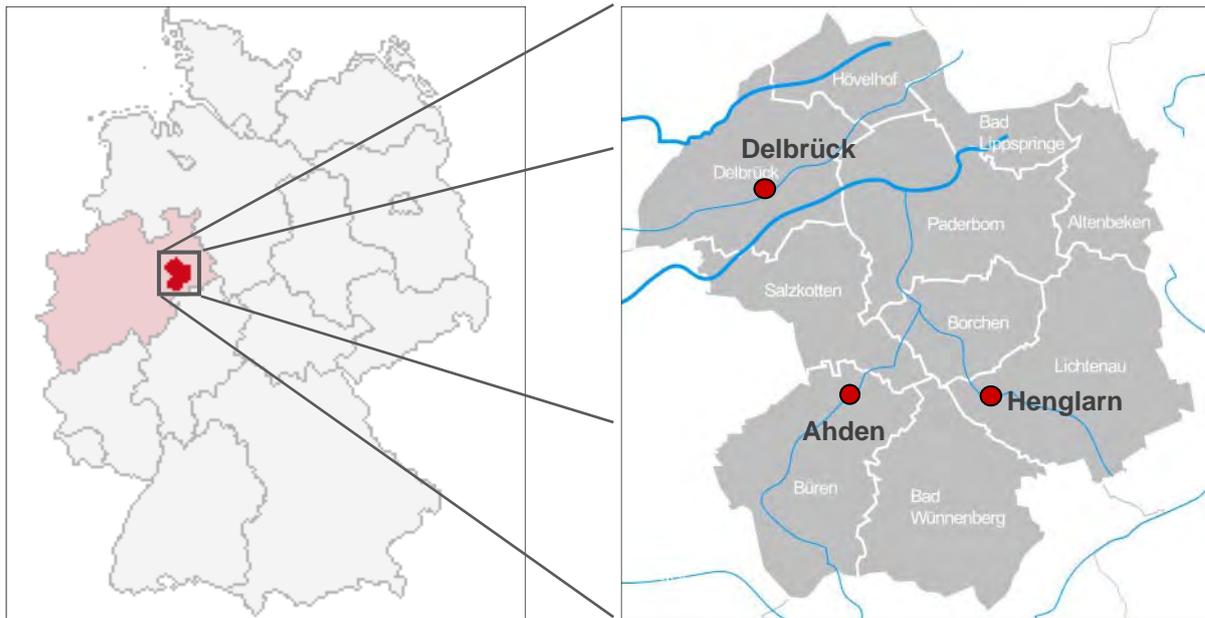


Abbildung 3.1: Lage der Untersuchungsgebiete im Kreis Paderborn

3.1.1 Geologie

Die drei Gebiete gehören zur Paderborner Hochfläche, die einen Teil der westfälischen Bucht bildet, und sind der geologischen Einheit Oberkreide zuzuordnen. Im Süden schließen sich die Formationen des Devon bzw. Karbon an, die das rheinische Schiefergebirge bilden und durch eine Sattel- und Muldenstruktur gekennzeichnet sind. Durch die tektonische Aufhebung dieser Schichten, die sich als Sockel auch nördlich unterhalb des oberkreidezeitlichen Deckgebirges fortsetzen, wurden die Ränder der westfälischen Mulde am Ende der Oberkreidezeit aufgebogen. Im Bereich Henglarn und Ahden hat sich dies in einem heute hügeligen Relief ausgeprägt. Während der Eis- bzw. Kaltzeiten und der Warmzeiten im Quartär wurden bis zu 60 m mächtige Sedimente aus Eis- (Grundmoränen-) und Schmelzwasserablagerungen sowie äolische Sedimente (Löss und Flugsande) abgelagert (Feige, 1961).

Nahezu das gesamte Stadtgebiet von Delbrück befindet sich im Bereich saalezeitlichen Grundmoränenablagerungen, die sich zungenförmig etwa 19 km nach Südwesten erstrecken und im Bereich Delbrück mit einer Breite von 3,5 km die weiteste Ausdehnung haben. Südlich schließen sich

die weichselzeitlichen Niederterrassensedimente des Haustenbaches und der Lippe an, nördlich befindet sich ein schmaler Streifen saalezeitlicher Vorschüttsande und Beckenablagerungen. Nördlich dieser Ablagerungen sind neben den holozänen Auensedimenten des in Ost-West Richtung fließenden Grubenbachs, noch schmale Streifen der weichselzeitlichen Niederterrassen vorzufinden. Die Grundmoränensedimente sind schluffig bis tonig, während die Bodenarten der Niederterrassen und Beckenablagerungen als größte Komponente Mittel-Feinsand aufweisen.

Die geologische Situation in Ahden ist durch drei ausstreichende Schichten der Oberkreide gekennzeichnet. Im Talbereich der Alme stehen die Lamarcki-Schichten aus Mergelkalkstein an, nördlich daran anschließend streichen die Striatoconcentricus-Schichten aus Kalkmergel-Mergelkalkstein aus. Der Verlauf des Hellwegs zeichnet schließlich die ausstreichenden Schloenbachi-Schichten aus Mergelkalk-/Kalkmergelstein nach, die sich auf der Seite des Flughafens nach Norden hin fortsetzen. Im hängigen Bereich unmittelbar nördlich von Ahden sind quartäre Fließerden aus der Weichseleiszeit vorzufinden. In einem schmalen Streifen im Ablagerungsbereich der Alme überdecken holozäne schluffige Auensedimente den Mergelkalkstein.

In Henglarn wird das lithostratigraphische Profil mit den ausstreichenden älteren Oberkreide-Schichten fortgesetzt. Im Bereich des Siebentals und des Hengler Berges südlich von Henglarn stehen die Lamarcki-Schichten aus Mergelkalkstein an. Darauf folgen unmittelbar nördlich des Siebentals die Labiatus-Schichten aus Kalkmergelstein. In einem schmalen Streifen südlich der Altenau streichen die Kalksteinschichten des Cenomans aus. Im Flusstal werden auch hier die kreidezeitlichen Schichten von den holozänen Auensedimenten der Altenau überdeckt.

Im gesamten Bereich der Oberkreideschichten der Paderborner Hochfläche erstreckt sich ein Karstgebiet, das im Osten und Süden von Egge und Sauerland, im Norden durch den Hellwegquellhorizont von Geseke bis Lippspringe begrenzt wird. Die gesamte unterirdische Entwässerung der Hochfläche ist durch die Verkarstung geprägt (Feige, 1961). Die oberirdische Entwässerung erfolgt über die Alme und ihre Nebenflüsse, die im Jahresverlauf zeitweilig auf längeren Strecken trocken fallen. Die Alme führt nahezu in jedem Jahr mehrere Monate lang im Mittellauf kein Wasser, Ellerbach und Sauer fallen streckenweise mehr als sechs Monate lang trocken. Die kleinen Nebentäler der Hauptflüsse sind nur zeitweilig durchflossen, so dass Trockentäler als eine Leitform des Karstes der Paderborner Hochfläche gelten können (Feige, 1961).

Bei der Entstehung von Oberflächenabfluss spielen hydrogeologische Prozesse keine Rolle. Maßgeblich sind vielmehr die pedologischen Gegebenheiten und die Fließprozesse in der ungesättigten Zone (Kapitel 2.2.1). Bei der hydrologischen Modellierung der Untersuchungsgebiete wurde der Grundwasserabfluss bzw. die Karstwasserdynamik daher nicht berücksichtigt.

3.1.2 Landnutzung und Böden

Nach der Nutzungsart entfallen 60 % der Westfälischen Bucht auf Landwirtschaftsflächen (Acker-Grünland-Verhältnis 2,3:1) und 15 % auf Waldflächen (Becks, 2001). In den Gebieten Ahden (3,0:1) und Henglarn (2,8:1) ist dieses Verhältnis etwas größer. Der Anteil des Ackerlandes an der landwirtschaftlich genutzten Fläche ist ein treffender Indikator für die komplexen natürlichen Standortverhältnisse. Der Kreis Paderborn, in dem die Untersuchungsgebiete liegen, weist einen durchschnittlichen Ackerlandanteil von 70-80 % auf (Becks, 2001). Die intensive ackerbauliche Nutzung ist auf die relativ hohen Ackerzahlen (64 im Bereich der Börden des Hellweggebiets) zurückzuführen, die für die natürliche Ertragsfähigkeit der Böden stehen (Becks, 1980). Die Böden in den Untersuchungsgebieten Ahden und Henglarn werden außerhalb der Siedlungsflächen vornehmlich ackerbaulich genutzt (Abbildung 3.2). Im Überflutungsbereich der Flüsse herrscht Grünlandnutzung vor. An steileren Hängen, wo keine landwirtschaftliche Nutzung möglich ist, befinden sich Waldflächen (hauptsächlich Buchen- und Fichtenforste).

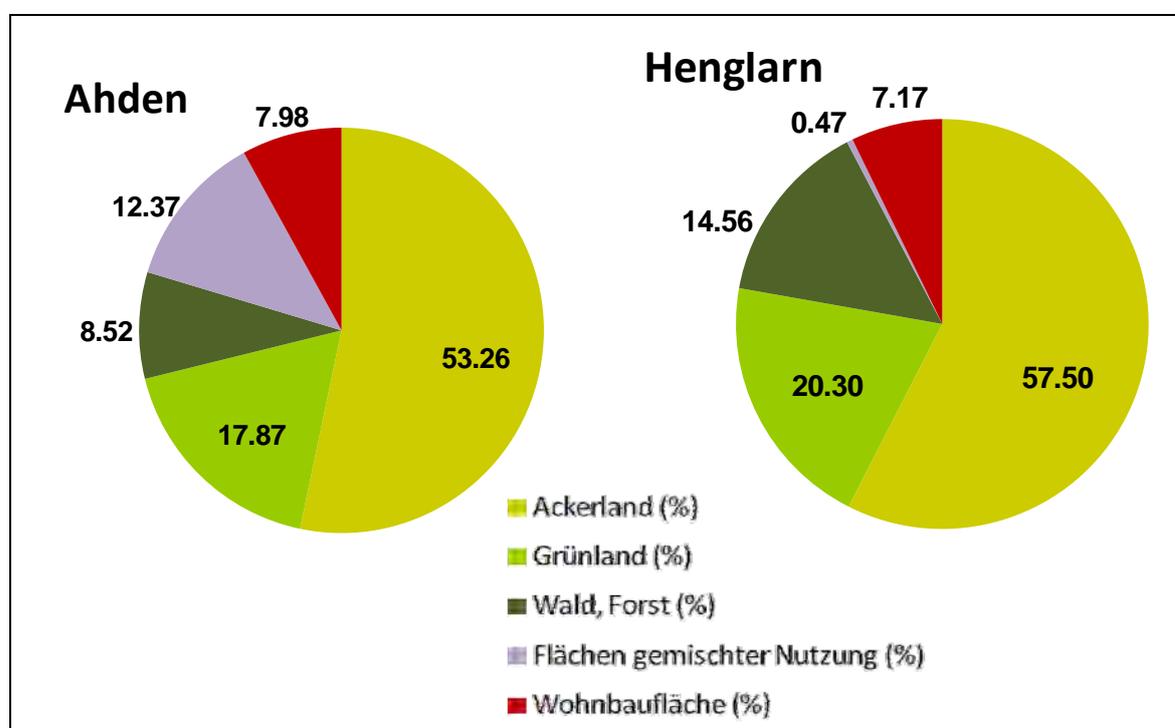


Abbildung 3.2: Landnutzungscharakteristik in den Einzugsgebieten Ahden und Henglarn

Bei den Böden im Untersuchungsgebiet Henglarn handelt es sich um Braunerden, Parabraunerden und Rendzinen, im Überflutungsbereich der Altenau um Auenböden (Gleye, Vegen) (Abbildung A.5 im Anhang). In Ahden sind nördlich der Alme fast ausschließlich Braunerden vorzufinden. Im Bereich des Almetals haben sich Auenböden (Gleye, Vegen) ausgeprägt (Abbildung A.4 im Anhang). Die vorherrschenden Bodentypen in Delbrück sind Pseudogleye im Bereich der Grundmoräne, Braunerden auf den Vorschüttungen und Beckenablagerungen sowie Gleye bzw. Anmoorgleye im Überflutungsbereich des Haustenbachs (Abbildung A.6 im Anhang). Bei der Bodenart handelt es sich in den Untersuchungsgebieten überwiegend um tonigen bis schluffigen Lehm stellenweise auch um tonigen Schluff (Abbildung 4.12).

Lehmböden und Schluffböden mittleren Tongehaltes besitzen nach Scheffer und Schachtschabel (1992) ein hohes Speichervermögen für nutzbares Wasser. Schluffböden haben bei einer Wasserspannung von $10^2 - 10^4$ cm Wassersäule, die unter Freilandbedingungen in terrestrischen Böden besonders häufig auftritt, im Vergleich zu anderen Bodenarten die höchste Wasserleitfähigkeit. Allerdings neigen Schluffböden bei Tongehalten unter 17 % zur Verschlammung und werden dann auch leicht durch Wasser erodiert. Insgesamt zeichnen sich tonhaltige Lehm- und Schluffböden durch eine hohe Abflussbereitschaft aus.

3.1.3 Topographie

Die Beschaffenheit der Erdoberfläche (Topografie, Relief) ist eine maßgebliche Größe bei der Verteilung der niederschlagsbedingten Abflüsse auf der Oberfläche (Castro et al., 2008). Die Hangneigung ist nach Gerits et al. (1990) einer der Hauptfaktoren, die die Höhe des Oberflächenabflusses bestimmen, da sie maßgeblich die Infiltrationsmenge beeinflusst. Je größer die Hangneigung, desto größer ist der Anteil des Niederschlags, der zum Oberflächenabfluss beiträgt.

Die Hangneigungen der drei Untersuchungsgebiete sind in Abbildung B.1 bis B.3 im Anhang dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die beiden Hauptstraßen (Flughafenstraße und Tiggstraße) im Ortskern von Ahden ein besonders großes Gefälle aufweisen (35 – 73 %). In Henglar ist die Hangneigung der Flächen im Siebental (einer in Nord-Süd-Richtung verlaufenden natürlichen Schlucht, die in den Siebentalweg mündet) besonders groß (bis zu 104 %). Die Ackerflächen oberhalb der beiden Ortschaften weisen ein Gefälle zwischen 4 und 35 % auf. In Delbrück ist das Gefälle der in Nord-Südrichtung verlaufenden Hauptstraßen Lipplinger Straße und Ostenländer Straße im Vergleich zum restlichen Stadtgebiet relativ groß (26 %). Außerdem weist der Hang nördlich der Theodor-Heuss Straße mit bis zu 46 % ein großes Gefälle auf. Insgesamt ist die Hangneigung jedoch deutlich geringer als in Henglar und Ahden.

3.2 Starkniederschläge im August 2007

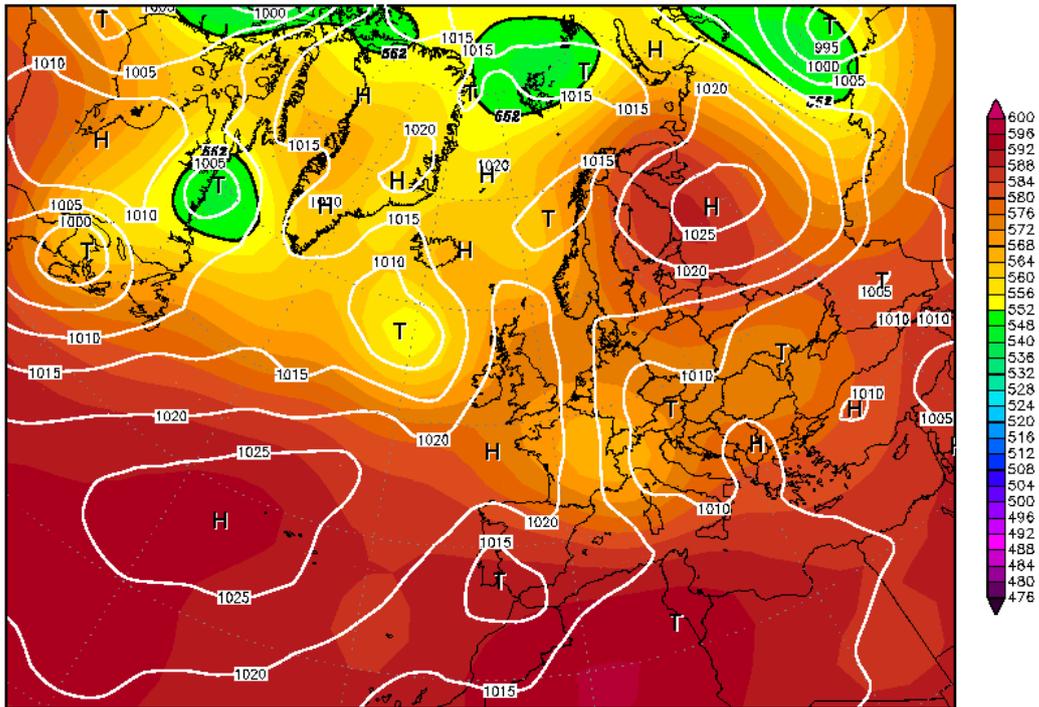
In den ersten Tagen im August 2007 kam es zu Starkregenereignissen in Ostwestfalen. In diesem Abschnitt soll der meteorologische Hintergrund etwas näher erläutert werden.

3.2.1 Synoptische Ausgangslage

Nach einem gegenüber dem klimatologischen Mittel niederschlagsreichen Monat Juli, setzte sich zu Beginn des Augusts kurzzeitig hoher Luftdruck durch. Ab dem 7. schwächte sich dieser ab. Während das Hoch über Mitteleuropa in Richtung Nordost abzog, wurde ein Trog mit einem Höhentief über dem westlichen Mitteleuropa wetterwirksam (Abbildung 3.3).

Diese Situation ist in den folgenden Abbildungen erkennbar. Die Analysekarte in der Abbildung 3.4 zeigt, dass es im Zusammenhang mit dem Höhentief zu einer Zyklonogenese im Alpenraum kam.

09AUG2007 00Z
 500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Abbildung 3.3: Bodendruckverteilung und Geopotential 500 hPa für den 09.08.2007
 (Quelle wetterzentrale.de, Juni 2009)

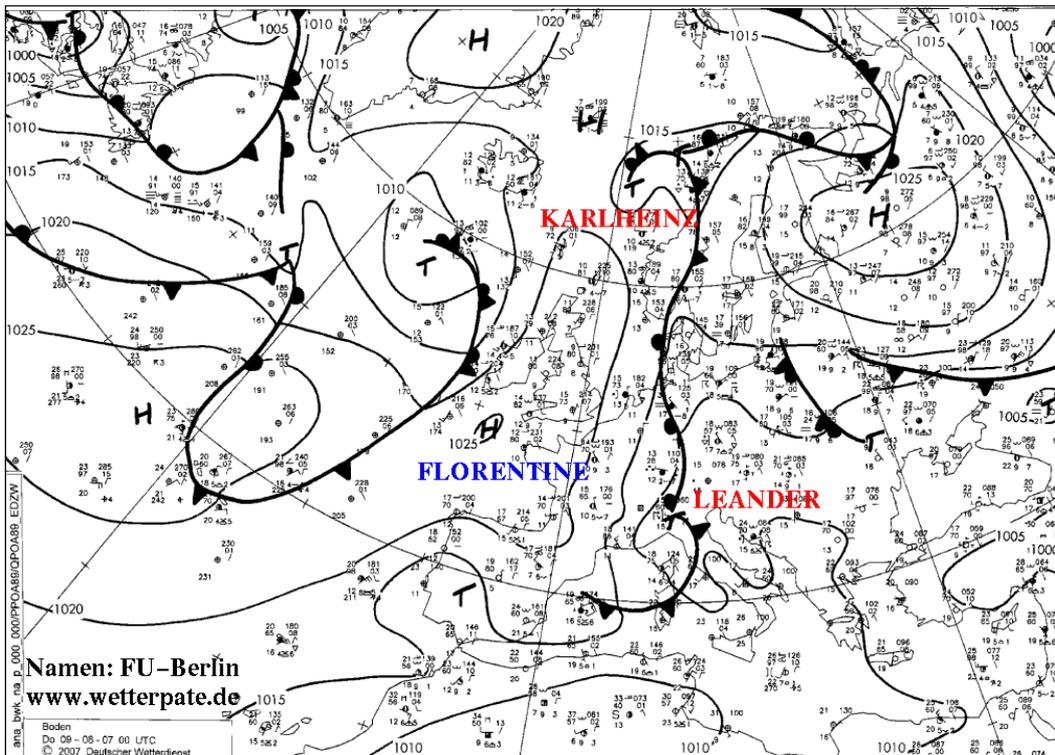
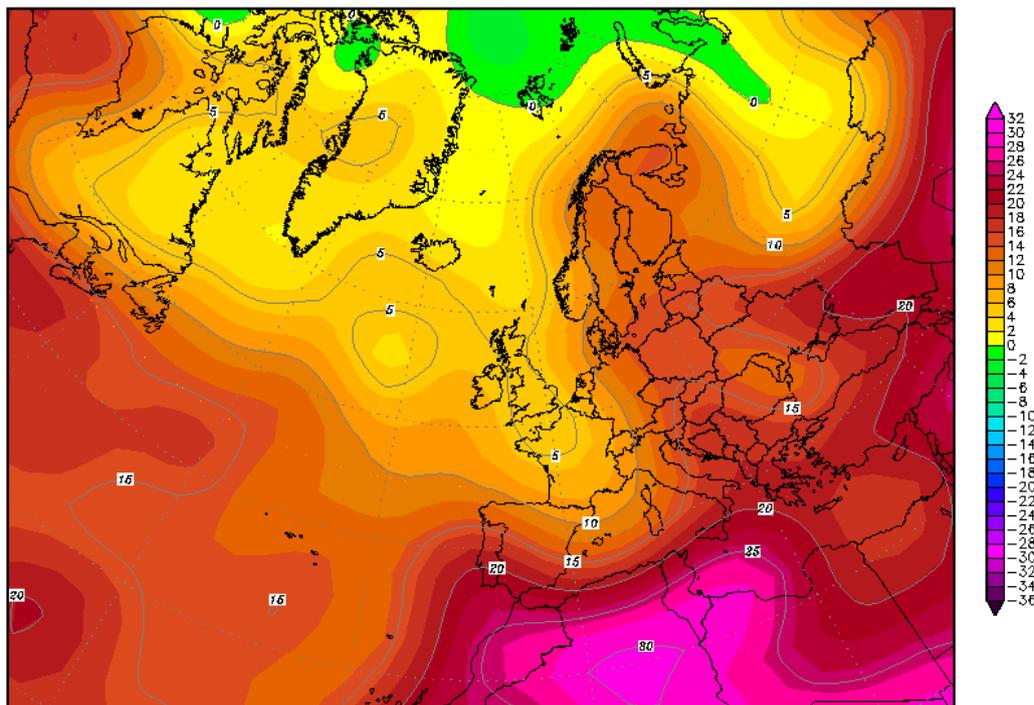


Abbildung 3.4: Bodenwetterkarte vom 09.08.2007 (Quelle: Meteorologisches Institut FU Berlin, Juni 2009)

Wie es aus der Temperaturverteilung der 850 hPa-Topographie in der Abbildung 3.5 hervorgeht, stellte sich eine Luftmassengrenze mit meridionaler Längsachse ein, welche einen Übergang zwischen kühlerer Luft im Westen und wärmerer im Osten bildete. Die Luftdruckgradienten waren schwach ausgeprägt und die Luft war relativ labil bei gleichzeitiger Zufuhr feuchter Luftmassen aus südlicher Richtung. Am Abend des 9. bildeten sich schließlich konvektive Zellen mit hohen Niederschlagsintensitäten, welche vielerorts Überschwemmungen verursachten.

09AUG2007 00Z

850 hPa Temperatur (Grad C)



Daten: Reanalysis des NCEP
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Abbildung 3.5: Temperaturverteilung 850 hPa für den 09.08.2009 (Quelle: wetterzentrale.de, Juni 2009)

Der Verlauf des Ereignisses auf der Mesoskala kann sehr anschaulich anhand von Radarbeobachtungen des Niederschlages nachvollzogen werden. Diese erlauben, aufgrund ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, eine nähere Untersuchung der räumlichen Niederschlagsstruktur (Maul-Kötter, 1998). Die Abbildung 3.6 zeigt Niederschlagsradarbilder von dem Ereignis am 09.08.2007, die aus der Datenbank von WetterOnline.de stammen. Die Radardaten stehen in 15-minütlicher Auflösung zur Verfügung und sind in einem Raster mit einer Pixelgröße von 2 x 2 km dargestellt. Die Radarbilder enthalten keine absoluten Werte, sondern nur Farben, die die zugehörigen Werteklassen (‘sehr starke’ bis ‘leichte’ Niederschläge) repräsentieren.

Zu erkennen ist, dass sich die konvektiven Zellen relativ langsam nach Westen ausbreiten und es räumliche Schwerpunkte der Niederschlagsintensität gibt, welche im Bereich der Projektgebiete beobachtet wurden.

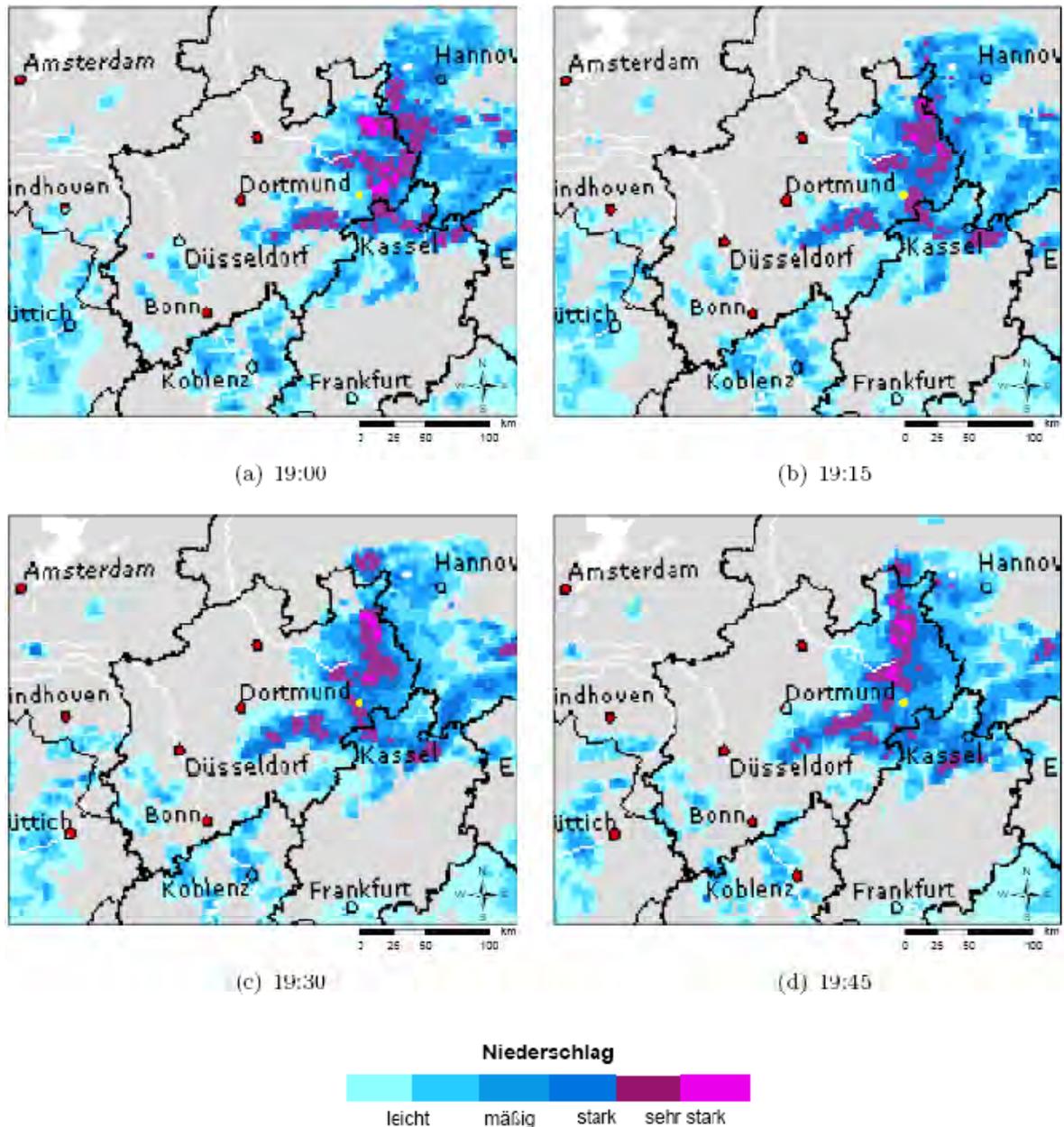


Abbildung 3.6: Niederschlagsradarbilder von Nordrhein-Westfalen vom 09.08.2007 (19:00 bis 19:45). Die Lage des Untersuchungsgebiets Henglar ist gelb markiert. Quelle: WetterOnline.

3.2.2 Vergleich der beobachteten Niederschlagshöhen

Für die Projektgebiete standen hochaufgelöste Stationsdaten aus der Umgebung zur Verfügung. Die Messstellen können den Projektgebieten zugeordnet werden:

1. Station Büren (Minutenauflösung) → Ahden, Entfernung ca. 8 km
2. Station Ebbinghausen HRB (Minutenauflösung) → Henglar, Entfernung ca. 3 km
3. Station Delbrück-Kläranlage (nur Summe) → Delbrück, Entfernung bis zu 2 km
4. Station Boke (Minutenauflösung) → Delbrück, Entfernung ca. 3 km

Die Summenlinien der Stationen sind in der nachstehenden Abbildung gegenübergestellt.

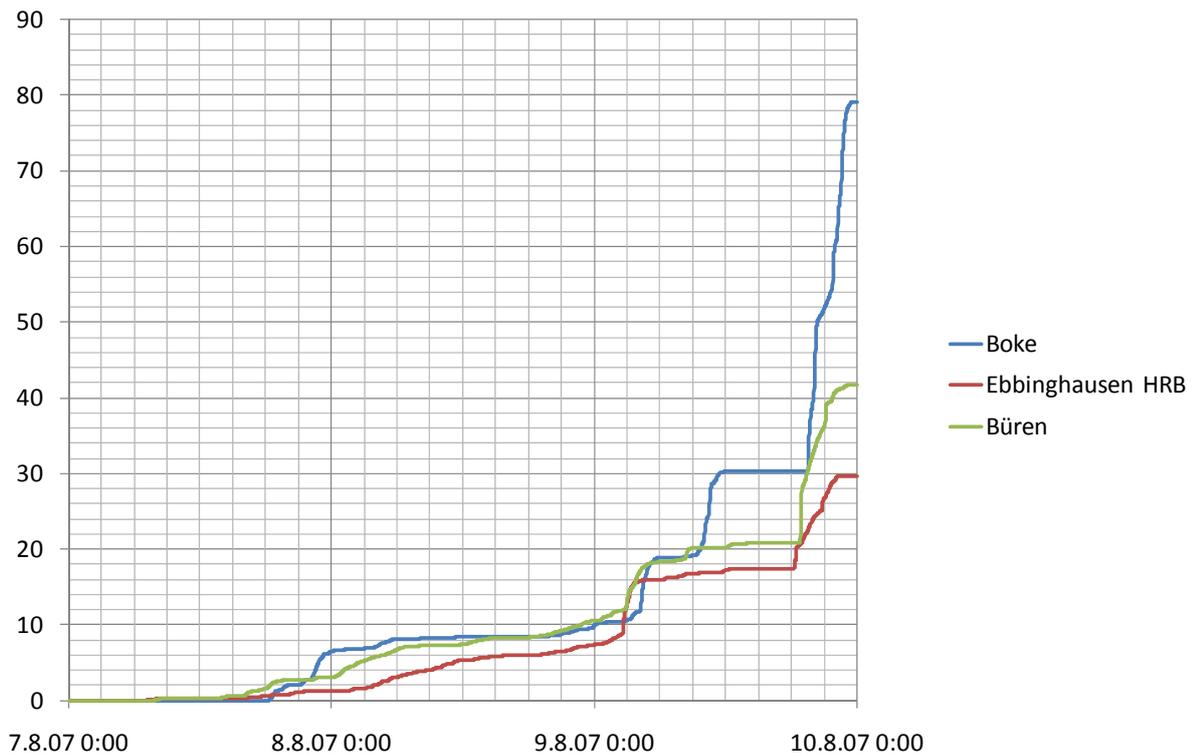


Abbildung 3.7: Aufgezeichnete Summenlinien des Niederschlags im Zeitraum 07. bis einschließlich 09.08.2007

Wie aus den Vergleichen mit den vorliegenden Summen der Station Delbrück-Kläranlage hervorgeht, sind die Niederschlagsmengen der Station Boke für die Kernstadt von Delbrück nur bedingt repräsentativ. Für die Station Delbrück-Kläranlage ist bekannt, dass am Abend des 09. Augusts ca. 137 mm innerhalb von 4h registriert wurden, während an der ca. 2 km entfernten Station Boke ca. 50 mm aufgezeichnet wurden (vergleiche Abbildung 3.7). Anhand der Werte wird die räumliche Variabilität der Niederschlagsfelder bei konvektiven Niederschlägen deutlich.

Der genannte Wert von 137 mm innerhalb von 4 Stunden ist außergewöhnlich. Ein Vergleich mit beobachteten Extremereignissen zeigt, dass dieser Wert aber noch unter den bislang größten Niederschlagsmengen in Deutschland liegt, wie sie in der Tabelle 3.1 zusammengestellt sind.

Tabelle 3.1: Die größten in Deutschland beobachteten Niederschlagshöhen für verschiedene Beobachtungsintervalle (nach Rudolf und Rapp, 2003)

Intervall	Niederschlagshöhe (mm)	Messort	Zeit
8 min	126	Füssen (Ostallgäu)	25. Mai 1920
1 h	200	Miltzow (Nordvorpommern)	15. September 1968
2 h	239	Daudenzell (Baden-Württemberg)	27. Juni 1994
1 Tag	260	Zeithain, Kr. Riesa (Sachsen)	6.-7. Juli 1906 (6 – 6 UTC)
1 Tag	312	Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)	12.-13. August 2002 (6 – 6 UTC)
24 h	353	Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)	12.-13. August 2002 (3 - 3 UTC)
2 Tage	377	Seehaus bei Ruhpolding (Kreis Traunstein)	7.-9. Juli 1954
3 Tage	458	Stein (Kreis Rosenheim)	7.-10. Juli 1954
7 Tage	515	Schneizreuth-Weißbach (Berchtesgaden L.)	7.-14. September 1899
10 Tage	652	Stein (Kreis Rosenheim)	1.-11. Juli 1954
1 Monat	779	Stein (Kreis Rosenheim)	Juli 1954
30 Tage	810	Baiersbronn-Zwiggabel (Schwarzwald)	7. Dez.1993 - 6. Jan. 1994
12 Monate	3661	Purtschellerhaus (Berchtesgadener Land)	Dez.1943 - Nov.1944

Der vorliegende 4-Stunden-Wert ist geringer als die bislang größte Niederschlagsmenge, welche innerhalb von einer Stunde gefallen ist. Anzumerken ist, dass dieser Vergleichswert nicht dem Mittel- bzw. Hochgebirgsraum zugehörig ist, wo i. A. größere Niederschlagsintensitäten beobachtet werden.

Ein Vergleich mit der KOSTRA-Tabelle (siehe dazu Kapitel 4 sowie Tabelle A.5) führt zu der Schlussfolgerung, dass der aufgetretene Niederschlag jenseits eines hundertjährigen Niederschlages einzuordnen ist.

4 Anwendung und Beurteilung unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete

Die Charakterisierung der Abflussprozesse bei Starkregen und die Abschätzung der Hochwassergefahr, die von diesen Abflüssen ausgeht, können zu einer Schadensminderung bei zukünftigen Ereignissen beitragen. Allerdings existieren im Gegensatz zu Überschwemmungen durch Flusshochwässer für Starkregenereignisse keine abgestimmten Verfahren der Gefahrenanalyse (Castro et al., 2008).

In diesem Kapitel werden mehrere Ansätze zur Abschätzung der Hochwassergefahr durch Oberflächenabfluss infolge von Starkregenereignissen vorgestellt und getestet. Ihre Anwendbarkeit wird im Hinblick auf Eignung, Datenbedarf, Unsicherheiten, Aufwand und Übertragbarkeit auf größere Gebiete bewertet.

Die angewendeten Methoden zur Ermittlung der Hochwassergefahr durch Starkregen umfassen:

- die Rekonstruktion des historischen Starkregenereignisses vom 09.08.2007 anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen (4.1),
- eine Gebietsbegehung, bei der Abflusshindernisse aufgenommen und Modellparameter am Beispiel der hydraulischen Leitfähigkeit ermittelt wurden (4.2), sowie
- die hydrologische (4.3) und hydraulische (4.4) Abflussmodellierung.

4.1 Rekonstruktion des historischen Starkregenereignisses vom 09. August 2007

In Gebieten, in denen in der Vergangenheit bereits Schäden durch Starkregenereignisse aufgetreten sind, kann die Auswertung von Presseberichten sowie die Befragung von Betroffenen und der Feuerwehr Informationen über den zeitlichen Verlauf, Schadensschwerpunkte, Wassertiefen der Überschwemmungen und bevorzugte Abflusswege liefern. Das Starkregenereignis, von dem die Untersuchungsgebiete im Raum Delbrück betroffen waren, lag zum Zeitpunkt der durchgeführten Befragung ca. ein Jahr zurück, daher konnten sich die Anwohner noch an viele Einzelheiten erinnern. Im Folgenden werden die Auswertungen der Zeitungsartikel sowie die Ergebnisse der Befragung in den einzelnen Untersuchungsgebieten aufgeführt und zusammenfassend in den Abbildungen 4.1; 4.4 und 4.5 dargestellt.

4.1.1 Presseberichte

In den Ausgaben vom 10., 11., 12. und 13. August 2007 der Zeitung "Westfalen-Blatt" wurde von den Überschwemmungen in der Nacht vom 09. auf den 10. August im Stadtgebiet Delbrück und einigen Orten in der Umgebung infolge der Starkregenereignisse berichtet. Die Schäden, die in der Innenstadt an Wohn- und Geschäftshäusern vor allem durch volllaufende Keller entstanden, wurden auf 25 bis 30 Millionen Euro geschätzt. Als Schwerpunktgebiet wurde der Ortskern genannt: "Weite Teile der Innenstadt glichen einer Seen- und Flusslandschaft". Im Bereich der Pfarrkirche stand das Wasser am Abend des 09.08.07 knietief, woraufhin die Gottesdienstbesucher aufgefordert wurden in der Kirche zu bleiben. Auf der Langen Straße, Lipplinger Straße und den Postberg "schossen unglaubliche Regenmengen" zum Alten Markt herunter. In diesem Bereich "blieb kein Gebäude verschont". Betroffen waren zudem die Filiale der Volksbank in der Thülecke und die Kleiderkammer des Roten Kreuzes in der Südstraße.

Auf die Situation in den Orten Ahden und Henglarn wurde in den Zeitungsberichten nicht eingegangen.

Die aus den Zeitungsartikeln entnehmbaren Informationen waren hilfreich, um einen groben Überblick über die aufgetretenen Schäden zu bekommen. Da es sich jedoch um eine sehr selektive Beschreibung handelte, konnte nicht davon ausgegangen werden, dass alle Überschwemmungsschwerpunkte erfasst wurden. Vor allem eine Mengenbetrachtung konnte auf der Basis dieser Informationen ("unglaubliche Regenmengen") nicht durchgeführt werden. Möglicherweise hätte der Vergleich mit Berichten über länger zurückliegende Ereignisse interessante Rückschlüsse über konvergente Gefahrenschwerpunkte zugelassen, derartige Artikel waren jedoch nicht verfügbar.

4.1.2 Feuerwehreinsätze

In den Untersuchungsgebieten Ahden und Delbrück konnte jeweils ein Vertreter der örtlichen Feuerwehr, der bei den Starkregenereignissen im Einsatz gewesen war, zu den aufgetretenen Überschwemmungen befragt werden. Für das Untersuchungsgebiet Henglarn standen keine Aussagen der Feuerwehr zur Verfügung.

1. Untersuchungsgebiet Ahden

Nach Aussage eines Vertreters des Löschzuges Ahden hatten die Abflüsse, die infolge des Niederschlagsereignisses am 09. und 10. August 2007 auftraten, ihren Ursprung auf den Ackerflächen unmittelbar unterhalb des Flughafens. Als Schwerpunktgebiete der Abflussbildung wurden die Hangabschnitte nordwestlich der Flughafenstraße und oberhalb der Haselnussstraße angegeben. Außerdem wurden die großflächigen Parkplätze des Flughafens als mögliches Entstehungsgebiet der Abflüsse genannt. Die Bereiche der unteren Flughafenstraße, der unteren Tiggstraße und des Kirchplatzes waren infolge der Abflussscheinungen flächendeckend überschwemmt. Der Wasserstand auf dem Kirchplatz wurde auf etwa 50 cm geschätzt.

Die Feuerwehrbefragung lieferte wertvolle Informationen zu den Einsatzorten und Überschwemmungsschwerpunkten bei den Starkregenereignissen. Aufgrund dieser Eingrenzung

konnten bei der Gebietsbegehung und Anwohnerbefragung gezielt die Gebäude aufgesucht werden, die am stärksten betroffen waren. Die Aussagen konnten mit den synthetischen Gewässernetzen und den Modellergebnissen verglichen werden. Die Unsicherheit besteht bei dieser Methode darin, dass die Aussagen subjektiv geprägt sein können und daher kein absolut exakter Ereignisbericht vorliegt. Wenn Informationen über alle Einsatzorte, aufgetretene Schäden und getroffene Maßnahmen in Form von Einsatzberichten vorliegen, ist die Objektivität eher gewährleistet und es wird ein besserer Überblick über den Verlauf und die Dimension des Ereignisses gegeben.

2. Untersuchungsgebiet Delbrück

Nach Aussage eines Mitgliedes der Feuerwehr Delbrück, war am 09./10. August 2007 das gesamte Delbrücker Stadtgebiet vom Hochwasser betroffen. Die Überlastung des Kanalnetzes wurde als Hauptursache für die oberflächlich auftretenden Abflüsse angegeben. Überschwemmungen dauerten, den Aussagen zufolge, die gesamte Nacht vom 09. auf den 10. August an, wobei unterschiedliche Gebiete zu unterschiedlichen Zeiten betroffen waren. Die hangabwärts verlaufenden Straßen wurden als bevorzugte Fließwege genannt. Es wurde beobachtet, dass das Wasser zunächst aus etwas höher gelegenen Gebieten im Norden des Stadtgebiets entlang der großen Straßen wie der Graf-Sporck-Straße, der Lipplinger Straße und der Ostenländer Straße in Richtung Innenstadt floss. Der Kirchplatz, an dem die Graf-Sporck-Straße und die Lipplinger Straße zusammentreffen wurde, nach den Angaben der Feuerwehr, von den hier zusammenfließenden Abflüssen der oberhalb liegenden Straßen und Hängen überflutet. Die Oststraße und das Gehöft an der Kreuzung Oststraße/Ostenländer Straße wurden ebenfalls als Schwerpunkte der Überschwemmungen genannt. Im weiteren Verlauf wurden im südlichen Stadtgebiet Überschwemmungen mit Wasserständen bis ca. 60 cm in tiefer gelegenen Bereichen beobachtet. Vor allem die Theodor-Heuss Straße, die parallel zu den teilweise sehr steilen Hängen verläuft, war nach Aussagen der Feuerwehr durch die dort auftretenden Abflüssen betroffen (vgl. Abbildung B.3). Der Bereich der Sonnenstraße, Südstraße und Boker Straße war, den Angaben zufolge ca. 60 cm tief überflutet. Das Wasser floss hier aus Richtung der Adolf-Kolping-Straße und Schlaunstraße zu und wurde von der Feuerwehr in die östlich angrenzenden Wiesen gepumpt.

4.1.3 Bevölkerungsbefragung

Am 14. und 15. Oktober 2008 wurde eine Anwohnerbefragung in den drei Untersuchungsgebieten durchgeführt. Es wurden insgesamt 40 Personen folgende Fragen gestellt:

- erinnern sie sich an das Hochwasser am 08./09. August 2007, waren sie vom Hochwasser direkt betroffen?
- Wenn ja, wo stand das Wasser wann wie hoch (z.B. Vor der Haustür morgens um 7 Uhr 20 cm hoch, am Ende der Straße nur 2 cm, etc.)?
- Welche Schäden sind entstanden?
- Welche anderen Flächen waren überschwemmt?
- Welche Flächen blieben trocken?
- Wann stand das Wasser am höchsten?
- Hatte das Wasser eine Fließrichtung? Wenn ja, welche?
- Woher kam das Wasser?
 - Starker Regen konnte nicht so schnell abfließen/versickern
 - Wasser drückte aus Kanalisation hoch
 - Wasser lief die Straßen/Wiese hinab
 - Fluss trat über die Ufer
- War das Wasser klar oder trübe?
- Hat das Wasser Schlamm transportiert?

Die Ergebnisse der Befragungen in den einzelnen Untersuchungsgebieten werden im Folgenden dargestellt.

1. Untersuchungsgebiet Henglarn

Nicht alle der 12 in Henglarn befragten Anwohner konnten zu allen Fragen Angaben machen. Zusammenfassend wurden folgende Beobachtungen gemacht:

Der größte Teil des Oberflächenabflusses folgte dem Siebentalweg, außerdem trat Oberflächenabfluss auf der Wiese oberhalb des Amselweges auf (Abbildung 4.1). Der Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes wurde von drei Personen zwischen 21:00 und 22:00 Uhr abends angegeben. Die anderen Befragten konnten sich nicht an die genaue Uhrzeit erinnern, machten aber größtenteils die Angabe, dass es abends gewesen sein musste, da es bereits dunkel war. Die Anwohner im unteren Hangbereich, deren Grundstücke direkt an den Siebentalweg angrenzen (Nr. 1, 2, 4 und 5 in Abbildung 4.25) und die Bewohner der Andreasstraße (Nr. 10, 11 und 12) machten außerdem die Angaben, dass Abwasser aus der Kanalisation ins Haus drückte. Als weiterer Grund für die eingetretenen Überschwemmungen nannten einige Anwohner einen verschmutzten Kanaleingang oberhalb des Siebentalweges (s. Kapitel 4.2.1). Die Anwohner der Amselweges (Nr. 8 und 9) sowie der Bewohner des Hauses an der Ecke Siebentalweg/Amselweg (Nr.1) gaben an, dass sie durch Oberflächenabfluss, der von den Grünlandflächen oberhalb der Grundstücke abfloss und teilweise

durch die Kellerschächte in die Gebäude lief, betroffen waren. Abbildung 4.2 zeigt Fotos eines Anwohners, die die Fließwege des Oberflächenabflusses dokumentieren. Zwar handelt es sich nicht um Aufnahmen des Ereignisses im August 2007, jedoch traten die Überschwemmungen laut Aussagen der Anwohner an denselben Stellen auf. Die Angaben zu den Wasserständen auf der Straße schwankten zwischen 20 und 50 cm. In Abbildung 4.1 sind die Angaben zu den beobachteten Fließwegen und Wasserständen dargestellt.

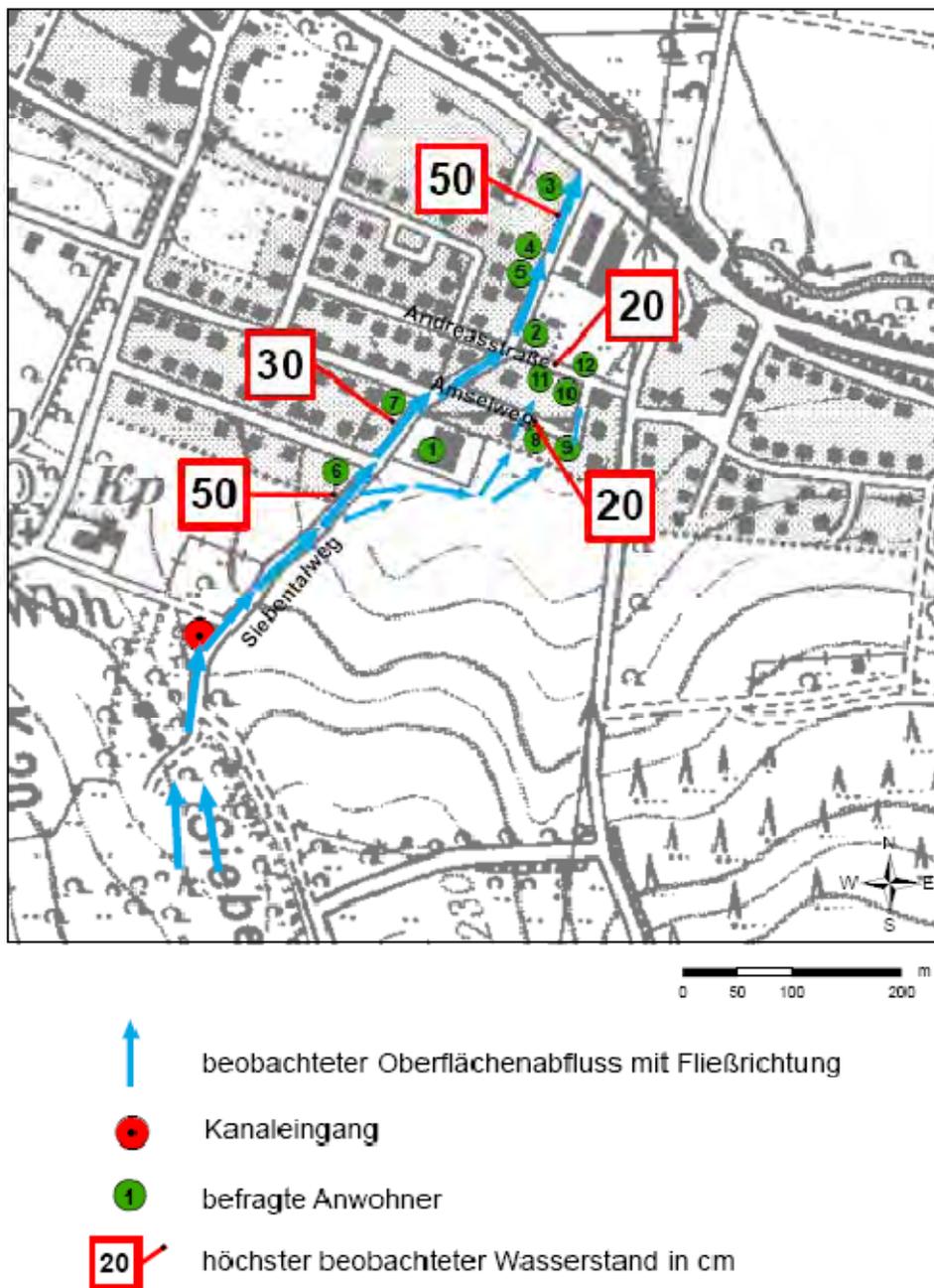


Abbildung 4.1: Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Henglar, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.



(a)



(b)

(c)

Abbildung 4.2: Fließwege des Oberflächenabflusses bei einem Starkregenereignis in Henglar.

Bild (a) zeigt den Siebentalweg, Bild (b) und (c) die Rückseite der Grundstücke des Amselweges, wo der Oberflächenabfluss von den Grünlandflächen der Hänge oberhalb auf die Grundstücke floss. Fotos: S. Savory.

2. Untersuchungsgebiet Delbrück

Insgesamt wurden in Delbrück 19 Personen zum Augusthochwasser 2007 befragt. Die Angaben der Befragten bestätigten die Informationen der Feuerwehr. Im Bereich des Kirchplatzes wurden vier Anlieger befragt. Diese berichteten wiederholt von Zuflüssen aus den nach Norden angrenzenden Straßen. Der Wasserstand auf dem Kirchplatz wurde übereinstimmend mit 50 cm beziffert. An der Tür der Kreuzapotheke (Abbildung 4.3) stand das Wasser 40 cm hoch.

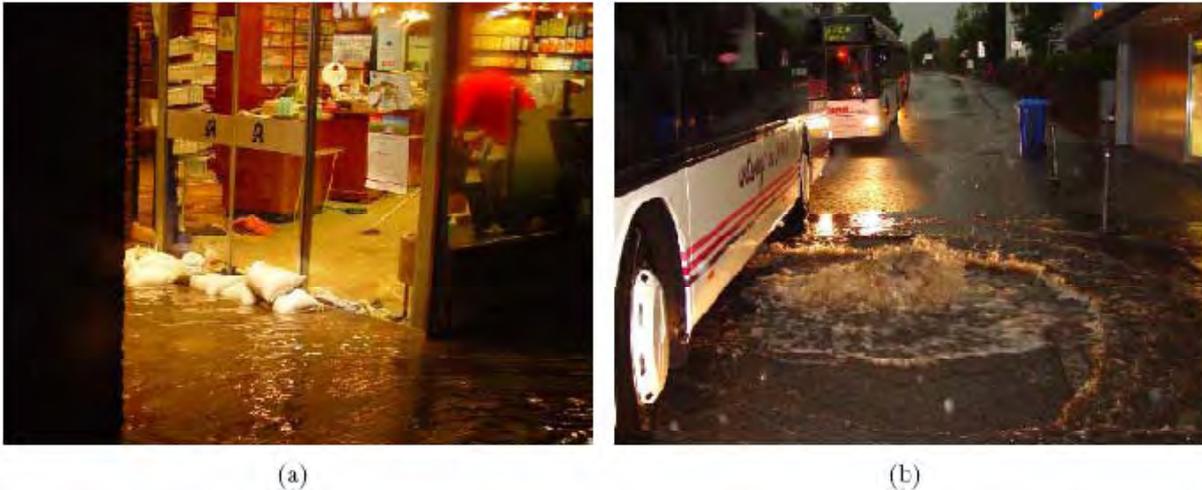
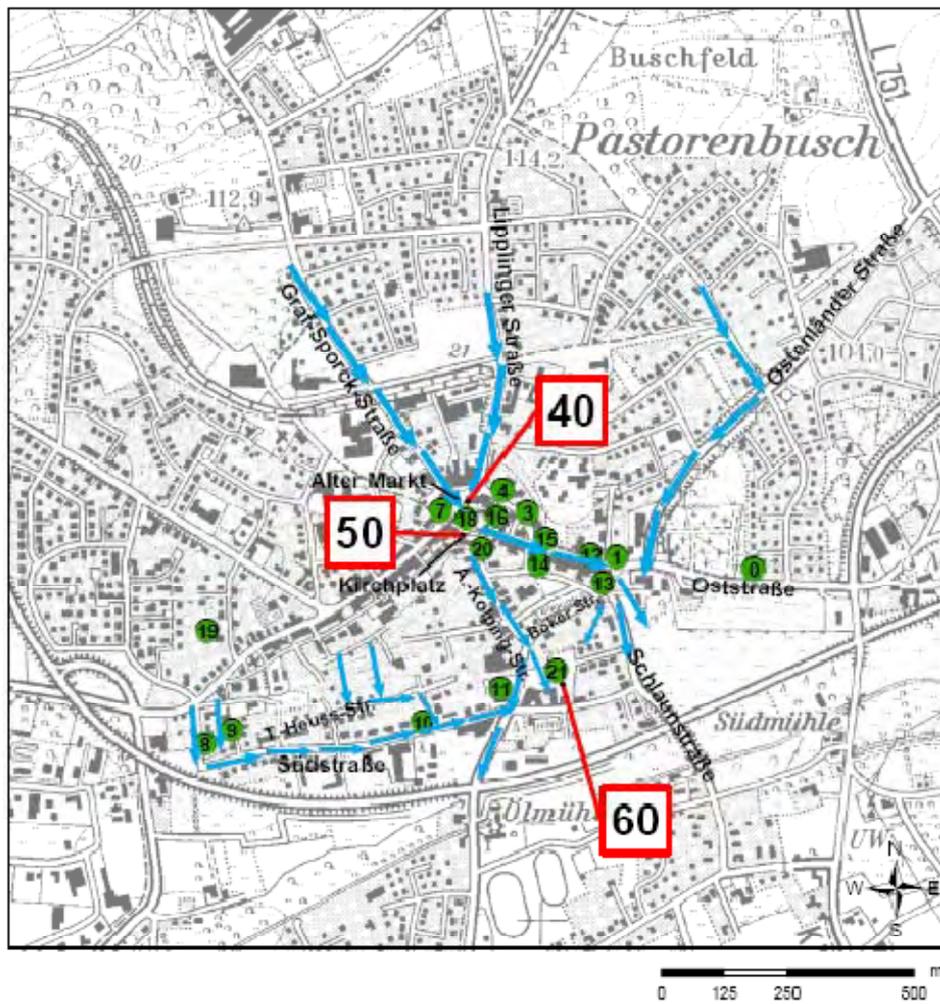


Abbildung 4.3: Eingang der Kreuzapotheke am Kirchplatz in Delbrück (a) und Kanaldeckel auf dem Alten Markt 6 vor der Volksbank Paderborn-Höxter in Delbrück (b). Fotos: S. Hartmann.

Der Kirchplatz wurde den Angaben der Betroffenen zufolge vorwiegend aus westlicher und nördlicher Richtung überflutet. Es wurde beobachtet, dass das Wasser in Richtung Süden über die Adolf-Kolping-Straße abfluss. Die Oststraße war nach Anwohneraussagen 30 bis 40 cm hoch überflutet. Ob das Wasser in die Häuser drang, hing den Beobachtungen zufolge, weitestgehend von der Höhe der Türen und Kellerfenster über dem Straßenniveau ab. Zahlreiche Keller und Tiefgaragen liefen voll. Nach Angaben der Bevölkerung bewegte sich der Zeitpunkt der größten Überschwemmung zwischen 19:00 und 23:00 Uhr.

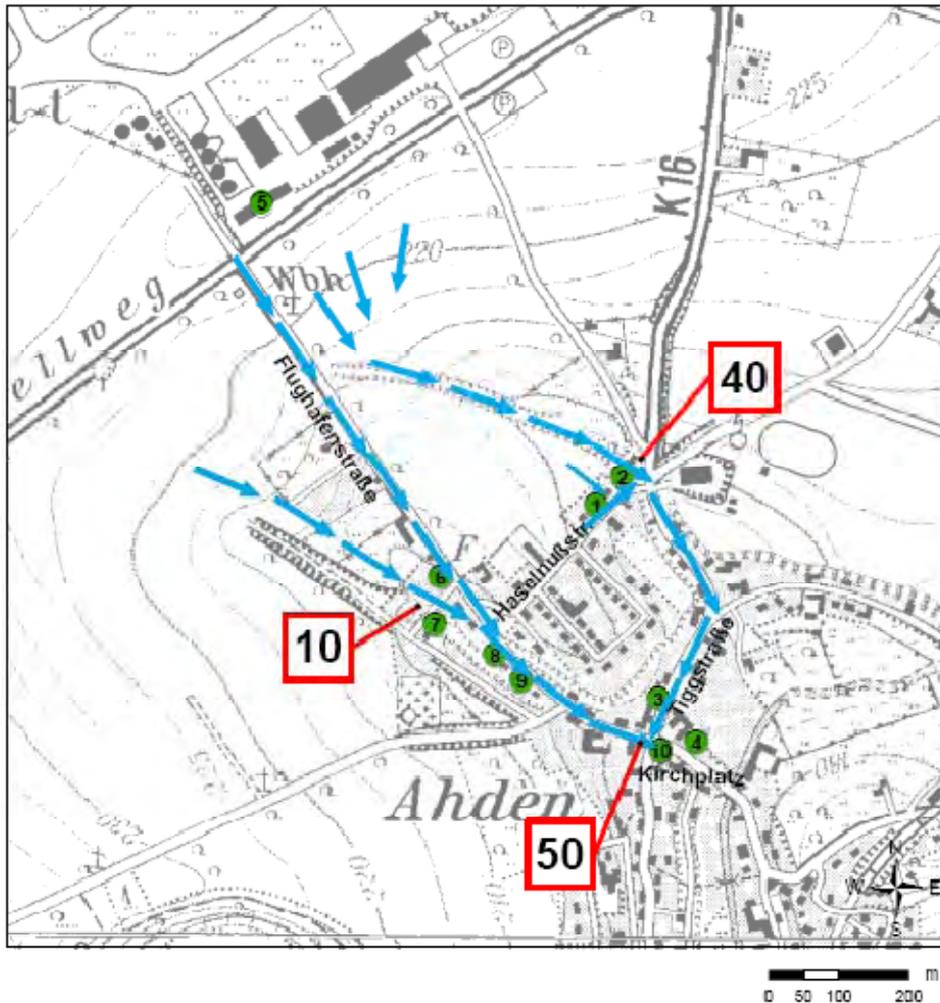


-  beobachteter Oberflächenabfluss mit Fließrichtung
-  befragte Anwohner
-  höchster beobachteter Wasserstand in cm

Abbildung 4.4: Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Delbrück, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.

3. Untersuchungsgebiet Ahden

Im Gebiet der beschriebenen Abflussschwerpunkte wurden 8 Anwohner befragt. Die Fließwege in Abbildung 4.5 wurden anhand der Aussagen der Anwohner und der Feuerwehr rekonstruiert.



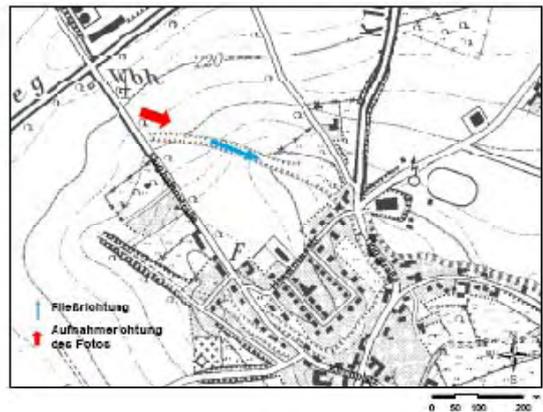
-  beobachteter Oberflächenabfluss mit Fließrichtung
-  befragte Anwohner
-  höchster beobachteter Wasserstand in cm

Abbildung 4.5: Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Ahden, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.

Die folgenden Abbildungen zeigen ausgewählte Sequenzen aus dem Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007, der von einem Anwohner erstellt wurde.



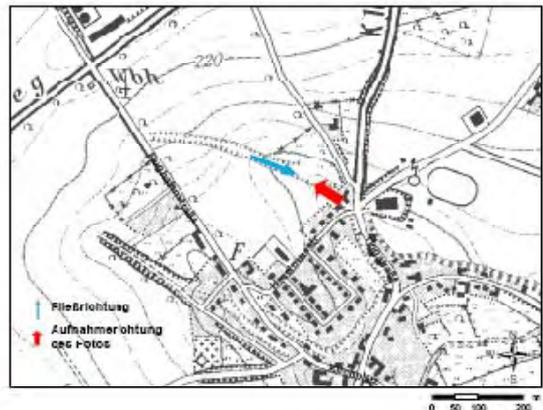
(a)



(b)



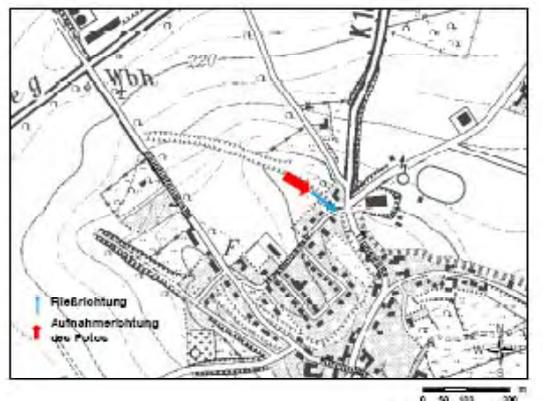
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 4.6: Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.

Die gefilmte Stelle und die Abflussrichtung sind jeweils auf der Grundkarte markiert. Bilder: Aus Filmaufnahmen, von D. Finke zur Verfügung gestellt.

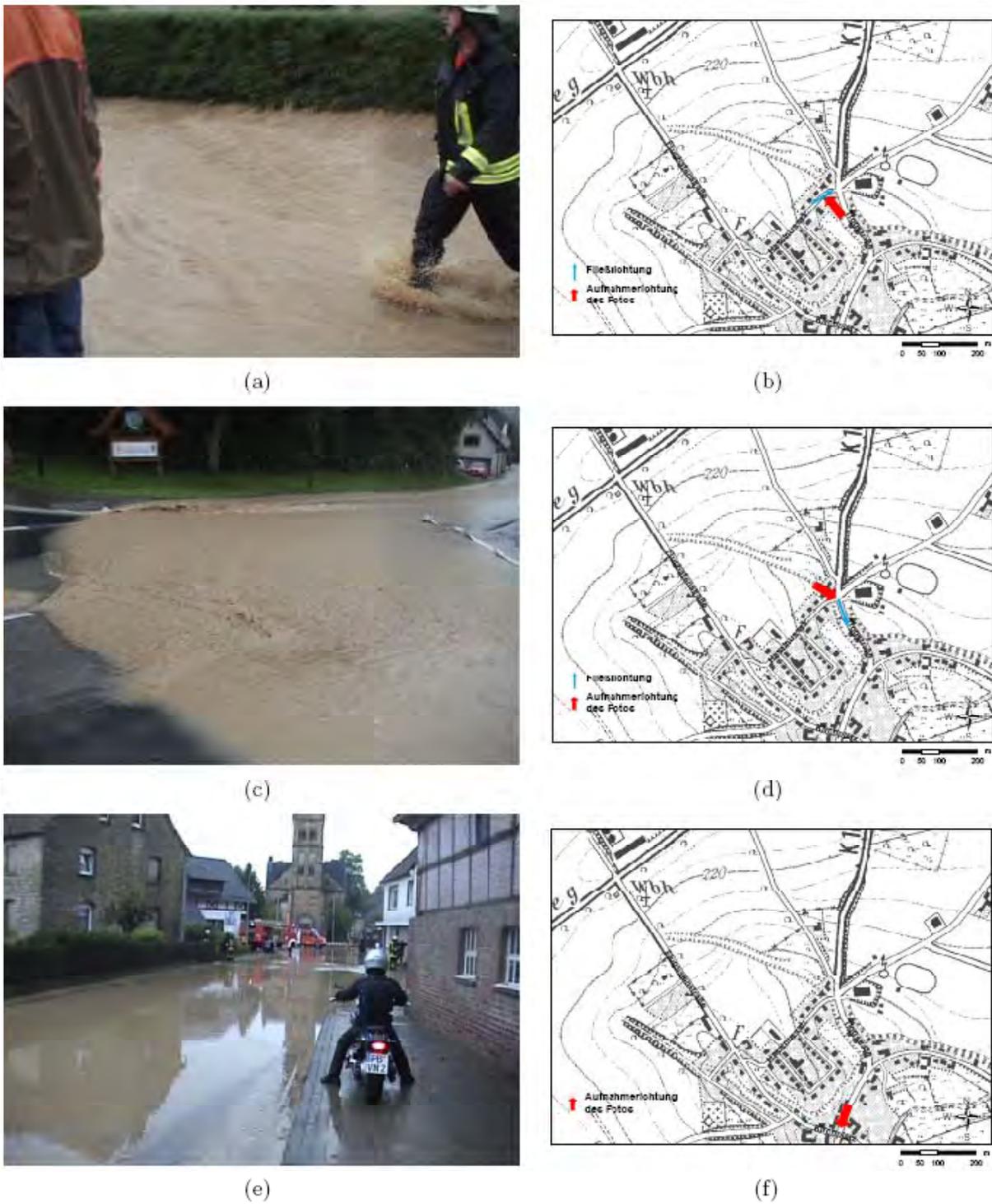


Abbildung 4.7: Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.

Die gefilmte Stelle und die Abflussrichtung sind jeweils auf der Grundkarte markiert. Bilder: Aus Filmaufnahmen, von D. Finke zur Verfügung gestellt. (Fortsetzung)



Abbildung 4.8: Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.

Die gefilmte Stelle und die Abflussrichtung sind jeweils auf der Grundkarte markiert. Bilder: Aus Filmaufnahmen, von D. Finke zur Verfügung gestellt. (Fortsetzung)

Der Oberflächenabfluss, der von den Flächen nordwestlich der Flughafenstraße floss, traf laut Aussage der Anwohner der Flughafenstraße in Höhe der Nr. 8 in der Abbildung 4.5 auf die Flughafenstraße und folgte deren Verlauf bis zum Kirchplatz (Abbildung 4.8 a-d). In diesem Bereich wurden mehrere Keller überflutet, besonders stark betroffen war das Haus am Punkt Nummer 8, dessen Keller 2,30 m tief geflutet wurde, da der Verlauf des Fließweges direkt in die Kellerschächte führte.

Ähnlich wie in Delbrück treffen beim Kirchplatz zwei hangabwärts verlaufende Straßen zusammen. Der Oberflächenabfluss der über diese Straßen abgeführt wurde, konzentrierte sich somit in der Ortsmitte (Abbildung 4.7 e). Neben dem beschriebenen Abfluss auf der Flughafenstraße, traten auf den Ackerflächen oberhalb der Haselnussstraße Oberflächenabflüsse auf (Abbildung 4.6 a), die in Höhe des Hauses mit der Nummer 2 in der Abbildung 4.5 auf die Haselnussstraße trafen und dann entlang der Tiggstraße weiter in Richtung Ortsmitte flossen (Abbildung 4.6 c-f und Abbildung 4.7 a-f). Nach Aussagen eines Anwohners führte früher über die Ackerflächen ein Feldweg, dessen Verlauf der Oberflächenabfluss bei dem Ereignis folgte. Das Haus mit der Nummer 2 der Abbildung 4.5 wurde bis zu einer Höhe von 40 cm umspült, Keller und Wohnzimmer wurden überflutet. Nach Schilderungen

der Anwohner war dieses Haus in dieser Straße am stärksten betroffen, da durch eine Lücke in der Hecke hinterm Haus das aufgestaute Oberflächenwasser direkt auf das Haus zufluss und durch die Hintertür und Lüftungsschlitze in der Hauswand eindrang.

Die Befragten äußerten übereinstimmend, dass das Ereignis am Nachmittag begann und die Abflüsse am Abend gegen 20:00 Uhr am stärksten waren.

Die Aussagen der betroffenen Anwohner waren für die Rekonstruktion des Abflussgeschehens äußerst hilfreich. Vor allem das zur Verfügung gestellte Bild- und Videomaterial trug zu einer relativ exakten Nachbildung der Fließwege bei. Die Unsicherheiten bestehen hierbei jedoch stärker noch als bei den Feuerwehrbefragung in der Subjektivität mancher Aussagen. Es handelt sich oft nur um eine grobe Abschätzung von Wasserständen (“Das Wasser stand im Keller mannshoch”), da in den seltensten Fällen tatsächliche Messwerte vorliegen. Diese wenig exakten Informationen können nicht für die Quantifizierung des Abflusses verwendet werden. Die Schwankungen in den Angaben über den zeitlichen Verlauf der Ereignisse sind ebenfalls erheblich. Eine zeitliche Einordnung lässt sich anhand von Aussagen wie “es war dunkel” nur sehr grob vornehmen. Ein weiterer Punkt, der die Unsicherheiten dieser Methode beeinflusst, ist, dass bei einer Befragung nicht alle betroffenen Personen erfasst werden können. Es besteht daher die Gefahr, dass eine Prognose auf der Grundlage der Informationen der befragten Personen, nicht alle potentiell gefährdeten Bereiche berücksichtigt.

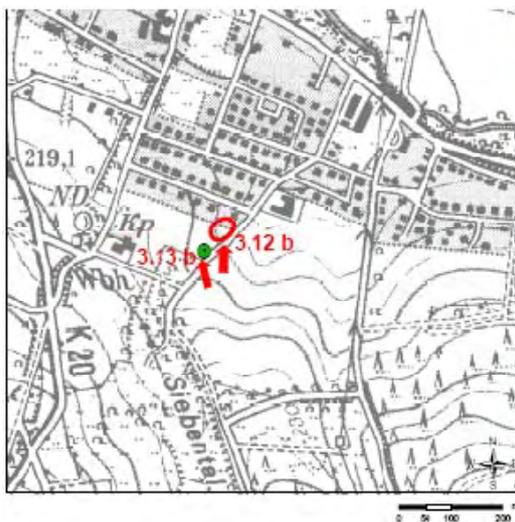
4.2 Gebietsbegehung

Bei einer Gebietsbegehung können Erkenntnisse zu bevorzugten Fließbahnen anhand der Lokalisierung von topographischen Besonderheiten gewonnen werden. Außerdem bietet eine Gebietsbegehung die Möglichkeit, Gebietsparameter vor Ort zu erheben. Die auf diese Weise gewonnenen Daten können für die Parametrisierung bei einer Modellanwendung hilfreich sein.

Am 14. und 15. Oktober 2008 wurden in den Untersuchungsgebieten eine Begehung durchgeführt, um abflussrelevante Strukturen wie z.B. Gräben und Verrohrungen aufzunehmen. Außerdem wurden auf zwei Ackerflächen ungestörte Stechzylinderproben genommen, um die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens an diesen Stellen zu bestimmen.

4.2.1 Abflusshindernisse und Gebietsbesonderheiten

In dem Untersuchungsgebiet Henglarndorf befindet sich oberhalb des Siebentalweges ein Kanaleingang, der wenige Meter unterhalb in ein Regenrückhaltebecken mündet (Abbildung 4.9).



(a)



(b)

Abbildung 4.9: (a) Lage des Kanaleingangs (grüne Markierung) und des Regenrückhaltebeckens (rote Markierung) in Henglarndorf.

Die roten Pfeile geben die Aufnahmerrichtungen der Fotos an. (b) Regenrückhaltebecken. Foto: K. Stein (14.10.2008).

Nach Aussagen von Anwohnern war der Kanaleingang zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses im August 2007 verkleinert, sodass der Zufluss zum Regenrückhaltebecken beeinträchtigt war. Zum Zeitpunkt der Geländebegehung war der Kanaleingang bereits erneuert und vergrößert worden (Abbildung 4.10).



Abbildung 4.10: Kanaleingang vor und nach der Erneuerung. Foto (a): S. Savory. Foto (b): K. Stein (14.10.2008).

Die Lage des Kanaleingangs und des Regenrückhaltebeckens gibt Hinweise auf den Verlauf von Fließwegen des Oberflächenabflusses bei Niederschlagsereignissen: Es kann davon ausgegangen werden, dass die Lage des Regenrückhaltebeckens so gewählt wurde, dass ein Teil des Wassers, das über das Siebental abfließt, in das Becken geleitet wird. Da allerdings das Schluckvermögen des Kanaleingangs von den Abflüssen überstiegen wurde, konnte nach Aussagen der Anwohner bei dem Starkregenereignis im August 2007 keine abflussmindernde Wirkung des Regenrückhaltebeckens beobachtet werden.

In Ahden wurden ebenfalls abflussrelevante Strukturen mit Gefahrenpotential identifiziert. In Abbildung 4.11 ist die Lage einer natürlichen Abflussrinne dargestellt, die ca. 500 m unterhalb in einen Kanaleingang mündet. Das Vorhandensein des Kanaleingangs lässt vermuten, dass die Abflussrinne bei vorangegangenen Ereignissen Oberflächenabfluss abführte. Bei dem Starkregenereignis im August 2007 folgte der Oberflächenabfluss allerdings nicht dem Verlauf der Abflussrinne, sondern traf ca. 100 m weiter östlich auf die westliche Stichstraße der Flughafenstraße (Abbildung 4.6) und floss dann weiter durch die Gärten der befragten Anwohner (Nr. 7, 8 und 9 in Abbildung 4.5).

Die Tatsache, dass in der Vergangenheit bereits bauliche Maßnahmen durchgeführt wurden, zeigt, dass in den Untersuchungsgebieten Gefahrenbereiche bekannt sind. Die Verminderung von Schäden bei zukünftigen Ereignissen kann aber nur erreicht werden, wenn die Konstruktionen richtig dimensioniert sind, sich an den richtigen Stellen befinden und regelmäßig gewartet werden.

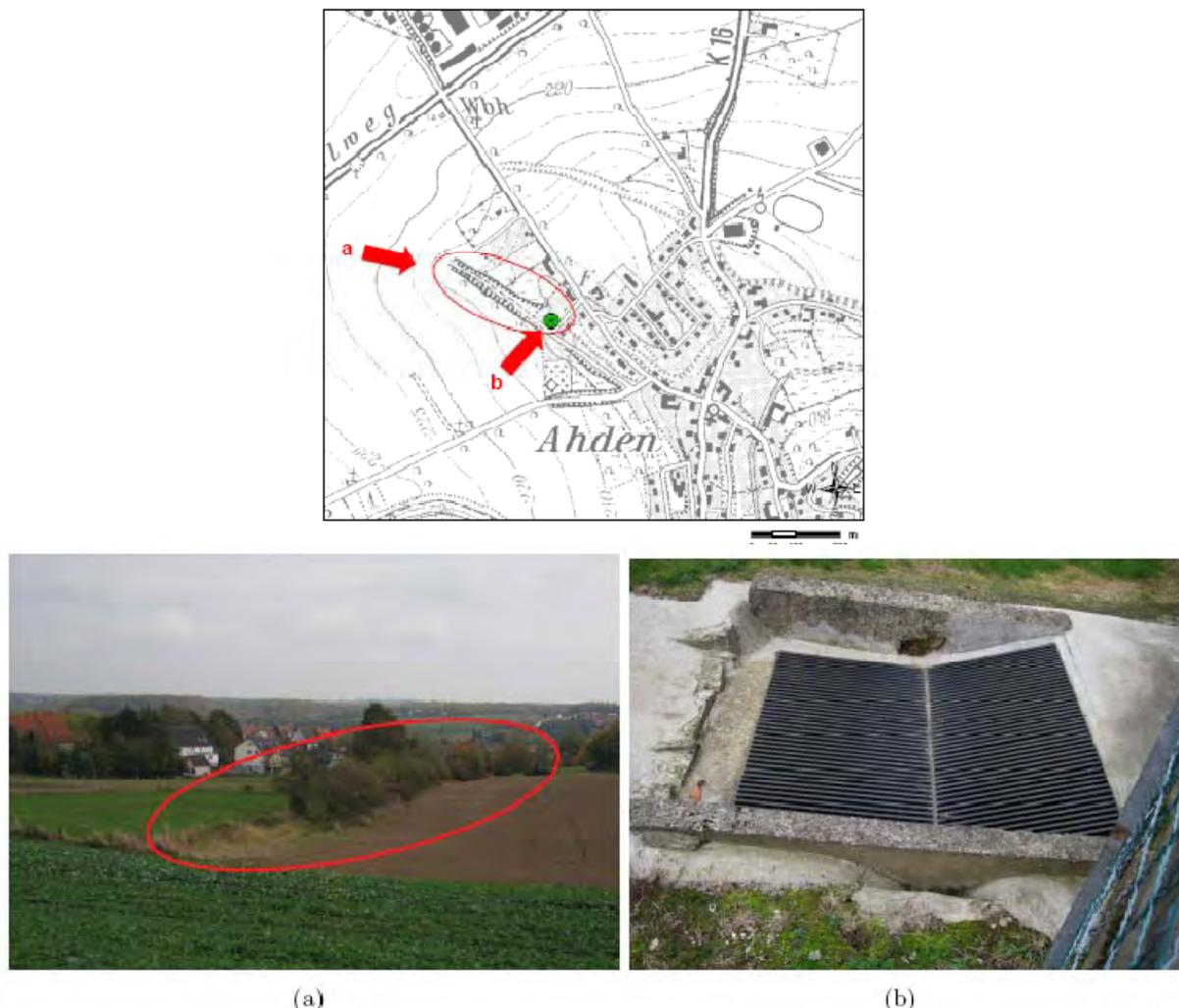


Abbildung 4.11: Lage der Abflussrinne (a) (rote Markierung) und des Kanaleingangs (b) (grüne Markierung) in Ahden. Die roten Pfeile geben die Aufnahmegerichtungen der Fotos an.

4.2.2 Modellparameterermittlung und Unsicherheitsbetrachtung am Beispiel der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit

Der Boden nimmt im hydrologischen Geschehen eine herausragende Bedeutung ein. Seine Eigenschaften wie Körnung, Struktur, Porenvolumen, Horizontabfolge, Profilmächtigkeit und Hydromorphie bestimmen, welche Anteile des Niederschlags infiltrieren, oberflächlich oder oberflächennah abfließen, gespeichert werden oder in die Tiefe versickern (Löhmannsröben, 2002). Als Eingangsdaten für hydrologische Modelle können diese aber in vielen praktischen Fällen nicht direkt aus Messwerten im betreffenden Einzugsgebiet abgeleitet werden, da die Datenbasis nur unzureichend ist (Blöschl und Merz, 2002). Die in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Eingangsdaten konnten nur der digitalen Bodenkarte (BK 50) entnommen werden, die auf der Regionalisierung von Messwerten der Bodenparameter basiert und daher mit Unsicherheiten behaftet ist, was die hohe Variabilität der Parameter, insbesondere der hydraulischen Leitfähigkeit, betrifft. Um einen Eindruck dieser Variabilität zu bekommen, deren Einfluss auf die Modellergebnisse abzuschätzen, und daraus Empfehlungen für deren Berücksichtigung bei der Modellierung abzuleiten, wurde an zwei ausgewählten Ackerstandorten oberhalb der Ortschaften Henglarn und Ahden die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bestimmt.

An den beiden Standorten wurden jeweils sechs ungestörte Stechzylinderproben genommen (Abbildung 4.12). Die Probenahme erfolgte an jeweils zwei charakteristischen Stellen auf abgeernteten Getreideäckern aus dem Ap-Horizont (Pflughorizont) in einer Tiefe von etwa 5 bis 10 cm. Dabei handelte es sich zum einen um eine Traktorfahrspur, die senkrecht zum Hang verlief (Proben A 1a, A 1b, A 1c sowie H 2a, H 2b und H 2c) zum anderen um einen nicht unmittelbar befahrenen Teil des Ackers (Proben A 2a, A 2b, A 2c sowie H 1a, H 1b und H 1c). Da sich die Bodenarten an den zwei Probenahmestellen unterscheiden, sollte die Variabilität der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart quantifiziert werden. Durch den Vergleich der Leitfähigkeiten der Proben aus unterschiedlich stark befahrenen Teilen des Ackers wurde außerdem der mögliche Einfluss von Fahrspuren auf die gesättigte Leitfähigkeit und somit auf die Infiltrationsfähigkeit des Bodens untersucht.

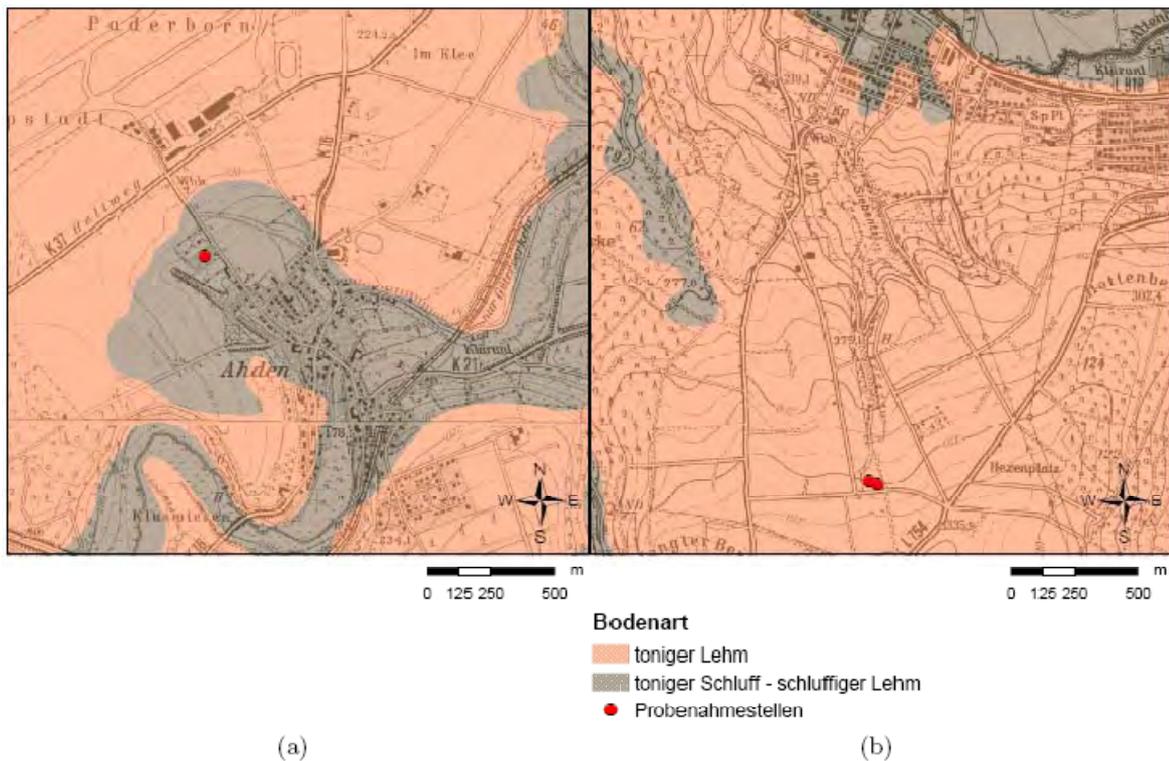


Abbildung 4.12: Bodenarten nach BK 50 an den Probenahmestellen in Ahden (a) und Henglarn (b).

4.2.2.1 Material und Methoden

Zur Probenahme wurden Stechzylinder aus Plexiglas mit einem Volumen von 500 cm^3 verwendet. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde durch die Methode mit fallendem Überstau ermittelt, die klassischerweise für gering durchlässige Bodenproben angewendet wird (Anderson und McDonell 2005). Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

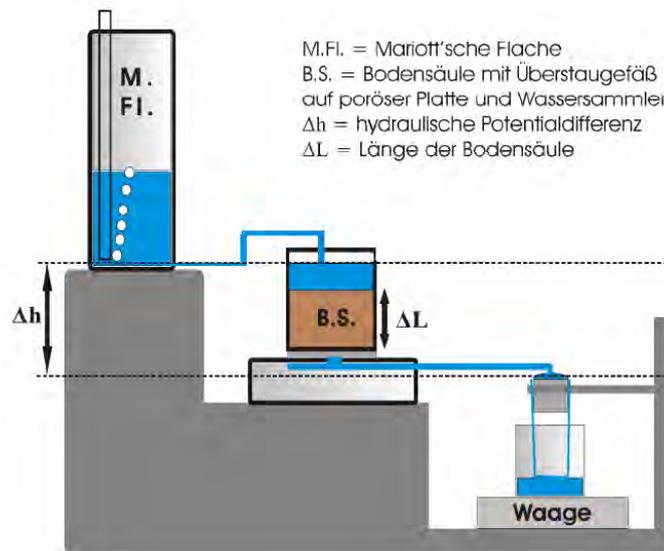


Abbildung 4.13: Schematischer Versuchsaufbau der K_s -Messung bei konstantem Überstau, aus Anderson und McDonell (2005).

Mit der Öffnung der Wasserzufuhr aus der Mariott'schen Flasche wurde die Messung gestartet. Hierzu wurde in gewissen zeitlichen Abständen, die je nach Fließgeschwindigkeit unterschiedlich groß gewählt wurden, die Masse des Wassers im Becherglas gemessen. Mit Erreichen eines stationären Flusses (konstante Abflussrate) wurden insgesamt ca. 10 Messwerte notiert. Als Perkolationsfluid wurde entgastetes Leitungswasser bei etwa 22°C Raumtemperatur verwendet.

Nach der Messung wurden die Proben aus den Stechzylindern einzeln in eine Trockenschale überführt, im Trockenschrank bei 105°C für 24 Stunden getrocknet und rückgewogen, um die Trockenmasse zu bestimmen.

4.2.2.2 Auswertung

Aus der Masse des Bodens bei Probenahme und der Trockenmasse des Bodens lässt sich, bei bekanntem Stechzylindervolumen und der Annahme des Wertes 1 g cm^{-3} für die Dichte von Wasser ρ_W , der volumetrische Wassergehalt θ bei Probenahme berechnen:

$$\theta = \frac{W_{\text{feucht}} - W_{\text{trocken}}}{W_{\text{trocken}}} \cdot \frac{\rho_B}{\rho_W} \quad (4.1)$$

- mit θ = volumetrischer Wassergehalt [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$]
 W_{feucht} = Masse des Bodens bei Probenahme [M]
 W_{trocken} = Trockenmasse des Bodens [M]
 ρ_B = Lagerungsdichte des Bodens [M L^{-3}]
 ρ_W = Dichte des Wassers [M L^{-3}].

Die Berechnung der gesättigten Leitfähigkeit K_s bei konstantem Überstau erfolgte nach einer durch Anderson und McDonell (2005) veränderten Form des Darcy-Gesetzes:

$$K_s = \frac{Q}{A_{Bd}} \cdot \frac{L_{Bd}}{\Delta H} \quad (4.2)$$

mit K_s = gesättigte Leitfähigkeit [$L T^{-1}$]
 Q = stationäre Strömungsrate aus der Mariott'schen Flasche [$L T^{-1}$]
 A_{Bd} = durchströmte Fläche der Bodensäule [L^2]
 L_{Bd} = Länge der Bodensäule [L]
 ΔH = hydraulische Potentialdifferenz [L].

Die stationäre Strömungsrate Q ergibt sich aus dem Ausflussvolumen ΔV je Zeitintervall Δt . Das Ausflussvolumen wurde aus der durch Wägung ermittelten Ausflussmasse Δm bestimmt:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_w} \quad (4.3)$$

mit ΔV = Ausflussvolumen aus der Mariott'schen Flasche [L^3]
 Δm = Ausflussmasse aus der Mariott'schen Flasche [M]
 ρ_w = Dichte des Wassers [$M L^{-3}$].

Durch die Anpassung einer linearen Regressionsgeraden an die gemessenen Werte des kumulativen Ausflusses, aufgetragen gegen die Zeit, konnte die mittlere Strömungsrate bestimmt werden.

Zur Unsicherheitsabschätzung wurden die absoluten Fehler Δx aller Eingangsgrößen x abgeschätzt und die Fehlerfortpflanzung nach Gauß angewendet. Nach Anderson und McDonell (2005) ergibt sich der relative Fehler eines Produkts durch vektorielle Addition der relativen Fehler der Eingangsgrößen. Daraus folgt für den relativen Fehler δK_s :

$$\delta K_s = \sqrt{\delta Q^2 + \delta A_{Bd}^2 + \delta L_{Bd}^2 + \delta H^2} \quad (4.4)$$

Der absolute Fehler der Fläche der Bodensäule ΔA_{Bd} ergibt sich durch:

$$\Delta A_{Bd} = \frac{\pi}{2} \cdot d_B \cdot \Delta d_B \quad (4.5)$$

Da die Leitfähigkeit der Platte (Nennweite der Poren 250-500 μm) die Leitfähigkeit des Bodens übersteigt, kann auf die Einbeziehung des Widerstandes in die Berechnungen verzichtet werden. Die gemessenen Leitfähigkeiten wurden somit direkt als Leitfähigkeiten der Böden interpretiert.

4.2.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Mittels Fingerprobe wurden nach der Arbeitsgruppe Boden (1994) für die Proben aus Henglar die Bodenart „toniger Lehm“ (Lt) und für die Proben aus Ahden „toniger Schluff“ (Ut) ermittelt. In Tabelle 4.1 sind die errechneten Lagerungsdichten, sowie der Wassergehalt bei Probenahme aufgelistet. Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung sind in Tabelle A.2 im Anhang und Abbildung 4.14 dargestellt. Die statistischen Unsicherheiten der einzelnen Parameter sind in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Lagerungsdichte und Wassergehalt der Einzelproben bei der Probenahme (Mittelwert und Standardabweichung (Stabw.) für jeweils drei Wiederholungen an den unterschiedlichen Probenahmestellen).

Probe	Lagerungsdichte $\rho_B [ML^{-3}]$		Wassergehalt $\theta [L^3 L^{-3}]$		Porenvolumen $\phi [-]$	
	Einzelwerte	Mittelwert \pm Stabw.	Einzelwerte	Mittelwert \pm Stabw.	Einzelwerte	Mittelwert \pm Stabw.
A 1a	1,29	1,41 \pm 0,10	0,30	0,31 \pm 0,01	0,51	0,47 \pm 0,04
A 1b	1,47		0,32		0,45	
A 1c	1,48		0,32		0,44	
A 2a	1,50	1,48 \pm 0,07	0,32	0,32 \pm 0,01	0,43	0,44 \pm 0,03
A 2b	1,40		0,31		0,47	
A 2c	1,54		0,32		0,42	
H 1a	1,42	1,42 \pm 0,02	0,45	0,44 \pm 0,01	0,46	0,46 \pm 0,01
H 1b	1,40		0,44		0,47	
H 1c	1,44		0,44		0,46	
H 2a	1,40	1,43 \pm 0,03	0,43	0,45 \pm 0,02	0,47	0,46 \pm 0,01
H 2b	1,46		0,44		0,45	
H 2c	1,43		0,47		0,46	

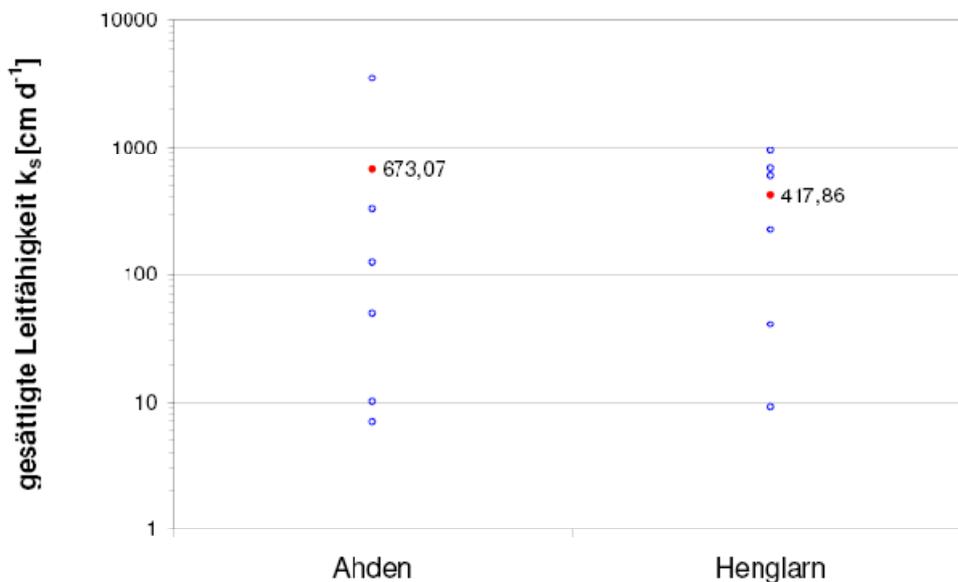


Abbildung 4.14: Gemessene gesättigte Leitfähigkeit K_s [$cm\ d^{-1}$] der Stechzylinderproben an den zwei Ackerstandorten. In rot: Mittelwert.

Die gemessenen Werte der gesättigten Leitfähigkeiten schwanken unabhängig von der Bodenart und Probenahmestelle um mehrere Größenordnungen, was auch anhand der hohen Standardabweichungen von $1399\ cm\ d^{-1}$ (Ahden) und $382\ cm\ d^{-1}$ (Henglarn) verdeutlicht wird. Diese hohen Schwankungen wurden auch in anderen Untersuchungen festgestellt. Nach Blöschl und Grayson (2002) können Punktmessungen der hydraulischen Leitfähigkeit innerhalb von 100 m über Zehnerpotenzen variieren.

In Abbildung 4.15 ist der Vergleich der Proben mit erkennbaren Makroporen (Regenwurmgingen) und Proben ohne erkennbaren Makroporeneinfluss anhand eines Boxplots dargestellt.

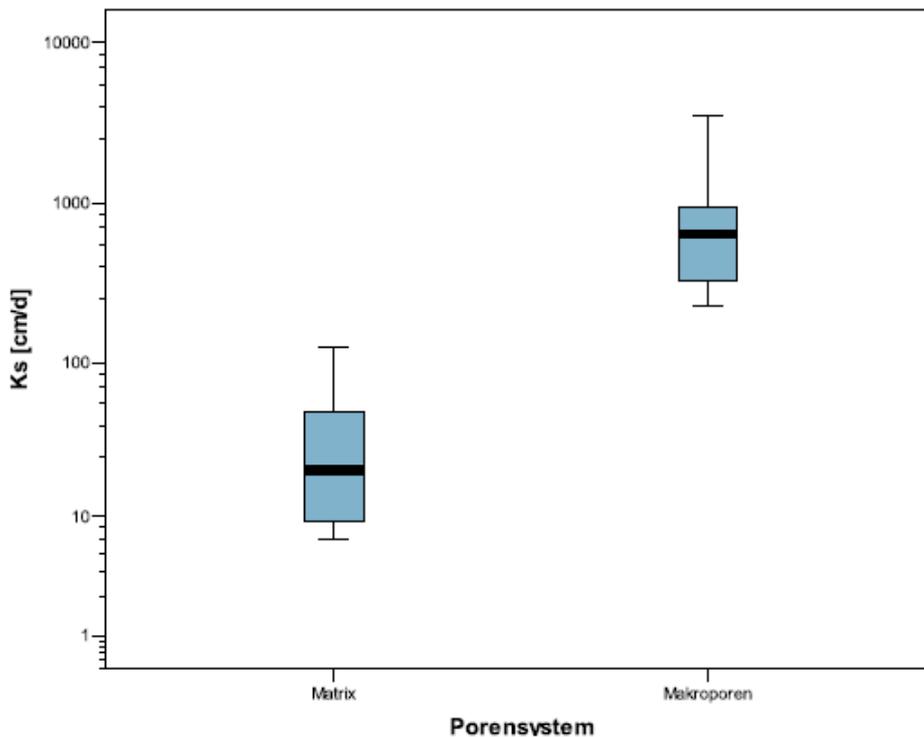


Abbildung 4.15: Vergleich der gesättigten Leitfähigkeiten aller Proben bei Makroporen- bzw. Matrixfluss

Zum Vergleich der Proben wurden mit Hilfe des Programms SPSS 13.0 statistische Tests durchgeführt. In der Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen t-Tests aufgelistet. Die Mittelwerte der errechneten Lagerungsdichten an den unterschiedlichen Probenahmestellen, sowie die Lagerungsdichten der Proben aus Fahrspuren bzw. unbefahrenen Teilen des Ackers unterscheiden sich nicht signifikant.

Tabelle 4.2: Vergleich der Mittelwerte von Lagerungsdichte bzw. gesättigter Leitfähigkeit verschiedener Gruppen anhand eines t-Tests (Annahme: Mittelwerte sind gleich).

Testvariable	Test-Gruppen	p-Wert
Lagerungsdichte ρ_b	Fahrspur Ahden – Acker Ahden	0,421
Lagerungsdichte ρ_b	Fahrspur Henglarn – Acker Henglarn	0,656
Lagerungsdichte ρ_b	Ahden (gesamt) – Henglarn (gesamt)	0,578
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s	Fahrspur Ahden – Acker Ahden	0,399
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s	Fahrspur Henglarn – Acker Henglarn	0,006
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s	Ahden (gesamt) – Henglarn (gesamt)	0,676
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s	Makroporen – Keine Makroporen	0,073

Die t-Tests lassen erkennen, dass es bis auf eine Ausnahme ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der gesättigten Leitfähigkeit zwischen Traktorfahrspur und nicht befahrenem Teil des Ackers gibt. In Henglarn ist mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,006 ein Unterschied zwischen den Messwerten der Traktorfahrspur und des nicht befahrenem Teil des Ackers gegeben. Allerdings kann dieser Unterschied nicht mit der Lagerungsdichte begründet werden, da sich diese, wie oben bereits erwähnt, an den zwei verschiedenen Probenahmestellen nicht signifikant unterscheidet (p-Wert 0,656). Ein Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und gesättigter

Leitfähigkeit kann auch mit Hilfe eines gepaarten t-Tests nicht hergestellt werden (p-Wert 0,327). Allerdings ist ein signifikanter Unterschied (bei einem Signifikanzniveau von 8 %) in der gesättigten Leitfähigkeit zwischen den Proben mit Makroporen und den Proben ohne Makroporen festzustellen (p-Wert 0,073). Der Makroporenanteil hat erwartungsgemäß einen größeren Einfluss auf die gesättigte Leitfähigkeit. Im Fall der Proben aus einer Traktorfahrspur und einem nicht befahrenem Teil des Ackers in Henglarn ist der signifikante Unterschied vermutlich ebenfalls auf den Makroporenfluss zurückzuführen, weil bei allen drei Proben aus der Fahrspur Regenwurmgänge vorgefunden wurden, wobei nur eine Probe des unbefahrenen Teil des Ackers Makroporen aufwies.

Da bei den Proben A 1a, A 2b, A 1c sowie H 1a und H 1c keine Makroporen vorhanden waren und daher angenommen werden kann, dass es sich bei den gemessenen Werten um den reinen Matrixfluss handelt, lassen sich diese Werte mit Literaturwerten vergleichen. Laut bodenkundlicher Kartieranleitung bewegen sich die hydraulischen Leitfähigkeiten der Bodenarten „Lt“ und „Ut“ im Oberboden bei landwirtschaftlicher Nutzung zwischen 10 und 40 cm d⁻¹.

Das Programm ROSETTA, das von Schaap et al. (2001) entwickelt wurde, schätzt bodenhydraulische Parameter der van Genuchten-Gleichung anhand von Bodentransferfunktionen ab:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha_g \psi_m)^{n_g}]^{m_g}} \quad (4.6)$$

mit θ = volumetrischer Wassergehalt [L³ L⁻³]
 θ_r = Residualwassergehalt [L³ L⁻³]
 θ_s = Sättigungswassergehalt [L³ L⁻³]
 α_g = Formparameter [L⁻¹]
 ψ_m = Matrixpotential [L]
 n_g = Formparameter [-]
 m_g = Formparameter [-].

Eingabeparameter sind die Korngrößenverteilung in % und die Lagerungsdichte der Böden. Die Werte für tonigen Lehm (15 % Sand, 20 % Schluff, 65 % Ton) und tonigen Schluff (15 % Sand, 65 % Schluff, 20 % Ton) bei den errechneten Lagerungsdichten an den Standorten werden in dem Programm mit 9,47 cm d⁻¹ bzw. 13,52 cm d⁻¹ beziffert. Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung der Proben ohne Makroporen (Abbildung 4.15) bewegen sich in einer Größenordnung, die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung und dem Programm ROSETTA ähnlich angegeben wird und spiegeln daher realistische Werte für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der jeweiligen Bodenart wider.

Die stochastische Unsicherheit der Einzelmessungen ist mit 1,4-7,8 % relativ gering. Jedoch ist die Streuung der Leitfähigkeitsmesswerte um den Mittelwert der jeweiligen Probenahmestelle sehr hoch (Abbildung 4.14). Aufgrund dieser hohen Varianz der Messwerte bei lediglich sechs Proben kann keine Aussage über die mittlere gesättigte Leitfähigkeit des Bodens der jeweiligen Gesamtackerfläche getroffen werden.

Die Versuche zeigen, dass der Makroporenfluss einen erheblichen Einfluss auf die Infiltration und somit auch auf den Oberflächenabfluss hat und die räumliche Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit sehr groß ist.

Verschiedene Untersuchungen beschreiben diesen Zusammenhang. Mosley (1982) beobachtete z. B. Fließgeschwindigkeiten bis zu 2 cm s^{-1} bei Messungen des Wasserflusses in Grobporen. Der Einfluss des Makroporenflusses auf die hydrologischen Prozesse auf der Hangskala wurde anhand von Modellanwendungen von verschiedenen Autoren untersucht (z. B. Bronstert, 1994 und Faeh et al., 1997), lässt sich aber auf einer größeren Skala und bei unzureichender Datenlage nur schwer berücksichtigen. Nach Scherer (2008) bleiben immer, unabhängig von der räumlichen Auflösung von Messungen zur Erkundung des Prozessgeschehens in einem Einzugsgebiet oder zur Parameterbestimmung, kleinräumige Details übrig, die nicht von der Messung erfasst werden können. “Hierzu zählt z. B. das präferentielle Fließen bei den bodeninneren Abflussprozessen, d. h. der Wasserbewegung in bevorzugten Fließwegen, für dessen Mechanismen eine explizite Beschreibung nur schwer möglich ist.” (Scherer, 2008, S. 28).

4.3 Hydrologische Modellierung

Zur Quantifizierung der Oberflächenabflüsse infolge Starkregen ist eine hydrologische Modellierung erforderlich. Sie kann außerdem als Prognosewerkzeug dienen, in dem Belastungsszenarien für verschiedenen Niederschlagsdauern und Jährlichkeiten simuliert werden.

Für die hydrologische Modellierung wurden Eingangsdaten von der Bezirksregierung Detmold zur Verfügung gestellt. Sie sind in Tabelle 4.3: für die einzelnen Projektgebiete aufgeführt.

Tabelle 4.3: Übersicht der Eingangsdaten für die Projektbearbeitung

	Ahden	Delbrück	Henglarn
Rasterkarten	TK25, DGK5	TK25, DGK5	TK25, DGK5
Digitales Landschaftsmodell (DLM)	ATKIS Shape-Datei	ATKIS Shape-Datei	ATKIS Shape-Datei
Digitales Geländemodell (DGM)	DGM2 Rasterdaten des Landes NRW der Blattschnitte 4317-29 u. 4317-30 Laserscanner-Befliegung der Alme	DGM5 Rasterdaten des Landes NRW Laserscanner-Befliegung in 2004 und 2006 für die Ortslagen Anreppen, Boke sowie Ringboke Bereich der Lippe.	DGM5 Rasterdaten des Landes NRW der Blattschnitte 4418-04 u. 4418-05
Geologische Karte	GK50 Shape-Datei	GK50 Shape-Datei	GK50 Shape-Datei
Bodenkarte	BK50 Shape-Datei	BK50 Shape-Datei	BK50 Shape-Datei
Niederschlagsdaten	Büren (Ganglinie)	Boke (Ganglinie) Delbrück-KA (nur Summe)	Ebbinghausen (Ganglinie)

Die Fragestellung und die Datenlage sind die entscheidenden Faktoren, an denen sich die Wahl eines geeigneten Modells orientieren sollte. Die Güte der Modellergebnisse ist unter anderem abhängig von der Komplexität der Modellstruktur, der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie den Unsicherheiten der Eingangsdaten. In Kapitel 4.3.2.1 werden die Kriterien, die der Wahl eines geeigneten Modells zugrunde gelegt wurden, beschrieben.

Die einzelnen Schritte, die für den Aufbau des Modellsystems erforderlich waren, umfassten die Generierung eines synthetischen Gewässernetzes, die Erstellung von Teilflächen anhand eines GIS, aus denen die Modellelemente abgeleitet wurden, die Parametrisierung der Modellelemente und die Simulation mit meteorologischen Eingangsdaten. Sie werden im Folgenden detailliert vorgestellt.

4.3.1 Ermittlung der Fließwege aus digitalen Geländedaten

Digitale Geländemodelle (DGM) beschreiben die räumliche Verteilung von Geländehöhen über einer Vergleichsebene. Die Geländehöhe bestimmt die potentielle Energie des gefallenen Niederschlags und ist daher die wichtigste Einflussgröße für den Abflussprozess (Fürst, 2004). DGM gehören somit zu den wichtigsten Grundlagen für hydrologische Modelle und sind insbesondere für verteilte Abflussmodelle unbedingt erforderlich (Fürst, 2004). Mit Hilfe eines geographischen Informationssystems können aus DGM zahlreiche Kenngrößen und abgeleitete Karten erstellt werden, wie z. B. Fließrichtungen, Abflussakkumulation oder synthetische Gewässernetze, die als Eingangsgröße für hydrologische Modelle dienen. Synthetische Gewässernetze können anhand von berechneten bevorzugten Fließwegen das aus thematischen Karten abgreifbare Gewässernetz ergänzen oder für einzelne Aufgabenstellungen auch ersetzen.

4.3.1.1 Synthetisches Gewässernetz

Die synthetischen Gewässernetze der drei Untersuchungsgebiete wurde in ArcGIS anhand eines 10 × 10 m DGM auf Rasterbasis generiert. Hierzu stehen die Funktionen des “Hydrology Tools” (GIS-HT) zur Verfügung (vgl. Schäuble, 2003). Die einzelnen Arbeitsschritte umfassen:

Erstellung eines senkenfreien DGMS

Zunächst müssen Flächen ohne Abflussrichtung im DGM mit der GIS-HT-Funktion “Sink” identifiziert werden. Hierzu wird eine Rasterkarte der Fließrichtungen, wie im folgenden Schritt beschrieben, erstellt. Mit der GIS-HT-Funktion “Fill” werden die Senken für die Ableitung von durchgängigen Fließwegen gefüllt. Aus dem senkenfreien DGM kann dann wiederum die Fließrichtung jeder Rasterzelle ermittelt werden.

Ermittlung der Fließrichtung jeder Rasterzelle

ArcGIS verwendet das Fließrichtungskonzept D8. Die Fließrichtung wird für jede Rasterzelle anhand der Richtung des steilsten Gefälles zu einer der acht Nachbarzellen ermittelt. Das Ergebnis ist eine Rasterkarte, deren Zellen einen der Werte 1 bis 8 (bzw. als 2^i , $i = 0 \dots 7$, kodiert, also mit den Werten 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128) annehmen und damit die Nachbarzelle angeben, in die sie zur Gänze entwässern (Fürst, 2004). Der Algorithmus zur Ermittlung der Fließrichtung wird mit Hilfe der GIS-HT-Programmfunktion “Flow Direction” bereit gestellt.

Erstellen einer Rasterkarte des akkumulierten Abflusses

Die GIS-HT-Programmfunktion “Flow Accumulation” ermöglicht das Erstellen einer Karte des akkumulierten Abflusses, die für jede Zelle die Anzahl der Zellen, die dorthin entwässern (= Einzugsgebiet dieser Zelle, “Upslope Drainage Area”) enthält. Die Zelle am Gebietsauslass enthält damit die Fläche des gesamten Einzugsgebiets. Lokale Maxima oder Höhenrücken sind Quellelemente und erhalten den Wert 1. Zusammenhängende Zellen oberhalb eines Schwellenwerts ergeben ein miteinander verknüpftes Entwässerungsnetz. Für diesen Schwellenwert wurde ein Wert von 500 Rasterzellen gewählt, was einer Teileinzugsgebietsmindestgröße von 0,05 km² entspricht. Bei einer Größe des

Gesamteinzugsgebiets von ca. 3 km² entspricht das ungefähr dem von Djokic und Ye (1999) empfohlenen Schwellenwert von 1/500 der Gesamteinzugsgebietsgröße. Eine Erhöhung des Schwellenwerts führt zu einem weniger dichten Gewässernetz und weniger Teileinzugsgebieten, während bei der Reduzierung des Schwellenwertes ein dichteres Gewässernetz und mehr Teileinzugsgebiete erzeugt werden (Djokic und Ye, 1999). Da das Gewässernetz als Grundlage für die in der Modellanwendung benötigten "Kanalelemente" dient (Kapitel 4.3.2.3), hat die Dichte des Gewässernetzes und somit die Wahl des Schwellenwertes entscheidenden Einfluss auf die gesamte Modellstruktur.

Die Gewässernetzraster wurden in einem weiteren Schritt mit Hilfe der GIS-HT- Funktion "Stream to Feature" für die weitere Verarbeitung im hydrologischen Modell in Linien-Shapefiles konvertiert.

1. Untersuchungsgebiet Ahden

Das synthetische Gewässernetz des Gebietes Ahden (Abbildung 4.16) hat zwei Hauptfließwege auf den Hangflächen oberhalb der Haselnußstraße und westlich der Flughafenstraße. Anhand der Aussagen der Anwohner und der Videoaufnahmen lassen sich die Fließwege des synthetischen Gewässernetzes verifizieren. Der Punkt, an dem der Oberflächenabfluss auf die Haselnußstraße trifft, konnte durch die Aussage des Bewohners des Hauses mit der Nr. 2 in der Abbildung 4.5 bestätigt werden. Wie in Kapitel 4.2.1 erwähnt, folgte der Oberflächenabfluss bei dem Starkregenereignis nicht dem Graben. Diese Beobachtung wird auch durch den Verlauf des synthetischen Gewässernetzes bestätigt, der ebenfalls nicht entlang des Grabens führt.

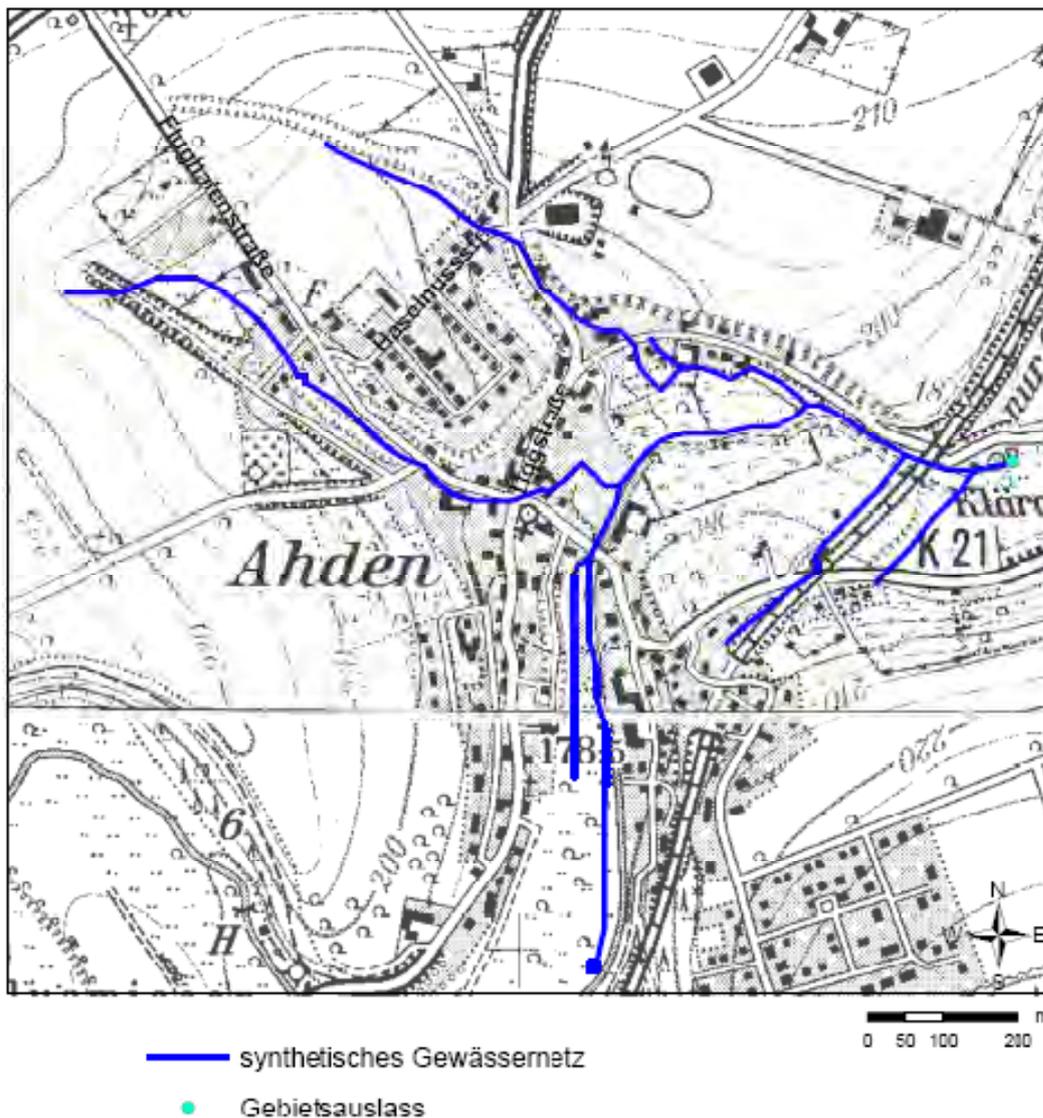


Abbildung 4.16: Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Ahden.

2. Untersuchungsgebiet Henglar

Das für Henglar generierte synthetische Gewässernetz (Abbildung 4.17) zeigt zwei Schwerpunkte der Abflusskonzentration auf den Ackerflächen oberhalb des Ortes. Der Großteil des Oberflächenabflusses folgt im Wesentlichen dem Verlauf des Siebentals und trifft am südlichen Rand des Siedlungsgebiets auf den Siebentalweg, dessen Verlauf er bis zur Mündung in die Altenau folgt. Ein anderer Teil fließt über die Grünlandflächen oberhalb des Amselweges ab und durchquert die bebauten Bereiche des Amselweges und der Andreasstraße. Das generierte synthetische Gewässernetz stimmt weitestgehend mit den tatsächlich beobachteten Fließwegen überein.

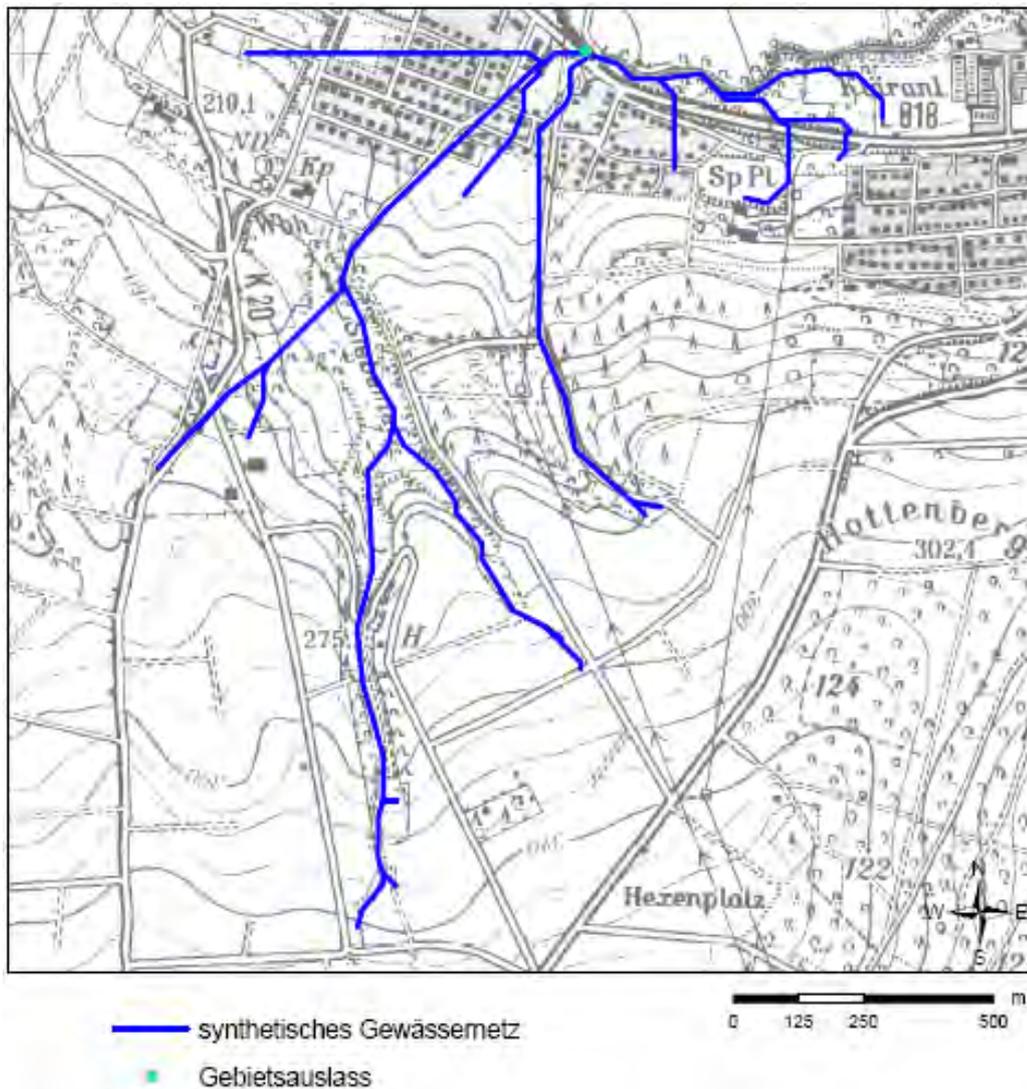
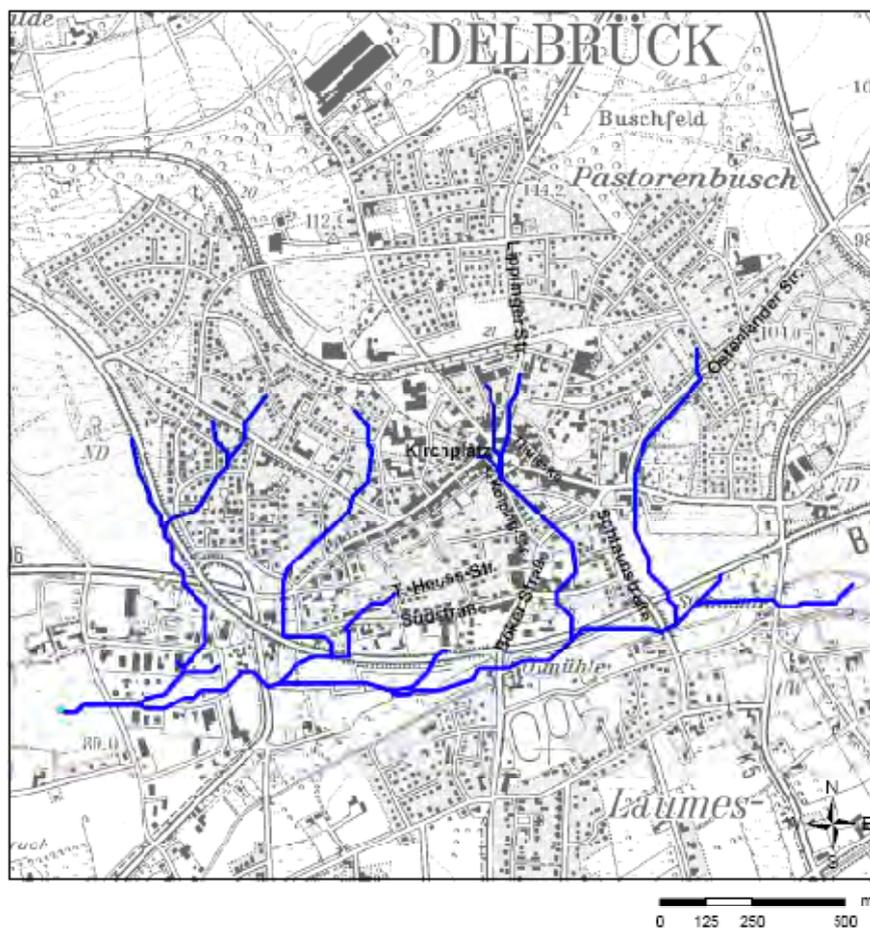


Abbildung 4.17: Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Henglar.

Der direkt in West-Ost-Richtung verlaufende Fließweg im Nordwesten des Kartenausschnitts wurde als Folge des Modellrandes berechnet. Dieser Fließweg ist durch die fehlenden Daten nördlich des Blattsschnitts bedingt und belegt, dass im Randbereich der Daten Fehlinterpretationen der Ergebnisse möglich sind.

3. Untersuchungsgebiet Delbrück

Das synthetische Gewässernetz für das Stadtgebiet von Delbrück (Abbildung 4.18) zeigt Abweichungen von den Aussagen der Bevölkerung von Delbrück. Die befragten Anwohner und die Feuerwehr in Delbrück gaben an, dass die Oberflächenabflüsse überwiegend den Straßenverläufen folgten. Abweichungen der Abflusswege des synthetischen Gewässernetzes von den Straßenverläufen fallen vor allem bei der Adolf-Kolping Straße/Boker Straße und der Schlaunstraße auf. In beiden Fällen zeichnen die synthetischen Fließwege die jeweils oberhalb verlaufenden Straßen (Liplinger Straße bzw. Ostenländer Straße) nach. Ändert sich jedoch die Richtung der Straße, folgen die Fließwege nicht mehr dem Straßenverlauf. Dieses widerspricht auf den ersten Blick den Aussagen der Anwohner und der Feuerwehr. Allerdings ist es denkbar, dass zumindest Teile des Abflusses eher dem Straßenverlauf folgen als dem größten Gefälle, da dort die Bordsteinkante den Abflussverlauf maßgeblich beeinflussen kann. Der Kirchplatz bildet auch beim synthetischen Gewässernetz einen Konvergenzbereich mehrerer Gewässerabschnitte. Im südlichen Stadtbereich zeichnet das synthetische Gewässernetz im Wesentlichen den Verlauf des Haustenbaches nach. Strukturen wie Bordsteinkanten werden im 10 x 10 Meter DGM nicht erfasst und werden somit auch bei der Generierung des synthetischen Gewässernetzes nicht berücksichtigt. Die Unterschiede zwischen den beobachteten Fließwegen und den synthetischen Fließwegen sind also mutmaßlich auf diesen Sachverhalt zurückzuführen.



- synthetisches Gewässernetz
- Gebietsauslass

Abbildung 4.18: Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Delbrück.

Wie oben beschrieben, wurde das synthetische Gewässernetz mit Hilfe des D8-Algorithmus generiert. Die Auflösung des DGM spielt dabei die entscheidende Rolle für den Verlauf der Fließwege. Nach Fürst (2004) kann vor allem eine zu grobe Auflösung ein DGM völlig ungeeignet für die Beschreibung der Abflussverhältnisse machen. Mitunter kann eine geringfügige Höhenänderung an einer sensiblen Stelle die Linienführung eines Fließweges gravierend ändern. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde der Einfluss der Auflösung des DGM auf die Modellergebnisse betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Unterschiede in den Ergebnissen der Modellierung mit KINEROS2 bei der Verwendung eines DGM mit der Auflösung 5×5 m im Vergleich zu der Verwendung eines DGM mit einer Auflösung von 10×10 m nur geringfügig sind. Detailliertere Informationen zu diesen Voruntersuchungen sind bereits im Zwischenbericht zu diesem Projekt gegeben worden und sollen an dieser Stelle nicht wiederholt werden.

Neben dem D8-Algorithmus existieren verschiedene andere Verfahren zur Ermittlung von Fließrichtungen, die z. B. von Tarboton (1997) und Erskine et al. (2006) diskutiert werden. Eine der Alternativen ist der sogenannte D^∞ -Algorithmus, bei dem die Strömungsrichtung als kontinuierlicher Winkel kodiert wird. Der Abfluss von einer Zelle des DGM kann so in zwei angrenzende Zellen aufgeteilt. Diese Aufteilung erfolgte proportional zu der Aufteilung des Winkels, entsprechend des maximalen Gefälles (Tarboton, 1997). Im Vergleich zu anderen kontinuierlichen Methoden werden hierdurch Dispersionsprobleme reduziert (Meng et al., 2008). Endreny und Wood (2003) vergleichen die Übereinstimmung zwischen beobachteten und anhand verschiedener Methoden generierten Gewässernetze und misst dem D^∞ -Algorithmus die beste Anpassung bei.

Der im Rahmen von Voruntersuchungen für das Untersuchungsgebiet Ahden durchgeführte Vergleich zwischen dem mit Hilfe des D8-Algorithmus und dem mit Hilfe des D^∞ -Algorithmus generierten Gewässernetzes zeigte relativ große Unterschiede im Verlauf der Fließwege. Es konnte allerdings festgestellt werden, dass in den untersuchten Gebieten die anhand des D8-Algorithmus ermittelten Fließwege eine bessere Übereinstimmung mit den bei dem Ereignis im August 2007 beobachteten Fließwegen erzielten.

4.3.2 Simulation des Starkregenereignisses im August 2007

Zur Simulation des Starkregenereignisses musste zunächst ein geeignetes Modell ausgewählt werden, welches im folgenden Kapitel erläutert wird. Es folgt die Beschreibung der Modellansätze und die Darstellung der Arbeitsschritte, die für den Aufbau des Modellsystems und die Durchführung der Modellierung erforderlich waren.

4.3.2.1 Wahl eines geeigneten hydrologischen Modells

Die Aussagekraft hydrologischer Modellierungsergebnisse hängt vor allem von der Güte der verwendeten Daten sowie von einer an die Fragestellung angepassten Repräsentation der beteiligten hydrologischen Prozesse ab (Fritsch, 2001). Wichtige Kriterien für die Auswahl eines Modells sind:

- der Zweck der Modellanwendung (z. B. Hochwasservorhersage, Prognose der Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf die Abflussbildung bei Hochwasser).
- die Größe des betrachteten Gebiets (z. B. Hangparzelle, meso- oder makroskaliges Einzugsgebiet).

- der Zeitraum, der für die Fragestellung relevant ist (z. B. Wasserhaushaltsjahr, Hochwasserereignis).
- die hydrologischen Prozesse, die für die zu lösende Problemstellung von Bedeutung sind (z. B. Verdunstung, Makroporenfluss, Schneeschmelze)
- das Datenmaterial, das für die Modellierung zur Verfügung steht, sowie
- ein der Fragestellung angemessener Arbeitsaufwand.

Für die Untersuchung der Pilotgebiete wurde das hydrologische Modell KINEROS2 gewählt. Es handelt sich um ein räumlich verteiltes, physikalisch basiertes Ereignismodell, das die Prozesse der Interzeption, der dynamischen Infiltration, des Oberflächenabflusses und der Erosion in Einzugsgebieten, die durch vorherrschenden Oberflächenabfluss charakterisiert sind, beschreibt.

Der Fokus des Projektes liegt auf der Bestimmung des Oberflächenabflusses. Da die Beschaffenheit der Erdoberfläche bei der Entstehung von Oberflächenabfluss eine entscheidende Rolle spielt, sollte das Modell auf die spezifische Topographie des Einzugsgebiets zugeschnitten sein (Bronstert, 1999). Dies ist beim Modell KINEROS2 der Fall, da die räumliche Diskretisierung mit Hangelementen als kleinster Einheit erfolgt. Bei dem Untersuchungsgebiet Henglarn handelt es sich um ein teils landwirtschaftlich und teils städtisch geprägtes Einzugsgebiet. Die Oberflächenabflüsse wurden auf den Ackerflächen gebildet und flossen in Richtung der Siedlungsbereiche, wo sie auf versiegelte Flächen trafen. Da die Hangelemente in KINEROS2 einzeln parametrisiert werden, ist es möglich, den Oberflächenabfluss flächendetailliert zu modellieren, womit der Variabilität in den Oberflächeneigenschaften (Infiltrationsfähigkeit, Vegetationsbedeckung, Rauzigkeit etc.) der Flächen Rechnung getragen werden kann. Aufgrund der Schlüsselstellung der oberen Bodenzone bei der Aufteilung des Niederschlags in Oberflächenabfluss bzw. oberirdische Speicherung und unterirdischen Abfluss (längerfristig gespeicherter Anteil) ist die Güte der Simulation der Abflussbildung bei Hochwasser eng an eine geeignete Repräsentation der Bodenoberfläche sowie der ungesättigten Zone im Modell geknüpft (Fritsch, 2001). In KINEROS2 wird die Infiltration durch das Parlange 3-Parameter Modell beschrieben. Dieser Infiltrationsansatz zeichnet sich nach Semmens et al. (2005) durch seine Robustheit bei starken Schwankungen der Niederschlagsintensität und des Bodenwassergehalts aus. Für das Starkregenereignis, das modelliert werden sollte, standen Niederschlagsdaten in Minuten-Auflösung zur Verfügung. Das Modell sollte daher eine zeitliche Diskretisierung in Minutenschritten ermöglichen. Dieses Kriterium wird von KINEROS2 erfüllt. Da allerdings die Anzahl der Rechenschritte in KINEROS2 begrenzt ist, mussten die Niederschlagsdaten für einen längeren Simulationszeitraum teilweise in zwei-Minuten-Intervallen zusammengefasst werden (s. Kapitel 4.3.2.4).

Die mathematische Beschreibung der hydrologischen Prozesse, die KINEROS2 zugrunde liegen, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

KINEROS2

Das Modell KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion Model) wurde ursprünglich in den 1960er Jahren im U.S. Department of Agriculture (USDA) entwickelt (Woolhiser et al., 1990). Anwendungsbeispiele geben Al-Qurashi (2008) und Yatheendradas et al. (2008). Das Einzugsgebiet wird als eine Kaskade aus Hangelementen und Gewässerabschnitten dargestellt. Die Abflusstransformation erfolgt über die Lösung der eindimensionalen kinematischen Wellengleichung mithilfe der Finiten Differenzen Methode. Die kinematische Wellengleichung ist eine Vereinfachung der Saint-Venant Gleichung und eignet sich für die meisten Bedingungen des Oberflächenabflusses (Gerits et al., 1990). Unter der Annahme, dass das Reibungsgefälle (S_f) gleich dem Oberflächengefälle (S_0) ist, kann der Abfluss q an jedem Punkt und zu jeder Zeit als eine Funktion der hydraulischen Höhe h wie folgt beschreiben werden (vgl. Abbildung 4.19):

$$q = vh = \alpha h^m \quad (4.7)$$

mit

- q = spezifischer Abfluss [$L^2 T^{-1}$]
- v = Fließgeschwindigkeit [$L T^{-1}$]
- h = mittlere Wassertiefe auf einem Hangelement [L]
- m = Parameter für den Fließzustand [-]
- α = hydraulischer Koeffizient [$L^{1/3} T^{-1}$].

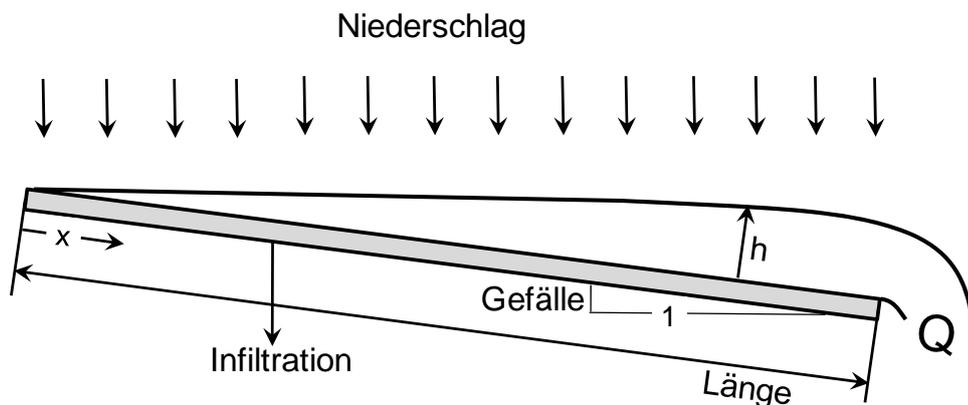


Abbildung 4.19: Definitionsskizze für den Oberflächenabfluss (nach Woolhiser et al. 1990)

Durch Einsetzen von Gleichung 4.10 in die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.6) erhält man die Differentialgleichung der kinematischen Welle (Fürst, 2004):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (4.8)$$

mit

- t = Zeit [T]
- x = Distanz entlang der Falllinie [L]
- $q(x, t)$ = Zufluss über den Rand [$L T^{-1}$].

Zur numerischen Lösung der Gleichung 4.8 muss die Randbedingung für die hydraulische Höhe festgelegt werden. Handelt es sich um ein Modellelement ohne Zufluss von oberhalb, ist die obere Randbedingung:

$$h(0, t) = 0 \quad (4.9)$$

Wenn ein Element in ein anderes entwässert, ist dessen obere Randbedingung:

$$h(0, t) = \left[\frac{\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{\alpha W} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (4.10)$$

worin die Parameter mit dem Index u die Eigenschaften der benachbarten, stromaufwärts liegenden Elemente beschreiben. W ist die Breite und L ist die Länge des oberen Elementes. Durch diese Bedingung wird ein Fließgleichgewicht zwischen den benachbarten Elementen festgelegt (Woolhiser et al., 1990).

Räumliche Gliederung in KINEROS2

Hangelemente

Hangelemente werden in KINEROS2 als ebene, rechteckige Teilflächen mit einheitlichen Parametern abstrahiert. Bei uneinheitlicher Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Hangneigung oder Leitfähigkeit) können mehrere Teilflächen mit unterschiedlichen Parametereingaben generiert werden, die kaskadenförmig angeordnet werden.

Kanalelemente

Einzelne Kanalelemente werden anhand trapezförmiger Querschnitte am jeweiligen Anfangs- bzw. Endpunkt des Gewässerabschnitts definiert. Geometrische und hydrologische Parameter können einheitlich sein, oder linear entlang des Elements variieren (Semmens et al., 2005).

Teilprozesse des Modells

Niederschlag

Die Niederschlagshöhen werden mit den dazugehörigen Zeitschritten als Datenpaare eingegeben. Dies geschieht entweder in Form von Niederschlagssummen (Summe seit Startzeitpunkt) oder Niederschlagsraten (Summe über ein Rechenintervall). Der Niederschlag wird für das jeweilige Element als räumlich gleich verteilt angenommen. Wenn Daten mehrerer Niederschlagsmessstationen zur Verfügung stehen, werden den Elementen die am nächsten gelegenen Niederschlagsstationen zugeordnet und die Niederschlagshöhen interpoliert.

Interzeption

Die Interzeption wird anhand von zwei Parametereingaben berücksichtigt: Zum einen muss der Vegetationsbedeckungsgrad des jeweiligen Hangelements eingegeben werden, zum anderen muss die Interzeptionshöhe abgeschätzt werden, was z. B. mit Hilfe der Hoyningen-Huene Formel (Gl. 2.4) erfolgen kann. Die den Boden erreichende Niederschlagshöhe wird bei der Modellierung solange um den Bedeckungsgrad reduziert (z. B. ergibt ein Bedeckungsgrad von 0.50 eine Reduktion von 50 %), bis die zurückgehaltene Wassermenge die maximale Interzeptionshöhe erreicht hat.

Infiltration

In KINEROS2 wird die Infiltration anhand des Parlange 3-Parameter Modells bestimmt. In diesem sind die Ansätze von Green und Ampt (1911) und Smith und Parlange (1978) berücksichtigt. Bei beiden Ansätzen handelt es sich um Vereinfachungen der Richards-Gleichung (Zuidema, 1985):

$$\vec{\nabla} \left(-\vec{K}(\theta) \nabla (\psi_m + \psi_h) \right) = C(\psi_m) \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.11)$$

mit $\vec{\nabla}$ = Nabla-Operator (Differential-Operator für den 3D-Raum) [-]

\vec{K} = Vektor der ungesättigten Leitfähigkeit [L]

θ = Wassergehalt [$L^3 L^{-3}$]

ψ_m = Matrixpotential [L]

ψ_h = Gravitationspotential [L]

C = Speicherkoeffizient (spezifische Feuchtekapazität) [-].

Dem Ansatz von Green und Ampt wird der eindimensionale Fall der Richards-Gleichung zugrunde gelegt, wobei statt des Speicherkoeffizienten die kumulierte Infiltrationsmenge zum aktuellen Zeitschritt als Parameter einfließt. Die Gleichung von Smith und Parlange hingegen verwendet statt der ungesättigten die gesättigte Leitfähigkeit, die in einen funktionalen Zusammenhang mit dem Wassergehalt gesetzt wird. Die meisten Böden weisen ein Infiltrationsverhalten auf, das eine Mittelstellung zwischen den beiden Modellen einnimmt. Aus diesem Grund verwendet KINEROS2 das Parlange 3-Parameter Modell (Semmens et al., 2005):

$$i = K_s \left[1 + \frac{\gamma}{\left(e^{\left(\frac{\gamma I}{G \Delta \theta_i} \right)} - 1 \right)} \right] \quad (4.12)$$

mit i = Infiltrationsrate bei unbegrenzter Wasserzufuhr von der Oberfläche [$L T^{-1}$]

K_s = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [$L T^{-1}$]

γ = Formparameter [-]

θ_i = Sättigungsdefizit des Bodens [$L^3 L^{-3}$]

I = kumulative Infiltration [L^3]

G = kapillarer Aufstieg [L].

Für den Formparameter γ wird in KINEROS2 ein Wert von 0,85 angenommen. Die Zeit fließt in diesem Modell nicht als unabhängige Variable ein, wird jedoch durch die kumulative Infiltrationsmenge I ersetzt, die abhängig vom betrachteten Zeitpunkt unterschiedlich groß ist. Der Vorteil dieses Modells ist, dass die Prozesse der Infiltration bei konstanter Wasserzufuhr (Überstau durch unbegrenzten Niederschlag) und die abnehmende Infiltrationsrate bei nachlassendem Niederschlag nicht separat beschrieben werden müssen (Semmens et al., 2005).

Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss wird durch die kinematische Wellengleichung (Gleichung 4.11) berechnet. Dabei wird zwischen Horton'schem Oberflächenabfluss und Sättigungsflächenabfluss (s. Kapitel 2.2) unterschieden. Im ersten Fall überschreitet die Niederschlagsintensität die Infiltrationsfähigkeit (f_c) des Bodens. Im zweiten Fall (bei Angabe von zwei unterschiedlichen Bodenhorizonten)

verhindert eine Stauschicht oder Sättigung im Untergrund die weitere Infiltration. Oberflächenabfluss tritt dann auf, wenn das Porenvolumen des Bodens vollständig mit Wasser gefüllt ist. Die hydraulischen Koeffizienten (in Gleichung 4.11) α , der den Effekt der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ausdrückt und m , der das Abflussregime charakterisiert (laminar, turbulent) sind abhängig vom Fließzustand. Bei turbulentem Abfluss wird das hydraulische Widerstandsgesetz nach Manning-Strickler angewendet:

$$v = \frac{S^{\frac{1}{2}} h^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (4.13)$$

mit v = Fließgeschwindigkeit [$L T^{-1}$]
 S = Gefälle [$L L^{-1}$]
 h = hydraulischer Radius [L]
 n = Rauigkeitskoeffizient nach Manning [$T L^{-1/3}$].

Durch Kombination mit Gleichung 4.10 erhält man:

$$\alpha = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \text{ und } m = \frac{5}{3} \quad (4.14)$$

Alternativ kann das Gesetz von Chezy angewendet werden, die Parameter α und m sind dann:

$$\alpha = C S^{\frac{1}{2}} \text{ und } m = \frac{3}{2} \quad (4.15)$$

mit C = Rauigkeitskoeffizient nach Chezy [$L^{1/3} T^{-1}$].

In diesem Fall gilt das Gesetz für alle Wertebereiche der Reynoldszahl. Für die Eingabe in das Modell ist es nicht notwendig, die kritische Reynoldszahl zu spezifizieren. Stattdessen muss entweder der Rauigkeitskoeffizient nach Manning-Strickler oder Chezy für jedes Element angegeben werden. Daraus wird im Modell die kritische Reynoldszahl definiert, woraufhin das hydraulische Widerstandsgesetz für den entsprechenden Zeitschritt angepasst wird (Woolhiser et al., 1990).

Abfluss im Gerinne

Instationärer Fluss im offenen Gerinne wird ebenfalls durch eine Näherung der instationären, nichtlinearen Strömungsgleichungen durch die kinematische Wellengleichung simuliert (Semens et al., 2005). Die einzelnen Gewässerelemente können räumlich gleichverteilten aber zeitlich schwankenden lateralen Zufluss von den Hangelementen auf einer oder beiden Gerinneseiten oder von einem oder zwei oberstrom angrenzenden Gewässerelementen erhalten. Der Niederschlag, der direkt in das Gerinne fällt, wird nicht berücksichtigt.

Erosion und Sedimentation

Optional kann mit KINEROS2 die Bewegung von erodiertem Material mit dem Oberflächenwasser simuliert werden. Dabei wird zwischen Erosion, die durch Regentropfen verursacht wird (splash erosion), und Erosion durch fließendes Wasser (hydraulic erosion) unterschieden. Bei dieser Untersuchung wurde auf die Betrachtung der Erosion und Sedimentation verzichtet.

4.3.2.2 Aufbau des Modellsystems

Die Modellsysteme für die hydrologische Modellierung wurden für die ländlichen Projektgebiete Ahden und Henglarn auf andere Weise aufgebaut als für das städtische Gebiet Delbrück. Die Vorgehensweise wird im Folgenden erläutert.

1. Projektgebiete Ahden und Henglarn

Erstellung der Teileinzugsgebiete

Um die Teileinzugsgebiete zu generieren, musste zunächst ein Punkt-Shapefile der Gebietsauslässe erstellt werden. Diese befinden sich an den Zusammenflüssen der einzelnen Gewässerabschnitte (Knoten) des synthetischen Gewässernetzes. Der Gebietsauslass des Gesamteinzugsgebiets wurde so gewählt, dass bis zu diesem Punkt alle Zellen, die für die Entstehung von Oberflächenabfluss relevanten Flächen, entwässert haben. Mit der GIS-HT-Funktion "Watershed" wurden nun die Teileinzugsgebiete als Rasterkarte erstellt. Mit der "Raster to Feature"-Funktion wurde das Raster in ein Polygon-Shapefile für den weiteren Modellaufbau umgewandelt.

Erstellung der Hangelemente

Für die Eingabe in KINEROS2 wurden homogene Flächen mittels folgender Parameter bestimmt:

- Gefälle [%]
- Vegetationsbedeckungsgrad [%]
- Interzeptionshöhe [mm]
- Rauigkeitskoeffizient nach Manning-Strickler [-]
- Porenvolumen [%]
- Anfangswassergehalt des Bodens [%]
- gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s [mm h⁻¹]

Gefälle

Die Untersuchungsgebiete wurden zunächst in Flächen gleichen mittleren Gefälles unterteilt. Hierzu stand die Funktion "Slope" des "Spatial Analyst" in ArcGIS zur Verfügung, mit der für jede Zelle des DGM die maximale Änderungsrate ihres Wertes zu einer ihrer acht Nachbarzellen berechnet wird ("AverageMaximum Technique"). Es wurden vier Hangneigungsklassen mit Hilfe der Klassifizierungsmethode "Natural Breaks" definiert (Tabelle 4.4). Das auf diese Weise generierte Raster wurde in ein Polygon-Shapefile transformiert.

Tabelle 4.4: Mittleres Gefälle der in ArcGIS generierten Hangneigungsklassen.

Hangneigungsklasse	mittleres Gefälle [%]	
	Henglarn	Ahden
1	0-9	0-7
2	9-17	7-20
3	17-30	20-40
4	30-64	40-117

Verschneidung der Flächen

Die erstellten Shapefiles der Teileinzugsgebiete, Hangneigungsklassen, Bodenarten und Landnutzung wurden zu einem Polygon-Shapefile verschritten. Die bei der Verschneidung entstandenen Teilflächen wurden in einem weiteren Bearbeitungsschritt generalisiert (d. h. kleine Teilflächen wurden zusammengelegt). Die Größe dieser Flächen wurde mit Hilfe der Flächenberechnungsfunktion von ArcGIS ermittelt. Die Abbildung 4.20 und die Abbildung 4.22 zeigen das generierte Gewässernetz, die Teileinzugsgebiete und die Flächen unterschiedlicher Landnutzung sowie die verschrittenen Teilflächen, die als Hangelemente in die für KINEROS2 erstellte Parameterdatei übertragen wurden. Die Anordnung der Systemelemente zur Beschreibung des Untersuchungsgebiete Henglarn und Ahden in KINEROS2 sind in Abbildung 4.21 und Abbildung 4.23 dargestellt.

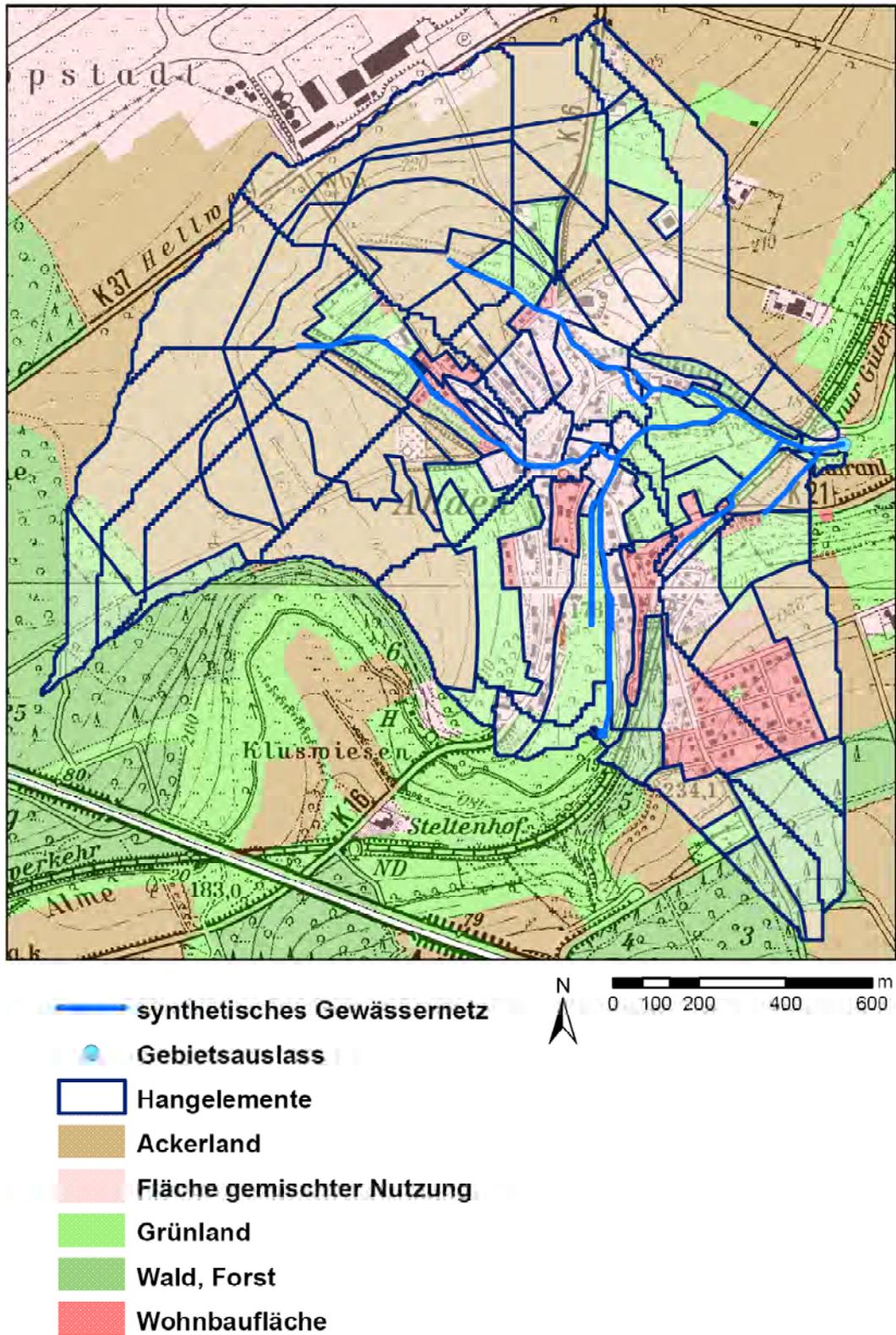


Abbildung 4.20: Synthetisches Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Landnutzung und verschnittene Teilflächen des Untersuchungsgebiets Ahden

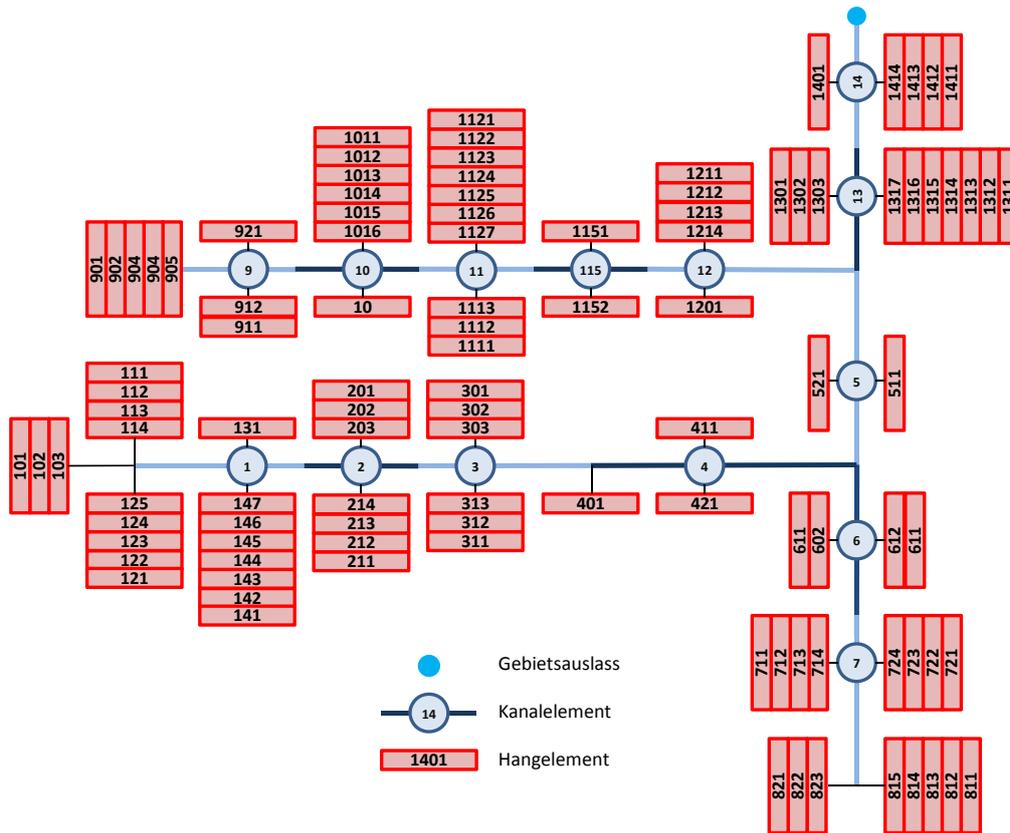


Abbildung 4.21: Anordnung der Systemelemente zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets Ahden in KINEROS2.

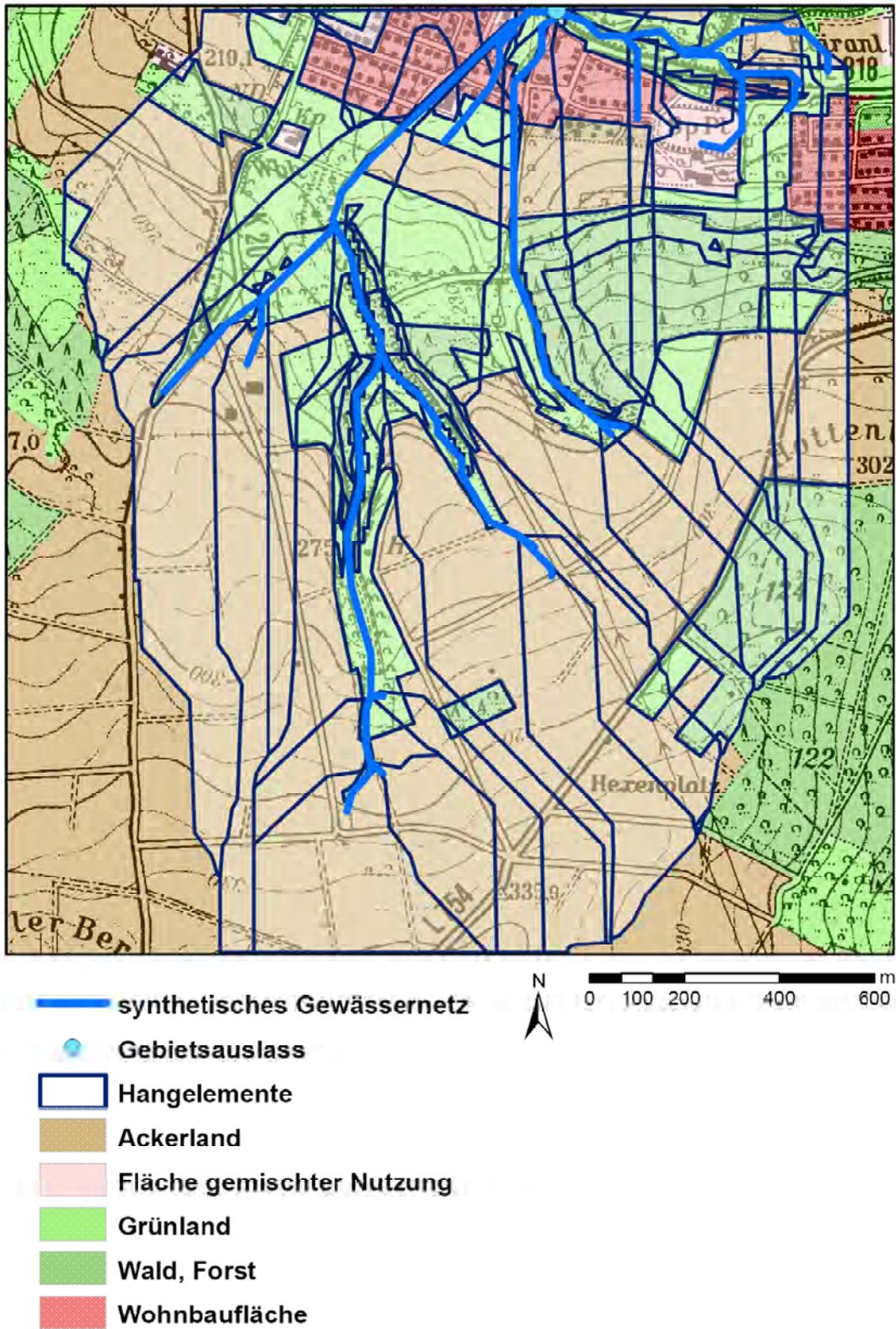


Abbildung 4.22: Synthetisches Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Landnutzung und verschnittene Teilflächen des Untersuchungsgebiets Henglar.

dem Geländegefälle folgt, erweisen sich als bevorzugte Fließwege.

- *Kanalnetz zur Siedlungsentwässerung:* Die künstlichen Entwässerungsstrukturen in urbanen Gebieten leiten das von Dach- und Straßenflächen aufgefangene Niederschlagswasser ab. Üblicherweise werden diese Kanalnetze auf geringe Jährlichkeiten bis etwa 5 Jahre bemessen¹. Ihre Überlastung hat Oberflächenabfluss über Straßen zur Folge. Durch Überstau kann Wasser aus Kanaldeckeln austreten, wie es auch in Delbrück beobachtet wurde. Man unterscheidet Misch- und Trennsysteme. Während die Mischkanalisation sowohl Schmutz- als auch Regenwasser der Kläranalage zuleiten, werden bei einem Trennsystem getrennte Kanäle für Regen- und Schmutzwasser vorgesehen. Im Falle der Mischkanalisation werden zur Entlastung der Kläranalage Regenüberlaufbecken (RÜB) zur Speicherung von Mischwasser bei Starkregen und Regenüberläufe (RÜ) zur Entlastung von Mischwasser in den Vorfluter vorgesehen. In besonders ungünstigen Fällen kann es zum Rückstau des Mischwassers über die Hausanschlüsse kommen.

In der vorliegenden Untersuchung lagen Angaben (Schachtsohlhöhen, Lage und Dimension von Haltungen) zum Kanalnetz in der Stadt Delbrück nicht vor (vorhanden waren nur die Deckelhöhen). Die Beobachtungen während des Ereignisses weisen jedoch auf eine Überlastung der Kanalisation hin. Es wird daher in der vorliegenden Untersuchung ein Schwerpunkt auf die Beschreibung des Oberflächenabflusses gesetzt. Zur Beschreibung der Abflussbildung wird das Modell KINEROS2 eingesetzt, analog zur Vorgehensweise bei den beiden anderen Gebieten.

Zunächst wurden die Einzugsgebiete anhand des digitalen Geländemodells (DGM5) abgeleitet (Abbildung 4.24). Es wurde davon ausgegangen, dass 25 % der Gesamtfläche undurchlässig ist. Um dies modelltechnisch umzusetzen, ist jedes der vier Teileinzugsgebiete in zwei Teilflächen untergliedert. Jeweils eine Teilfläche berücksichtigt die Infiltration und stellt 75% der Einzugsgebietsfläche dar. Die übrigen 25 % werden durch eine undurchlässige Fläche repräsentiert. Die Flächen werden durch einen Straßenabschnitt als Fließweg entwässert. So setzt sich beispielsweise Einzugsgebiet 1 aus den Flächen 11 (durchlässig) und 12 (undurchlässig) zusammen und wird über das Kanalelement 101 entwässert (vergl. Abbildung 4.25).

¹ Nach Merkblatt ATV-A 118 („Hydraulische Berechnung von Entwässerungssystemen“): 2 Jahre für ländliche Gebiete, 3 Jahre für Wohngebiete, ≥ 5 Jahre für Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete und ≥ 10 Jahre für unterirdische Verkehrsanlagen / Unterführungen (Schneider, 2008)

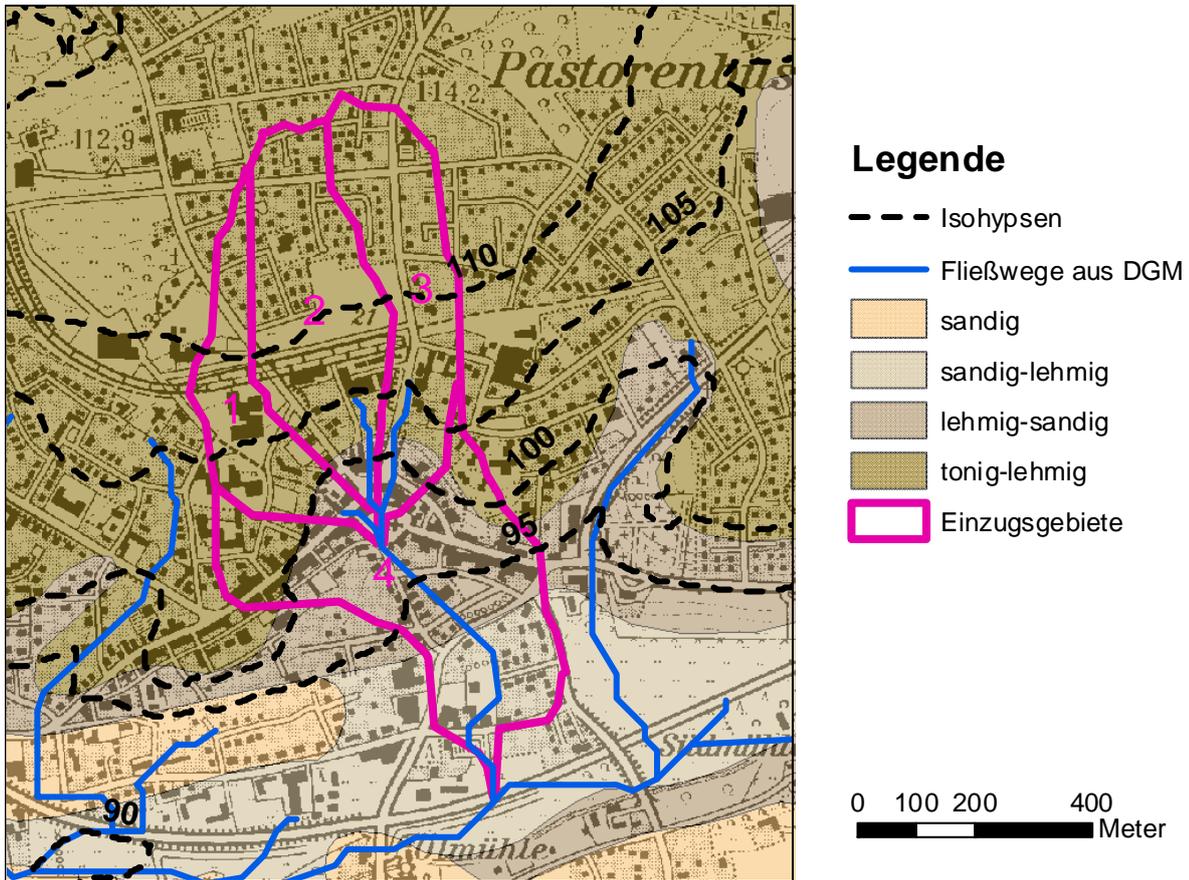


Abbildung 4.24: Bodenkarte und Einzugsgebiete Delbrück Innenstadt

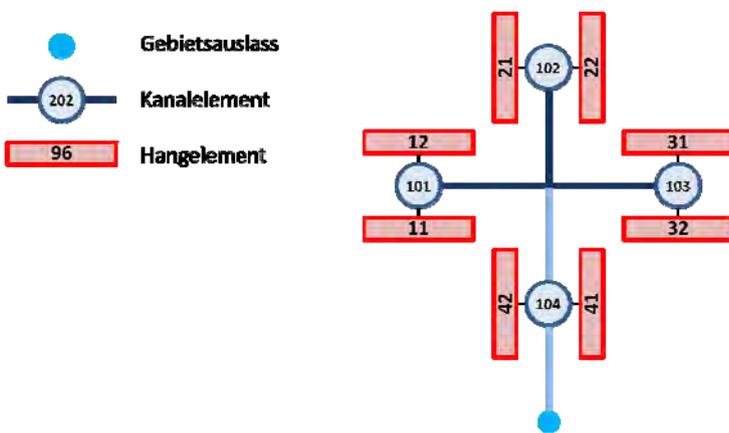


Abbildung 4.25: Systemplan KINEROS2-Modell Delbrück

4.3.2.3 Parametrisierung

Die Parameter der einzelnen Teilflächen wurden blockweise in einen Texteditor übertragen und als Textdatei gespeichert. Der erste Eingabeblock definiert die globalen Parameter, die für alle Elemente gelten. In diesem Fall wurde lediglich die Maßeinheit (METRIC) festgelegt und die charakteristische Länge der Hangelemente (äquivalent zum längsten Hangelement bzw. zur längsten Hangelementkaskade) angegeben. Jedem Modellelement wurde im jeweiligen Eingabeblock zunächst eine Identifizierungsnummer zugeordnet (ID) und die Art des Elements festgelegt (PLANE oder CHANNEL). Die weiteren Eingabeparameter für Hangelemente sind (die verwendeten Abkürzungen sind hervorgehoben):

- **Upstream**: ID eines oberhalb liegenden Hangelements
- **Length**: Länge des Hangelements [m]
- **Area**: Flächengröße des Hangelements [m²]
- **Slope**: mittleres Gefälle des Hangelements [-]
- **Manning**: Rauigkeitskoeffizient nach Manning [-]
- **Interception**: Interzeptionsspeicherhöhe [mm]
- **Canopy**: Vegetationsbedeckungsgrad [-]
- **Saturation**: Anfangswassergehalt als Anteil am Porenvolumen [-]
- **Ksat**: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm h⁻¹]
- **Porosity**: Porosität [-]
- **G**: Kapillarer Aufstieg [mm]

Weitere Eingabeparameter sind möglich, wurden bei dieser Untersuchung jedoch nicht berücksichtigt. Sie können der Modellbeschreibung nach Woolhiser et al. (1990) entnommen werden. **Kanalelementen** können seitlich jeweils zwei Hangelemente zufließen, die kaskadenförmig verbunden sein können. Im Eingabeblock werden diese mit der Bezeichnung „Lateral“ angegeben. Die weiteren Eingabeparameter für Kanalelemente sind:

- **Upstream**: IDs von bis zu zehn oberstrom liegenden Kanalelementen
- **Length**: Länge des Kanalelements [m]
- **Slope**: mittleres Gefälle des Kanalelements [-]
- **Width**: Breite des Gerinnes [m]
- **SS1, SS2**: Neigung der Gerinneufer [%]
- **Manning**: Rauigkeitskoeffizient nach Manning [-]
- **Saturation**: Anfangswassergehalt als Anteil am Porenvolumen [-]
- **Ksat**: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm h⁻¹]
- **Porosity**: Porosität [-]

Die Ermittlung der Gebietsparameter wird im Folgenden erläutert.

1. Vegetationsbedeckungsgrad, Interzeptionshöhen und Rauigkeitskoeffizienten

Aus den ATKIS-Daten lassen sich Flächen gleicher Landnutzung ermitteln. Folgende Landnutzungsarten wurden unterschieden:

- Ackerland
- Grünland
- Wohnbaufläche
- Wald
- Fläche gemischter Nutzung
- Innenstadtbereich Delbrück (pauschal)

Aus der Landnutzung lassen sich Werte für den Vegetationsbedeckungsgrad und den Rauigkeitskoeffizienten nach Manning ableiten (Manning-Beiwert $n = 1/k_{st}$, k_{st} ist der Strickler-Beiwert). Die Werte sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Für die jeweilige Landnutzung wurde außerdem der Blattflächenindex (BFI) abgeschätzt, aus dem mit Hilfe der Formel nach Hoyningen-Huene (Gleichung 2.4) die Interzeptionsspeicherhöhe errechnet wurde. Für die Nutzungsart "Wald" wurde für die Interzeptionsspeicherhöhe ein Durchschnittswert aus Laub- und Nadelwald angenommen. Für die Werte der "Flächen gemischter Nutzung" wurde eine Zusammensetzung der Gesamtfläche aus 70 % Grünland und 30 % Wohnbaufläche angenommen. Die Werte sind ebenfalls in Tabelle 4.5 aufgeführt.

Tabelle 4.5: Parameter für Blattflächenindex aus Fritsch (2001), Interzeptionsspeicherhöhe (berechnet nach Hoyningen-Huene) und Vegetationsbedeckungsgrad sowie Rauigkeitskoeffizient aus Vieux (2004) für die jeweilige Landnutzung der Flächen.

Landnutzung	BFI [m ² /m ²]	Interzeptions- speicherhöhe [mm]	Bedeckungs- grad [%]	Rauigkeits- Koeffizient (Manning)
Acker (Stoppelfeld)	3,0	2,4	55	0,07
Grünland	4,0	2,8	100	0,05
Wald	6,0	3,7	95	0,10
Fläche gemischter Nutzung	3,9	2,8	70	0,08
Wohnbaufläche	0,9	1,4	32	0,08

2. Porenvolumen, Anfangswassergehalt und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens

Das Porenvolumen für die laut der Karte der Bodennutzung (BK 50) in den Untersuchungsgebieten vorzufindenden wurde anhand der bodenkundlichen Kartieranleitung (Arbeitsgruppe Boden, 1994, S. 297) ermittelt. Dabei wurden die Lagerungsdichten bei unterschiedlichen Landnutzungsarten berücksichtigt. Für die Bestimmung des Anfangswassergehalts wurde eine Saugspannung von $pF = 1,5$ zugrunde gelegt, um der erhöhten Vorfeuchte infolge Vorregen beim simulierten Starkregenereignis Rechnung zu tragen. Zunächst wurden für die einzelnen Bodenarten bei unterschiedlichen Lagerungsdichten die Parameter der van Genuchten Gleichung (θ_r , θ_s , α_g , n_g und m_g) mit dem Programm ROSETTA ermittelt und dann der Wassergehalt bei $pF = 1,5$ anhand der

Gleichung 4.9 berechnet. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde ebenfalls anhand der van Genuchten Gleichung unter Anwendung von ROSETTA berechnet. Die Lagerungsdichten wurden in Abhängigkeit von der Nutzung aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Arbeitsgruppe Boden, 1994, S. 126) ermittelt. Die Werte sind in Tabelle 4.6 aufgeführt. Zur Parametrisierung des Infiltrationsmodells für Delbrück wurde jede Teilfläche mit der maßgebenden Bodenart gemäß Bodenkarte parametrisiert. Die nördlichen drei Gebiete sind als tonig-lehmig angenommen worden, wohingegen bei Gebiet 4 (vgl. Abbildung 4.24) von einer lehmig bis sandigen Korngrößenverteilung ausgegangen wurde.

Tabelle 4.6: Porosität, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (ges. hydr. Leitf.) und Anfangswassergehalt als Anteil am Porenvolumen (AWG / Porenvolumen) der Teilflächen, unterteilt nach Bodenart und Landnutzung.

Landnutzung	Porosität [%]		ges. hydr. Leitf. [mmh ⁻¹]		AWG / Porenvolumen [-]	
	Tl	Tu	Tl	Tu	Tl	Tu
Ahden						
Acker (Stoppelfeld)	45	43	2,38	2,15	0,98	0,95
Grünland	53	51	2,38	2,15	0,98	0,94
Wald	53	51	2,38	2,15	0,99	0,92
Fläche gemischter Nutzung	39	36	2,38	2,15	0,98	-
Wohnbaufläche	0	0	2,38	2,15	1,00	1,00
Henglarn						
	Lt	Ut	Lt	Ut	Lt	Ut
Acker (Stoppelfeld)	40	37	1,39	1,14	0,95	0,98
Grünland	47	43	3,85	2,23	0,94	0,98
Wald	58	-	19,2	-	0,92	-
Fläche gemischter Nutzung	33	30	0,55	0,46	0,95	0,98
Wohnbaufläche	0	0	0	0	1,00	1,00
Delbrück						
	Lt	Ls	Lt	Ls	Lt	Ls
Wohnbaufläche / gemischte Nutzung	46	40	4,00	70,0	0,95	0,77

4.3.2.4 Eingabe der Niederschlagsdaten

Der Niederschlag wurde ebenfalls in Form einer Textdatei in das Programm eingegeben. Hierzu wurde ein Block von Datenpaaren aus Zeitschritten und der jeweils zugehörigen Niederschlagssumme seit Startzeitpunkt editiert. Die Anzahl der Datenpaare muss zu Beginn des Datenblocks angegeben werden. Bei den Niederschlagsdaten handelt es sich um die Aufzeichnungen der Niederschlagsmessstation HRB Ebbinghausen, Büren, und Boke, die in Minuten-Auflösung zur Verfügung standen. Da die Station Boke deutlich weiter entfernt vom Stadtgebiet Delbrück liegt als die Station Delbrück Kläranlage, für welche nur ein Summenwert verfügbar war, wurde der Intensitätsverlauf von Boke auf den Summenwert von Delbrück Kläranlage skaliert. Die Niederschlagssummenlinien der drei Stationen sind in Abbildung 4.26 dargestellt.

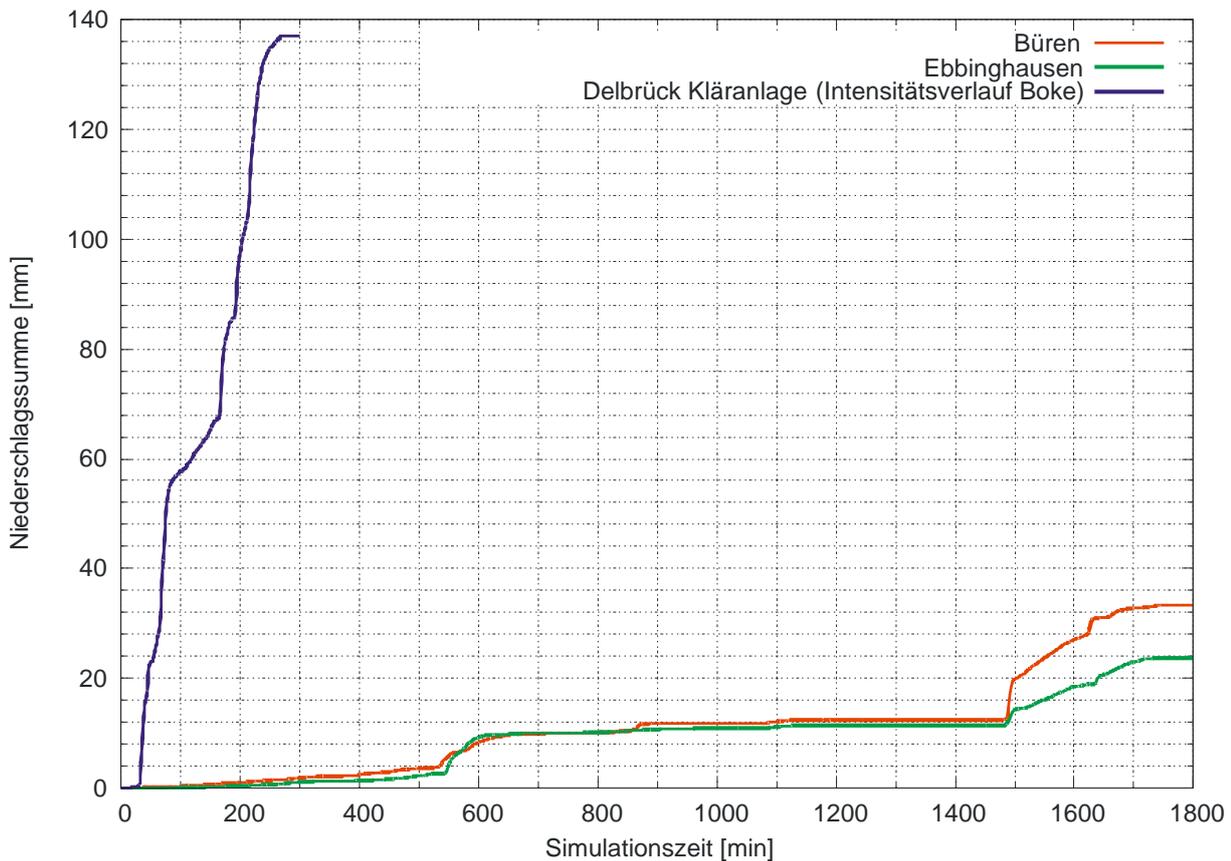


Abbildung 4.26: Niederschlagssummenlinien der drei Stationen Büren, Ebbinghausen und Delbrück Kläranlage mit dem Intensitätsverlauf der Station Boke

Die Anzahl der Datenpaare, die von KINEROS2 verarbeitet werden können, ist auf 1000 begrenzt. Da jedoch ein Zeitraum von 30 Stunden (1800 Datenpaare) gewählt wurde, musste gegebenenfalls die zeitliche Auflösung der Niederschläge auf 2 Minuten herabgesetzt werden.

4.3.2.5 Starten des Rechenlaufs

Im Hauptprogramm von KINEROS2 müssen zunächst die Parameterdatei und die Niederschlagsdatei eingelesen werden. Außerdem müssen die Berechnungsdauer und die Zeitschrittwahl angegeben werden, wodurch die numerische Stabilität des Modells gewährleistet wird. Die Größe des Zeitschritts kann mit Hilfe der Courant Bedingung angepasst werden:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \tag{4.16}$$

mit Δt = Zeitschritt [T]

Δx = Abstand zwischen den Konten der Finiten Elemente [L]

\sqrt{gh} = Geschwindigkeit der Oberflächenwelle [L T⁻¹].

4.3.2.6 Sensitivitätsanalyse

Um die Unsicherheit bei der Modellierung einschätzen zu können, sind Untersuchungen der Parametersensitivität hilfreich. Anhand der Variation der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist deren Einfluss auf die simulierten Füllen des Direktabflusses für das Gebiet Ahden untersucht worden. Die Abbildung 4.27 zeigt die Veränderung des simulierten Abflusses bei Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit, wobei der Bezugswert mit einer Änderung von 0 % den im vorigen Abschnitt erläuterten Werten entspricht (= 0% Änderung).

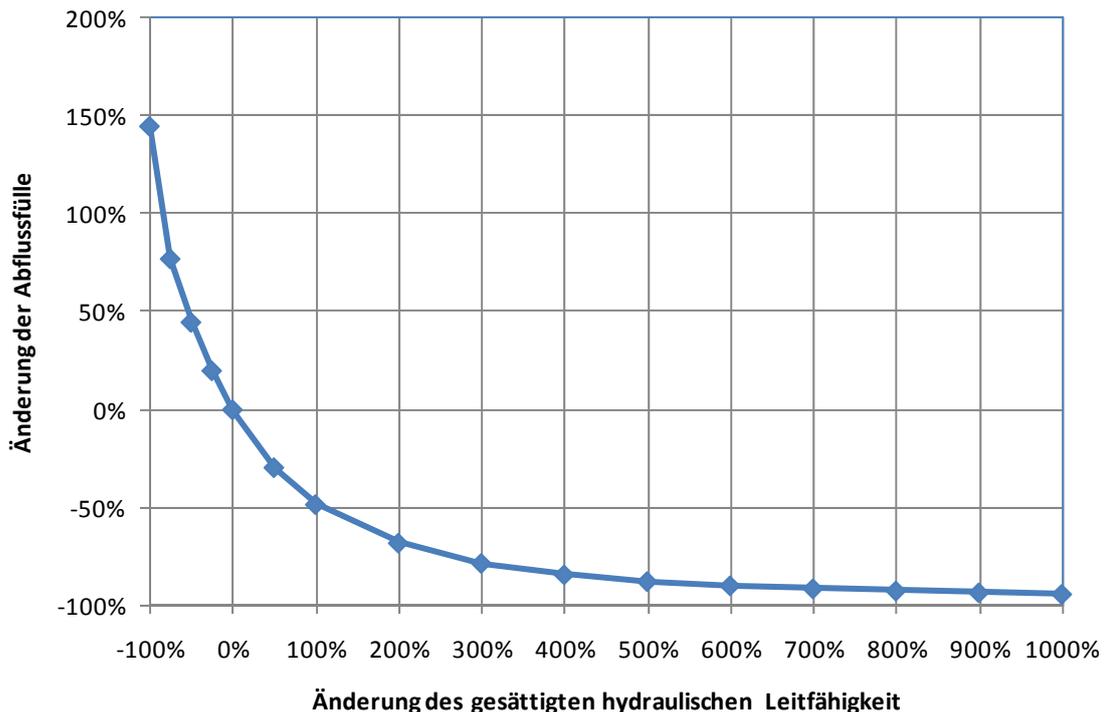


Abbildung 4.27: Prozentuale Veränderung der Gesamtabflussmenge bei Veränderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_s , berechnet mit KINEROS2 am Gebietsauslass Ahden.

Es wird deutlich, dass die Verringerung der gesättigten Leitfähigkeit eine extreme Erhöhung der Abflussmenge erzeugt, wohingegen bei größeren Werten der hydraulischen Leitfähigkeit geringere Abflussfüllen simuliert werden. Die berechneten Abhängigkeiten belegen, wie sensitiv der Abfluss auf Veränderungen der hydraulischen Leitfähigkeit reagiert. Bezugnehmend auf die geschilderten Unsicherheiten bei der Ermittlung von Leitfähigkeitswerten sowie den in der hydrologischen Modellierung erforderlichen Skalenübergängen, ist eine Plausibilitätsprüfung – und sofern möglich, eine Kalibrierung - der Ergebnisse unerlässlich. Daher werden die durch die KINEROS2-Simulationen ermittelten Ergebnisse im folgenden Abschnitt einer kritischen Bewertung unterzogen.

4.3.2.7 Simulationsergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Simulationen des Augusthochwassers 2007 sind in Tabelle 4.7 und Abbildung 4.28 dargestellt. Anhand der aufgezeigten Werte ist ersichtlich, wie sich das Niederschlagswasser auf die einzelnen Prozesse der Abflussbildung und –konzentration aufteilt. In den ländlichen Projektgebieten Ahden und Henglarn infiltriert der größte Teil des Niederschlags in den Boden (Ahden 58%, Henglarn 68 %), ca. 37% (Ahden), bzw. 19% (Henglarn) sind abflusswirksam. Bedingt durch die Versiegelung der Bodenoberfläche sowie die hohen Niederschlagsintensitäten in Delbrück beträgt der berechnete Anteil des Oberflächenabflusses 65 %, wohingegen ein Anteil von 32 % auf die Infiltration entfällt.

Der genannte Anteil des Oberflächenabflusses wird in der Siedlungswasserwirtschaft auch Gesamtabflussbeiwert Ψ genannt, da dieser volumenbezogen ist. Der Spitzenabflussbeiwert Ψ_s setzt demgegenüber die maximale Abflussspende und die Regenspende in Beziehung (Schneider, 2008). Der in Delbrück relativ hohe Gesamtabflussbeiwert von 65 % soll anhand von Literaturwerten geprüft werden.

Aus zahlreichen Untersuchungen von Hochwasserereignissen gibt Dyck (1980) für die Obergrenze des Gesamtabflussbeiwertes einen Wertebereich von 0,7 bis 0,9 an. Dabei wurden Einzugsgebiete verschiedener Flächengrößen untersucht. DWA (2006) geben als mittleren Gesamtabflussbeiwert für Flächen mit Gartennutzung und steilem Gelände ein Intervall von 0,1 bis 0,3 an. Ferner werden für Dächer und Straßen Werte im Bereich von 0,9 bis 1,0 genannt. Unter Berücksichtigung des veranschlagten Versiegelungsgrades von 25 % und der Annahme, dass von der jeweiligen Obergrenze der Wertebereiche ausgegangen werden kann, erhält man einen Gesamtabflussbeiwert von ca. 48 %. Dieser liegt unterhalb des berechneten Wertes aus KINEROS2. Zu beachten ist allerdings, dass die Bemessung nach DWA (2006) nur für Jährlichkeiten bis 10 a zulässig ist und Abflussbeiwerte von Ereignis zu Ereignis variieren. Daher dürften Extremwerte des Gesamtabflussbeiwertes höher liegen, wie es aus den Untersuchungen von Dyck (1980) hervorgeht. Laut den Untersuchungen des DVWK (1999) können bei Extremabflüssen Gesamtabflussbeiwerte durchaus über 0,5 liegen. Daher erscheint das Ergebnis durchaus im plausiblen Bereich zu liegen.

Tabelle 4.7: Mit KINEROS2 simulierte Volumenanteile von Interzeption, Infiltration, Abfluss und Gebietsrückhalt am Gebietsniederschlag.

	Volumen [mm]	Volumen [m³]	Anteil am Gebietsniederschlag [%]
Ahden			
Gebietsniederschlag	33,3	71424	100
Interzeption	1,4	2984	4
Infiltration	19,2	41125	58
Oberflächenabfluss	12,4	26599	37
Gebietsrückhalt	0,2	359	1
Volumenfehler	0,1	357	< 1
Henglarn			
Gebietsniederschlag	23,7	64790	100
Interzeption	1,9	5127	8
Infiltration	16,0	43654	68
Oberflächenabfluss	4,6	12666	19
Gebietsrückhalt	0,3	927	1
Volumenfehler	0,9	2416	4
Delbrück			
Gebietsniederschlag	137,0	57274	100
Interzeption	0,5	188	1
Infiltration	44,2	18459	32
Oberflächenabfluss	89,5	37398	65
Gebietsrückhalt	1,5	637	1
Volumenfehler	1,3	592	1

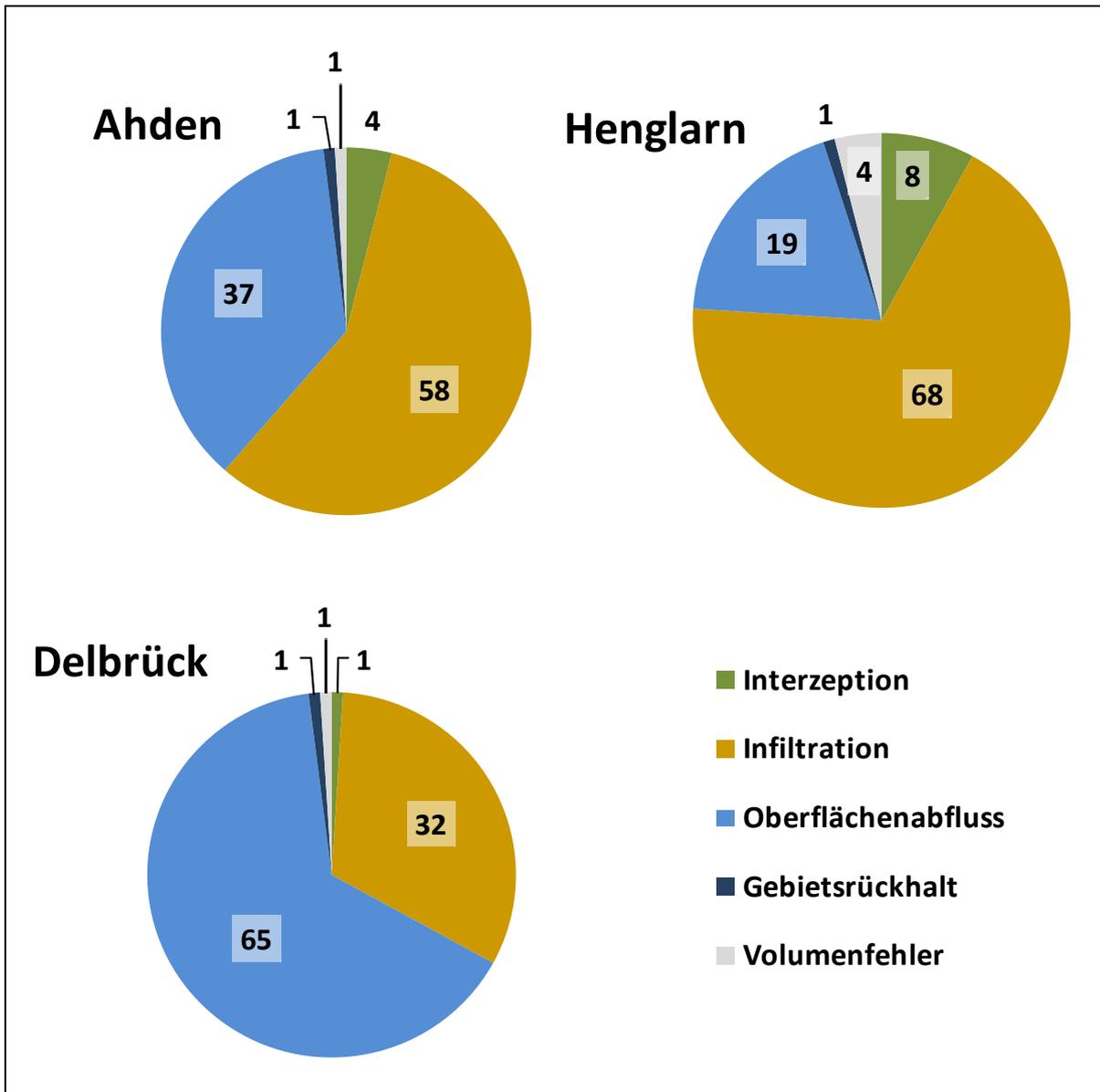


Abbildung 4.28: Mit KINEROS2 simulierte Volumenanteile von Interzeption, Infiltration, Abfluss und Gebietsrückhalt am Gebietsniederschlag.

Neben der rein volumenbezogenen Untersuchung der Ergebnisse erscheint eine nähere Beschreibung der Abflussganglinie und insbesondere der Scheitelwerte sinnvoll. Für alle drei Gebiete sind daher in den nachfolgenden Abbildungen der Niederschlagsintensitätsverlauf sowie die Abflussganglinien am Gebietsauslass dargestellt. Bei Ahden und Delbrück wurde ein längerer Zeitraum simuliert, da zwei Ereignisse ähnlicher Größenordnung relevant sind. Das Extremereignis in Delbrück wurde hingegen isoliert betrachtet.

Während in Ahden das zweite Niederschlagsereignis maßgebend bezogen auf den Wellenscheitel ist, verhält es sich bei Henglarn genau umgekehrt. Wegen der geringeren Niederschläge an Messstelle Ebbinghausen verglichen mit Büren, ist der berechnete Abfluss trotz des größeren Einzugsgebietes bei vergleichbaren Einzugsgebietscharakteristika und ähnlicher Parametrisierung in Henglarn deutlich niedriger als in Ahden. Die Abflussspende in Ahden beträgt ca. 1600 l/(s km²) wohingegen der entsprechende Vergleichswert für Henglarn bei nur 340 l/(s km²) liegt.

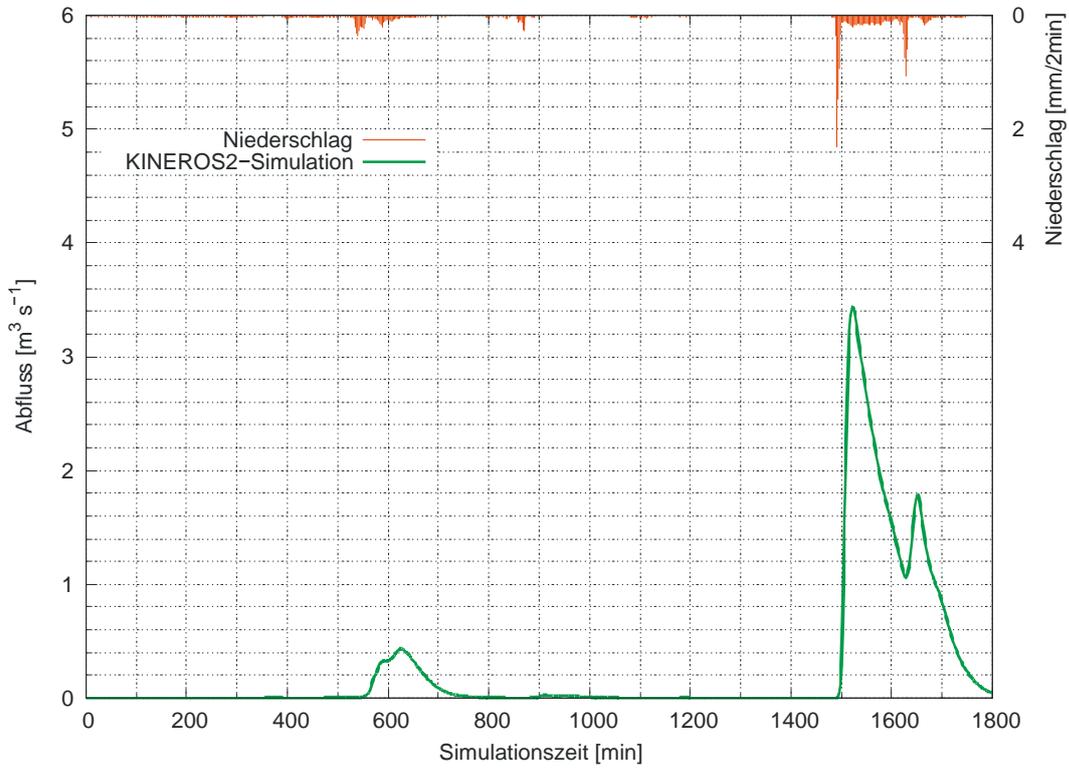


Abbildung 4.29: Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Ahden bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 08.08.07 17:30).

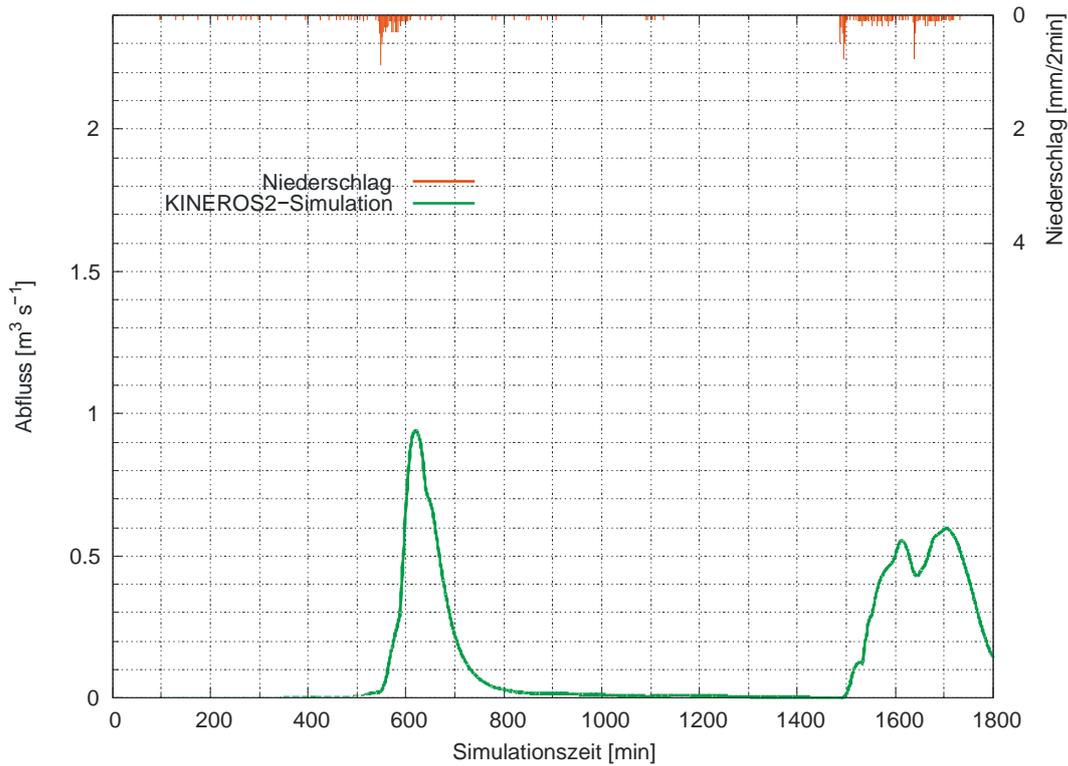


Abbildung 4.30: Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Henglar bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 08.08.07 17:30).

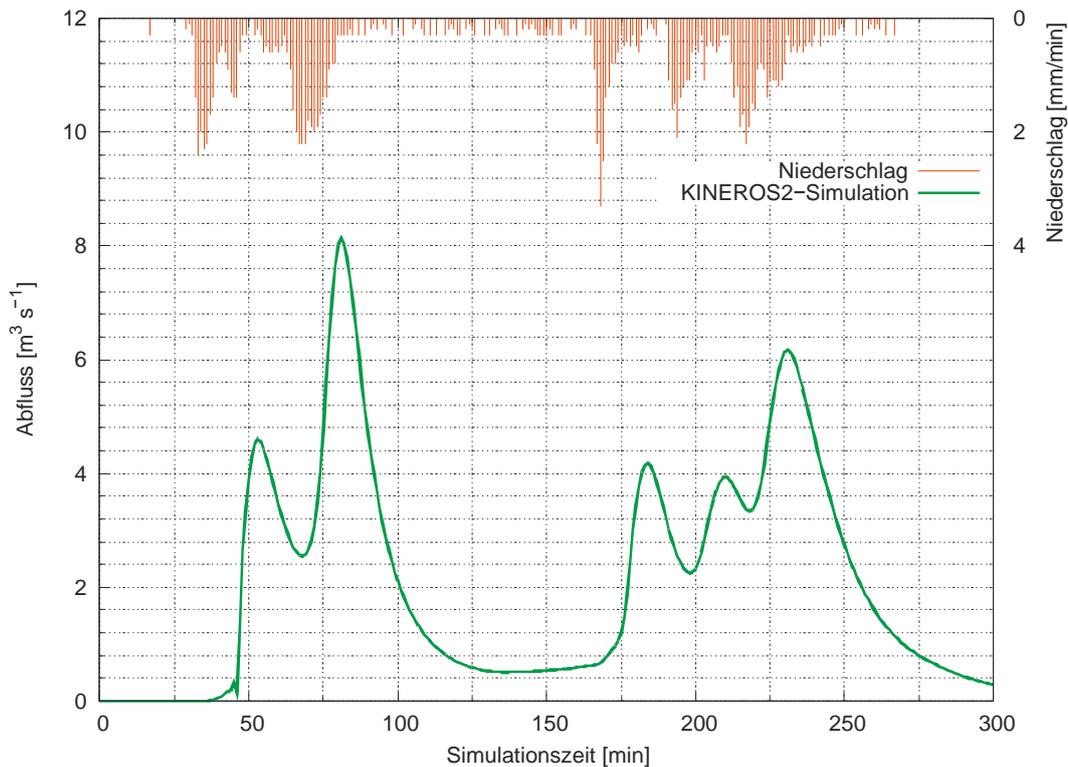


Abbildung 4.31: Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Delbrück bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 09.08.07 19:00).

Der Scheitelwert des Abflusses von $8,142 \text{ m}^3/\text{s}$ in Delbrück liegt deutlich über den Werten aus Henglar und Ahden, auch in Bezug auf die Spenden. Das Maximum der Niederschlagsintensität lag bei $3,3 \text{ mm min}^{-1}$. Dieser Wert entspricht einer Regenspende von $550 \text{ l}/(\text{s ha})$ (198 mm h^{-1}). Die Regenabflussspende beträgt den KINEROS2-Simulationen zufolge $195 \text{ l}/(\text{s ha})$ (70 mm h^{-1}). Der Spitzenabflussbeiwert liegt damit bei etwa $0,35$, was verglichen mit Angaben nach Schneider (2008) ein plausibler Wert für Gebiete mit ähnlicher Versiegelung ist.

Die simulierte Abflussspende beträgt in Delbrück $19\,476 \text{ l}/(\text{s km}^2)$. Verglichen mit Beobachtungen liegt dieser Wert im Bereich der maximal beobachteten Abflussspenden in Deutschland. Problematisch bei diesem Vergleich ist die Tatsache, dass in Einzugsgebieten von nur wenigen Quadratkilometern in den seltensten Fällen belastbare Quantifizierungen abgelaufener Hochwasserereignisse vorliegen. In einem $4,7 \text{ km}^2$ großen Einzugsgebiet in Sachsen wurde beispielsweise eine Abflussspende von $21\,000 \text{ l}/(\text{s km}^2)$ beobachtet (DVWK, 1999). Nach Wundt (zitiert in DVWK, 1999) betrage das 90 %-Perzentil der auf der Erde beobachteten maximalen Abflussspenden für ein Gebiet der Fläche 1 km^2 $14\,000 \text{ l}/(\text{s km}^2)$. Das 90 %-Perzentil werde auch unter europäischen Verhältnissen für realistisch gehalten (Rother, 2001). Da das Untersuchungsgebiet kleiner ist als die Vergleichsangaben aus der Literatur und mit abnehmender Fläche höhere Abflussspenden möglich sind, liegt der berechnete Wert durchaus im Bereich des Möglichen, zumal die betrachtete Einzugsgebietsfläche kleiner als 1 km^2 ist. Die Einzugsgebietsfläche entspricht damit etwa der Größenordnung konvektiver Zellen. Das Zusammenwirken extremer Niederschläge und einer vollständigen Überregnung des Gebietes kann zu extremen Abflussereignissen führen. Berücksichtigt man die Tatsache, dass es sich um ein urbanes Gebiet handelt, so sind deutlich höhere Spenden gegenüber landwirtschaftlichen Gebieten plausibel.

4.3.2.8 Unsicherheiten bei der Modellanwendung

Unsicherheitsquellen bei der Modellanwendung sind vor allem die Variabilität und Unsicherheiten der Eingangsdaten. Z. B. können die Werte der hydraulischen Leitfähigkeit, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, auf kleinem Raum über mehrere Zehnerpotenzen variieren. Nach Fritsch (2001) sollten für die Modellierung effektive Leitfähigkeiten abgeschätzt, oder Makroporen explizit getrennt behandelt werden. In KINEROS2 wird der Makroporenfluss in der Infiltrationsgleichung nicht berücksichtigt, daher wurden als Eingangsdaten für die hydraulische Leitfähigkeit Flächenwerte der Matrixleitfähigkeit verwendet, die mit Hilfe des Programms ROSETTA ermittelt wurden. Die hydraulische Leitfähigkeit ist in KINEROS2 ein sehr sensibler Parameter. Bei der Bewertung der Modellergebnisse muss daher beachtet werden, dass durch die Eingabe von höheren Leitfähigkeiten (effektiven Leitfähigkeiten), möglicherweise realistischere Oberflächenabflüsse errechnet werden. Die Kalibrierung dieses Parameters ist aber aufgrund fehlender (Abfluss-) Messdaten nur bedingt möglich.

Die verwendeten Niederschlagsdaten beinhalten ebenfalls systematische Messfehler. Es ist wahrscheinlich, dass die vorliegenden Niederschlagsmessungen nicht repräsentativ für die wenige Kilometer entfernten Einzugsgebiete sind. In Ahden und Henglarn sind die Messstellen 8 bzw. 3 km vom Untersuchungsgebiet entfernt. Die unterschiedlichen Messwerte der benachbarten Stationen Delbrück-Kläranlage und Boke belegen, dass bei konvektiven Starkniederschlägen eine extrem kleinräumige Variabilität der Niederschlagsfelder auftreten kann. Nach Maul-Kötter (1998) kann die räumliche Variabilität des Niederschlags besonders bei kleinräumigen, kurzen Starkregen nicht von einem oder zwei Regenschreibern erkannt werden. Anhand der in Kapitel 3 gezeigten Radarbilder ist zwar erkennbar, dass es im Bereich der Untersuchungsgebiete zu Niederschlägen mit erhöhter Intensität kam, ein quantitativer Vergleich mit den Regenschreiberaufzeichnungen ist aber mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Bei der Modellierung wurden die Daten der nächstgelegenen Niederschlagsstation verwendet. Es ist daher möglich, dass kleinräumige Gewitterzellen über den Untersuchungsgebieten bei den Niederschlagsmessungen nicht erfasst wurden.

Eine weitere Unsicherheit der Modellierung besteht in der Annahme der Gebietsfeuchte vor dem Ereignis, die abhängig von vorangegangenen Niederschlagsereignissen hohe Schwankungen aufweisen kann. Neben den Unsicherheiten der Eingangsdaten stellen auch die Einteilung der Hangklassen und die Kriterien für die Verschneidung der Teilflächen, durch die die Modellstruktur festgelegt wird, Unsicherheitsquellen dar. Bei der Generalisierung der Eingangsdaten (Reduzierung der Elementanzahl und damit verbundenen Zusammenfassung von Parameterklassen) wurden jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Modellergebnisse von KINEROS2 festgestellt.

4.3.2.9 Validierung der Simulationsergebnisse

Da bei der Modellierung des Oberflächenabflusses eine Validierung wegen fehlender (Pegel-) Messdaten nicht möglich ist, können allein Beobachtungsdaten, die von den Betroffenen und der Feuerwehr zum Zeitpunkt des Ereignisses erhoben wurden, zur Validierung herangezogen werden. Für das Untersuchungsgebiet Ahden stand Filmmaterial zur Verfügung.

Die modellierten Abflusshöhen konnten mit den Filmaufnahmen, die von dem Ereignis in Ahden gemacht worden waren (Kapitel 4.1.3) verglichen werden. In Abbildung 4.6 (e) ist ein Fließweg des Oberflächenabflusses bei dem Ereignis abgebildet, dessen Verlauf mit dem generierten Gewässernetz übereinstimmt. Eine grobe Abschätzung des Abflusses mit der Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.17), bei einem anhand dieser Abbildung abgeschätzten mittleren Wasserstand von ca. 30 cm, einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} und der Breite des "Gerinnes" von 5 m, ergibt einen Abfluss von $1,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$$Q = v \cdot A \quad (4.17)$$

Ein Modelllauf für diese Stelle des synthetischen Gewässernetzes (Kanalelement 10) ergab einen Scheitelabfluss von rund $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ein ähnliches Modellergebnis wurde für das Kanalelement 11 errechnet, das ungefähr auf der Kreuzung Haselnussstraße/Tiggstraße (Abbildung 4.7 a und c) liegt. Der Scheitelabfluss beträgt hier $1,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Die Modellergebnisse an diesen Stellen können also hinsichtlich ihrer Größenordnung als realistische Werte angesehen werden.

Ähnlich hohe Scheitelabflüsse können für die Fließwege an der Flughafenstraße angenommen werden (Abbildung 4.8 a und c). An dieser Stelle beträgt der berechnete Scheitelabfluss ca. $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Kanalelement 1).

Da die errechneten Scheitelabflüsse die gleiche Größenordnung wie die anhand des Videos abgeschätzten Abflüsse haben, kann davon ausgegangen werden, dass das Modell Abflüsse in einer realistischen Größenordnung liefert. Allerdings kann nicht angenommen werden, dass die Filmaufnahmen genau zum Zeitpunkt der höchsten Abflüsse gemacht wurden. Es ist daher möglich, dass die modellierten Abflüsse die tatsächlich aufgetretenen Abflussvolumina unterschätzen. Die hydrologische Modellierung der Niederschlag-Abflussprozesse im Untersuchungsgebiet Ahden mit KINEROS2 liefert weitestgehend realistische Ergebnisse für das beobachtete Ereignis. Die Größenordnung der modellierten Oberflächenabflusshöhen konnte mit Hilfe eines Vergleichs mit Abflussmengen, die aus Foto- und Videomaterial und Anwohner- bzw. Feuerwehraussagen abgeschätzt wurden, als plausibel eingeordnet werden. Eine detaillierte Validierung der Modellergebnisse konnte allerdings aufgrund der fehlenden Beobachtungsdaten nicht erfolgen. Für die Gebiete Henglar und Delbrück stand kein Film zur Einschätzung der Simulationsergebnisse zur Verfügung, weshalb auf eine nähere Betrachtung dieser Gebiete an dieser Stelle verzichtet wird.

Im Zuge der hydraulischen Modellierung werden die KINEROS2-Berechnungen wieder aufgegriffen und als Randbedingungen für die Strömungsmodellierung vorgegeben. Da eine detailliertere hydraulische Modellierung zur Ableitung von Fließgeschwindigkeiten und Wasserständen, welche direkt mit den Beobachtungen während des Ereignisses verglichen werden können, geeignet ist, kann der Modellansatz KINEROS2/hydraulisches Modell als Ganzes hinsichtlich der Simulationsgüte bewertet werden.

4.3.3 Belastungsszenarien mit Bemessungsniederschlägen

Um Aussagen über die Hochwassergefährdung der Untersuchungsgebiete durch Niederschläge mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeiten treffen zu können, wurden Belastungsniederschläge der Jährlichkeit 50, 100 und 200 mit verschiedenen Regendauern ermittelt und auf die Gebietsmodelle angewendet. Für die Jährlichkeiten 50 bis 100 wurden die Niederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2000 verwendet, für die Jährlichkeit 200 wurde die Niederschlagshöhen nach variiertes PEN (Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags)-Methode berechnet. Dieser gängigen Bemessungspraxis liegt die sehr einfache Annahme zu Grunde, dass die Jährlichkeiten von Niederschlag und Abfluss identisch sind.

4.3.3.1 KOSTRA-DWD-2000 Niederschlagsdaten

Im Deutschen Wetterdienst (DWD) werden seit Jahren extremwertstatistische Untersuchungen mit praxisrelevanten Zielsetzungen der Anwendungsgebiete Hydrometeorologie und Wasserwirtschaft für variierende Basiszeiträume durchgeführt (Bartels et al., 2005). Daraus resultierende Ergebnisse sind u. a. als KOSTRA-Atlas 1997 (Basiszeitraum 1951-1980) veröffentlicht (Bartels et al., 1997). Die Bezeichnung KOSTRA steht für die "Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung".

Der KOSTRA-Atlas "Starkniederschlagshöhen für Deutschland" ist als bundeseinheitliche, verbindliche Regel durch das 'Niederschlagsregelwerk' eingeführt (Bartels et al., 1997). Die extremwertstatistischen Aussagen dienen in erster Linie als Planungsgrundlage und Entscheidungshilfe für den technischen Hochwasserschutz, z. B. bei der Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen. Die Ergebnisse von KOSTRA-DWD beruhen auf einer einheitlichen Auswertung von punktuell ermittelten Starkniederschlagshöhen verschiedener Dauerstufen und Wiederkehrzeiten (Jährlichkeiten) sowie deren Übertragung auf Standorte, für die keine langfristigen Niederschlagsregistrierungen vorliegen.

Im Unterschied zu KOSTRA-DWD werden bei KOSTRA-DWD-2000 die stationsbezogenen Tageswerte der Niederschlagshöhe nicht punktuell ausgewertet und anschließend regionalisiert, Datengrundlage sind vielmehr tägliche Niederschlagshöhen auf Rasterbasis (1 x 1 km), die im DWD-Hydrometeorologie rückwirkend seit 1951 und mittlerweile routinemäßig berechnet werden. Die Informationsdichte wurde von rund 3000 auf 300000 Rasterzellen erhöht. Es wurde das REGNIE-Verfahren (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) verwendet, das den Vorteil hat lückenlose, homogene Zeitreihen zu liefern. Dieser Ansatz geht davon aus, dass mit der durchgeführten Regionalisierung der Niederschlagsbezugswerte des Zeitraums 1951-1990 (mittlerer monatlicher Niederschlag, durch Aufsummieren der Tageswerte ermittelt) in Abhängigkeit von

- Höhe,
- geogr. Länge und Breite,
- Expositionsrichtung des Geländes und
- Betrag der Exposition

bereits die wesentlichen klimatologischen Besonderheiten der Niederschlagsverteilung erfasst sind. Die verbleibenden Abweichungen in den aktuellen Niederschlagsmessungen an den Stationen

wurden demgegenüber als witterungsbedingt - „nichtklimatologisch“ - eingestuft. Die aktuellen Niederschlagshöhen an den Messstationen konnten daher in Form von Relativwerten zum Niederschlagsbezugswert entfernungsabhängig interpoliert und auf das Raster übertragen werden (Hintergrundfeld-Methode). Die für jedes Rasterfeld interpolierten Relativwerte wurden anschließend durch Multiplikation mit den Werten des Bezugfelds wieder in absolute Niederschlagshöhen umgerechnet.

Mit der beschriebenen Methode wurde der Basiszeitraum auf insgesamt 50 Jahre verlängert. Er umfasst nun den Zeitraum von 1951 bis 2000.

Um eine Bewertung der innerhalb eines Messzeitraums ausreichender Länge zufällig aufgetretene Niederschlagsereignisse zu erhalten und eine Extrapolation auf sehr seltene Starkniederschlagsereignisse zu ermöglichen, wurde bei KOSTRA-DWD-2000 eine extremwertstatistische Analyse durchgeführt (Malitz, 2005). Der extremwertstatistische Ansatz geht für jede Dauerstufe von Serien aus, die sich aus Messreihen der Niederschlagshöhe h_N ergeben. Den Serien wurde durch eine Regressionsrechnung, die sogenannte KOSTRA-Gleichung, für jede Dauerstufe D in Abhängigkeit von der Jährlichkeit T angepasst, wobei u und w die Parameter der Verteilungsfunktion bezeichnen:

$$hN(D, T) = u(D) + w(D) \cdot \ln T \quad (4.18)$$

Um mittels der Verteilungsparameter über alle Dauerstufen hinweg eindeutige Niederschlagshöhen zu erhalten, stehen ein einfachlogarithmischer und ein doppeltlogarithmischer Ansatz zur Auswahl (Malitz, 1999):

- Einfachlogarithmischer Ansatz

$$u(D) = a_u + b_u \cdot \ln D \quad (4.19)$$

$$w(D) = a_w + b_w \cdot \ln D \quad (4.20)$$

- Doppeltlogarithmischer Ansatz

$$\ln u(D) = A_u + B_u \cdot \ln D \quad (4.21)$$

$$\ln w(D) = A_w + B_w \cdot \ln D \quad (4.22)$$

Untersuchungen zeigen, dass die Kurzzeitniederschläge fast ausschließlich aus Schauern und/oder Regen mit Gewittern (konvektiver Niederschlag) stammen (Malitz, 2005). Zu längeren Dauerstufen hin nehmen die advektiven Niederschläge erheblich zu. Letztere gehen allerdings im Sommer in der Regel mit Schauern und/oder Regen mit Gewittern einher. Entsprechend dieser vereinfachten Einteilung des Starkniederschlagsgeschehens in die zwei Grundtypen mit ihrer jeweiligen charakteristischen Niederschlagsdauer wurde eine Bereichsabgrenzung der Dauerstufen bei 60 Minuten und bei 12 Stunden gewählt. Der Bereich I umfasst die Dauerstufen $D = 5$ min bis $D = 60$ min, der Bereich II die Dauerstufen $D = 60$ min bis $D = 12$ h und der Bereich III die Dauerstufen $D = 12$ h bis $D = 72$ h.

Abhängig vom Dauerstufenbereich erzielen die beiden Ansätze zur Bestimmung der Verteilungsparameter (Gleichung 4.24 bis Gleichung 4.26) unterschiedlich gute Anpassungen der Verteilungsfunktion an die Daten der Niederschlagsserien. Für den Dauerstufenbereich I wurde 1997 für den KOSTRA-Atlas festgelegt, dass für beide Parameter $u(D)$ und $w(D)$ der doppeltlogarithmische

Ansatz zu verwenden ist. Neuere Untersuchungen zeigen, dass bei einer Extrapolation auf kleinere Dauerstufen diese Festlegung die tatsächlichen Zusammenhänge nicht optimal widerspiegelt. Daher wird ein hyperbolischer Parameterausgleich für $u(D)$ und der doppelt logarithmische Parameterausgleich für $w(D)$ im Dauerstufenbereich I empfohlen (Malitz, 2005). Die Gleichung zur Bestimmung der Niederschlagshöhen lautet dann:

$$h_N(D, T) = \frac{a_u^* \cdot D}{(D + b_u^*)} + e^{A_w + B_w \cdot \ln D} \cdot \ln T \quad (4.23)$$

Für die Interpolation im Dauerstufenbereich II werden bei KOSTRA-DWD-2000 $u(D)$ und $w(D)$ doppeltlogarithmisch ausgeglichen. Im Dauerstufenbereich III wurde anstelle des Parameterausgleichs ein anderer Weg eingeschlagen: Eventuelle Widersprüche in der Abfolge der Starkniederschlagshöhen von $D = 24$ h bis $D = 72$ h wurden nachträglich korrigiert. Im Falle gleich bleibender, oder sogar abnehmender Niederschlagshöhen mit zunehmender Dauer, wurden die Parameter schrittweise um 2 % angehoben und die hieraus resultierenden Niederschlagshöhen erneut auf Widersprüche kontrolliert. Die Starkniederschlagshöhen für $D = 18$ h ergeben sich durch eine Mittelung der Niederschlagshöhen für $D = 12$ h und $D = 24$ h (Malitz, 2005).

Die Niederschlagsdaten von KOSTRA-DWD-2000 liegen deutschlandweit flächendeckend für Rasterfelder von $8,45 \times 8,45$ km mit 18 Dauerstufen zwischen 5 Minuten und 72 Stunden und 8 Jährlichkeiten zwischen zweimal pro Jahr und einmal in 100 Jahren vor. Außerdem ist eine Ausgabe der Niederschlagsdaten in tabellarischer Form für jedes Rasterfeld möglich. Die für die Projektgebiete relevanten KOSTRA-Tabellen sind im Anhang zusammengestellt (siehe Kapitel 4.3.3).

Für die Belange der hydrologischen Praxis werden häufig Bemessungswerte geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit als 1 %, also seltener als hundertjährlich, benötigt (Stalman et al., 2004).

Nach Veranlassung der LAWA wurde 1991 das Ziel festgelegt, "außerordentliche Extremwerte" des Niederschlags zu ermitteln. Die Bearbeitung durch den DWD ergab 1997 die "Maximierten Gebietsniederschläge für Deutschland (MGN)". Während mit den KOSTRA-Werten der Bereich der jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten bis 1 % ($T = 100$ a) erfasst wird, sind die MGN-Werte die Schätzung der vermutlich größten physikalisch möglichen Niederschlagshöhen. Die Lücke zwischen MGN und KOSTRA-100a-Werten schloss 2003 das Projekt "Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN)", die Berechnung von Niederschlägen für Wiederkehrzeiten zwischen 1.000 und 10.000 Jahren zum Ziel hat. Es trägt damit pragmatischen Gesichtspunkten Rechnung, indem es die Grundlage bildet, Hochwasser extremer Größe mit Hilfe von Niederschlag-Abflussmodellen abzuschätzen. Anders als bei größeren Flüssen, wo oft die Möglichkeit besteht, sich außerordentliche Extremwerte aus Hochwasserstatistiken mit langen Beobachtungszeiten zu verschaffen, fehlt es daran bei kleineren Flusseinzugsgebieten, z. B. bei stadthydrologischen Aufgaben (Stalman et al., 2004).

Die gemeinsame Abschätzung von Tausend- oder Zehntausend-jährlichen Niederschlagshöhen aus den KOSTRA-100 a-Werten einerseits und den MGN-Werten andererseits kann nicht als geeignet angesehen werden, da sich die beiden Projekte schon in ihrer räumlichen Auflösung und damit auch in der Genauigkeit sehr weit unterscheiden. Bei KOSTRA handelt es sich ursprünglich um Punktwerte,

bei MGN um regionalisierte Angaben.

Für die Ermittlung eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der extremen Niederschlagshöhen wurde zunächst versucht, über Verteilungsfunktionen aus langen Messreihen die Parameter der Verteilungsfunktion zu ermitteln (Verworn und Kummer, 2003). Dabei stellte sich heraus, dass sich deren Verlauf nur wenig von der KOSTRA-Verteilung unterschied. Daher wurde für die Bestimmung der Niederschlagshöhen für $T = 1.000$ a und $T = 10.000$ a festgelegt, diese aus der "Weiterführung" oder "Extrapolation" der KOSTRA-Verteilung zu entnehmen. Diese wurde allerdings steiler gewählt, indem für den KOSTRA-Bereich eines Ortpunktes für $T = 1$ a der untere und $T = 100$ a der oberere Wert des Bereiches verwendet wurde. Damit kann für jedes Rasterfeld in KOSTRA diese Verteilungsfunktion ermittelt und daraus die Niederschlagshöhen für $T = 1.000$ a und $T = 10.000$ a nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$h_N(T) = h_{KOSTRA}(1) + (w \cdot \ln T) \quad (4.24)$$

mit $h_N(T)$ = Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von der Jährlichkeit [L]

T = Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses [T]

$$w = \frac{[h_{KOSTRA}(100)] - [h_{KOSTRA}(1)]}{\ln 100} \quad (4.25)$$

Für Belastungsniederschläge mit einer Jährlichkeit zwischen 100 a und 1000 a empfiehlt der Gewässerkundliche Landesdienst Thüringen (2005), die Niederschlagshöhe nach variiertes PEN-Methode zu berechnen, bei der w durch folgende Gleichung ermittelt wird:

$$w = \frac{[h_{KOSTRA}(100) \cdot 1,2] - [h_{KOSTRA}(1) \cdot 0,9]}{\ln 100} \quad (4.26)$$

Die Faktoren 1,2 bzw. 0,9, mit denen die Niederschlagshöhen nach KOSTRA für $T = 100$ a bzw. $T = 1$ a multipliziert werden, bewirken eine zusätzliche Erhöhung der Steigung der KOSTRA-Verteilungsfunktion. Daher führt dieser Ansatz zu relativ hohen Niederschlagswerten für $T = 200$ a (vgl. Tabelle 8.3 ff im Anhang). Die daraus resultierenden großen Unterschiede zwischen den Niederschlagshöhen für $T = 100$ a und $T = 200$ a sind kritisch zu betrachten, vor allem in Hinblick auf die Auswirkungen auf die modellierten Abflussganglinien.

4.3.3.2 Auswahl der Dauer der Belastungsniederschläge für die Modellanwendung

In Näherung kann als Faustregel gelten, dass bei gleicher Jährlichkeit der maßgebende, zum größten Abflussscheitel führende Niederschlag eine Dauer besitzt, die in etwa der Konzentrationszeit t_c im Einzugsgebiet entspricht (Lecher et al., 2001).

Die Konzentrationszeit t_c entspricht bei einem gleichmäßig überregneten Gebiet, in welchem alle Teilgebiete zum Abfluss beitragen, der Fließzeit die ein Wasserteilchen benötigt, um vom äußeren Punkt der Wasserscheide bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Sie entspricht der Zeitspanne vom Regenbeginn bis zu dem Zeitpunkt, zu welchem der gesamte effektive Niederschlag (= direkter Abfluss) den Gebietsauslass erreicht (Maniak, 2005).

Häufig wird für die kritische Regendauer folgende Bedingung angenommen:

$$t_c < D < 2 t_c \quad (4.27)$$

mit t_c = Konzentrationszeit [T]
 D = kritische Regendauer [T].

Zur Bestimmung der Konzentrationszeit wurden in diversen Untersuchungen empirische Gleichungen abgeleitet. Die gebräuchlichsten Formeln bauen auf der empirischen Näherungsgleichung nach Kirpich (1940) auf:

$$t_c = 0,0622 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (4.28)$$

mit L = größte Fließstrecke im Einzugsgebiet [L]
 S = mittlere Gefälle längs L [$L L^{-1}$].

Sifalda (1996) führt als charakteristische Fließzeit die Verzögerungszeit t_v („Lag Time“) an, die anhand eindeutiger Bezugspunkte in der Abflussganglinie bestimmt werden kann. Sie ist definiert als Zeitabstand zwischen dem Schwerpunkt des effektiven Regens und dem Gipfel der Abflussganglinie. Die gebräuchlichsten Formeln zur Bestimmung der Verzögerungszeit haben einen Aufbau wie die Formel nach Kirpich (Gl. 4.28). Die entsprechenden Beiwerte und Exponenten der Gleichung wurden aus der Regression von Messwerten ermittelt.

Bei einer Fließstrecke $L = 1909$ m und einem mittleren Fließgefälle $S = 6,8$ % beträgt die Konzentrationszeit für das Untersuchungsgebiet Henglarn nach Gleichung 4.28 18 Minuten.

Lacher (1982) merkt an, dass in der Praxis die Kirpich´sche Formel als brauchbar bestätigt wurde, das Fehlen des Einflusses der Niederschlagsintensität aus physikalischer Sicht allerdings ein Manko darstelle. Er empfiehlt daher vergleichende Untersuchungen auf der Basis von Natur- und Modellmessungen.

Da die empirischen Formeln zudem auf Parametern beruhen, die je nach Charakteristik des Einzugsgebiets sehr unterschiedlich sein können, ist eine Berechnung der Konzentrationszeit mithilfe dieser Methoden nicht pauschal gültig.

Da mit den in KINEROS2 aufgebauten Niederschlag-Abfluss-Modellen eine detaillierte Simulation von Starkregenereignissen in den Projektgebieten möglich ist, wurde die maßgebende Dauerstufe für alle Gebiete und die wesentlichen Jährlichkeiten mit KINEROS2 ermittelt. Für jede Jährlichkeit wurde die Dauerstufe mit dem größten Scheitelabfluss als maßgebend angenommen. Die mit Hilfe der PEN-Methodik abgeleiteten Extremwerte des Niederschlages wurden gleichermaßen bearbeitet.

4.3.3.3 Niederschlagsverteilung

Neben den Niederschlagshöhen und der Niederschlagsdauer hat auch die zeitliche Niederschlagsverteilung großen Einfluss auf die resultierende Abflussganglinie (DVWK, 1984). Im Allgemeinen können folgende Typen des Intensitätsverlauf unterschieden werden: Der Blockregen mit konstantem zeitlichen Intensitätsverlauf, sowie der Regen mit dem Intensitätsmaximum am Anfang, in der Mitte oder am Ende des Niederschlagsereignisses. Diese vier Fälle deuten die Vielfalt der natürlichen Regenverläufe nur an, in Wirklichkeit ist die Niederschlagsintensität ständigen zeitlichen Schwankungen unterworfen, die im Modell nur näherungsweise berücksichtigt werden können.

Ist die Niederschlagsmenge gleichmäßig über die Gesamtdauer D verteilt (Blockregen), resultieren daraus im Allgemeinen kleinere Scheitelabflüsse als aus anderen Intensitätsverläufen.

Nach DVWK (1984) kann ein hinsichtlich des höchsten Scheitelwerts oder der Fülle der Welle ungünstiger Regenverlauf durch Proberechnungen gefunden werden. Die genannten typischen Intensitätsverläufe sind in der Abbildung 4.32 gegenübergestellt.

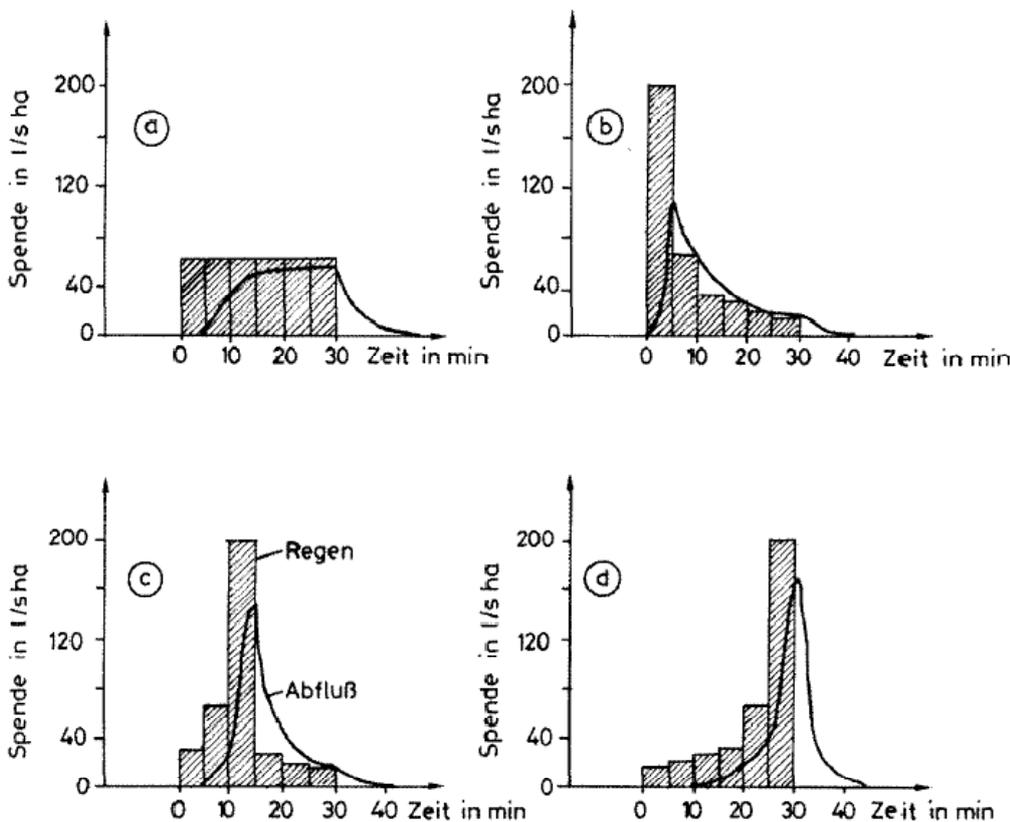


Abbildung 4.32: Einfluss der Intensitätsverteilung des Niederschlages auf den zeitlichen Verlauf der Abflussganglinie (Maniak, 2005)

Es ist zu erkennen, dass sich die modellierten Abflussganglinien bei anfangs-, end- und mittenbetontem Niederschlagsverlauf deutlich von der Abflussganglinie eines Blockregens unterscheiden. Der Abflussscheitel ist bei einem endbetonten Niederschlag i. A. am größten.

Die Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten (DVWK, 1984) empfiehlt einen Verlauf mit drei unterschiedlichen Intensitäten, entsprechend Abbildung 4.33. Die Ergebnisse von Proberechnungen verschiedener Untersuchungen kamen einem entsprechenden ungünstigen Regenverlauf qualitativ nahe. Dabei werden in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer 20 % der Gesamtniederschlagshöhe angesetzt, in den folgenden 20 % der Dauer 50 % des Gesamtniederschlags und in den restlichen 50 % die restlichen 30 % der Gesamtniederschlagshöhe.

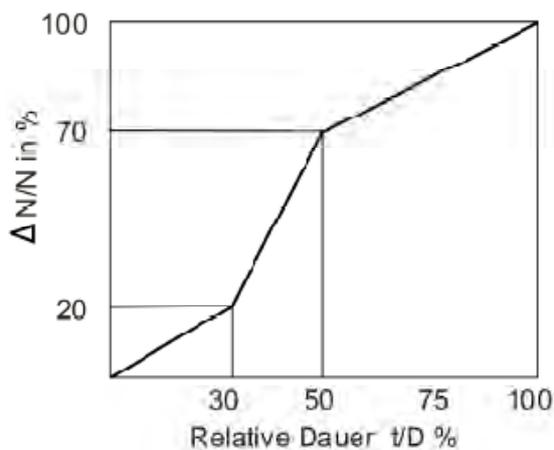


Abbildung 4.33: Empfohlener Niederschlagsverlauf (DVWK 1984)

Der Niederschlagsverlauf für die Modellanwendung wurde entsprechend der Abbildung 4.33 gewählt. Die betrachteten Niederschlagsdauern nach KOSTRA bzw. PEN wurden hierfür in äquidistante 5-Minuten-Intervalle unterteilt. Die ermittelten Bemessungsniederschläge wurden als Eingangsdaten für eine hydrologische Modellierung mit KINEROS2 verwendet.

Als Gebietsparameter wurden dieselben Werte zugrunde gelegt, wie sie in Kapitel 4.3.2.3 aufgeführt sind. Allerdings wurde für die Simulation von Bemessungsabflüssen eine geringere Anfangsbodenfeuchte von $pF = 1,8$ festgelegt, was einem Wassergehalt bei Feldkapazität entspricht.

4.3.3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die folgenden Abbildungen zeigen die Abflussganglinien am Gebietsauslass für alle drei Gebiete, die mit Niederschlägen unterschiedlicher Dauerstufe und Jährlichkeit modelliert wurden. Zum Vergleich ist das Ereignis von August 2007 ebenfalls enthalten. Es zeigt sich, dass die maßgebende Dauerstufe, welche durch Vergleichsrechnungen über alle Dauerstufen (siehe Anhang, Abbildung A.7ff) mit KINEROS2 simuliert wurden, nicht für alle Jährlichkeiten konstant ist. In Ahden ist bei den selteneren Ereignissen der 30-minütige DVWK-Regen maßgebend, während bei den Ereignissen größerer Überschreitungswahrscheinlichkeit die Dauerstufe von 60 Minuten relevant ist. Für das Gebiet

Henglarin liegt der entsprechende Wert, der Schätzung entsprechend, zwischen 45 und 60 Minuten. Hingegen ist im städtischen Einzugsgebiet von Delbrück die kürzere Dauer von 30 Minuten für alle untersuchten Jährlichkeiten maßgebend.

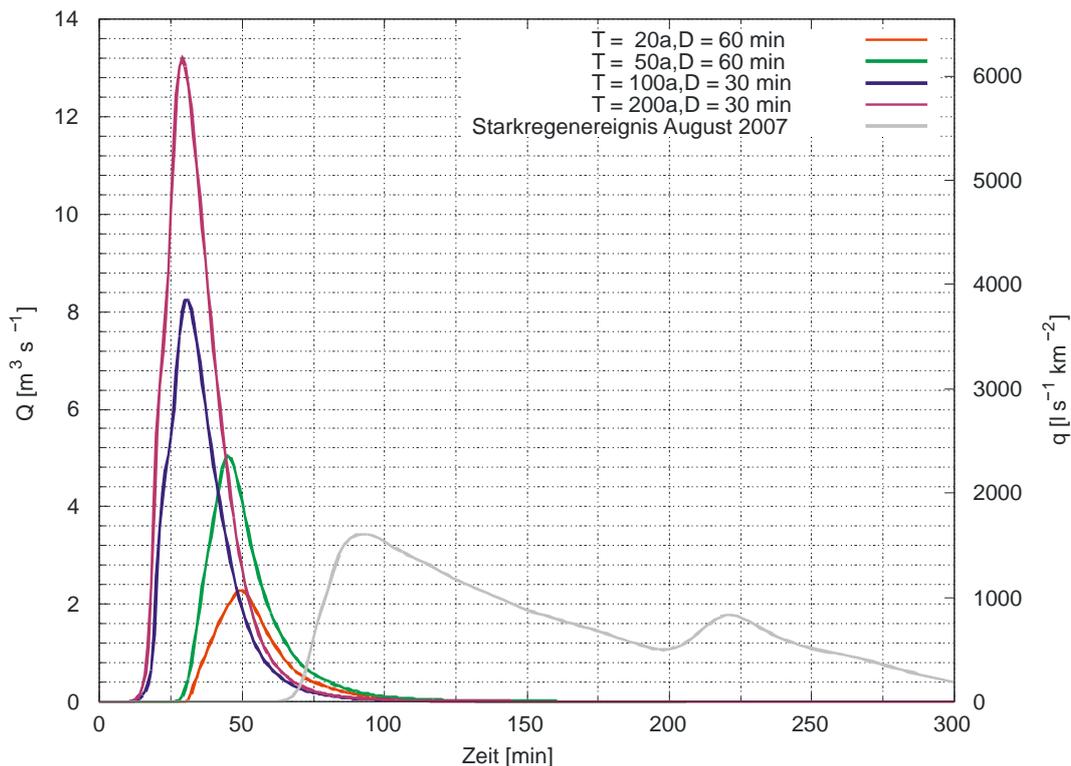


Abbildung 4.34: Abflussganglinien am Gebietsauslass in Ahden, modelliert mit Niederschlägen unterschiedlicher Dauer (D) und Jährlichkeit (T) nach KOSTRA-DWD-2000. Niederschlagsverlauf DVWK-verteilt.

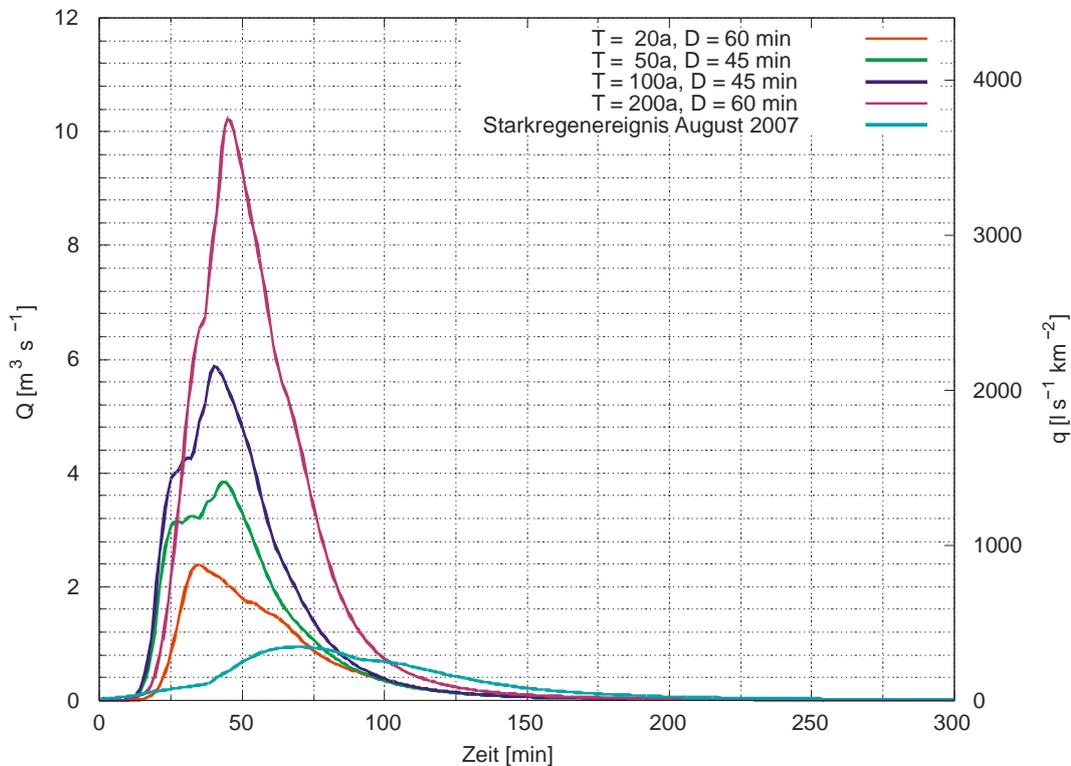


Abbildung 4.35: Abflussganglinien am Gebietsauslass in Henglarin

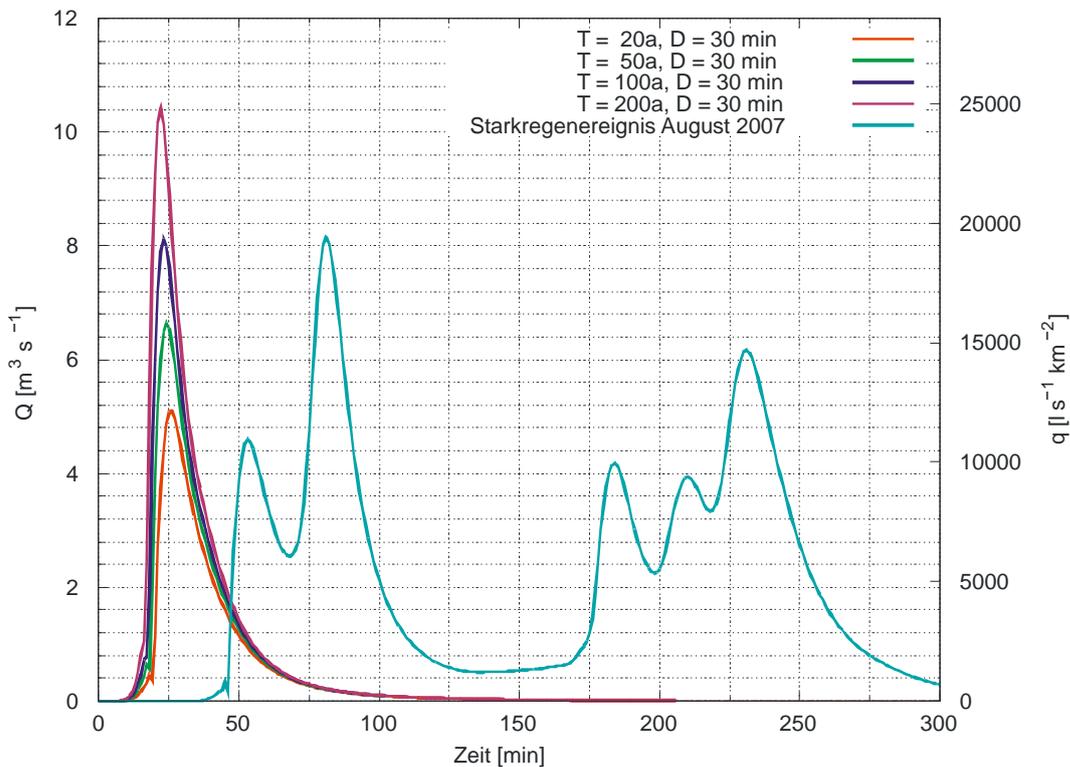


Abbildung 4.36: Abflussganglinien am Gebietsauslass in Delbrück

Auffällig ist, dass bei dem Niederschlagsereignis im August 2007, das den Überschwemmungen vorausging, deutlich geringere Niederschlagsmengen gefallen waren (ca. 30 mm (Ebbinghausen) bzw. ca. 40 mm (Büren) in 72 Stunden, vgl. Abbildung 4.26), als die nach KOSTRA-DWD-2000 ermittelten Extremniederschlagshöhen mit hohen Jährlichkeiten (vgl. Tabelle A.3ff). Die mit den Bemessungsniederschlägen nach KOSTRA-DWD-2000 modellierten Abflüsse sind daher teilweise deutlich größer als die Abflüsse in Ahden und Henglarn, die mit den Niederschlagsdaten des Ereignisses im August 2007 simuliert wurden. In Delbrück hingegen sind die Niederschlagsmengen des beobachteten Ereignisses größer als Werte ähnlicher Dauer der KOSTRA-Tabelle. Das beobachtete und die synthetischen Ereignisse weisen ähnliche Werte des Scheitelabflusses auf.

Dass ein Ereignis mit einer insgesamt relativ geringen Niederschlagshöhe überhaupt ein Hochwasser ausgelöst hat, wie es im Fall von Ahden und Henglarn beobachtet wurde, kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen entscheiden Gebietseigenschaften, Bewuchs und Vorfeuchte in einem Gebiet darüber, welche Arten von Extremniederschlägen in einem Gebiet extreme Hochwässer auslösen können. Die Diskrepanzen zwischen Niederschlags- und Hochwasserjährlichkeiten ergeben sich nach Niehoff (2001) vor allem aus vier Faktoren:

1. Der Witterungsverlauf vor dem Niederschlagsereignis, das dem Hochwasser unmittelbar vorausgeht, ist von entscheidender Bedeutung für die Hochwasserentstehung.
2. Die physiographischen Eigenschaften bestimmen maßgeblich, welche Typen von Niederschlägen (kurze oder lange Dauern) in einem Gebiet zu großen Hochwässern führen.
3. Eine großflächige Überregnung des Einzugsgebiets ist für die Hochwasserentstehung wichtig
4. Alle genannten Faktoren sind abhängig von der Größe des Einzugsgebiets.

Zum anderen ist fraglich, ob die Niederschlagsmessungen während des Ereignisses repräsentativ waren.

4.4 Hydraulische Simulation

Im Zuge der bisherigen Betrachtungen wurde die eindimensionale Ausbreitung des Oberflächenabflusses im Gelände untersucht. Dazu wurden GIS-Funktionen verwendet, welche auf Grundlage hochaufgelöster Geländemodelle die Fließwege bei Starkregen aufzeigen. Grundlage dieser Berechnungen sind Gefällegradienten sowie Einzugsgebietsflächen. Die eingesetzten geographischen und hydrologischen Verfahren liefern plausible Ergebnisse und können zur Lokalisierung von bei Starkregen betroffenen Gebieten dienen.

Sollen hingegen flächenhafte Aussagen über Wasserstände erfolgen, ist eine Anwendung dieser Ansätze nicht mehr ausreichend. Erst hydrodynamische Berechnungsansätze erlauben durch die Berücksichtigung von Massen-, Energie und Impulserhalt eine detaillierte Untersuchung des Abflussgeschehens. Anders als die einfacheren Geländeanalysen werden bei hydrodynamischen Simulationen deutlich höhere Anforderungen an die Eingangsdaten gestellt. Eine isolierte Betrachtung des Geländes ist nicht mehr ausreichend, wenngleich die Schwerkraft, deren Wirkung anhand des Geländemodells ermittelt werden kann, den wesentliche Wirkungsmechanismus beim Hangabfluss darstellt. Es werden weitere Informationen über die Geländebeschaffenheit sowie über Wassermengen benötigt. Letztere können anhand der bereits abgeleiteten Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modell) ermittelt werden. Anzumerken ist, dass es keine scharfe Trennlinie zwischen Niederschlag-Abfluss-Modellen und hydrodynamisch-begründeten Modellen zur Beschreibung des Abflussverlaufs auf dem Gelände bzw. in einem Gewässer gibt. Es gibt eine Reihe von N-A-Modellen, welche eine explizite Betrachtung des Oberflächenabflusses auf Grundlage eines Geländemodells mit reduzierten hydrodynamischen Ansätzen erlauben, so z.B. das Modell CASC2D (Julien et al., 1995), sowie dessen Weiterentwicklung GSSHA (Downer und Ogden, 2006) und das Rastermodul r.sim.water (SIMWE) in GRASS GIS (Mitasova et al., 2004).

4.4.1 Verwendete Modellsysteme

Im Rahmen der hydraulischen Untersuchungen kamen drei Modellsysteme zum Einsatz, welche jeweils über verschiedene Modellstrukturen und Eingangsdaten verfügen:

1. Hydro_as-2d (Nujic, 2003) ist ein zweidimensionales Strömungsmodell, welches zur Simulation von Überschwemmungsgebieten in Flusstälern und hochinstationären Dammbrechszszenarien entwickelt wurde. Die Abflüsse müssen extern berechnet und als Randbedingung vorgegeben werden.
2. Bei CASC2D (Julien et al., 1995) handelt es sich um N-A-Modell mit zweidimensionaler Beschreibung des Oberflächenabflusses im Gelände und eindimensionaler Beschreibung des Gerinneabflusses. Das Modell steht als Raster-Modul für das geographische Informationssystem GRASS zur Verfügung. Die Abflüsse werden intern berechnet.
3. Das Programm FloodArea ist eine Erweiterung für ArcView/ArcGIS zur Berechnung von Überschwemmungsgebieten auf Rasterkarten (geomer, 2005). Das Programm bietet dem Anwender mehrere Verfahren zur Ableitung von Überschwemmungsgebieten. Neben der Berechnung auf Grundlage bekannter Wasserstände entlang des Gewässerverlaufs können darüber hinaus auch Simulationen mit einem einfachen hydraulischen Verfahren durchgeführt werden. Zuflüsse müssen extern berechnet und als Randbedingung vorgegeben werden.

Die drei nachfolgend näher beschriebenen Programme werden repräsentativ für verschiedene Herangehensweisen bei der Berechnung von Wasserständen angewendet.

4.4.1.1 Hydro_as-2d

Das zweidimensionale Strömungsmodell Hydro_as-2d (Nujić, 2003) beschreibt die Strömungsvorgänge mit Hilfe der 2d-tiefengemittelten Flachwassergleichungen, demzufolge von einer hydrostatischen Druckverteilung ausgegangen wird. Die räumliche Gliederung bzw. Lösung des Systems partieller Differentialgleichungen erfolgt auf der Grundlage der Methode der finiten Volumen. Für die zeitliche Lösung der Differentialgleichungen kann je nach Anwendungsfall ein explizites Lösungsverfahren erster bzw. zweiter Ordnung (Runge-Kutta-Verfahren) gewählt werden. Während das erstgenannte Verfahren für stationäre oder quasi-stationäre Strömungssituationen relativ genaue Ergebnisse bei verkürzter Rechenzeit liefert, sollten instationäre Wellenabläufe nur mit dem Verfahren zweiter Ordnung berechnet werden (Nujić, 2003).

Im Gegensatz zur Finite-Differenzenmethode ist die hier eingesetzte Finite-Volumen-Methode nicht auf ein einheitliches Raster beschränkt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die besser mögliche Anpassung des Berechnungsgitters an das Gelände. Bruchkanten können damit lagegetreu erfasst werden, was nur sehr fein aufgelöste Rastergitter mit einheitlichen Abschnitten näherungsweise erlauben. Bereiche, welche einer Detailuntersuchung unterzogen werden sollen, können feiner abgebildet werden als die Randbereiche. So wird i.A. ein relativ feines Netz um Brücken und Wehre im Fluss bzw. um Häuser im Überschwemmungsgebiet erstellt. Damit die zeitliche Diskretisierung durch lokale Netzverfeinerungen nicht zu stark reduziert wird, was längere Berechnungsdauern zur Folge hätte, kann der Anwender eine minimale Flächengröße vorgeben (Präkonditionierung). Alle Flächen, welche kleiner als dieser Grenzwert sind, werden auf diesen Wert gesetzt.

Um stabile Ergebnisse zu erzielen, müssen bestimmte Bedingungen für die Netzerstellung eingehalten werden, für die Richtwerte angegeben werden (Nujić, 2003). Ein sog. „Quality Mesh“ enthält keine spitzen Dreiecke und nur geringe Flächenunterschiede benachbarter Dreiecke.

Das Netz kann durch Vermaschung von Punktdaten erzeugt werden. In den meisten Fällen ist eine detaillierte Nachbearbeitung des Netzes notwendig. Alternativ kann auch ein sog. Netzgenerator-Programm verwendet werden, welches auf Grundlage eines Raster-DGM, 3d-Polylinien (z.B. aus terrestrischem Aufmaß oder photogrammetrischer Auswertung) und aufbereiteten ALK-Daten² ein den genannten Anforderungen genügendes Netz erzeugt. Die automatische Ableitung von Bruchkanten aus hochauflösenden DGM bei gleichzeitiger Ausdünnung wird heutzutage bereits bei der Erstellung zweidimensionaler Strömungsmodelle angewandt (Michel, 2006). Randbedingungen wie Zuflüsse, Auslaufrandbedingungen oder Bauwerksstrukturen müssen nachträglich im Modell definiert werden. Die manuelle Netzerstellung sowie die Bearbeitung der Randbedingungen erfolgte in dieser

² *Automatisierte Liegenschaftskarte*

Untersuchung mit dem Programm „Surface Water Modeling System“ (SMS) der Firma EMS-I, South Jordan, Utah, USA.

Liegt die Bathymetrie von Gewässern nicht durch Echolotmessungen vor, wie es i.A. der Fall ist, müssen Punkte und Elemente zwischen Querprofilaufmessungen interpoliert werden. Dies kann mit der Software SMS abschnittsweise erfolgen. Es stehen mittlerweile auch halbautomatische Verfahren zur Verfügung, wie z.B. das Zusatzprogramm von Hydro_as-2d „Flussnetz-2d“.

Das Modell Hydro_as-2d wird vorzugsweise zur Berechnung von Überschwemmungsgebieten entlang von Flüssen sowie für Dambruchszenarien eingesetzt. Die bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung nutzt Hydro_as-2d zur Ermittlung von Überschwemmungsgebieten und zur Anpassung von Abflusskurven an Pegelmessstellen (Bleck et al., 2007).

Für die vorliegende Untersuchung wurde geprüft, ob die Anwendung des Modells bei Starkregenabfluss auf landwirtschaftlichen Flächen und in Siedlungsgebieten ohne ausgeprägte Gerinne zu plausiblen Wasserständen führt. Da es sich um ein rein hydraulisches Modell ohne die Möglichkeit der Betrachtung der Abflussbildung handelt, kann es nur in Kombination mit anderen Verfahren eingesetzt werden, so wie es beispielsweise bei dem BMBF-Projekt Urbane Sturzfluten „URBAS“ (Castro et al., 2008) erfolgte.

4.4.1.2 CASC2D

CASC2D ist ein flächendifferenziertes N-A-Modell, welches bereits in den 1990er Jahren entwickelt wurde (Julien et al., 1995) und als Zusatzmodul für das geographische Informationssystem GRASS zur Verfügung steht. Es kann kostenfrei bezogen werden.

Als Elementarfläche werden Rasterzellen einheitlicher Kantenlänge verarbeitet. Einzelne Teilprozesse werden für jede Rasterzelle berechnet. Die Infiltration wird mit dem Green-Ampt-Ansatz berechnet. Der damit errechnete Effektivniederschlag der Rasterzellen ist zugleich Quellterm des zweidimensionalen Oberflächenabflussmodells. Dieses Strömungsmodell berücksichtigt die Strömung in Richtung der vier adjazenten Rasterzellen auf Grundlage des Diffusionswellenansatzes.

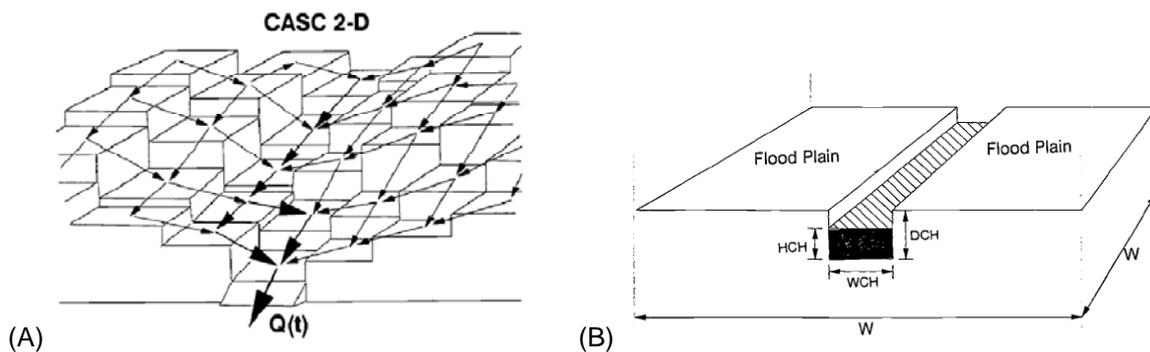


Abbildung 4.37: (A) Landoberflächen- und (B) Gerinneabfluss in CASC2D (Julien et al., 1995)

Optional kann der Benutzer die Simulation des Gerinneabflusses durch ein eindimensionales Modell durchführen lassen. Dieses Modell wird mit dem 2d-Oberflächenabflussmodell direkt gekoppelt. Der Wellenablauf in Gräben, Bächen und Flüssen kann durch eine Näherung der Querschnittsfläche als Rechteck realistischer abgebildet werden. Anzumerken ist, dass nur der Landoberflächenabfluss berechnet wird. Eine Berücksichtigung des Zwischenabflusses (oder Interflow) ist nicht möglich.

Das Modell kann direkt die im GIS zur Verfügung stehenden Daten verarbeiten, eine Konvertierung oder ein Export der Daten ist nicht notwendig. Vom Anwender können Niederschlagszeitreihen vorgegeben werden. Anhand der Stationskoordinaten erfolgt eine Berechnung des Gebietsniederschlags mit Hilfe der Verfahren IDW (Inverse Distance Weight) oder Thiessen-Polygone.

Die numerische Lösung erfolgt mit einem expliziten Verfahren erster Ordnung. Eine dynamische Anpassung des Zeitschrittes erfolgt nicht. Ein fester Zeitschritt muss vom Anwender vorgegeben werden. Eine einfache Wasserstands-Durchfluss-Beziehung wird zur Ableitung des Volumenstroms herangezogen. Der Diffusionswellenansatz berücksichtigt dabei einen instationären, ungleichförmigen Durchflussprozess. Gegenüber dem vollständigen Wellenansatz, wie er z.B. in Hydro_as-2d implementiert ist, sind hier die Beschleunigungsterme (lokal und konvektiv) vernachlässigt, eine Vereinfachung die bei der Betrachtung des Oberflächenabflusses häufig in Kauf genommen wird.

Da dieses Programm nicht Bestandteil von GRASS ist, muss es als Add-on separat bezogen werden³. Dieses Add-on ließ sich unter dem Betriebssystem Windows mit dem Compiler MinGW in einer MSYS-Umgebung und dem GRASS-Quelltext kompilieren.

4.4.1.3 FloodArea

Das Programm FloodArea (geomer GmbH, Ruiz Rodriguez + Zeisler GbR) ist kein eigenständiges Programm, sondern ein Modul für ArcView 3.x sowie ArcGIS 9.x. Auf der Basis eines Raster-DGM können Überschwemmungsgebiete mit einer der drei folgenden Methoden ermittelt werden:

1. Methode Wasserstand – Es wird davon ausgegangen, dass die Wasserspiegellagen eines Gewässers bekannt sind. Dazu müssen Wasserstände entlang eines Fließgewässerabschnittes vorgegeben werden.
2. Methode Zuflussganglinie – Der Benutzer kann bei dieser Variante an einer oder mehreren Punkten eine Ganglinie als Zufluss vorgeben.
3. Methode Beregnung – Anders als bei der punktuellen Methode der punktuellen Zuflüsse wird bei der Beregnung von einer Niederschlagsganglinie ausgegangen.

Für die vorliegende Untersuchung ist insbesondere die 3. Methode von Interesse. Diese Berechnungsmethode geht, wie auch die Zuflussmethode, von einem einfachen hydraulischen Ansatz aus. Das Abflussvolumen zwischen zwei benachbarten Zellen wird mit dem Ansatz nach Manning-Strickler aus der Wasserstandsdifferenz berechnet. Um eine konvergierende Lösung zu erhalten, erfolgt eine dynamische Anpassung des Iterationszeitschrittes (geomer, 2005).

Die Bilanzierung der Rasterzellen erfolgt in 8 Richtungen, wobei der tatsächlich längere Fließweg in diagonalen Richtungen berücksichtigt wird. Wie in der nachstehenden Abbildung gezeigt, werden einzelne Zellen als Achtecke betrachtet, sodass der Fließquerschnitt zu allen adjazenten Zellen identisch ist.

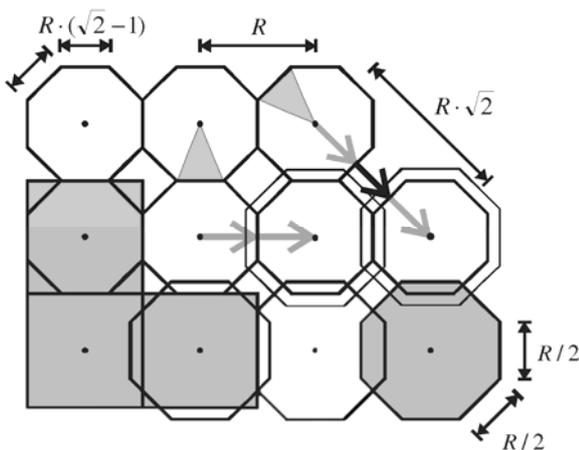


Abbildung 4.38: Volumenbilanzierung auf Raster-DGM-Basis mit FloodArea (geomer, 2005)

³ Das Hauptprogramm sowie zusätzliche Module sind unter der Webseite <http://www.grass.itc.it> erhältlich (Stand: Mai 2009)

4.4.1.4 Vergleich der Modelle

Die beschriebenen Modelle verwenden unterschiedliche Berechnungsansätze und sind prinzipiell für unterschiedliche Fragestellungen entwickelt worden. Die Tabelle 4.8 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die wesentlichen Merkmale der Modelle.

Tabelle 4.8: Vergleich der verwendeten Modelle

	Beschreibung	DGM	Gleichungssystem	Vereinfachung
Hydro_as-2d	<i>2d-Strömungsmodell;</i> Berechnung von Überschwemmungsgebieten, Nachrechnung von hydraulischen Modellversuchen (<u>Hydraulik</u>)	TIN	2d-Flachwasser-gleichung (dynamischer Wellenansatz)	vollständiges Gleichungssystem
CASC2D	<i>Flächendifferenziertes Niederschlag-Abfluss-Modell;</i> Detailbetrachtung des Oberflächenabflusses kleiner Einzugsgebiete (<u>Hydrologie und Hydraulik</u>)	Raster	Diffusionswellenansatz	ohne Trägheit und Beschleunigung
FloodArea	<i>Modell zur Berechnung von Überschwemmungsbereichen</i> (<u>Hydraulik</u>)	Raster	kinematischer Wellenansatz	ohne Trägheit, Beschleunigung und Druckgradient

Als maßgebende Modellcharakteristika – sowohl für die Bearbeitung, den Zeitaufwand, sowie die Ergebnisse – sind die räumliche Diskretisierung (Datentyp des DGM) sowie das verwendete Gleichungssystem einschließlich dessen Vereinfachung gegenüber dem dynamischen Wellenansatz vergleichend hervorgehoben.

Die räumliche Diskretisierung erfolgt bei Hydro_as-2d in Form eines unregelmäßigen Dreiecksnetzes, während die übrigen Modelle Rasterdaten verarbeiten. Hydro_as-2d weist durch die Berücksichtigung des vollständigen Wellenansatzes den höchsten Grad der Prozessbeschreibung der gegenübergestellten Modelle auf. CASC2D berücksichtigt demgegenüber die lokale und konvektive Beschleunigung nicht. Diese Vernachlässigung wirkt sich insbesondere bei komplexen Strömungssituationen, wie etwa Fließquerschnittseinschnürungen vor Brücken aus. Gegenüber dem kinematischen Wellenansatz können jedoch Rückstausituationen mit allmählichen Veränderungen berücksichtigt werden.

In der aufgelisteten Reihenfolge nehmen die Anforderungen an die Eingangsdaten und die Bearbeitung, gemäß den obigen Ausführungen, ab. Während mit FloodArea mit relativ wenig Arbeitsaufwand mit Hilfe eines DGM ein Überschwemmungsgebiet ermittelt werden kann, bedarf es

bei Hydro_as-2d einer detaillierteren Aufbereitung und Prüfung der Eingangsdaten. Inwieweit die Verwendung detaillierter Ansätze erforderlich und sinnvoll ist bzw. ob eine einfache Betrachtung zweckdienlich ist, soll in den kommenden Abschnitten skizziert werden. Dabei werden auch die erforderlichen Arbeitsschritte für die einzelnen Verfahren kurz erläutert.

4.4.2 Datenaufbereitung

Wie aus den Ausführungen des vorherigen Abschnittes hervorgeht, differieren die Anforderungen der Modelle an die Eingangsdaten. Ein digitales Geländemodell ist grundlegend für die Berechnungen. FloodArea und CASC2D können durch die direkte GIS-Anbindung direkt auf die entsprechenden Höhendaten zurückgreifen. Bei Hydro_as-2d ist hingegen eine gesonderte Datenaufbereitung erforderlich. Darüber hinaus benötigen die Modelle weitere räumliche Daten zur Beschreibung der Oberflächenrauigkeit. CASC2D benötigt darüber hinaus zahlreiche weitere Daten zur Parametrisierung der Abflussbildung. Bei der rein hydraulischen Modellierung in FloodArea und Hydro_as-2d sind im Gegenzug detaillierte Angaben zu Anfangs- bzw. Randbedingungen vorzugeben.

4.4.2.1 Optionale Ausdünnung von Rasterdaten

Die fortschreitende Bereitstellung von Laserscan-Daten erlaubt zunehmend die Berücksichtigung von kleinräumigen Geländesprüngen, wie beispielsweise die Auflösung von Straßen- oder Bahndämmen. Auf der anderen Seite müssen enorm große Datenmengen mit hohem Zeitaufwand verarbeitet werden. Es ist daher häufig sinnvoll, das vorhandene Geländemodell unter Beibehaltung von markanten Geländesprüngen um einen Faktor auszudünnen. Dieser Faktor ist meist iterativ zu ermitteln durch Ergebnisvergleiche mit dem detaillierten Ursprungsmodell und dem ausgedünnten Modell. Im Ergebnis erhält man ein Geländemodell, welches zwar ein vorgegebenes Grundraster enthält, aber dennoch wegen den zu erhaltenden Umbruch- und Extrempunkten einen unregelmäßigen Punktabstand aufweist. Diese nun unregelmäßigen Daten sollten bei der Geodatenverarbeitung nicht mit einem einheitlichen Raster weiterverarbeitet werden.

Die nachstehende Abbildung zeigt die Ausdünnung um einen Faktor von fünf bei Gleichzeitiger Erhaltung wesentlicher Geländepunkte. Ein Grundraster ist erkennbar, wobei Zwischenpunkte enthalten sein können. Es erfolgt keine Interpolation von Zwischenpunkten zur Wahrung der Netzqualität, sodass ggf. eine Nachbearbeitung erforderlich ist.

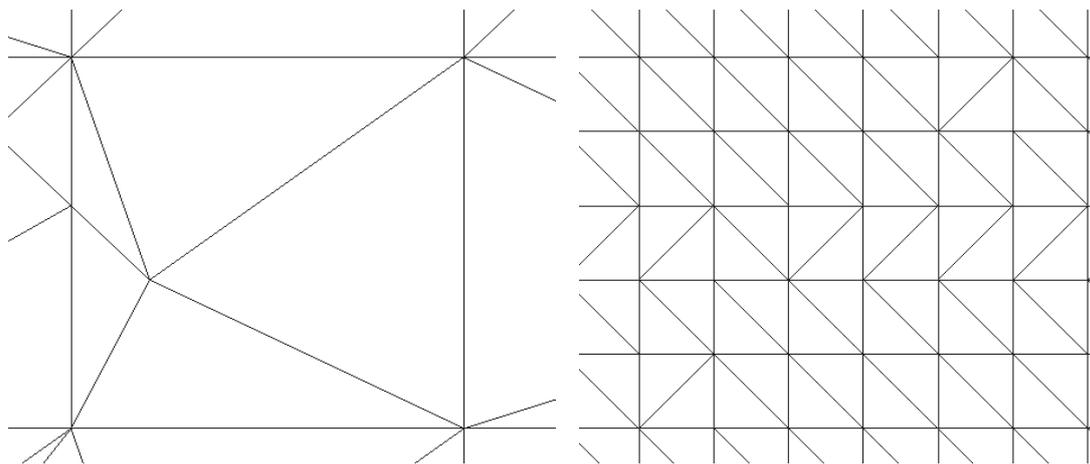


Abbildung 4.39: Funktionsweise des Hydro_as-2d-Hilfsprogramms "Ausdünnen", gezeigt ist ein trianguliertes Gitter

4.4.2.2 Vorbereiten eines Berechnungsnetzes

Die zweidimensionale Strömungsmodellierung mit Hydro_as-2d setzt ein unregelmäßiges Dreiecksnetz voraus, wobei die Unregelmäßigkeit nicht zwingend zu erfüllen ist. Sie bietet dem Bearbeiter im Wesentlichen die Möglichkeit von der üblichen Vorgabe eines Rasters mit einheitlichen Abständen abzuweichen, um den Geländeverlauf frei von Zwangspunkten eines Rasters abzubilden. Im einfachsten Fall kann ein Raster-DGM übernommen werden und automatisiert vermascht werden. Die einzelnen Knoten, welche den Rasterzellen des ursprünglichen DGM entsprechen, werden dann automatisch trianguliert, wie es die Abbildung 4.39 zeigt. Im Ergebnis erhält man ein Gitter regelmäßiger Dreiecke. Stocker und Schwaller (2003) sowie EMS-I (2005) empfehlen zur Optimierung des Berechnungsnetzes und zur Erhöhung der numerischen Stabilität die Dreiecke zu Vierecken zusammenzufügen. Dieser Bearbeitungsschritt kann mit Hilfe der Software SMS automatisch durchgeführt werden.

Der Aufwand für die Netzerstellung steigt erheblich an, sofern man Gewässer, Nutzungsgrenzen, oder nicht durchfließbare Gebäude berücksichtigen möchte. Es empfiehlt sich daher, die Nutzung eines Netzgenerators in Betracht zu ziehen. Damit kann bei gleichzeitiger Ausdünnung des Geländemodells ein für die numerische Modellierung geeignetes Netz unter Berücksichtigung von Nutzungsgrenzen, Gebäuden im Überschwemmungsbereich sowie separaten Netzteilen, wie z.B. ein Gewässerabschnitt, nahezu automatisiert erzeugt werden. Mit dem Programm Laser_as-2d lässt sich beispielsweise die Punktzahl eines Laserscan-DGM laut Hersteller auf unter 10% reduzieren (Nujić, 2006). Der Verlauf der Bruchkanten werde darüber hinaus durch eine geeignete Approximation realistischer abgebildet als durch die Verwendung der ursprünglichen Punkte.

Liegt kein Netzgenerator vor, so können Umgrenzungen von Gebäuden oder Nutzungsgrenzen in ein trianguliertes Gitter durch Interpolation ergänzt werden. Da die Triangulation (ohne Netzgenerator) im einfachsten Fall nach der Delaunay-Methode erfolgt, sind Korrekturen am Netz erforderlich. Die am häufigsten auftretenden Probleme liegen in den quer zu Bruchkanten liegenden Dreieckskanten begründet. Zudem kann die für die numerische Modellierung erforderliche Netzqualität nicht gewährleistet werden.

Die beschriebene Verfeinerung des Modellnetzes zur Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Detailgrade auf die berechneten Wasserstände wurde für das Stadtgebiet von Delbrück durchgeführt. Die Abbildung 4.40 veranschaulicht die Arbeitsschritte. Dem bestehenden Berechnungsnetz (B) wurden zunächst die Nutzungsgrenzen Straße/Bebauung hinzugefügt (C). In einem letzten Schritt erfolgte eine Netzverfeinerung einschließlich der Berücksichtigung von Gebäuden (D). Die Umgrenzungen der Gebäude sind als Ränder (kein Volumenstrom über den Rand) definiert worden.

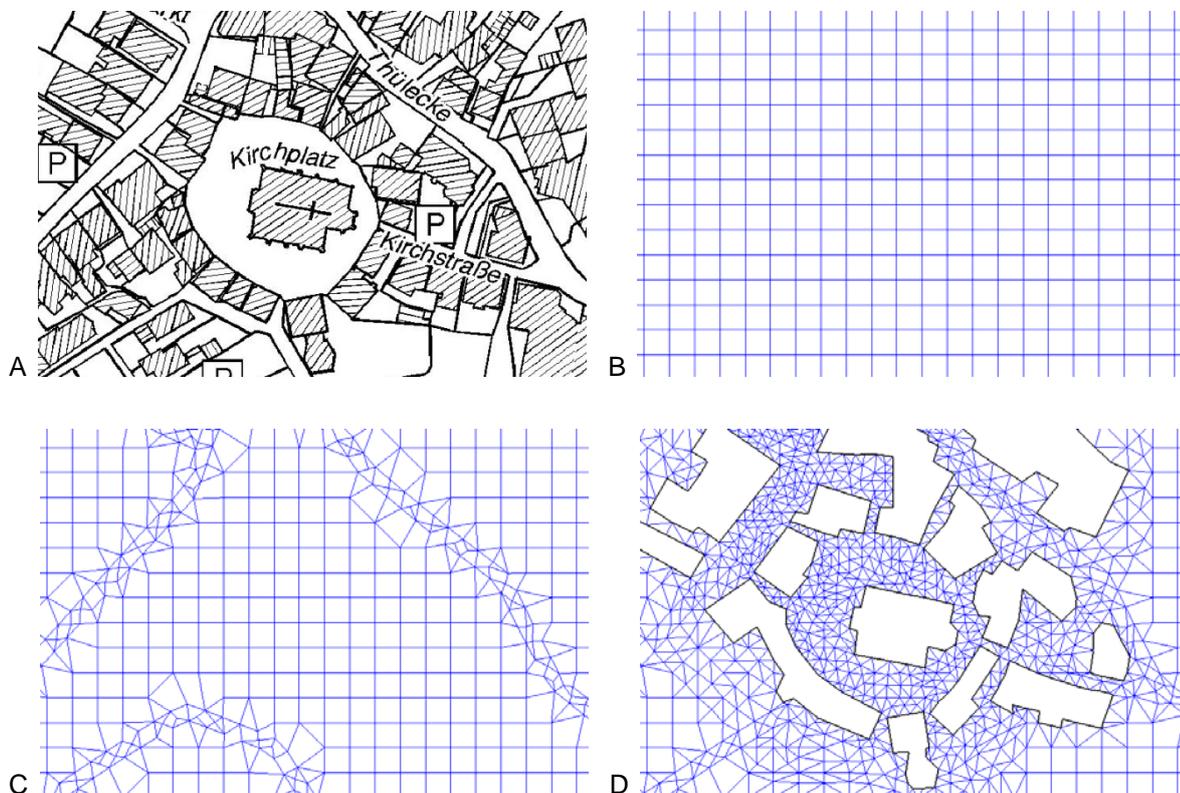


Abbildung 4.40: Verfeinerung des Ausgangsgitters in der Innenstadt von Delbrück.

(A) Ausschnitt DGK5, (B) zu Vierecken vermaschtes DGM5, (C) Nachbildung des Verlaufes von Hauptstraßen zur Berücksichtigung verschiedener Rauigkeitsbeiwerte, (D) stark verfeinertes Berechnungsgitter mit nicht durchfließbaren Gebäuden als Modellränder.

Die Übernahme von Gebäudeumrissen erforderte eine Verfeinerung des Modellnetzes, um Defizite hinsichtlich der Netzqualität zu vermeiden. Die Höhenwerte der dem Netz hinzugefügten Punkte wurden durch Interpolation erhalten.

Eine Unterteilung des Gebietes in Rauigkeitsklassen kann automatisch erfolgen, sofern die unterschiedlichen Nutzungen digital in Form von Polygonen vorliegen. Jeder Nutzungsklasse kann abschließend ein Rauigkeitsbeiwert zugewiesen werden. Für die Einteilung können beispielsweise ATKIS⁴-Daten herangezogen werden. Damit ist eine großflächige Zuweisung möglich. Allerdings

⁴ Amtliches Topographisch-Kartographische Informationssystem

stellen diese Daten eine Generalisierung von ALK-Daten dar, d.h. einzelne Straßenzüge und Gebäude sind darin nicht aufgelöst. Im Überschwemmungsbereich sind hingegen Detailfragestellungen zu untersuchen, was eine Nachbearbeitung des Modellnetzes unter Zuhilfenahme von ALK-Daten oder Orthophotos erfordert. Im Falle einer photogrammetrischen Auswertung liegen Nutzungsgrenzen im gewünschten Detailgrad idealerweise vor.

Bei den rein rasterorientierten Berechnungsverfahren von CASC2D und FloodArea ist eine ähnlich aufwendige Datenaufbereitung nicht erforderlich. Im Allgemeinen kann das Original-DGM als Berechnungsgrundlage verwendet werden. Die Zuweisung von Rauigkeitsbeiwerten ist bei diesen Verfahren an die festen Abstände des Rasters gebunden. Eine Berücksichtigung von Nutzungsgrenzen ist nur entlang von Rasterkanten möglich und damit weniger flexibel als bei einem TIN.

4.4.3 Schnittstelle zwischen Abflussberechnung und Wasserstandsberechnung

Wie bereits beschrieben entfällt die Erarbeitung einer Schnittstelle bei CASC2D, da das Modell sowohl die Niederschlagsbildung als auch die Abflussbildung und die Abflusskonzentration im gewünschten Abstraktionsgrad berechnet.

Eine gesonderte Betrachtung gilt hingegen bei den Modellen Hydro_as-2d und FloodArea. Diese Modelle müssen mit Zuflussmengen als Randbedingungen parametrisiert werden. I.A. gibt man Zeitreihen des Abflusses vor. Bei FloodArea kann auch eine „Beregnung“ des Untersuchungsgebietes vorgegeben werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass diese „Beregnung“ anwenderseitig als Effektivniederschlag vorgegeben werden muss, da FloodArea keine Infiltration berechnet.

Bei Hydro_as-2d können die Zuflüsse durch Zuflussrandbedingungen (Zeitreihen) oder durch die Vergabe eines Wasserstandes zu Beginn der Simulation (Anfangsbedingung) vorgegeben werden, wobei auch eine Kombination der genannten Vorgehensweisen möglich ist.

Im Projekt „URBAS“ (Castro et al., 2008) wurde das Programm Hydro_as-2d zur Simulation des Oberflächenabflusses in Stadtgebieten eingesetzt. Es wurden diese zwei o.g. Varianten zur Parametrisierung der Zuflüsse verwendet. Aus vorhergehenden Kanalnetzsimulationen wurden Durchflussganglinien von Schächten mit Überstau als Zuflüsse im Modellnetz definiert. Neben dieser Vorgehensweise wurden Effektivniederschlagshöhen als Anfangswasserstände vorgegeben. Nach einer Simulationszeit von fünf Minuten wurde das Modell angehalten und zu den berechneten Wasserständen wurden die Effektivniederschlagshöhen des nächsten Zeitschrittes addiert usw. Eine abschließende Bewertung, welche der genannten Methoden geeigneter für die Berechnung von Überschwemmungen in Städten ist, liegt nicht vor. Aspekte der numerischen Stabilität sind ebenfalls nicht Gegenstand der Auswertung des Projekts URBAS.

In der vorliegenden Untersuchung wurden für die Modelle Hydro_as-2d und FloodArea die Abflüsse geeigneter KINEROS2-Elemente lagerecht als Randbedingungen vorgegeben.

4.4.4 Modellanwendung

Es wurde angestrebt, möglichst alle Verfahren für die drei Untersuchungsgebiete gleichermaßen anzuwenden. Es zeigten sich jedoch Einschränkungen bei der Anwendbarkeit der Verfahren, welche Teils in der Methodik selbst, in den vorliegenden Eingangsdaten oder in einer Kombination aus beidem begründet liegen.

4.4.4.1 Hydro_as-2d

Für alle drei Untersuchungsgebiete wurde ein Berechnungsnetz auf Grundlage der vorhandenen Raster-Geländemodelle erstellt. Wie es aus der Tabelle 4.3 auf Seite 59 ersichtlich ist, liegen keine einheitlichen Daten für die Gebiete vor. Für das Gebiet Ahden ergeben sich durch das DGM2 (2 m) große Datenmengen. Daher wurde das Netz um den Faktor 5 (10 m) unter Beibehaltung markanter Geländepunkte ausgedünnt und es wurden die berechneten Wasserstände verglichen. Bei beiden Modellen wurden in den Bereichen Flughafenstraße und Kötterweg jeweils $4 \text{ m}^3/\text{s}$ stationär als Zuflussrandbedingung vorgegeben (Simulationszeitraum 2h). Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse bei rein visueller Betrachtung weitestgehend übereinstimmen. Um die Abweichungen quantitativ einschätzen zu können, wurden die Wassertiefen, welche auf Grundlage des ausgedünnten DGM ermittelt worden sind, von denen des Original-DGM subtrahiert. Die errechneten Differenzen sind in Form eines Histogramms in der Abbildung 4.41 veranschaulicht. Die Verwendung des modifizierten (ausgedünnten) Geländemodells liefert bei sonst gleichen Randbedingungen etwas höhere Wasserstände, da rund 50 % der benetzten Knotenpunkte zwischen $-0,1 \text{ m}$ und $0,0 \text{ m}$ liegen. Rund 90 % aller unter Wasser stehender Knoten weisen eine absolute Abweichung von weniger als 10 cm auf.

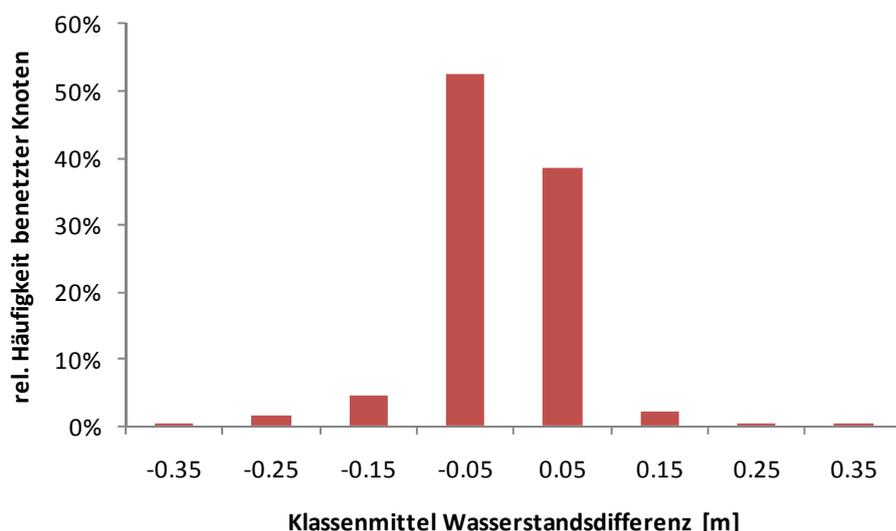


Abbildung 4.41: Histogramm der Abweichungen der berechneten Wassertiefen Original-DGM - ausgedünntes DGM

Auf Grundlage des ausgedünnten DGM liegt die Berechnungsdauer bei einem Viertel der Zeit des Original-Datensatzes.

In den Gebieten Delbrück und Henglar lag kein DGM2 für die Bearbeitung vor. Hier offenbarten sich zum Teil numerische Schwierigkeiten bei der Simulation mit einem 10 m-Raster. In Henglar stellten sich sehr niedrige Wassertiefen unter 5 cm ein. Die in Abbildung 4.42 gezeigte Wasserspiegellage des August-2007-Ereignisses in Henglar weist nur für den westlichen (Siebental, KINEROS2-Knoten 222 mit 655 l/s, vergleiche Abbildung 4.23, S. 76) der beiden Zuflüsse ein plausibles Ergebnis auf. Der östliche Zufluss (Knoten 211 mit 99 l/s) wird nur zum Teil berechnet. Wegen der geringen Wassermengen und der groben Gitterweite wird kein Wasserspiegel berechnet (Wassertiefe 0). Bei der Ausgabe der Abflussmengen traten Oszillationen in den Zeitreihen auf (Abbildung 4.43). Damit bestätigen sich die in der Literatur beschriebenen Instabilitäten bei der Berechnung im Übergangsbereich trockener und unter Wasser stehender Knoten (Nujic 2003).

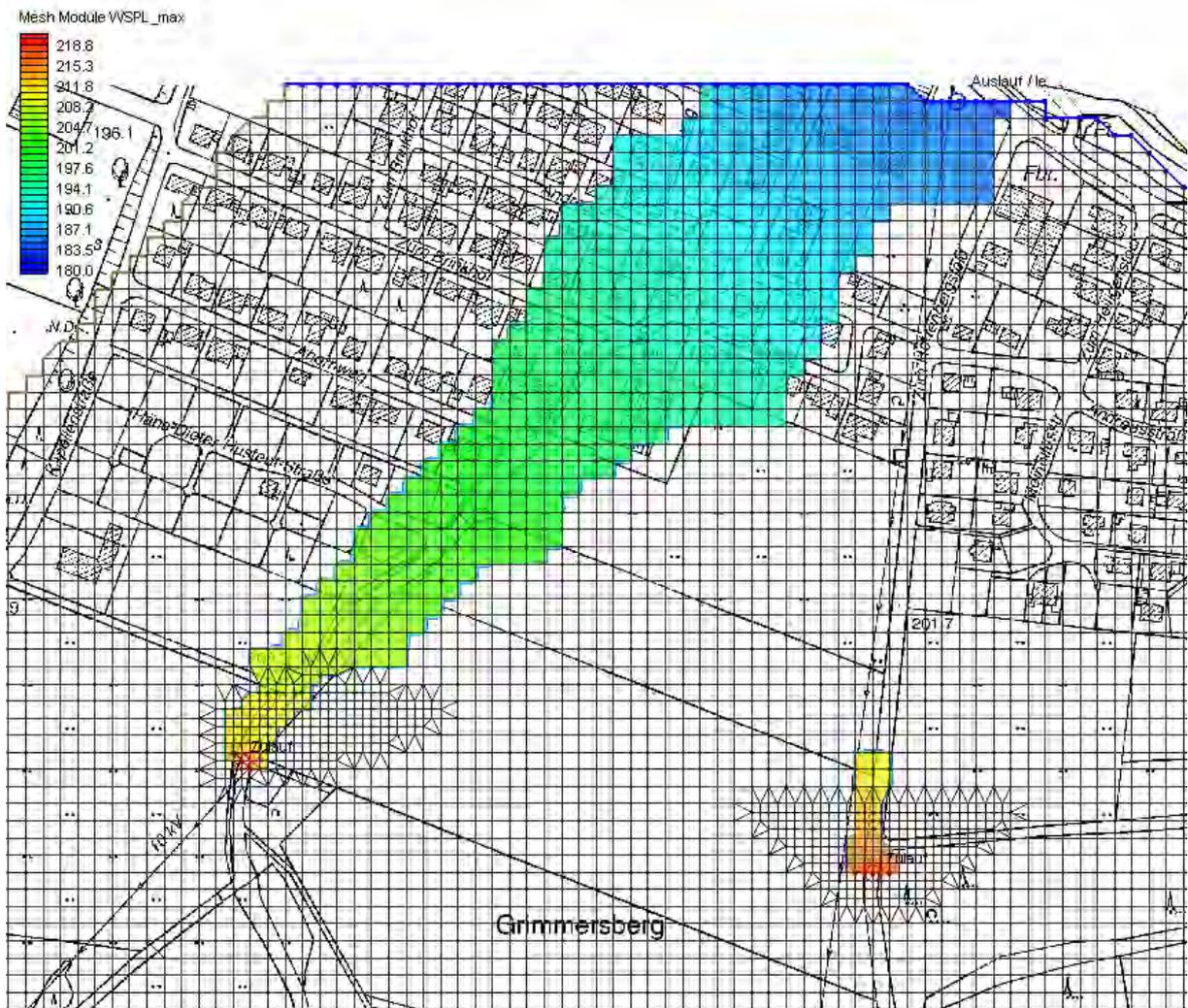


Abbildung 4.42: Berechnete Wasserspiegellage in Henglar (DGM5)

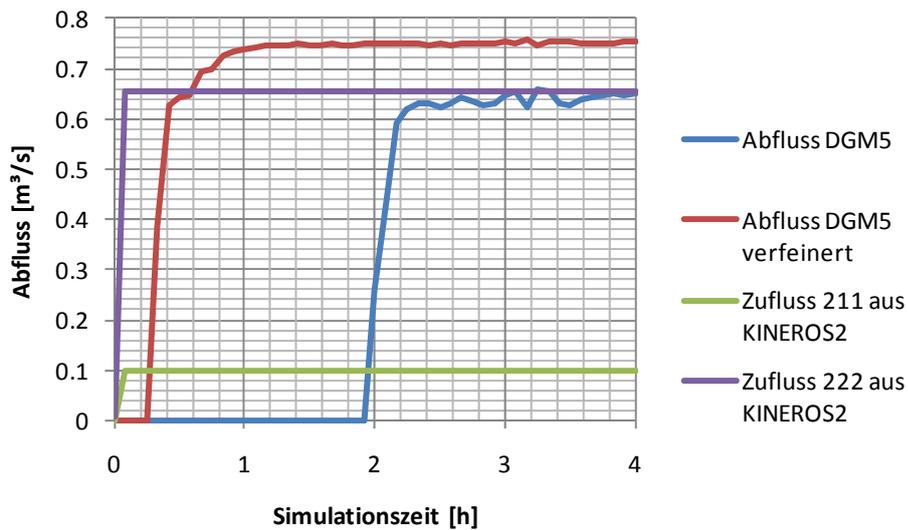


Abbildung 4.43: Abfluss über den Modellrand (untere Randbedingung) in Henglarn

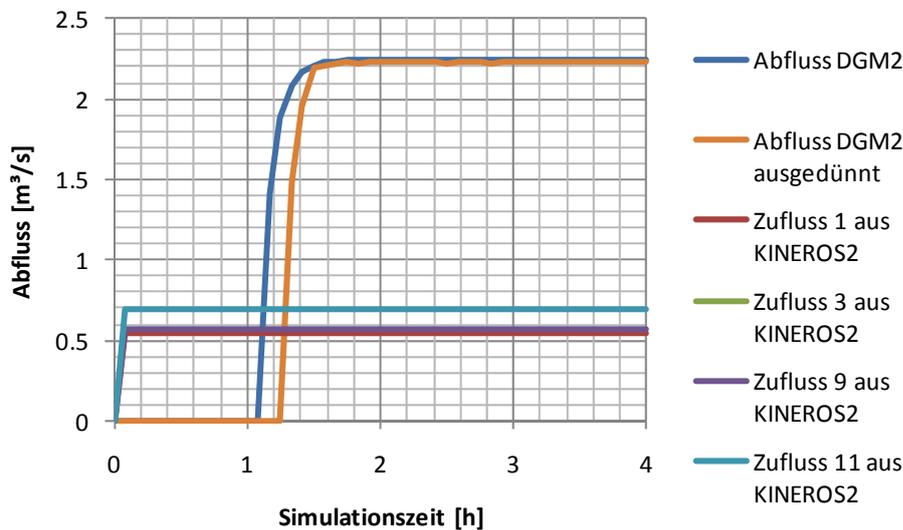


Abbildung 4.44: Abfluss über den Modellrand (untere Randbedingung) in Ahden

Die in der Abbildung 4.43 gegenübergestellten Ganglinien verdeutlichen den Einfluss der Punktdichte des Eingangsgitters. Da Raum- und Zeitschritt eng miteinander verknüpft sind (Courant-Friedrichs-Lewis-Kriterium), hat die Elementgröße einen maßgebenden Einfluss auf die Güte der Simulation. Neben den stationären Zuflüssen aus KINEROS2 sind die Modellausgabe des Original-DGM sowie die berechnete Zeitreihe eines durch Interpolation stark verfeinerten Berechnungsnetzes mit einem festen Punktabstand von 1,25 m dargestellt.

Die Verwendung des Original-Datensatzes führt zu unbrauchbaren Ergebnissen, wie es bereits anhand der Beschreibung der berechneten Wasserstände angedeutet wurde. In diesem Fall kann der Zufluss 211 zur Wahrung der numerischen Stabilität als Randbedingung vom Modell nicht eingehalten werden, sodass das Zuflussvolumen geringer ist als vorgegeben. Daher entspricht auch der berechnete Abfluss nur dem Zufluss 222. Gegenüber der verfeinerten Variante wird auch dieser Zufluss zu Beginn der Simulation nicht korrekt vom Modell übernommen, was sich am relativ späten

Anstieg der Ganglinie erkennen lässt. Verglichen mit dem feineren Berechnungsnetz neigt das Modell trotz Erreichens eines stationären Zustandes zu Oszillationen.

In Ahden konnten, wie man anhand der Ganglinien in Abbildung 4.44 erkennt, stabilere Ergebnisse erzielt werden. Die Ausdünnung des Berechnungsnetzes erwies sich hier kaum von Nachteil. Der leichte Zeitversatz kann auch in der Präkonditionierung begründet liegen. Aus den Erkenntnissen der Berechnungen für Henglar und Ahden wird deutlich, dass bei relativ geringen Zuflüssen nur mit einem Berechnungsnetz mit kleinen Raum- und damit auch kleinen Zeitschritten belastbare Ergebnisse erzielt werden können.

Ein ähnliches Modellverhalten konnte auch im Zuge der Simulationen für Delbrück⁵ beobachtet werden. Die höhere Niederschlagsbelastung beim Ereignis von August 2007 in Delbrück hat höhere Wasserstände zu Folge und erwies sich als numerisch günstiger. Ohne lokale Verfeinerungen ergaben sich aber auch für Delbrück Probleme bei der Simulation. Das stark verfeinerte Netz mit Straßen und Gebäuden erwies sich hingegen als relativ stabil hinsichtlich der Numerik und der Ergebnisse.

Wegen der genannten Einschränkungen bei den Berechnungen, wurde beschlossen, die Ergebnisse für Henglar nicht weiter zu verwerten. Als problematisch stellte sich beim Modell von Henglar heraus, dass das DGM in der Ortslage endet. Die Auslaufrandbedingung liegt also im Bereich der zu untersuchenden Bereiche. Folglich ist der Einfluss der Randbedingung, deren Parametrisierung (Wasserspiegellagengefälle) nur geschätzt werden konnte, besonders hoch. An den Zulauf- und Auslaufrandbedingungen werden in Hydro_as-2d keine Schubspannungen berücksichtigt. Der Empfehlung, Randbedingungen nach Möglichkeit außerhalb des Untersuchungsbereiches zu definieren (Nujic 2003), konnte daher bei den vorliegenden Daten nicht gefolgt werden.

Für die weitere Ergebnisauswertung stehen das auf dem DGM2 basierende Strömungsmodell von Ahden sowie das durch Interpolation stark verfeinerte Berechnungsnetz von Delbrück zur Verfügung. Beide Modelle liefern plausible Ergebnisse.

Zur Plausibilitätskontrolle und zum Vergleich mit Beobachtungsdaten wurden die Zuflüsse der KINEROS2-Berechnungen in das Strömungsmodell als Zuflussganglinie integriert. Die Simulationen wurden stationär unter Vorgabe des Wellenscheitels an markanten Konten der KINEROS2-Modelle durchgeführt.

Die Oberflächenrauigkeit wurde beim Modell Ahden mit Hilfe der ATKIS-Daten zugewiesen. Den Klassen aus ATKIS wurden Literaturwerte des Stricklerbeiwertes zugeordnet (Stocker und Schwaller 2003). Diese Vorgehensweise wurde für Delbrück nicht angewendet, da feinere Strukturen (Straßen, Gebäude) im Modellnetz nachgebildet wurden, welche nicht in den ATKIS-Daten aufgelöst sind.

⁵ In Delbrück standen desweiteren Kanaldeckelhöhen zur Verfügung. Wegen der Abweichungen zwischen den Kanaldeckelhöhen und DGM5-Höhenwerten wurden die Datensätze nicht kombiniert. Es wurden daher nur die DGM5-Daten mit einer Rasterweite von 10 m verwendet.

Daher wurden die Gebäude als Ränder definiert und es wurden die Rauigkeiten „Straßen“ und „Bebauung“ unterschieden. Es zeigte sich, dass Straßenverläufe mit glatteren Oberflächen so auch modelltechnisch als bevorzugte Fließwege wirken. Gegenüber der generalisierten, einheitlichen Vergabe von Rauigkeiten, konnten damit die Fließwege detaillierter abgebildet werden.

Inwieweit sich die Festlegung der Rauigkeiten auf die berechneten Wasserstände auswirkt, ist in der Abbildung 4.45 gezeigt. Den gezeigten Ergebnissen liegen die folgenden Simulationen zu Grunde:

1. Ahden, ausgedünntes DGM2, KINEROS2-Zuflüsse August 2007, Standardwerte der Stricklerbeiwerte gemäß der obigen Ausführungen
2. Ahden, ausgedünntes DGM2, KINEROS2-Zuflüsse August 2007, um 10 % reduzierte Stricklerbeiwerte
3. Ahden, ausgedünntes DGM2, KINEROS2-Zuflüsse August 2007, um 10 % erhöhte Stricklerbeiwerte

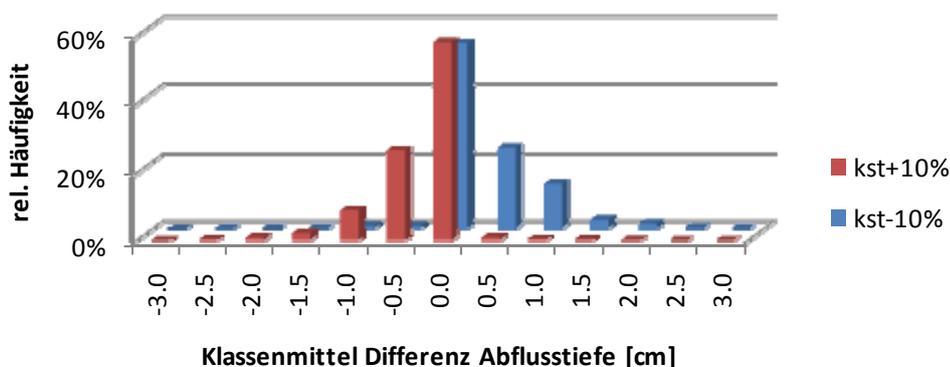


Abbildung 4.45: Sensitivität der berechneten Wasserstände bei Variation der Stricklerbeiwerte für die Simulation des August-2007-Ereignisses in Ahden, ausgedünntes TIN

Erwartungsgemäß führt die Verringerung der Stricklerbeiwerte zu höheren Wasserständen und umgekehrt. In absoluten Zahlen liegen die Abweichungen der Simulationen im Wesentlichen unterhalb von 2 cm. Bezogen auf die niedrigen Abflusstiefen von wenigen Zentimetern beim Oberflächenabfluss können die in absoluten Zahlen geringen Abweichungen größeren relativen Abweichungen entsprechen (vergleiche Abbildung 4.46).

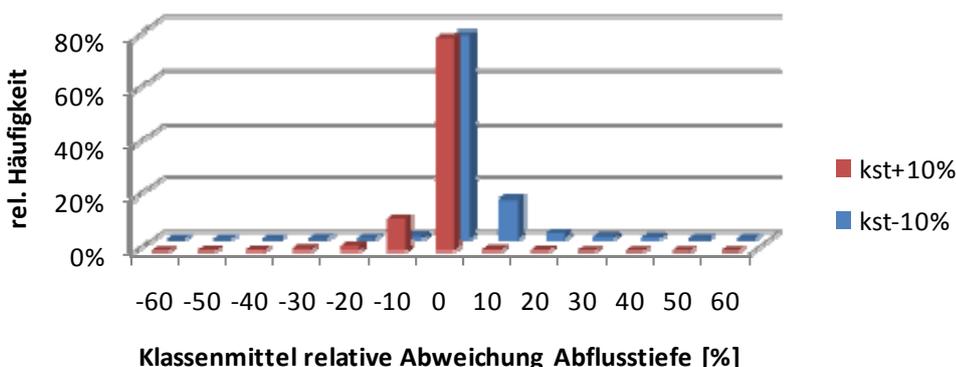


Abbildung 4.46: Relative Abweichung der berechneten Wasserstände in Ahden bezogen auf die Standardrauigkeiten

Die Abweichungen von rund 80 % aller unter Wasser stehenden Knoten liegen im Bereich von +/- 5 %. Im Falle niedrigerer Stricklerbeiwerte (höhere Rauigkeit) weisen 15 % aller unter Wasser stehender Knoten eine Abweichung von +5 % bis +15 % gegenüber der Simulation mit vorgegebenen Rauigkeiten aus Tabellenwerten auf. Wird hingegen von um 10 % erhöhten Stricklerbeiwerten ausgegangen, so erhält man einen entsprechenden Wert mit umgekehrten Vorzeichen (ca. 12 % aller unter Wasser stehenden Knoten sind durch eine Abweichung von - 5 % bis -15 % gekennzeichnet).

Die dargelegten Abweichungen der berechneten Wasserstände bei einer zugrunde gelegten Variation der Stricklerbeiwerte zeigen, dass die Festlegung von Rauigkeiten einen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Die genannten Zahlen demonstrieren beispielhaft die Unsicherheiten, die mit der Festlegung eines Modellparameters verbunden sind.

4.4.4.2 FloodArea

Die Anwendung des Programms FloodArea erfordert weniger Aufwand zur Modellerstellung. Es konnte jeweils das Original-DGM verwendet werden. Wegen der fehlenden Daten in der Ortslage wurde keine Programmanwendung für Henglar durchgeführt.

Für Delbrück wurde eine einheitliche Rauigkeit vorgegeben, wohingegen bei Ahden die für Hydro_as-2d ermittelte Verteilung der Rauigkeiten auf ATKIS-Basis zur besseren Vergleichbarkeit übernommen wurde. Die Abbildung 4.47 zeigt einen Kartenausschnitt der Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler sowie der Klassengrenzen aus den ATKIS-Daten für die Ortslage Ahden. Im Bereich der Bebauung wurden relativ geringe Rauigkeiten vergeben. Wiesen und Grünland sind durch höhere Beiwerte gekennzeichnet (siehe Tabelle A.6). Die Straßen in der Ortslage sind nicht in den ATKIS-Daten aufgelöst. Um eine Vergleichbarkeit mit Hydro_as-2d zu gewährleisten, wurden dieselben KINEROS2-Knoten als stationäre Zuflüsse vorgegeben.

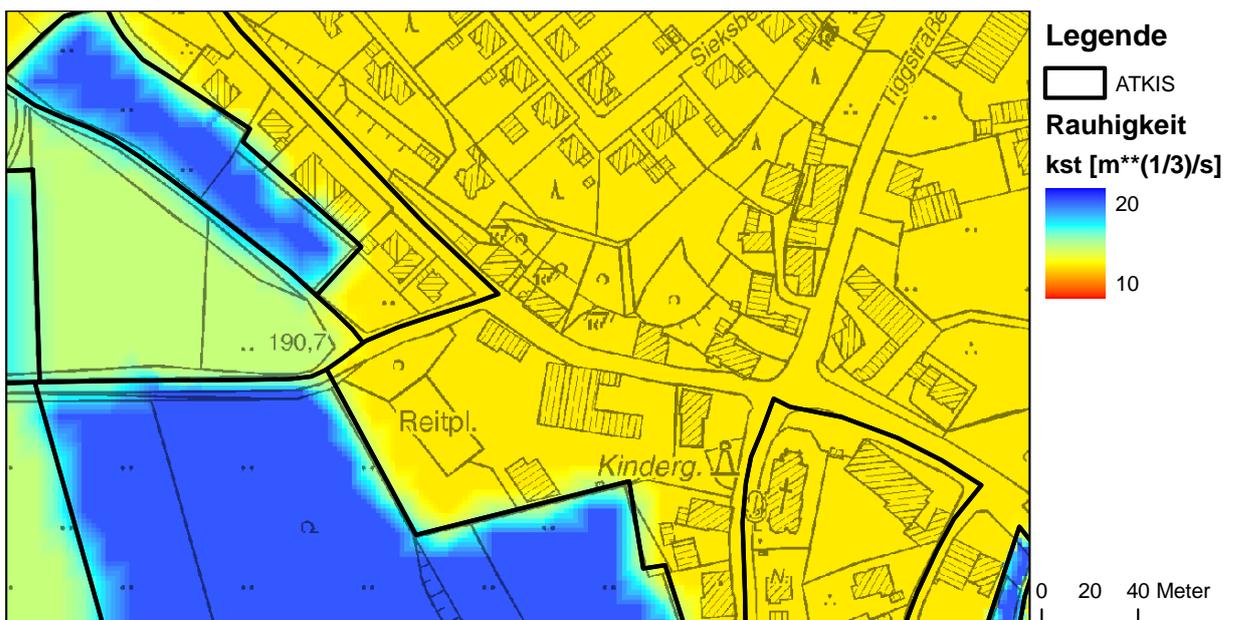


Abbildung 4.47: In Hydro_as-2d und FloodArea zu Grunde gelegte Rauigkeitsbeiwerte sowie Nutzungsgrenzen nach ATKIS, Ausschnitt Ortslage Ahden

4.4.4.3 CASC2D

Neben der rein hydraulischen Betrachtung des Oberflächenabflusses erfordert CASC2D weitere Parametrisierungen zur Beschreibung der Abflussbildung. Wie bereits erläutert, handelt es sich um ein Niederschlag-Abfluss-Modell mit einer Detailbetrachtung des Oberflächenabflussprozesses. Eine Modellanwendung zur Untersuchung der Gefährdung durch Starkregen ist insbesondere wegen dieser Eigenschaft des Modells interessant.

CASC2D setzt, wie FloodArea auch, Rasterdaten voraus. Somit kann das vorhandene DGM verwendet werden. Daneben müssen eine Reihe weiterer Rasterdatensätze bereitgestellt werden. U.a. handelt es sich um die folgenden Daten mit Raumbezug:

1. Rauigkeit nach Manning (kann auch für das Projektgebiet einheitlich vorgegeben werden)
2. Hydraulische Leitfähigkeit
3. Matrixpotenzial an der Feuchtefront
4. Porosität
5. Bodenwassergehalt zu Beginn der Simulation

Liegen mehrere Niederschlagsstationen vor, wird anhand der Stationskoordinaten ein flächendifferenzierter Gebietsniederschlagswert für jeden Zeitschritt der Ganglinien berechnet. Eine untere Randbedingung muss – wie in Hydro_as-2d – als Wasserspiegellagengefälle definiert werden. Der Berechnungszeitschritt muss fest vorgegeben werden, wobei 1s der minimal zulässige Wert ist. Mit diesem unteren Grenzwert bricht das Programm die Berechnungen bei den Gebieten Delbrück und Ahden ab (wegen der obig genannten Einschränkungen wurde das Gebiet Henglar nicht mit CASC2D untersucht). Als Ursache werden numerische Instabilitäten angegeben. Da offensichtlich die Courant-Bedingung für explizite numerische Lösungsverfahren verletzt wurde, erfolgte eine Skalierung des Geländemodells auf eine gröbere Zellweite. Auf einem 30 m-Raster liefert das Programm konsistente und stabile Ergebnisse. Die Vergleichbarkeit zu den beiden anderen Modellen ist durch diesen Skalenwechsel nur noch bedingt möglich.

Die Rauigkeitsbeiwerte und Bodenparameter, welche in CASC2D Verwendung finden, orientieren sich weitestgehend an den Parametrisierungen der beschriebenen Methoden.

4.4.5 Ergebnisse der hydraulischen Simulation

4.4.5.1 Hydro_as-2d

Im Zuge der Modellanwendung wurde deutlich, dass Hydro_as-2d Einschränkungen hinsichtlich der räumlichen Daten unterliegt. Bedingt durch die Eingangsdaten wurden die Gebiete Ahden und Delbrück näher untersucht und ausgewertet.

Die mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell KINEROS2 berechneten Abflüsse für das August-2007-Ereignis wurden als stationäre Zuflussrandbedingungen an ausgewählten Punkten in das 2d-

Strömungsmodell eingegeben. Anhand der Beobachtungen, welche im Rahmen der Anliegerbefragung erfolgte, konnten die berechneten Wasserstände hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft werden. In einem zweiten Schritt wurden die mit KINEROS2 simulierten synthetischen Abflüsse auf Grundlage der KOSTRA-DWD2000-Daten im 2d-Strömungsmodell ausgewertet.

Für das Gebiet Ahden wurden vier Zuflussrandbedingungen definiert, wobei einige KINEROS2-Kanalelemente zusammengefasst worden sind (siehe Abbildung 4.21 auf S. 74):

1. Südlicher Zufluss (parallel zur Flughafenstraße)
 - a. Kanalelement 1
 - b. Summe der Kanalelemente 2, 3 und 4
2. Nördlicher Zufluss (Kreisstraße 16)
 - a. Kanalelement 9
 - b. Summe der Kanalelemente 10, 11, 115 und 12

Es wurde eine stationäre Simulation durchgeführt. Die berechneten Wasserstände können der Abbildung 4.48 entnommen werden. Verglichen mit den Beobachtungen vor Ort, ergeben die berechneten Überschwemmungsgebiete ein übereinstimmendes Bild.

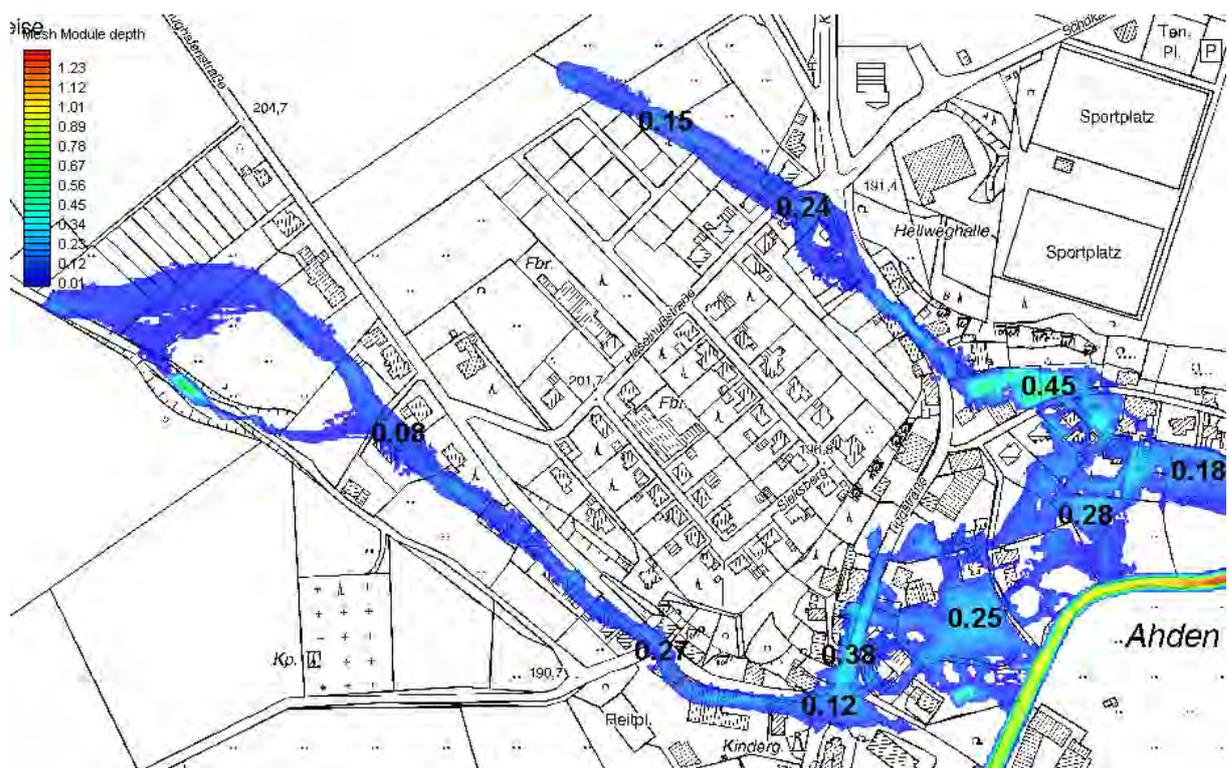


Abbildung 4.48: Simulation des Ereignisses August 2007, berechnete Wasserstände in Ahden [m]

Neben einem rein visuellen Vergleich sind in der Tabelle 4.9 die berechneten und beobachteten Wasserstände gegenübergestellt. Im Bereich Flughafenstraße konnte das Modellsystem, bestehend aus KINEROS2 und Hydro_as-2d, die Beobachtung relativ gut reproduzieren. In den beiden übrigen Fällen liegen die berechneten Werte deutlich unter den Beobachtungen. Berücksichtigt man die vorhandenen Unsicherheiten, so z. B. die Höhenungenauigkeit von Geländemodellen in bebauten

Bereichen, die fehlende Berücksichtigung von Gebäuden als Fließhindernisse und insbesondere die Unsicherheiten bei der Parametrisierung der Modelle (bodenhydraulische Parameter, Oberflächenrauigkeit), so lässt sich dennoch das Ergebnis als plausibel einstufen.

Tabelle 4.9: Mit Hydro_as-2d berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Ahden

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m]		Differenz [m]
	beobachtet	berechnet	
Bereich Flughafenstraße	0,1	0,11	0,01
Bereich Kirche / Tiggstraße	0,5	0,36	-0,14
Bereich Haselnussstraße	0,4	0,21	-0,19

Für das Untersuchungsgebiet Delbrück wurde die gleiche Vorgehensweise bei der Auswertung gewählt. Es wurden die Zuflüsse der KINEROS2-Elemente 101 bis 103 sowie 41 und 42 als stationäre Zuflussrandbedingung definiert. Anders als in Ahden wurden Gebäude aus dem Berechnungsnetz ausgespart, sodass deren Wände einen nichtdurchströmbaren Modellrand darstellen. Dadurch konnte die Strömungssituation im Bereich des Kirchplatzes in der Innenstadt detaillierter abgebildet werden, da großen Fließhindernisse in der Hauptströmung Rechnung getragen wird. Die Ergebnisse der Simulation sind in der Abbildung 4.49 in Form von Wasserständen veranschaulicht. Die Berücksichtigung der undurchlässigen Häuser führt zur Simulation von lokalen Aufstaubereichen westlich der Kirchplatzes, sowie im Süden. In den Gassen zwischen den Häusern berechnet das Modell zudem erhöhte Fließgeschwindigkeiten infolge des sich einstellenden Wasserspiegellagengefälles (vergleiche Abbildung 4.50). Die Hauptströmung muss, wie es aus der Betrachtung der beiden Abbildungen hervorgeht, dem Geländegefälle folgend den Fließhindernissen ausweichen. Somit stellt sich eine deutlich komplexere Strömungssituation ein, als es unter einer rein gefälle- und rauigkeitsbedingen Betrachtung möglich wäre.

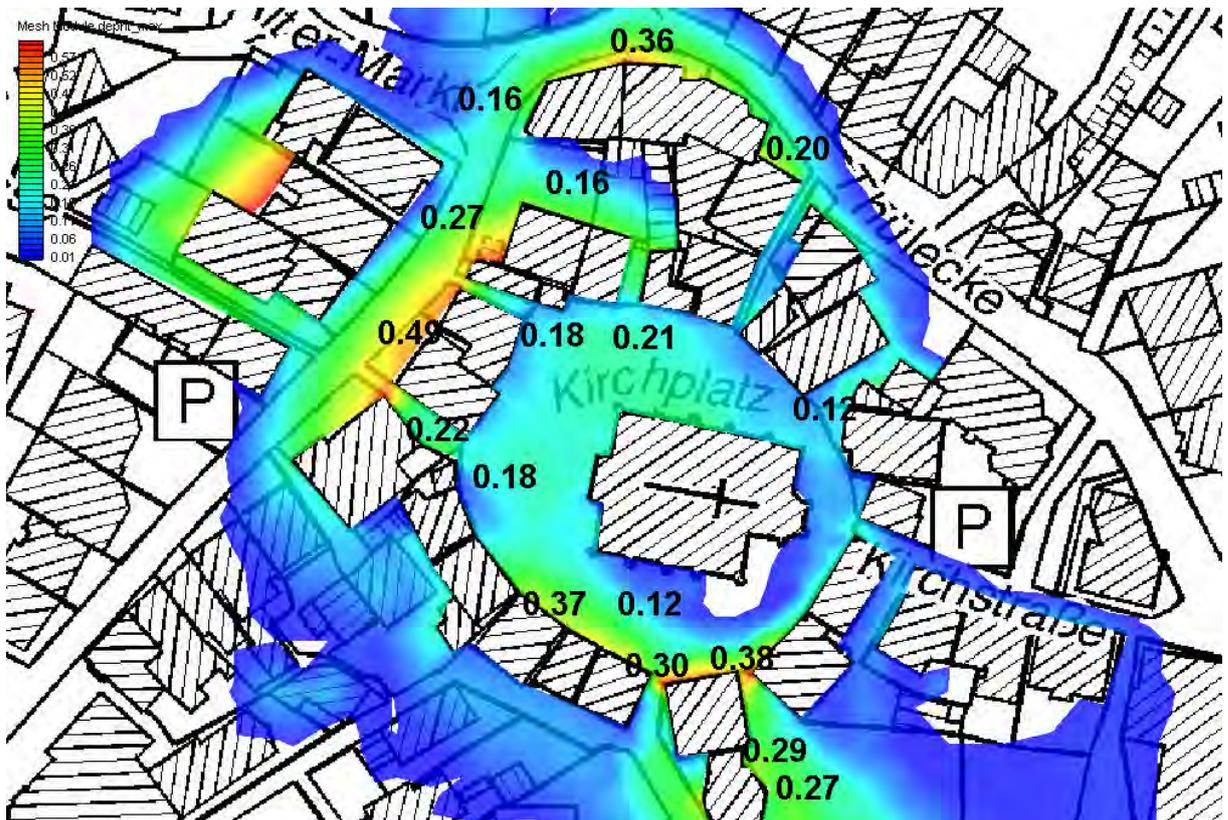


Abbildung 4.49: Berechnete Wasserstände am Kirchplatz in Delbrück für das Ereignis August 2007 [m]

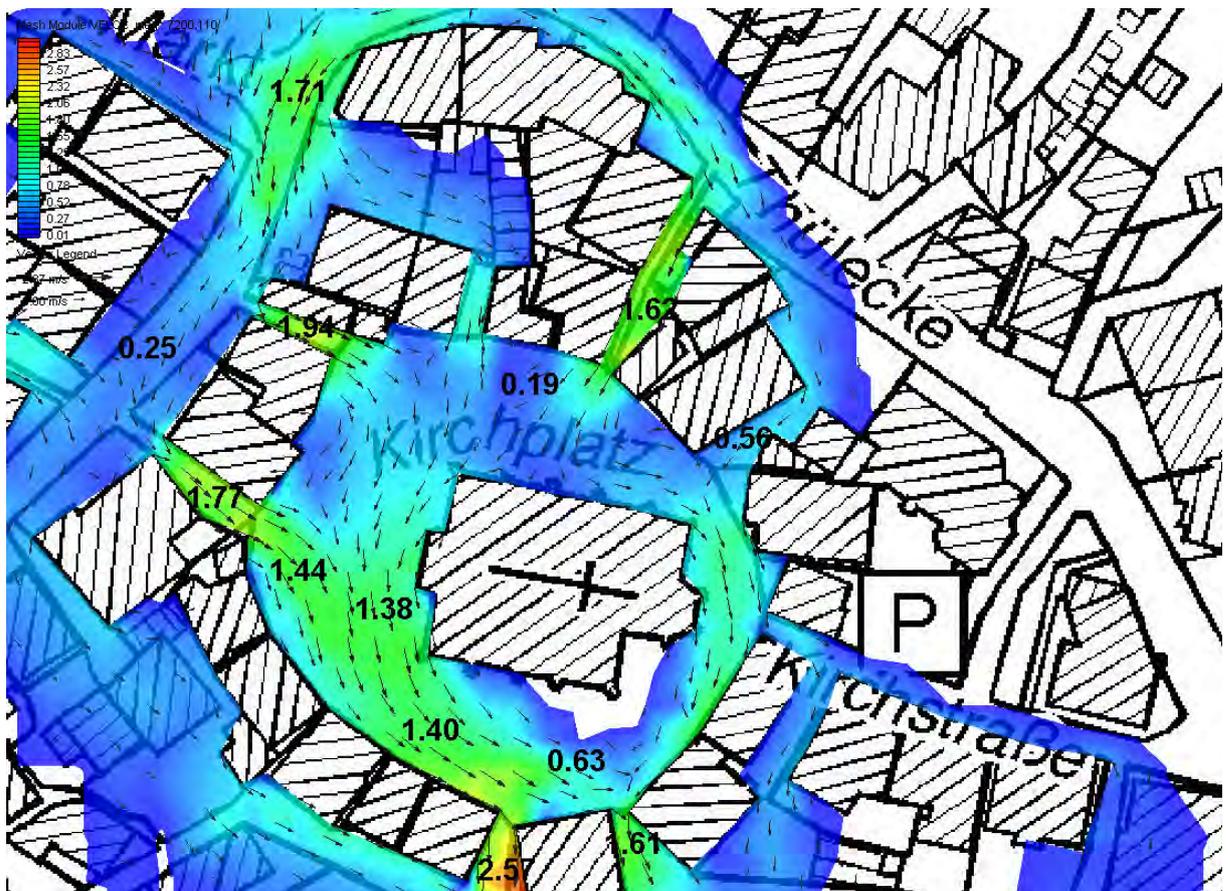


Abbildung 4.50: Berechnung von Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit am Kirchplatz in Delbrück, an ausgewählten Knoten sind die Geschwindigkeiten in m/s gekennzeichnet

Anhand des zusammenfassenden Vergleiches in der Tabelle 4.10 wird der beschriebene Einfluss der Netzverfeinerung deutlich. Verglichen werden die Simulationen auf Grundlage der KINEROS2-Zuflüsse mit und ohne Berücksichtigung von Gebäuden. Die Simulation unter Berücksichtigung der Gebäude berechnet erwartungsgemäß deutlich höhere Wasserstände im dicht bebauten Innenstadtbereich um den Kirchplatz. Die Abweichungen gegenüber den Beobachtungen liegen im Bereich bis 10 cm. Die Beobachtung im Bereich der Südstraße ist hingegen weniger gut simuliert worden. In diesem Bereich sind keine Gebäude als Fließhindernisse berücksichtigt.

Tabelle 4.10: Mit Hydro_as-2d berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Delbrück

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m] mit Gebäuden ⁶			Abflusstiefe [m] ohne Gebäude		
	beobachtet	berechnet	Differenz	beobachtet	berechnet	Differenz
Apotheke	0,4	0,49	0,09	0,4	0,13	-0,27
Kirchplatz	0,5	0,49	-0,01	0,5	0,13	-0,37
Bereich Südstraße	0,6	0,36	-0,24	0,6	0,36	-0,24

Die Ergebnisse zeigen, dass erst die Berücksichtigung der Gebäude zu adäquaten Simulationsergebnissen führte. Vermutlich könnte mit Hilfe einer Netzverfeinerung auch im Untersuchungsgebiet Ahden eine bessere Simulationsgüte im Bereich des Ortskerns (nahe der Kirche) erzielt werden.

4.4.5.2 FloodArea

Für die Projektgebiete Ahden und Delbrück wurden überschwemmte Gebiete des August-2007-Ereignisses berechnet. Für Ahden wurde ebenfalls das DGM2 verwendet, wohingegen das DGM5 in der Kernstadt von Delbrück Verwendung fand.

Die berechneten überschwemmten Gebiete in der Ortslage von Ahden zeigt die Abbildung 4.51. Die räumliche Ausdehnung der Überschwemmungen stimmt relativ gut mit denen der Abbildung 4.48 (Hydro_as-2d) überein. So werden sowohl die Hauptfließwege aus der Feldgemarkung sowie die Überschwemmungen in der Ortslage zutreffend abgebildet.

⁶ „mit Gebäuden“ bedeutet, dass die Gebäudeumrisse als nicht durchfließbare Ränder in das Modellnetz eingearbeitet worden sind.

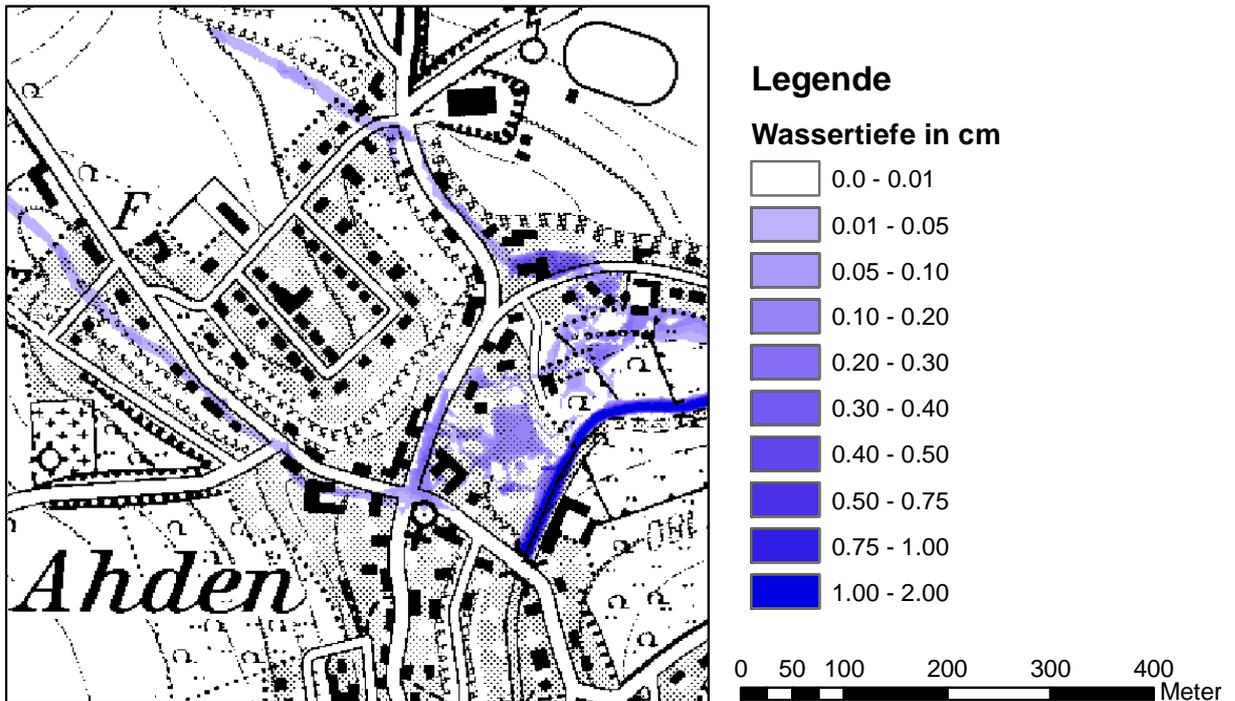


Abbildung 4.51: Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der FloodArea-Simulation August 2007 in Ahden

Die mit FloodArea berechneten Wasserstände sind in der Tabelle 4.11 den Beobachtungen der Anlieger gegenübergestellt. FloodArea berechnet ebenfalls niedrigere Wasserstände, wobei die Abweichungen größer ausfallen als bei Hydro_as-2d.

Tabelle 4.11: Mit FloodArea berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Ahden

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m]		Differenz [m]
	beobachtet	berechnet	
Bereich Flughafenstraße	0,1	0,06	-0,04
Bereich Kirche / Tiggstraße	0,5	0,29	-0,21
Bereich Haselnussstraße	0,4	0,16	-0,34

Die entsprechenden Ergebnisse für das Projektgebiet Delbrück werden in der Abbildung 4.52 und der Tabelle 4.12 bereitgestellt. Auch hier zeigt sich visuell eine recht gute Abbildung des Ereignisses. Die berechneten Wassertiefen liegen allerdings deutlich unter den Beobachtungen.

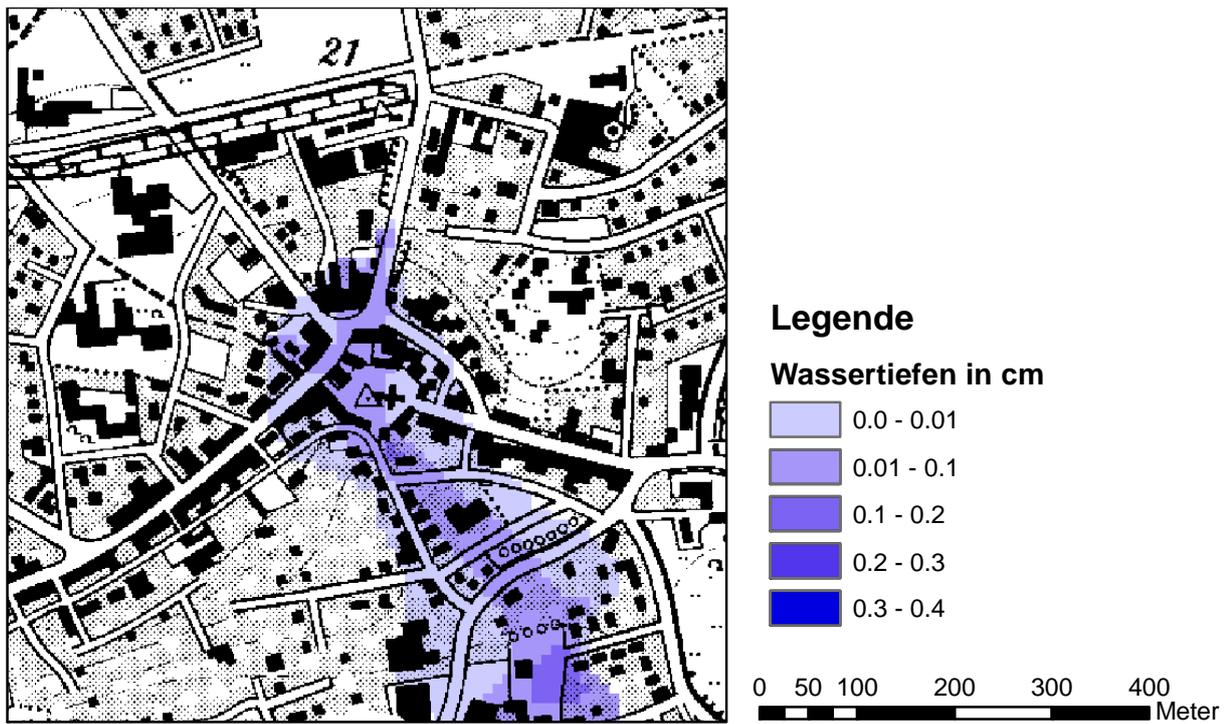


Abbildung 4.52: Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der FloodArea-Simulation August 2007 in Delbrück

Tabelle 4.12: Mit FloodArea berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Delbrück

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m]		
	beobachtet	berechnet	Differenz
Apotheke	0,4	0,02	-0,38
Kirchplatz	0,5	0,03	-0,47
Bereich Südstraße	0,6	0,13	-0,47

4.4.5.3 CASC2D

Die Ergebnisse, welche mit CASC2D erzielt werden, beziehen sich auf eine generalisierte Beschreibung des Geländes. Zur Gewährleistung der numerischen Stabilität musste, wie bereits erläutert, eine Vergrößerung des Raumschrittes durchgeführt werden. Für die Projektgebiete Ahden und Delbrück wurde daher eine Simulation auf Grundlage eines 30 m-DGM durchgeführt.

Der Skalenübergang in Raum und Zeit stellt eine Vereinfachung der zuvor durchgeführten Detailanalysen dar. Geländedetails, wie Böschungen und Straßenverläufe sind nicht mehr aufgelöst. Somit repräsentiert jede Elementarfläche aus der Simulation (Rasterzelle mit Kantenlänge von 30 m) ein Mittel der Umgebung.

Für das Gebiet Ahden beträgt der mit CASC2D bei gleichen Randbedingungen berechnete Scheitelwert $1,39 \text{ m}^3/\text{s}$. Bezugspunkt ist der Zusammenfluss der beiden Zuflüsse aus der Feldgemarkung. Der entsprechende Wert aus der KINEROS2-Simulation beträgt hier $2,23 \text{ m}^3/\text{s}$. Somit liegen die der hydraulischen Berechnung in CASC2D zugrunde liegenden Abflüsse deutlich unter den KINEROS2-Werten.

Die tatsächlich beobachteten Überschwemmungsbereiche werden vom Modell wiedergegeben (Abbildung 4.53). Verglichen mit den bereits erläuterten Berechnungen wird die reduzierte räumliche Auflösung offenkundig.

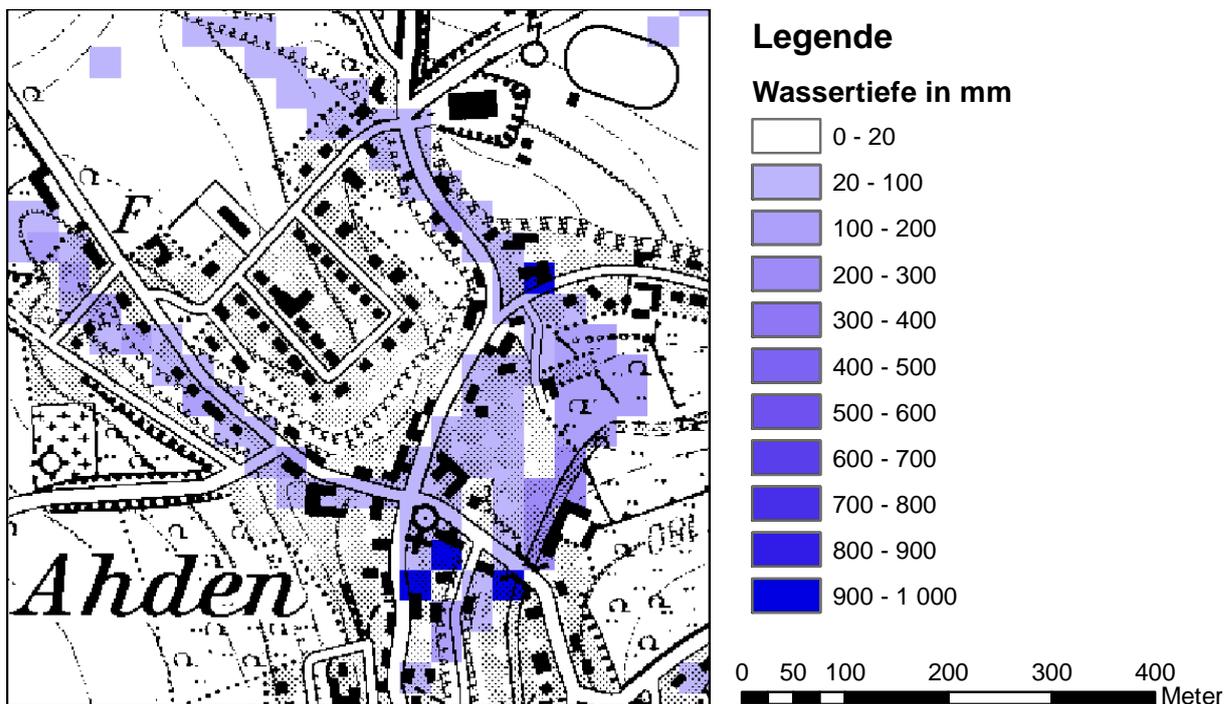


Abbildung 4.53: Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der CASC2D-Simulation August 2007 in Ahden

Im Bereich der Flughafenstraße zeigt die Berechnung gute Übereinstimmungen mit den Beobachtungen während des Ereignisses, wie es aus der Tabelle 4.13 ersichtlich ist. In der Ortslage liegen die berechneten Wasserstände – ähnlich wie bei der FloodArea-Simulation in Delbrück – eine Größenordnung unterhalb der Beobachtung. Gegenüber FloodArea kommen als weitere Ursachen für

diese Abweichungen die generalisierte Geländeabbildung sowie die geringeren Abflüsse zur Geltung. Darüber hinaus erfolgt die Berechnung in CASC2D instationär, wohingegen Hydro_as-2d und FloodArea mit stationären Zuflüssen parametrisiert wurden.

Tabelle 4.13: Mit CASC2D berechnete Wasserstände in Ahden

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m]		Differenz [m]
	beobachtet	berechnet	
Bereich Flughafenstraße	0,1	0,12	0,02
Bereich Kirche / Tiggstraße	0,5	0,07	-0,43
Bereich Haselnussstraße	0,4	0,06	-0,44

Demgegenüber zeigen die Ergebnisse aus CASC2D für Delbrück ein schlüssigeres Ergebnis, obwohl der berechnete Scheitelwert des Abflusses ebenfalls unterhalb des KINEROS2-Wertes bei ähnlicher Modellkonfiguration liegt (CASC2D: 5,6 m³/s instationär ⇔ KINEROS2: 7,9 stationär).

Im Ergebnis liefert die CASC2D-Simulation, deren Randbedingung das Niederschlagsereignis von August 2007 ist, den Beobachtungen entsprechende Überschwemmungsflächen (Abbildung 4.54).

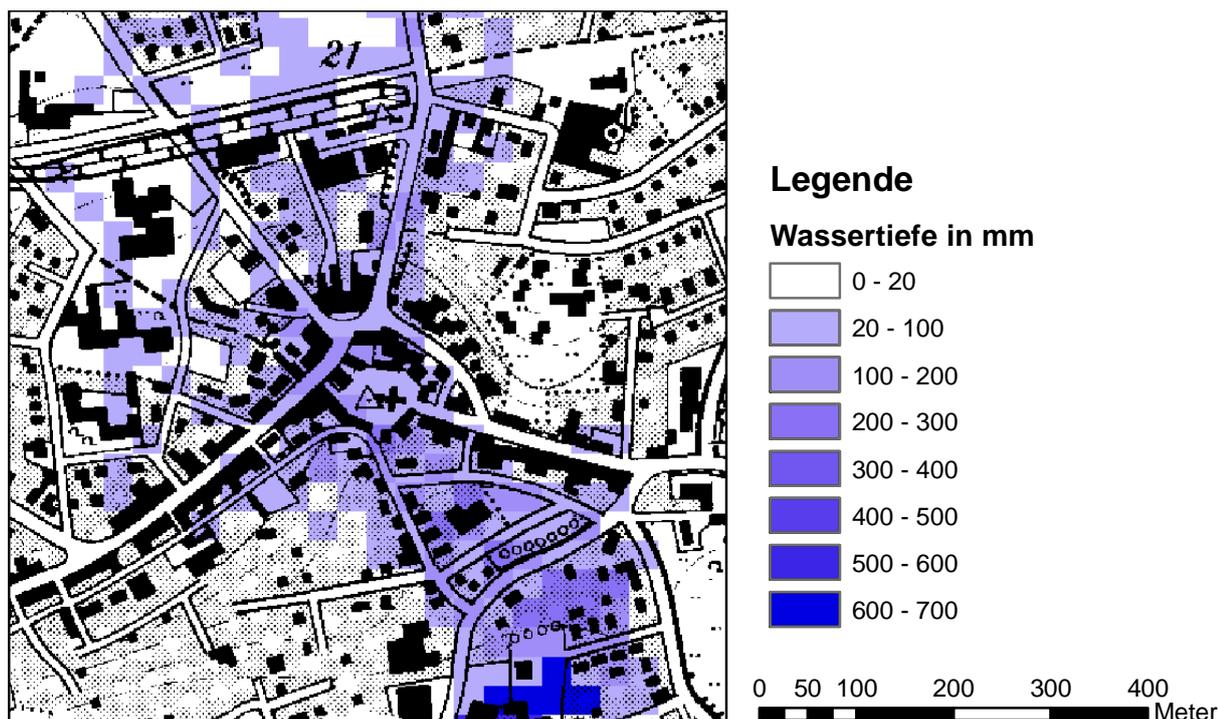


Abbildung 4.54: Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der CASC2D-Simulation August 2007 in Delbrück

Da in CASC2D Infiltrationsüberschüsse in der numerischen Berechnung des Oberflächenabflusses bilanziert werden, werden Wassertiefen im gesamten Einzugsgebiet ausgegeben, was man den überschwemmten Flächen im nördlichen Teil der Abbildung erkennt.

Bemerkenswert ist, dass die berechneten Wasserstände in etwa den Werten der Hydro_as-2d-Berechnung ohne Berücksichtigung von Gebäuden entsprechen (vgl. Tabelle 4.14 mit Tabelle 4.10).

Tabelle 4.14: Mit CASC2D berechnete Wasserstände in Delbrück

Beobachtungspunkt	Abflusstiefe [m]		
	beobachtet	berechnet	Differenz
Apotheke	0,4	0,11	-0,29
Kirchplatz	0,5	0,21	-0,29
Bereich Südstraße	0,6	0,63	0,03

4.4.5.4 Vergleich der berechneten Wasserstände aus FloodArea und Hydro_as-2d

Auf Grundlage gleicher Eingangsdaten liefern die Modelle Hydro_as-2d und FloodArea abweichende Ergebnisse bei den berechneten Wasserständen. Um die Berechnungsergebnisse besser vergleichen zu können, wurde ein Berechnungsgitter ohne Berücksichtigung von Gebäuden in Hydro_as-2d als Referenz für diesen Vergleich herangezogen. Beide Modelle wurden mit den Scheitelwerten der KINEROS2-Berechnung und vergleichbaren Rauigkeitsbeiwerten parametrisiert.

Die Tabelle 4.15 stellt die zwei Modelle für eine Berechnung in Delbrück hinsichtlich der Eingangsdaten gegenüber. Der Vergleich wurde für das Gebiet Delbrück durchgeführt. Es wurde das vorhandene DGM5 mit einem Rasterabstand von 10 m verwendet. Es wurden Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler vorgegeben, wobei sich die Werte, welche in den Modellen vorgegeben wurden, in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Die Zuflüsse, welche mit Hilfe des N-A-Modells KINEROS2 berechnet wurden, sind bei beiden Modellen identisch als Scheitelwerte vorgegeben. Dass beide Modelle volumentreu rechnen, belegt die letzte Spalte der Tabelle 4.15. Die vorgegebenen Zuflüsse werden gleichermaßen durch das Modellgebiet geleitet. Somit liegt beiden Berechnungen eine identische stationäre Strömungssituation zu Grunde.

Tabelle 4.15: Vergleichsrechnung Hydro_as-2d und FloodArea

Modell	Höhendaten	Rauigkeit	Zufluss	Abfluss
Hydro_as-2d	DGM5	13 m ^{1/3} /s (Bebauung), 36 m ^{1/3} /s (Straßen)	4 Zuflüsse aus KINEROS2 (stationär)	30.244 m ³ /h
FloodArea	DGM5	15 m ^{1/3} /s für das gesamte Gebiet	4 Zuflüsse aus KINEROS2 (stationär)	30.767 m ³ /h

Die räumliche Verteilung der berechneten Abflusstiefen ist in der nachstehenden Abbildung 4.55 veranschaulicht (Differenz = Wasserstand_(FloodArea) – Wasserstand_(Hydro_as-2d)). Negative Werte weisen darauf hin, dass FloodArea geringere Wasserstände ausweist als Hydro_as-2d.

Die Rauigkeitsbeiwerte verschiedener Modellsysteme können nicht als identisch hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen in den Berechnungsmethoden angesehen werden. Die berechneten, signifikanten Abweichungen können jedoch nicht ausschließlich in den Rauigkeiten begründet liegen.

Als wesentliche Ursache dürfte die Berechnungsmethode als solches in Frage kommen. Der stark reduzierte Berechnungsansatz in FloodArea vereinfacht die tatsächlichen Strömungsprozesse wesentlich stärker als beim dynamischen Wellenansatz, wie er Hydro_as-2d zugrunde liegt. Ursächlich für den Strömungsprozess ist bei diesen einfachen Ansätzen hauptsächlich das Geländegefälle. Rückstau- und Impulseinflüsse werden vernachlässigt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die vereinfachte Modellstruktur von FloodArea ursächlich für die (in absoluten Zahlen) großen Differenzen ist. Eine genauere Analyse der Wirkungsweisen verschiedener Modelle anhand quantitativer Beschreibungen kann nur in einer Detailbetrachtung der Modellausgaben erfolgen.

Eine abschließende Bewertung der Ergebnisse der hydraulischen Modellierung ist Gegenstand des Abschnittes 4.4.7.

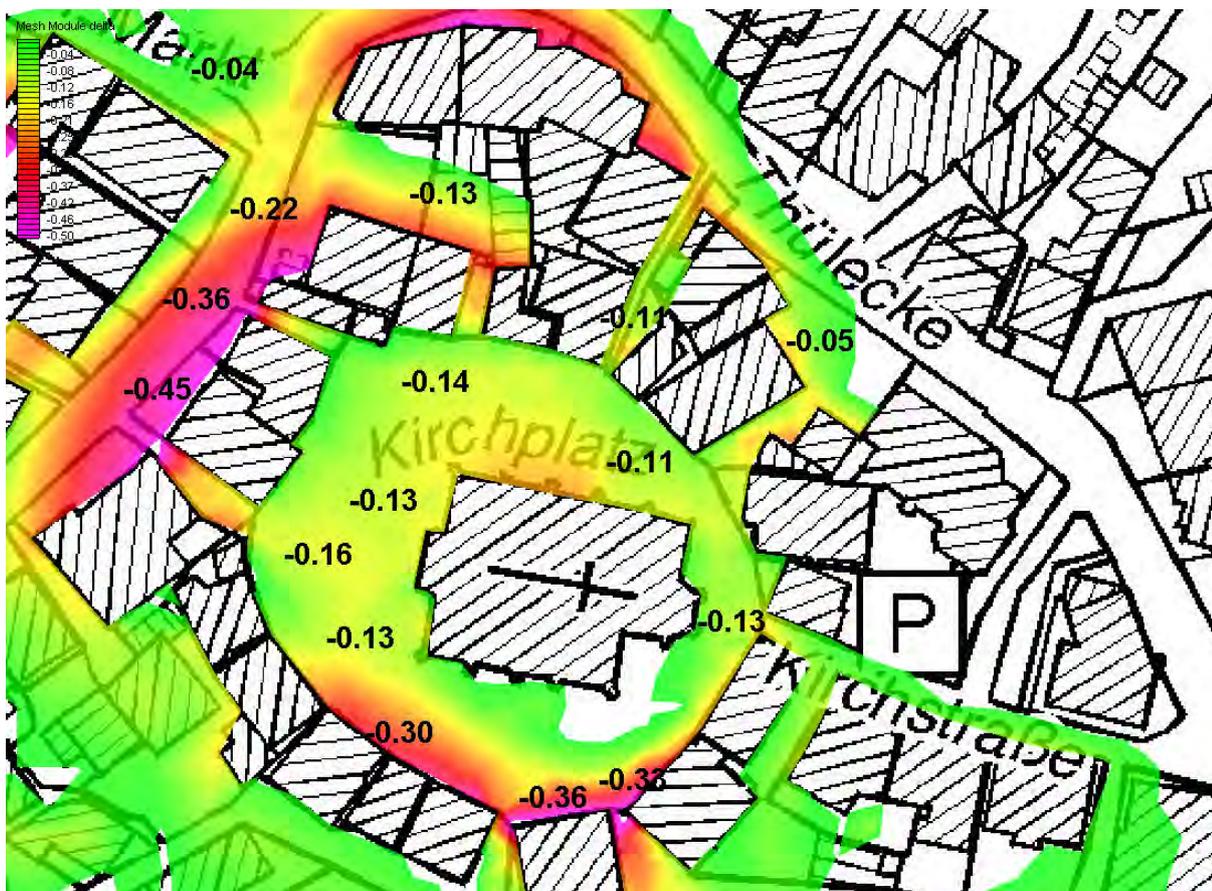


Abbildung 4.55: Räumliche Verteilung der Wasserstandsunterschiede (FloodArea vs. Hydro_as-2d) im Untersuchungsgebiet Delbrück

4.4.6 Simulation synthetischer Ereignisse

Das Modellsystem KINEROS2 in Verbindung mit Hydro_as-2d liefert auf Grundlage des Ereignisses von August 2007 plausible Ergebnisse für die Projektgebiete Ahden und Delbrück.

Zur Ermittlung von Überschwemmungsszenarien sollen nun synthetische Ereignisse simuliert werden, welchen statistische Wiederkehrintervalle zugeordnet werden können. Als Randbedingungen der 2d-Strömungsmodelle für Ahden und Delbrück wurden die Scheitelwerte der mit KINEROS2 simulierten KOSTRA-Modellregen vorgegeben.

Die berechneten Überschwemmungsgebiete für die Jährlichkeiten 20 a, 100 a sowie 200 a sind in den nachstehenden Abbildungen dargestellt. Den Simulationsergebnissen zufolge nehmen die überschwemmten Flächen nur geringfügig mit der Jährlichkeit zu, was insbesondere im Stadtgebiet Delbrück auffällt. Offensichtlich ist hier der überschwemmungsgefährdete Bereich durch einen steilen Geländegradienten begrenzt, sodass höhere Wasserstände nur eine geringfügige Änderung der Überschwemmungsfläche bewirken. Dies kann jedoch nicht verallgemeinert werden und ist stets abhängig von der Topographie vor Ort.

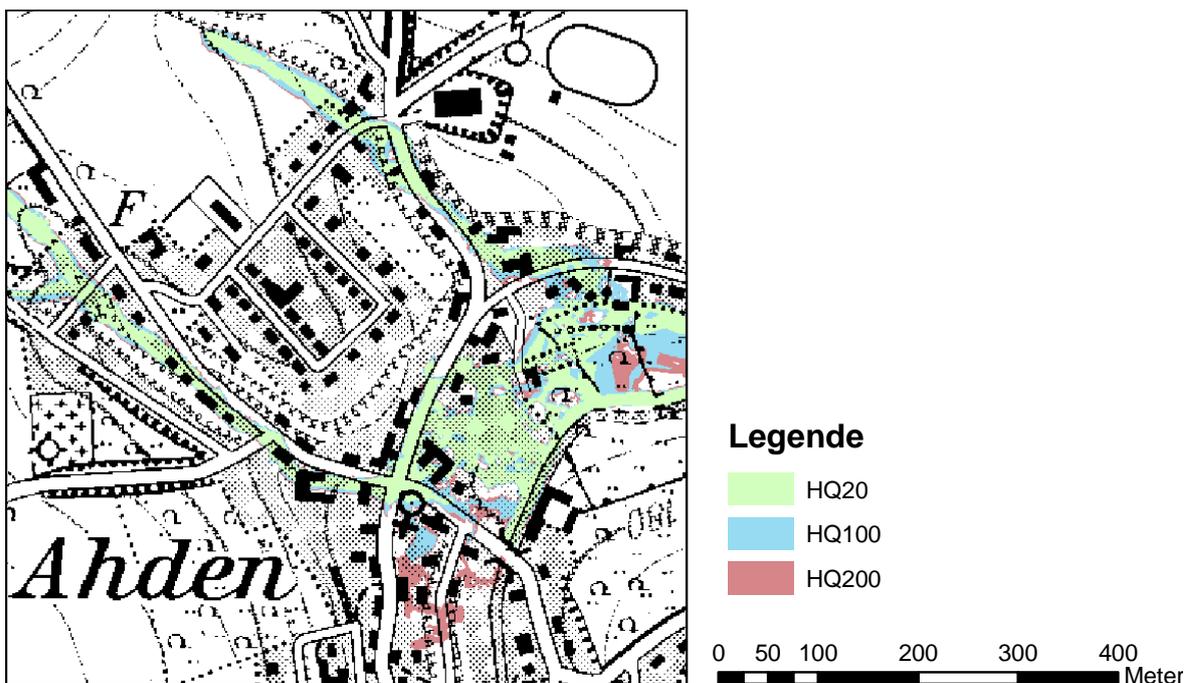


Abbildung 4.56: Überschwemmungsgebiete in Ahden infolge Starkregen

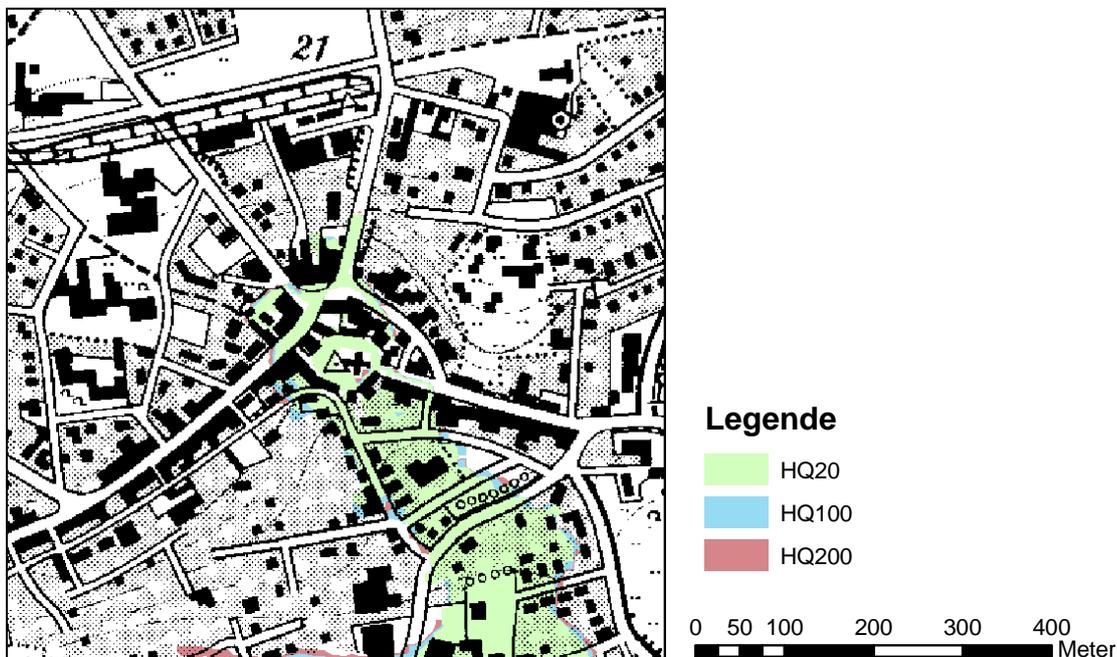


Abbildung 4.57: Überschwemmungsgebiete in Delbrück infolge Starkregen

Für die Simulation des Ereignisses HQ100 in Delbrück enthält die Abbildung 4.58 abschließend noch eine hydraulische Längsschnittdarstellung. Daneben ist die räumliche Lage der Achse im Bereich des Kirchplatzes gekennzeichnet und es sind die spezifischen Durchflüsse als Produkt aus der Abflusstiefe und dem Betrag der Fließgeschwindigkeit in Kartenform ergänzt.

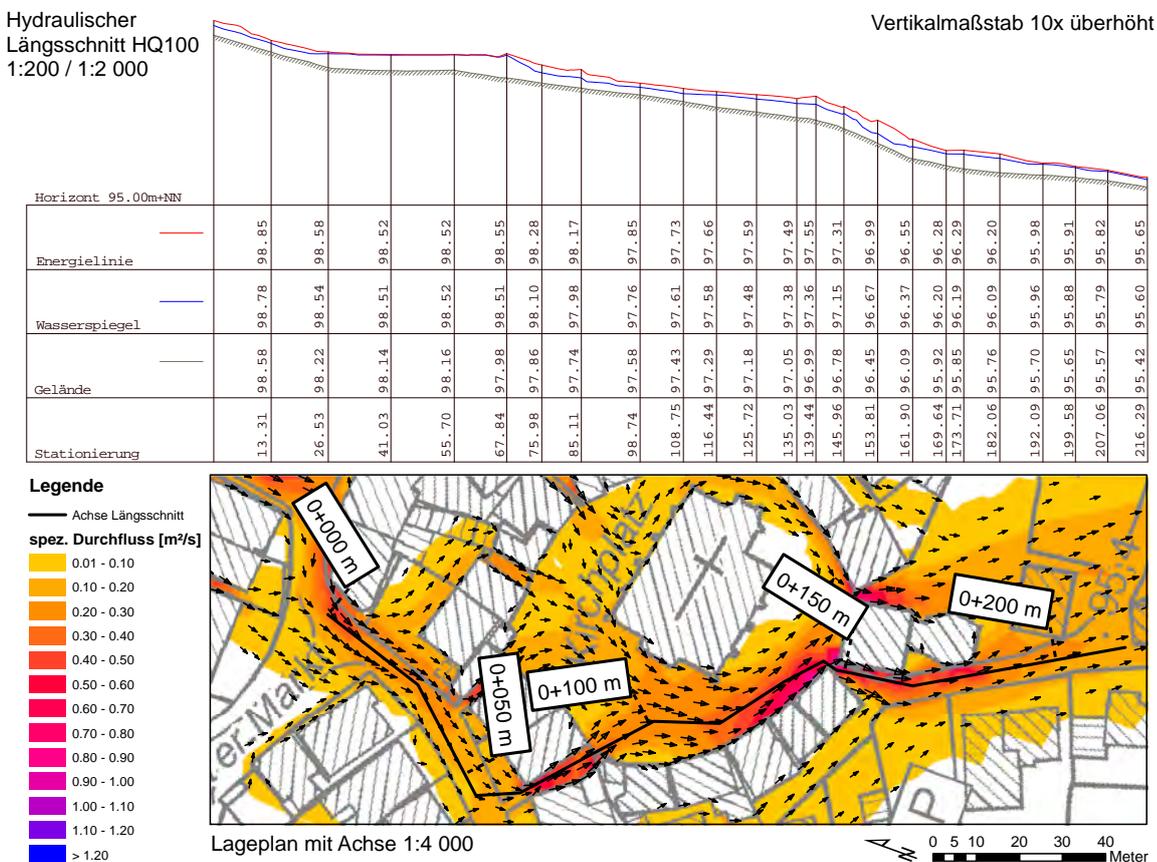


Abbildung 4.58: Hydraulischer Längsschnitt HQ100 mit Achse und Kartendarstellung des spezifischen Durchflusses

Die Lage der Achse zur Konstruktion des Längsschnittes wurde mit Hilfe der räumlichen Verteilung des spezifischen Durchflusses geschätzt. Diese spiegelt in etwa den Hauptfließweg wider. Wegen des zweidimensionalen Charakters der vorliegenden Eingangsdaten ist dies jedoch nur unter Einschränkungen möglich, da keine einheitlichen Zustandsgrößen für einzelne Abschnitte vorliegen und der Wasserspiegel quer zur Achse geneigt sein kann. Anhand dieser Zusammenhänge lassen sich die lokalen Schwankungen der Energielinie erläutern. Typischerweise hat die Energielinie einen monoton fallenden Verlauf.

Auch wenn diese eindimensionale Ergebnisdarstellung der Simulationsergebnisse dem zweidimensionalen Charakter der Strömungssituation nur bedingt gerecht wird, kann ein Längsschnitt auch bei einer 2d-Simulation zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen werden. Anhand der Abbildung wird beispielsweise die Aufstausituation oberhalb des Kirchplatzes verdeutlicht. Dem Gefälle folgend fließt die Hauptströmung dem Platz zwischen den Gebäuden zu. Diese wirken als Fließhindernisse und es stellt sich eine Staulinie ein. Beim Ereignis im August 2007 führte dieser Effekt zu den Überschwemmungen im Bereich der Apotheke. Anhand des Aufstaus und der nachfolgenden (konvektiven) Beschleunigung (Differenz Energielinie und Wasserspiegel) können Gefahrenbereiche ebenfalls lokalisiert werden. Beim HQ100 sind insbesondere die Anlieger nordwestlich (Zustrom) und südlich des Kirchplatzes betroffen.

4.4.7 Zusammenfassung und Diskussion

Für die Projektgebiete Ahden, Henglar und Delbrück wurden verschiedene Ansätze zur Beschreibung des Oberflächenabflusses bei Starkregenereignissen hinsichtlich ihrer prinzipiellen Eignung untersucht. Es standen dazu drei Modellsysteme zur Verfügung, welche unterschiedliche Detailgrade der Prozessbeschreibung repräsentieren. Das Modell Hydro_as-2d, dessen Strömungssimulation auf Grundlage der 2d-Flachwassergleichung erfolgt, stellt dabei das in dieser Untersuchung detaillierteste Verfahren zur Berechnung von Überschwemmungsgebieten dar. Demgegenüber ist das Programm FloodArea hinsichtlich der Prozessbeschreibung eine starke Vereinfachung. Beide Programme erfordern zur Berechnung die Vorgabe von Abflüssen aus Niederschlag-Abfluss-Modellen. Das Modell CASC2D kombiniert Niederschlag-Abfluss-Modellierung und die zweidimensionale Abbildung des Oberflächenabflusses. Hinsichtlich der Prozessbeschreibung stellt es gegenüber Hydro_as-2d ebenfalls eine Vereinfachung dar, wenngleich es einen etwas höheren Detailgrad aufweist als FloodArea.

Im Rahmen der Modellerstellung, welche in Kürze modellbezogen erläutert wurde, zeigten sich Besonderheiten und Einschränkungen in der Anwendung. Hydro_as-2d erfordert den höchsten Arbeitsaufwand bei der Modellerstellung. Es konnten nicht in allen Fällen sinnvolle Ergebnisse erzielt werden. Für das Projektgebiet Henglar erwies sich die Kombination aus geringer Auflösung des Geländemodells, geringen Zuflüssen aus KINEROS2 sowie die fehlenden Höhendaten in der Ortslage in Henglar als problematisch hinsichtlich der numerischen Stabilität, sodass von einer Interpretation der Ergebnisse abgesehen wurde. Daher erfolgte der Methodenvergleich nur für die Projektgebiete Ahden und Delbrück.

Mit Hydro_as-2d konnten für die Gebiete Ahden und Delbrück plausible Ergebnisse erhalten werden. Im Stadtgebiet von Delbrück konnte eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen während des Ereignisses festgestellt werden. Die Verfeinerung des Modellnetzes wirkte sich besonders günstig auf die Simulationsgüte aus.

FloodArea erfordert demgegenüber einen vergleichsweise geringen Aufwand zur Vorbereitung der Simulation. Während die beobachteten überschwemmten Flächen mit FloodArea gut nachvollzogen werden konnten, zeigte sich beim Vergleich der Wasserstände, dass die Wasserstände systematisch unterhalb der entsprechenden Hydro_as-2d-Werte liegen. Als wesentliche Ursache wurde der unterschiedliche Detailgrad der Prozessbeschreibung genannt.

Nachteilig bei der Anwendung von CASC2D erwiesen sich die Einschränkungen bei der Wahl von Zeit- und Raumschritt. Ein Vergleich mit den zuvor genannten Modellen war nur bedingt möglich, da CASC2D zum Teil weniger Abfluss berechnete als KINEROS2. Die beobachteten Abflusstiefen in Ahden konnten mit CASC2D nicht nachvollzogen werden. Die berechneten Abflüsse und Wasserstände waren deutlich zu niedrig. Im Gegenzug konnten für das Stadtgebiet Delbrück bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei ähnlichen Zuflüssen ergaben die Simulationsergebnisse von Hydro_as-2d und CASC2D – auch hinsichtlich der Abflusstiefen - ein einheitliches Bild. Die Simulationsgüte der Detailbetrachtung des Kirchplatzes in Hydro_as-2d konnte mit CASC2D nicht erzielt werden.

Zusammenfassend lauten die Schlussfolgerungen für die hydraulische Simulation der Starkregenereignisse in den Projektgebieten:

- Je detaillierter die Prozessbeschreibung, desto umfangreicher ist der Arbeitsaufwand.
- Eine detaillierte hydraulische Simulation setzt stets eine Detailbetrachtung voraus.
- Auch mit Hilfe einfacher Ansätze können Überschwemmungsgebiete ermittelt werden. Die auf diese Weise berechneten Abflusstiefen können deutlich von den entsprechenden Werten einer Detailuntersuchung abweichen.
- Eine Kalibrierung ist in den seltensten Fällen möglich

Über diese Untersuchung hinaus sollte daher eine mögliche Übertragbarkeit von Ergebnissen aber auch von Methoden auf andere Gebiete untersucht werden. Weiterführende Betrachtungen sollten die Anpassung oder Weiterentwicklung detaillierter, flächendifferenzierter Niederschlag-Abfluss-Modelle mit einer Detailbetrachtung des Oberflächenabflusses für die Simulation von Extremereignissen zum Gegenstand haben. Dabei sollte eine nahtlose Beschreibung der Abflussbildungs- und Konzentrationsmechanismen in natürlichen und städtischen Einzugsgebieten (Kanalnetze) im Mittelpunkt stehen.

Teilkarte A stellt natürliche Fließwege und die Überflutungsgebiete bei den Bemessungshochwässern HQ₂₀, HQ₁₀₀ und HQ₂₀₀ dar. Die natürlichen Fließwege beruhen auf der Ermittlung der Fließwege aus digitalen Geländedaten (Kapitel 4.3.1). Die Überflutungsflächen sind Ergebnis einer hydraulischen Simulation (Kapitel 4.4). Die farbliche Darstellung erfolgte analog der Vorgaben des MUNLV (2003) für die Hochwässer < HQ₁₀₀, HQ₁₀₀ und EHQ. Die Klassifizierung der Überflutungstiefen wurde angepasst an für Starkregenüberflutungen typische Wassertiefen (Abbildung 4.60). In dieser Teilkarte können weitere Gefahrenquellen wie Durchlässe, Verrohrungen, Kanaleingänge dargestellt werden, falls entsprechende Informationen vorliegen oder bei einer Gebietsbegehung kartiert wurden. Sollten keine Informationen zu Überflutungsflächen vorliegen, können alternativ Scheitelabflüsse an verschiedenen Punkten des Gewässers dargestellt werden, die bei einer hydrologischen Simulation mit Bemessungsniederschlägen (Kapitel 4.3.3) ermittelt worden sind. Ein Beispiel dafür liefert die Gefahrenkarte des Gebiets Henglarn (Kartenanlage 2).

Überflutungsgebiet Wasserspiegel [cm] über Gelände		
HQ 20	HQ 100	HQ 200
 1 - < 5	 1 - < 5	 1 - < 5
 5 - < 10	 5 - < 10	 5 - < 10
 10 - < 20	 10 - < 20	 10 - < 20
 20 - < 30	 20 - < 30	 20 - < 30
 30 - < 40	 30 - < 40	 30 - < 40
 40 - < 50	 40 - < 50	 40 - < 50
 ≥ 50	 ≥ 50	 ≥ 50

Abbildung 4.60: Angepasste Klassifizierung der Überflutungstiefe

In Teilkarte B sind das Gebietsgefälle und die Fließgeschwindigkeiten beim HQ₁₀₀ dargestellt. Das Gefälle wurde mit dem ArcGIS-Tool „slope“ aus dem DGM berechnet und kann wahlweise in Grad oder Prozent angegeben werden. Die Klassifizierung der Gefällestufen erfolgte entsprechend der Empfehlung von Castro (2008) (Tabelle 4.16). Eine Unterteilung des Geländes in Klassen unterschiedlicher Neigung gibt Hinweise auf Bereiche, in denen aufgrund starker Hangneigung die Entstehung von Oberflächenabfluss begünstigt ist. Alternativ kann anstelle des Gefälles auch die Gefälleänderung dargestellt werden, die über das ArcGIS-Tool „curvature“ (2. Ableitung der Geländehöhe) aus dem DGM berechnet werden kann. Die Gefälleänderung oder Hangkrümmung sagt aus, ob der Hang konvex oder konkav gekrümmt ist. Sie ist lediglich eine andere Darstellungsform und liefert keine Zusatzinformationen gegenüber der Darstellung des Gefälles.

(Abbildung 4.61).

Tabelle 4.16: Hangneigungsstufen, nach Castro (2008).

Neigungsstufen		Darstellung				Bezeichnung
%	°	Farbe	R	G	B	
0-2	0-0,5		173	217	176	nicht geneigt
2-4	0,5-2		141	217	145	sehr schwach geneigt
4-9	2-5		177	224	101	schwach geneigt
9-18	5-10		255	247	130	mittel geneigt
18-27	10-15		255	214	89	stark geneigt
27-36	15-20		240	170	101	sehr stark geneigt
> 36	> 20		224	105	101	steil

Fließgeschwindigkeit bei HQ100 [m/s]		
□	< 0.5	▨
	0.5 - < 1.0	▩
	≥ 1.0	

Abbildung 4.61: Angepasste Klassifizierung der Fließgeschwindigkeit

Die Teilkarte C ist vorgesehen, um Informationen über ein historisches Ereignis darzustellen. Meistens handelt es sich dabei um Wasserstände oder Überflutungsflächen. In den Beispielkarten stammen die Daten aus einer Bevölkerungsbefragung am 15.10.2008 (Kapitel 4.1). Da in den meisten Fällen die Ausdehnung der historischen Überflutungen nur teilweise bekannt ist, wird empfohlen, zur Darstellung eine Schraffur zu verwenden.

Die ländlichen Untersuchungsgebiete Ahden und Henglarn wurden im Maßstab 1:5000 im DIN A3 Format dargestellt. Für den Innenstadtbereich von Delbrück wurde der Maßstab 1:2500 gewählt. Alle Karten enthalten einen Schrifksten, der sich an den Vorgaben des MUNLV (2003) orientiert und Informationen zu Inhalt, Auftraggebern, Bearbeitern, Gebiet, Maßstab und Erstellungsdatum enthält. Des Weiteren ist ein Feld für Erläuterungen vorgesehen, in welchem Informationen zu Datengrundlagen und Methoden Platz finden sollen.

4.6 Bewertung der Methoden und Empfehlungen für die Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete

Die hier vorgestellten Methoden zur Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete nutzen verschiedene Informationsquellen und unterscheiden sich in ihren Ergebnissen. Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsmethoden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Zusätzlich werden Empfehlungen für die Anwendung ausgesprochen.

Rekonstruktion historischer Ereignisse

Möglichkeiten zur Rekonstruktion historischer Ereignisse bestehen in der Recherche von Presse- und Feuerwehrberichten sowie in der Befragung von Anwohnern und Einsatzkräften. Es können Informationen über die flächenhafte Ausdehnung von Überflutungen und Wasserstände bei vergangenen Starkregenereignissen gewonnen werden. Ferner besteht die Möglichkeit zur Charakterisierung der entstandenen Schäden. Einsatzkräfte können oft einen guten Überblick über Einsatzgebiete und den Umfang der aufgetreten Schäden geben und machen aufgrund ihres Fachwissens sachliche Aussagen. Die Angaben der Anwohner sind subjektiver, oft sehr detailliert und beschränken sich größtenteils auf die Schäden, die auf dem eigenen Grundstück und an den Gebäuden in der Nachbarschaft aufgetreten sind. Die Unsicherheiten der Anwohneraussagen können jedoch durch gezieltes Nachfragen reduziert werden. Wenn Fotos oder Videoaufnahmen zur Verfügung gestellt werden, ist es möglich, objektive Informationen über Fließwege und Überschwemmungsbereiche zu erhalten. Presseberichte geben eine exakte zeitliche Einordnung der Ereignisse, was bei Anwohneraussagen, besonders bei länger zurückliegenden Ereignissen, nicht immer der Fall ist.

Diese Methode ist einfach anzuwenden, erfordert wenig Fachkenntnis vom Anwender und bedarf keinerlei Softwareeinsatz. Allerdings liegt ein Nachteil in der Subjektivität und Ungenauigkeit der Informationen. In größeren Gebieten ist die Durchführung von Anwohnerbefragungen relativ aufwendig. Der entscheidende Vorteil dieser Methode ist die Gewinnung von Informationen, die absolut unabhängig von den Informationen sind, die auf Grundlage der Gebietsdaten durch Softwareeinsatz gewonnen werden. Daher eignen sich diese Informationen besonders gut zur Validierung anderer Methoden.

Empfehlung:

Die Rekonstruktion historischer Ereignisse wird uneingeschränkt empfohlen. Es hat sich als sehr praktikabel erwiesen, zuerst Informationen in Presseberichten zu recherchieren und sich anschließend an die zuständige Feuerwehr zu wenden. Auf Grundlage der so gewonnenen Überblicksinformationen können gezielt betroffene Anwohner befragt werden.

Gebietsbegehung

Bei einer Gebietsbegehung können sehr vielfältige Informationen über Untersuchungsgebiete gewonnen werden. Neben den natürlichen Gegebenheiten können abflussrelevante Bauwerke und Strukturen kartiert werden und Erkenntnisse über hydrologische Besonderheiten gewonnen werden.

Eine Gebietsbegehung ermöglicht die Prüfung und Erhebung von Gebietsparametern wie Rauigkeiten und hydraulische Leitfähigkeiten, die als Eingangsgröße für Modellanwendungen benötigt werden. Zudem erleichtert eine detaillierte Gebietskenntnis die Plausibilitätsprüfung der Modellergebnisse.

Der Aufwand einer Gebietsbegehung steigt proportional zur Gebietsgröße. Die Verbindung der Gebietsbegehung mit einer Bevölkerungsbefragung relativiert den Aufwand erheblich. Der Informationsgewinn hängt stark vom Fachwissen der begehenden Person ab.

Empfehlung:

Eine Gebietsbegehung wird unbedingt empfohlen. Sie sollte in Verbindung mit einer Bevölkerungsbefragung erfolgen und von derselben Person durchgeführt werden, die auch modellabhängige Methoden anwendet. Im Rahmen der Begehung sollten so viele Informationen wie möglich aufgenommen und nachvollziehbar dokumentiert und kartiert werden.

Ermittlung der Fließwege aus digitalen Geländedaten

Die Ermittlung von Fließwegen mit einer GIS-Software benötigt als Eingangsdaten ausschließlich ein hinreichend detailliertes DGM, das in den meisten Gebieten in Deutschland flächendeckend zur Verfügung steht. Sie liefert als Output eindimensionale Informationen über reliefbedingte Abflusswege. Sie stellt oftmals die Grundlage für detailliertere hydrologische und hydraulische Methoden dar. Die Aussagekraft der generierten Fließwege ist besonders im Bereich un bebauter Flächen gut. In Siedlungsgebieten werden kleinräumige anthropogene Überprägungen des Reliefs wie Straßen und Bordsteinkanten, die die Fließwege beeinflussen, durch das DGM meist nicht wiedergegeben.

Der Vorteil dieser Methode besteht in der einfachen und schnellen Durchführung bei geringem Datenbedarf. Sie erfordert nur wenige Arbeitsschritte mit einer GIS-Standardsoftware und ist aus der Ferne vom Arbeitsplatz aus durchführbar. Nachteilig ist die mangelhafte Erfassung anthropogen veränderter Fließwege in bebauten Gebieten. Durch die Fließwegeermittlung können keine Aussagen zu Abflussmengen, Überflutungsflächen oder Wasserständen gewonnen werden.

Empfehlung:

Aufgrund des geringen Arbeitsaufwandes der Fließwegeermittlung ist die Methode grundsätzlich zu empfehlen. Allerdings erfordert die Verifizierung der generierten Fließwege Zusatzinformationen, die z. B. bei einer Befragung oder Gebietsbegehung gewonnen werden können.

An dieser Stelle können keine Empfehlungen für den zu verwendenden Algorithmus ausgesprochen werden, da Empfehlungen aus der Literatur (Erskine et al. 2006) durch die Anwendungen in den Untersuchungsgebieten nicht bestätigt werden konnten.

Hydrologische Modellierung

Die hydrologische Modellierung ist die rechnergestützte Nachbildung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet. Sie benötigt zahlreiche Eingangsdaten. Dazu gehören Niederschlagsdaten und vor allem Gebietseigenschaften. Sie liefert Informationen zum zeitlichen Verlauf des Abflusses auf eindimensionalen Fließwegen. In Abhängigkeit von den verwendeten Niederschlagsdaten können Ereignisse der Vergangenheit nachgebildet oder Belastungsszenarien mit Bemessungsniederschlägen gerechnet werden. Die hydrologische Modellierung liefert den Abfluss als Eingangsgröße für die hydraulische Modellierung.

Ein großer Vorteil der hydrologischen Modellierung ist die Gewinnung von Abflussmengen. Zudem stellt die hydrologische Modellierung ein Prognosewerkzeug für Szenarienbetrachtungen dar. Ihre hohen Anforderungen an die Eingangsdaten sind allerdings problematisch. Der Anwender sollte über eine gewisse Erfahrung verfügen und ausreichende Fachkenntnisse für die Schätzung der Gebietsparameter mitbringen. Ein besonderes Problem ergibt sich bei der Modellierung von Starkregenereignissen aus den fehlenden Beobachtungsdaten für die Validierung und Kalibrierung des Modells. Daraus ergeben sich große Unsicherheiten der Ergebnisse. Die hydrologische Modellierung ist je nach eingesetzter Software recht aufwändig. Sie liefert keine Aussagen zu Überflutungsflächen oder Wasserständen.

Empfehlung:

Vor dem Hintergrund der fehlenden Beobachtungsdaten zur Kalibrierung und Validierung des Modells wird empfohlen, auf deterministische, physikalisch basierte Modelle zurückzugreifen. Das Modell sollte für die zu betrachtende Raum- und Zeitskala konzipiert sein. Die Parameter, insbesondere die sensitiven, sollten sehr sorgfältig ermittelt werden. Eine Validierung der Ergebnisse über Zusatzinformationen wird unbedingt empfohlen.

Hydraulische Modellierung

Mithilfe hydraulischer Modelle können unter Vorgabe von Abflussmengen durch Simulation der Strömung Überflutungsflächen und Wasserstände im Hochwasserfall abgeleitet werden. Die Abflussmengen können mit Hilfe hydrologischer Modelle ermittelt werden und als Randbedingung im hydraulischen Modell vorgeben werden. Neben der rein wasserstands- und überschwemmungsflächenabhängigen Gefahrenereinschätzung erlaubt die hydraulische Modellierung auch die Ableitung von Fließgeschwindigkeiten und spezifischen Durchflüssen. Letztere können für eine Risikobewertung durchaus von Interesse sein. Die hydraulische Modellierung wird standardmäßig eingesetzt, um Überflutungsbereiche von Fließgewässern unter Verwendung von Profilvermessungsdaten auszuweisen. Für die Überschwemmungsflächenberechnung im Starkregenfall sind digitale Geländemodelle eine geeignete Datengrundlage. Insbesondere Laserscan-Befliegungen eignen sich aufgrund der hohen Punktdichten sehr gut. Ähnlich wie bei der Erstellung von Gefahrenkarten an Fließgewässern müssen geeignete Randbedingungen definiert werden und es müssen Fließhindernisse im Modell berücksichtigt werden.

Wesentlicher Vorteil der hydraulischen Modellierung ist die Gewinnung einer zweidimensionalen Information über Wasserspiegellagen, die gut durch den Vergleich mit Wasserstandsinformationen von historischen Ereignissen verifiziert werden kann. Schwerwiegende Nachteile sind die hohen Anforderungen an die Eingangsdaten und der hohe Arbeitsaufwand. Zudem sollte sich der Anwender mit der Methodik und den zugrundeliegenden Annahmen auskennen. Es zeigte sich am Beispiel Henglarn, dass eine hydraulische Simulation nicht immer anwendbar ist, insbesondere dann nicht, wenn geeignete Geländemodelle fehlen oder aber die numerische Stabilität nicht gewährleistet werden kann.

Empfehlung:

Eine hydraulische Modellierung ist dann zu empfehlen, wenn Rückstaueffekte im Gebiet eine wesentliche Rolle spielen und wenn die erforderlichen Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Sie sollte so detailliert wie möglich, d.h. auch unter Berücksichtigung des Rückstaus an Gebäuden, durchgeführt werden. Wenn bekannt ist, dass Rückstaueffekte bedeutsam sind, sollte ein Modell auf Grundlage der diffusiven Wellengleichung oder idealerweise der dynamischen Wellengleichung eingesetzt werden. Bei der hydraulischen Modellierung in den Pilotgebieten wurde mit der detailliertesten Betrachtung die besten Ergebnisse erzielt. Die verwendeten Modelle berücksichtigen den Einfluss des Kanalnetzes nicht.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass für die Abbildung der komplexen Prozesse bei der Entstehung von Überschwemmungen als direkte Folge von Starkregenereignissen keine der Methoden als „bestgeeignet“ identifiziert werden konnte. Als Gründe dafür sind zum einen die starke Abhängigkeit der Methoden von der Verfügbarkeit und Güte der Eingangsdaten zu nennen. Daneben stellte sich heraus, dass der Erstellung von Gefahrenkarten immer eine Einzelfallbetrachtung vorausgehen muss. Die Verwendung mehrerer Methoden diene dem Ergebnisvergleich im Sinne einer Plausibilitätskontrolle einerseits und der Informationsverdichtung andererseits. Darüber hinaus wurde deutlich, dass nicht in allen Fällen alle Verfahren gleichermaßen anwendbar sind. Für die Erstellung von Starkregengefahrenkarte wird daher empfohlen, möglichst viele Methoden bei der Erstellung mit einzubeziehen, die auf möglichst unabhängigen Informationsgrundlagen beruhen.

5 Ausblick

Der Gegenstand der vorliegenden Beauftragung war die Untersuchung von Möglichkeiten zur Erstellung von Gefahrenkarten in von Starkregen gefährdeten Gebieten. Als Pilotgebiete wurden die Gebiete Ahden/Büren, Delbrück sowie Henglar (Lichtenau) im Landkreis Paderborn festgelegt. In diesen drei Untersuchungsgebieten traten bei einem Starkregenereignis im August 2007 hohe Schadenssummen auf. Es wurden Techniken und Verfahren zur Berechnung von Fließwegen und Hochwasserereignissen an Hängen zusammengestellt. In einem nächsten Schritt wurden geeignete Methoden auf Grundlage der vorliegenden Daten angewendet und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erstellung von Gefahrenkarten erprobt und gegenübergestellt. Wegen der häufig fehlenden Vergleichsdaten mussten die Ergebnisse einzelner Methoden sorgfältig auf ihre Plausibilität hin untersucht werden. Teilweise konnte eine gute Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit Beobachtungen erzielt werden.

Für die Abbildung der komplexen Prozesse bei der Entstehung von Überschwemmungen als direkte Folge von Starkregenereignissen konnte keine der Methoden als „bestgeeignet“ identifiziert werden. Als Gründe dafür sind zum einen die starke Abhängigkeit der Methoden von der Verfügbarkeit und Güte der Eingangsdaten zu nennen. Daneben stellte sich heraus, dass der Erstellung von Gefahrenkarten immer eine Einzelfallbetrachtung vorausgehen muss. Die Verwendung mehrerer Methoden diene dem Ergebnisvergleich im Sinne einer Plausibilitätskontrolle einerseits und der Informationsverdichtung andererseits. Darüber hinaus wurde deutlich, dass nicht in allen Fällen alle Verfahren gleichermaßen anwendbar sind.

Zur Erstellung von Starkregengefahrenkarte wird daher empfohlen, möglichst viele Methoden bei der Erstellung mit einzubeziehen. Bestimmte Methoden sind ausbaufähig. Hierfür bieten sich gekoppelte Ansätze von Abflussbildung (Hydrologie), zweidimensionalem Oberflächenabfluss (Hydraulik) und Kanalnetzsimulationen (Siedlungswasserwirtschaft) an. Damit könnten Unsicherheiten durch numerische Schnittstellen zwischen einzelnen Modellsystemen minimiert und bestehende Defizite vorliegender Modellansätze (z. B. kein diagonalen Wasserfluss) beseitigt werden.

Da sich die Berücksichtigung von Aussagen der Anlieger und Einsatzkräfte bei Schadensereignissen als sehr wertvoll erwiesen und häufig Starkregenereignisse nur unzureichend durch das vorhandene Messnetz erfasst werden, sollte man den Einsatz einer Ereignisdatenbank prüfen. In dieser sollten Berichte, Bilder, aber auch Messergebnisse zusammengetragen werden, um künftige Untersuchungen zu erleichtern. Bereits bestehende Erhebungen könnten darin berücksichtigt werden. Eine solche Datenbank müsste als längerfristiges Vorhaben initiiert werden. Extreme des Niederschlages einschließlich der Folgen bedürfen ebenso einer Langzeitbetrachtung im klimatologischen Sinne wie Routinemessungen von anderen meteorologischen Daten. Der Zeitrahmen sollte also weit über den von Einzeluntersuchungen hinausgehen und die laufende Erhebung sollten nicht dann eingestellt werden, wenn ein Projekt zufällig abgeschlossen ist. Die Erfahrung zeigt, dass bei solchen Fragestellungen von Seiten der Bevölkerung stets eine große Hilfsbereitschaft ausgeht.

Neben einer verbesserten Dokumentation von Ereignissen sollten zudem besonders exponierte Bereiche großflächig identifiziert werden. Dazu müssten zahlreiche weitere Gebiete untersucht werden. Solche Fallstudien liefern eine geeignete Grundlage zur Erarbeitung eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung besonders betroffener Bereiche. Dazu schlagen wir für weitergehende Forschungen die Entwicklung eines Verfahrens vor, welches auf standardisierten Gefahrenindizes beruht.

Mit verbesserten Methoden zur Erstellung von Gefahrenkarten, gut dokumentierten Ereignissen sowie einem Bewertungskonzept zur Abschätzung der Überschwemmungsgefahr infolge Starkregen könnte eine systematische Kartierung gefährdeter Bereiche ähnlich wie bei den Gefahrenkarten an Fließgewässern erfolgen.

Als konsequente Weiterführung dieser Überlegungen könnte darauf aufbauend die Erstellung von Risiko- und Risikomanagementkarten erfolgen. Darin könnten potenzielle Schäden sowie Konzepte zur Schadensminimierung Berücksichtigung finden.

Literaturverzeichnis

- Abbott, M.B. und Refsgaard, J.C. 1996. Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Al-Qurashi, A. 2008. Application of the KINEROS2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, 355, 91–105.
- Anderson, M.G., Burt, T.P. 1990. Subsurface Runoff, in: *Process Studies in Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd.
- Anderson, M.G., McDonnell J.J. 2005. *Encyclopedia of hydrological sciences*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Arbeitsgruppe Boden. 1994. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4. Auflage, Hannover.
- Bartels, H.; Malitz, G.; Asmus, S.; Albrecht, F.M.; Dietzer, B.; Günther, T. und Ertel, H. 1997. *Starkniederschlagshöhen für Deutschland - KOSTRA*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Bartels, H.; Dietzer, B.; Malitz, G.; Albrecht, F.M. und Guttenberger, J. 2005. *KOSTRA- DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland - Fortschreibungsbericht*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Baumgartner, A., Liebscher H.J. 1996. *Allgemeine Hydrologie*. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- Becks, F. 1980. *Die räumliche Differenzierung der Landwirtschaft in der Westfälischen Bucht*. Ph.D. thesis, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster.
- Becks, F. 2001. *Die räumliche Entwicklung der Landwirtschaft in Westfalen seit den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts - Gründe und ökologische Folgen*. Agrarmodernisierung und ökologische Folgen, *Forschungen zur Regionalgeschichte*, Paderborn, 40, 451–478.
- Beven, K. und Germann, P. 1982. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resources Research*, 18, 1311–1325.
- Bleck, M., C. Fuchs, et al. 2007. "Überprüfung von Abflusskurven an Pegeln Mittlerer und Kleinerer Flüsse unter Verwendung Hydraulischer 2-D-Modelle." *Wasserwirtschaft* 97(12): 14-18.
- Blöschl, G. 1996. Scale and Scaling in Hydrology. *Wiener Mitteilungen*, 132, 346 Seiten.
- Blöschl, G. und Grayson, R. 2002. Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. *Wiener Mitteilungen*, 164, 33–56.
- Blöschl, G. und Merz, R. 2002. Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. *Wiener Mitteilungen*, 164, 149–178.
- Blöschl, G.; Reszler, C. und Komma, J. 2008. A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software*, 23(4), 464–478.
- Bongartz, K. 2001. *Untersuchung unterschiedlicher Flächendiskretisierungs- und Modellierungskonzepte für die hydrologische Modellierung am Beispiel Thüringer Vorfluter*. Ph.D. thesis, Friedrich-Schiller-Universität.
- Borga, M.; Gaume, E.; Creutin, J.D. und Marchi, L. 2008. Surveying flash floods: Gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*, 22, 3883–3885.
- Bork, H.R. 1980. Oberflächenabfluss und Infiltration. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, 6, 94 Seiten.
- Bormann, H.; Dieckrüger, B. und Renschler, C. 1999. Regionale Simulationen in der Hydrologie - Quantifizierung der Fehler und Unsicherheiten. In: Fohrer, N, Döll, P. (Hrsg.): *Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten*. Kassel University Press

- Breuer, L.; Eckhardt, K.; Frede, H.-G. 2003. Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169, 237-293.
- Bronstert, A. 1994. Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe.
- Bronstert, A. 1999. Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 13, 21–48.
- Castro, D.; Frerichs, S.; Hatzfeld, F.; Mittelstädt, R. und Seltmann, J. 2008. Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Tech. Rept. Hydrotec Ingenieuresellschaft für Wasser und Umwelt mbH, FH Aachen, DWD, Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Christiaens, K. und Feyen, J. 2002. Use of sensitivity and uncertainty measures in distributed hydrological modeling with an application to the MIKE SHE model. *Water Resources Research*, 38.
- Cloke, H.L.; Anderson, M.G.; McDonnell, J.J. und Renaud, J.P. 2006. Using numerical modelling to evaluate the capillary fringe groundwater ridging hypothesis of streamflow generation. *Journal of Hydrology*, 316, 141–162.
- Collier, C.G. 2007. Flash Flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 133, 3–23.
- Cuo, L.; Lettenmaier, D.P.; Mattheussen, B.V.; Storck, P. und Wiley, M. 2008. Hydrologic prediction for urban watersheds with the distributed hydrology-soil-vegetation model. *Hydrological processes*, 22, 4205–4213.
- Djokic, D. und Ye, Z. 1999. DEM Preprocessing for Efficient Watershed Delineation. In: ESRI International User Conference on hydrologic and hydraulic water quantity modeling support using GIS, San Diego.
- Downer, C. W. and F. L. Ogden 2006. Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual, Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1. Washington, DC, U.S. Army Corps of Engineers: 221 p.
- Dunne, T. 1980. Field studies of hillslope flow processes, in: *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd.
- DVWK (Hrsg.). 1984. Heft 113, Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- DWA (Hrsg.). 2006. Arbeitsblatt DWA-A 117, Bemessung von Regenrückhalteräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- Dyck, S. 1980. *Angewandte Hydrologie*, 2. Teil. Der Wasserhaushalt der Flußgebiete. VEB Verlag für das Bauwesen, Berlin, 538 Seiten.
- El-Hames, A.S. 1998. An integrated, physically based model for arid region flash flood prediction capable of simulating dynamic transmission loss. *Hydrological Processes*, 12, 1219–1232.
- EMS-I 2005. SMS Surface Water Modeling System Version 9.0 Tutorials. South Jordan, UT, Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory (EMS-I).
- Endreny, T.A. und Wood, E.F. 2003. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. *Int. J. Geographical Information Science*, 17, 699–713.
- Erskine, R. H., Green, T. R., Ramirez, J. A., MacDonald L. H. 2006. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research*, 42 (9), W09416, doi:10.1029/2005WR004648

- Estupina-Borrell, V. 2006. Flash flood modeling with the MARINE hydrological distributed model. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 3397–3438.
- Faeh, A.O.; Scherrer, S. und Naef, F. 1997. A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 787–800.
- Fang, X. und Su, D. 2006. An integrated one-dimensional and two dimensional urban stormwater flood simulation model. *Journal of the American Water Resources Association*, 42, 713–724.
- Feige, W. 1961. Talentwicklung und Verkarstung im Kreidegebiet der Alme. *Geographische Kommission für Westfalen, Münster*, 3–66.
- Foody, G.M. 2004. Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment. *Journal of Hydrology*, 292, 48–58.
- Freer, J. 1997. Topographic controls on subsurface storm flow at the hillslope scale for two hydrologically distinct small catchments. *Hydrological processes*, 11, 1347–1352.
- Fricke, W. (2002). Hängen vermehrte Starkniederschläge am Hohenpeißenberg mit veränderten Wetterlagen zusammen? In: *Klimastatusbericht 2002*. S. 165-171. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Fritsch, U. 2001. Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. *Tech. Rept. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung*.
- Fürst, J. 2004. *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Gattke, C. 2006. *Modellvergleiche zur Untersuchung struktureller Unsicherheiten – Anwendung objektorientierter Methoden in der hydrologischen Modellierung*. Ph.D. thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- Gaume, E.; Livet, M.; Desbordes, M. und Villeneuve, J.P. 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, 286(1-4), 135–154.
- geomer 2005. *FloodArea - ArcGIS-Erweiterung zur Berechnung von Überschwemmungsbereichen*, geomer GmbH, Ruiz Rodriguez + Zeisler GbR: 40 p.
- Georgakakos, K.P. 2005. Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317, 81–103.
- Gerits, J.J.; de Lima, J.L. und van den Broek, T.M. 1990. Overland flow and erosion. In: *Process Studies in Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd.
- Germann, P.F. 1990. Macropores and hydrologic hillslope processes, in: *Process studies in hillslope hydrology*. John Wiley & Sons Ltd.
- Gewässerkundliche Landesdienst Thüringen. 2005. *Anforderungen an hydrologische Gutachten*. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.
- Giertz, S. 2004. *Analyse der hydrologischen Prozesse in den sub-humiden Tropen Westafrikas unter besonderer Berücksichtigung der Landnutzung am Beispiel des Aguima-Einzugsgebietes in Benin*. Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Gomi, T. 2008. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japan. *Journal of Hydrology*, 361, 275–290.
- Green, W.H.; Ampt, G.A. 1911. Studies on on Soil Physics: I. The flow of air and water through soils, *Journal of Agricultural Sciences*, 4, 1-24

- Gupta, H. 2006. Development of a Site-Specific Flash Flood Forecasting Model for the Western Region. Tech. Rept. University of Arizona.
- Gutknecht, D. 1996. Abflussentstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen. *Osterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, 134–144.
- Hattermann, F.F.; Krysanova, V.; Habeck, A. und Bronstert, A. 2006. Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. *Ecological Modelling*, 199, 379–392.
- Hatzfeld, F. 2008. Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Tagungsbeitrag Wassertage Münster 27.08.2008.
- Häckel, H. 1999. Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Hölting, B. und Coldewey, W.G. 2005. Hydrogeologie. Elsevier GmbH, München.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 44, 446–460.
- Johnson, L.E. 2000. Assessment of flash flood warning procedures. *Journal of Geophysical Research*, 105, 2299–2313.
- Julien, P. Y., B. Saghafian, et al. 1995. Raster-based Hydrologic Modeling of spatially-varied surface runoff. *Journal of the American Water Resources Association* 31(3): 523-536.
- Kalin, L.; Hantush, M. H. 2006. Comparative assessment of two distributed watershed models with application to a small watershed. *Hydrol. Process.* 20, 2285-2307.
- Kirkby, M.J. 1980. Hillslope Hydrology. John Wiley & Sons Ltd.
- Kirnauer, R. 2000. Niederschlag-Abfluss-Simulation für Gefahrenzonenpläne - Fallstudie Schesatobel bei Bludenz. *Wiener Mitteilungen*, 164, 19–30.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 6, 362 ff.
- Klaghofer, E. 1985. Einfluss der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Oberflächenabfluss bei Starkregen. *Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, 30.
- Knebl, M.R. 2004. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75, 325–336.
- Krysanova, V.; Müller-Wohlfeil, D.I. und Becker, A. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling*, 106, 261–289.
- Lacher, H. 1982. Zur Begründung der Konzentrationszeit aus der Sicht der Hydraulik. *Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik*, TH Darmstadt, 29.
- Lahmer, W. und Becker, A. 1998. Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines mesoskaligen Einzugsgebietes. In: *Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe*. 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar.
- LAWA. 2006. Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zur Aufstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten.
- Lecher, K.; Lühr, H.P. und Zanke, U.C.E. 2001. Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Löhmannsröben, R. 2002. Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. *Wiener Mitteilungen*, 164, 201–213.

- Liu, Q.Q.; Xiang, H. und Singh, V.P. 2006. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. *Hydrological processes*, 20, 469–486.
- Liu, Y.B. 2006. Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model. *Hydrological processes*, 20, 533–548.
- López-Avilés, A. 2007. Flash flooding in Spain: geomorphological approaches supporting flood frequency analysis, and the implications for the design of structures. *Water and Environment Journal*, 21, 217–226.
- Maidment, D.R. (Hrsg.). 1992. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Malitz, G. 1999. Starkniederschlag in Deutschland - Messergebnisse, statistische Auswertungen, Schätzungen. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Malitz, G. 2005. KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland - Grundlagenbericht. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Maniak, U. 2005. *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. Springer, Berlin.
- Markart, G.; Kohl, B. und Zanetti, P. 1997. Oberflächenabfluss bei Starkregen - Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchteflächen (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesabürserberg, Vorarlberg). *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 2/3, 123–144.
- Maul-Kötter, B. 1998. Nutzung von radargemessenen Niederschlagsdaten in der wasserwirtschaftlichen Modelltechnik. Jahresbericht, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 49–63.
- Mück, R. 2000. Räumliche und zeitliche Verteilung von Starkregen und deren Wahrscheinlichkeiten. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen (Universität der Bundeswehr, München)*, 73, 131 Seiten.
- MUNLV. 2003. Leitfaden Hochwasser-Gefahrenkarten. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf, 21 p.
- Mendel, H.G. 2000. *Elemente des Wasserkreislaufs*. Analytica, Berlin.
- Meng, H.; Green, T.R.; Salas, J.D. und Ahuja, L.R. 2008. Development and testing of a terrain-based hydrologic model for spatial Hortonian Infiltration and Runoff/On. *Environmental modeling & software*, 23, 794–812.
- Michel, F. 2006. Großflächige numerische 2d-Modellierung auf Basis eines hochauflösenden Laserscanner-Gitters (1 m). *Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau*, Dresden.
- Mitasova, H., C. Thaxton, et al. 2004. Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport and short term terrain evolution in Open Source GIS. *Proceedings of the XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XV)*, Chapel Hill, NC, USA, C.T. Miller, M.W. Farthing, V.G. Gray, G.F. Pinder eds.
- Mosley, P.M. 1982. Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 52, 321–335.
- MUNLV. 2003. Leitfaden Hochwasser-Gefahrenkarten. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW.
- Nearing, M.A.; Jetten, V.; Baffaut, C.; Cerdan, O.; Couturier, A.; Hernandez, M.; Le Bissonnais, Y.; Nichols, M.H.; Nunes, J.P.; Renschler, C.S.; Souchère, V. und van Oost, K. 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61, 131–154.

- Nicolau, J.M. 2002. Dynamics of stormflow generation—A hillslope-scale field study in east-central Pennsylvania, USA. *Hydrological processes*, 16, 631–647.
- Niehoff, D. 2001. Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Ph.D. thesis, Universität Potsdam.
- Norbiato, D.; Borga, M.; Sangati, M. und Zanon, F. 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology*, 345, 149–166.
- Nujić, M. 2003. HYDRO_AS-2d - Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis - Benutzerhandbuch. Ingenieurbüro Dr. Nujić., Rosenheim.
- Nujić, M. 2006. Laser_as-2d - Ausdünnung und Aufbereitung von Laserdaten für die 2d-Modellierung. Ingenieurbüro Dr. Nujić., Rosenheim.
- Reed, S.; Schaake, J. und Zhang, Z. 2007. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 402–420.
- Richards, L. A. 1931, Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, 1, 318-333
- Rother, K. H. 2001 in Patt, H. (Hrsg.). Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. Kapitel Hydrologische Grundlagen. 548 p. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Rozalis, S. 2008. Flash flood modeling using radar rainfall data in Mediterranean catchments in Israel. *Geophysical Research Abstracts*, 10.
- Rudolf, B. und J. Rapp. 2003. Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Offenbach am Main.
- Sarkar, R. 2008. Effects of scale on infiltration in a macropore-dominated hillslope. *Current Science*, 94.
- Schaap, M.G.; Feike, J.L. und van Genuchten, M.T. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163–176.
- Schäuble, H. 2003. HydroTools 1.0 für ArcView 3.x - Ein Programm zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten. Institut für angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P. 1992. Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Scherer, U. 2008. Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion. Ph.D. thesis, Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- Scherrer, S. 1997. Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 147, ETH Zürich, herausgegeben von Prof. Dr. D. Vischer.
- Schmitt, T.G. 2004. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299, 300–311.
- Schmitz, G.H. und Cullmann, J. 2008. PAI-OFF: A new proposal for online flood forecasting in flash flood prone catchments. *Journal of Hydrology*, 360, 1–14.
- Schneider, K. J. in Goris, A. (Hrsg.) 2008. Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 18. Auflage, Werner Verlag, Wolters-Kluwer, Köln.
- Schwarz, H.R. und Köckler, N. 2006. Numerische Mathematik. Teubner Verlag, Wiesbaden.

- Semmens, D.J.; Goodrich, D.C.; Unkirch, C.L.; Smith, R.E.; Woolhiser, D.A. und Miller, S.N. 2005. KINEROS2 and the AGWA Modeling Framework. International G-WADI Modelling Workshop, Roorkee, Indien.
- Sifalda, V. 1996. Approximation der Konzentrationszeit der Abflüsse in kleinen natürlichen Einzugsgebieten. *Wasserwirtschaft*, 86, 104–105.
- Smith, M. 2006. Comment on 'Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding' by O. Mark et al. [*J. Hydrol.* 299 (2004) 284-299]. *Journal of Hydrology*, 321, 1–4.
- Snell, S. 2002. A flash flood prediction model for rural and urban basins in New Mexico. Tech. Rept. University of New Mexico.
- Srinivasan, M.S. 2002. Dynamics of stormflow generation—A hillslope-scale field study in east-central Pennsylvania, USA. *Hydrological processes*, 16, 649–665.
- Stalman, V.; Draschoff, R.; Günther, T.; Pfister, A.; Prellberg, D.; Verworn, H.R. und Malitz, G. 2004. Das Niederschlagsregelwerk für die Deutsche Wasserwirtschaft. *Wasserwirtschaft*, 94, 8–27.
- Szilagyi, J. 2007. Analysis of the nonlinearity in the hillslope runoff response to precipitation through numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 337, 391–401.
- Stocker, M. and G. Schwaller. 2003. Tutorial zur HYDRO_AS-2D/SMS - Grundschulung. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München: 88 p.
- Taramasso, A.C.; Gabellani, S. und Parodi, A. 2005. An operational flash-flood forecasting chain applied to the test cases of the EU project HYDROPTIMET. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 703–710.
- Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid elevation models. *Water Resources Research*, 33, 309–319.
- Torres, D.S. 1992. Using the DPFT Approach to Improve Flash Flood Forecasting Models. *Natural Hazards*, 5, 17–41.
- Tromp-van Meerveld, I. und Weiler, M. 2008. Hillslope dynamics modeled with increasing complexity. *Journal of Hydrology*, 361, 24–40.
- USDA-SCS. 1985. National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology. Washington, D.C.: USDA-SCS.
- Van Genuchten, M.Th. 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society Am. J.*, 44, 892-898
- Vertessy, R.A.; Hatton, T.J.; O'Shaughnessy, P.J. und Jayasuriya, M.D.A. 1993. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *Journal of Hydrology*, 150, 665–700.
- Verworn, H.R. und Kummer, U. 2003. Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlag (PEN) - Abschlussbericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover.
- Vieux, B.E. 2004. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Wardah, T.; Ab Bakar, S.H.; Bardossy, A. und Maznorizan, M. 2008. Use of geostationary meteorological satellite images in convective rain estimation for flash-flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 356, 283–298.
- Weiler, M.H. 2001. Mechanisms controlling macropore flow during infiltration - Dye tracer experiments and simulations. Ph.D. thesis, ETH Zürich.

- Woolhiser, D.A.; Smith, R.E. und Goodrich, D.C. 1990. A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 77, 130 Seiten.
- Yatheendradas, S.; Wagener, T.; Gupta, H.; Unkirch, C.; Goodrich, D.; Schaffner, M. und Stewart, A. 2008. Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semiarid regions. *Water Resources Research*, 44.
- Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16, 195–231.
- Zuidema, P.K. 1985. Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen, eine Untersuchung mit Hilfe numerischer Modelle unter der Verwendung plausibler Bodenkennwerte. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 79, ETH Zürich, 249 S

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Starkregenhöhen in Abhängigkeit von der Regendauer, berechnet nach Gleichung 2.1.....	6
Tabelle 2.2:	Modellierungsstrategien und ihre prinzipiellen Eigenschaften (nach Gattke, 2006).....	13
Tabelle 3.1:	Die größten in Deutschland beobachteten Niederschlagshöhen für verschiedene Beobachtungsintervalle (nach Rudolf und Rapp, 2003).....	35
Tabelle 4.1:	Lagerungsdichte und Wassergehalt der Einzelproben bei der Probenahme (Mittelwert und Standardabweichung (Stabw.) für jeweils drei Wiederholungen an den unterschiedlichen Probenahmestellen).....	55
Tabelle 4.2:	Vergleich der Mittelwerte von Lagerungsdichte bzw. gesättigter Leitfähigkeit verschiedener Gruppen anhand eines t-Tests (Annahme: Mittelwerte sind gleich).....	56
Tabelle 4.3:	Übersicht der Eingangsdaten für die Projektbearbeitung.....	59
Tabelle 4.4:	Mittleres Gefälle der in ArcGIS generierten Hangneigungsklassen.....	72
Tabelle 4.5:	Parameter für Blattflächenindex aus Fritsch (2001), Interzeptionsspeicherungshöhe (berechnet nach Hoyningen-Huene) und Vegetationsbedeckungsgrad sowie Rauigkeitskoeffizient aus Vieux (2004) für die jeweilige Landnutzung der Flächen.....	80
Tabelle 4.6:	Porosität, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (ges. hydr. Leitf.) und Anfangswassergehalt als Anteil am Porenvolumen (AWG / Porenvolumen) der Teilflächen, unterteilt nach Bodenart und Landnutzung.....	81
Tabelle 4.7:	Mit KINEROS2 simulierte Volumenanteile von Interzeption, Infiltration, Abfluss und Gebietsrückhalt am Gebietsniederschlag.....	85
Tabelle 4.8:	Vergleich der verwendeten Modelle.....	105
Tabelle 4.9:	Mit Hydro_as-2d berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Ahden.....	118
Tabelle 4.10:	Mit Hydro_as-2d berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Delbrück.....	120
Tabelle 4.11:	Mit FloodArea berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Ahden.....	121
Tabelle 4.12:	Mit FloodArea berechnete Wasserstände auf Grundlage der KINEROS2-Simulation für Delbrück.....	122
Tabelle 4.13:	Mit CASC2D berechnete Wasserstände in Ahden.....	124
Tabelle 4.14:	Mit CASC2D berechnete Wasserstände in Delbrück.....	125
Tabelle 4.15:	Vergleichsrechnung Hydro_as-2d und FloodArea.....	125
Tabelle 4.16:	Hangneigungsstufen, nach Castro (2008).....	133
Tabelle A.1:	Bodensäuleneigenschaften mit Auflistungen der jeweiligen Abweichung, die auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind.....	A-8
Tabelle A.2:	Potentialdifferenz im Versuchsaufbau, Fließrate und errechnete Werte der hydraulischen Leitfähigkeit der einzelnen Proben mit den statistischen Unsicherheiten der Einzelmessungen.....	A-8
Tabelle A.3:	Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S24-Z47 (Ahden) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation.....	A-9
Tabelle A.4:	Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S25-Z47 (Henglar) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation.....	A-10
Tabelle A.5:	Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S25-Z47 (Delbrück) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation.....	A-11
Tabelle A.6:	Rauigkeitsklassen nach ATKIS-Einteilung einschließlich gewählter Strickler-Beiwerte (Stocker und Schwaller, 2003).....	A-12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Die wesentlichen Komponenten des Wasserkreislaufs in ländlichen Gebieten und deren Interaktionen, nach Bronstert (1994).	5
Abbildung 2.2:	Charakteristische Raum- und Zeitskalen einiger hydrologischer Prozesse und Arbeitsskalen der hydrologischen Modellierung, aus Fritsch (2001).	14
Abbildung 3.1:	Lage der Untersuchungsgebiete im Kreis Paderborn	27
Abbildung 3.2:	Landnutzungscharakteristik in den Einzugsgebieten Ahden und Henglarn	29
Abbildung 3.3:	Bodendruckverteilung und Geopotential 500 hPa für den 09.08.2007 (Quelle wetterzentrale.de, Juni 2009).....	31
Abbildung 3.4:	Bodenwetterkarte vom 09.08.2007 (Quelle: Meteorologisches Institut FU Berlin, Juni 2009) ...	31
Abbildung 3.5:	Temperaturverteilung 850 hPa für den 09.08.2009 (Quelle: wetterzentrale.de, Juni 2009).....	32
Abbildung 3.6:	Niederschlagsradarbilder von Nordrhein-Westfalen vom 09.08.2007 (19:00 bis 19:45).	33
Abbildung 3.7:	Aufgezeichnete Summenlinien des Niederschlags im Zeitraum 07. bis einschließlich 09.08.2007	34
Abbildung 4.1:	Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Henglarn, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.	40
Abbildung 4.2:	Fließwege des Oberflächenabflusses bei einem Starkregenereignis in Henglarn.	41
Abbildung 4.3:	Eingang der Kreuzapotheke am Kirchplatz in Delbrück (a) und Kanaldeckel auf dem Alten Markt 6 vor der Volksbank Paderborn-Höxter in Delbrück (b). Fotos: S. Hartmann.....	42
Abbildung 4.4:	Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Delbrück, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.	43
Abbildung 4.5:	Fließrichtung des Oberflächenabflusses und Wasserstand auf der Straße in Ahden, rekonstruiert anhand von Anwohner- und Feuerwehraussagen.	44
Abbildung 4.6:	Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.	45
Abbildung 4.7:	Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.	46
Abbildung 4.8:	Ausschnitte aus dem von einem Anwohner erstellten Videofilm von dem Hochwasserereignis am 9. August 2007 in Ahden.	47
Abbildung 4.9:	(a) Lage des Kanaleingangs (grüne Markierung) und des Regenrückhaltebeckens (rote Markierung) in Henglarn.	49
Abbildung 4.10:	Kanaleingang vor und nach der Erneuerung. Foto (a): S. Savory. Foto (b): K. Stein (14.10.2008).	50
Abbildung 4.11:	Lage der Abflusssrinne (a) (rote Markierung) und des Kanaleingangs (b) (grüne Markierung) in Ahden. Die roten Pfeile geben die Aufnahmerichtungen der Fotos an.	51
Abbildung 4.12:	Bodenarten nach BK 50 an den Probenahmestellen in Ahden (a) und Henglarn (b).....	52
Abbildung 4.13:	Schematischer Versuchsaufbau der K_s -Messung bei konstantem Überstau, aus Anderson und McDonell (2005).	53
Abbildung 4.14:	Gemessene gesättigte Leitfähigkeit K_s [cm d^{-1}] der Stechzylinderproben an den zwei Ackerstandorten. In rot: Mittelwert.	55
Abbildung 4.15:	Vergleich der gesättigten Leitfähigkeiten aller Proben bei Makroporen- bzw. Matrixfluss	56
Abbildung 4.16:	Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Ahden.	62
Abbildung 4.17:	Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Henglarn.	63
Abbildung 4.18:	Anhand des DGM generiertes synthetisches Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet Delbrück.....	64
Abbildung 4.19:	Definitionsskizze für den Oberflächenabfluss (nach Woolhiser et al. 1990)	67
Abbildung 4.20:	Synthetisches Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Landnutzung und verschnittene Teilflächen des Untersuchungsgebiets Ahden.....	73
Abbildung 4.21:	Anordnung der Systemelemente zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets Ahden in KINEROS2.....	74

Abbildung 4.22:	Synthetisches Gewässernetz, Teileinzugsgebiete, Landnutzung und verschnittene Teilflächen des Untersuchungsgebiets Henglarh.....	75
Abbildung 4.23:	Anordnung der Systemelemente zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets Henglarh in KINEROS2.....	76
Abbildung 4.24:	Bodenkarte und Einzugsgebiete Delbrück Innenstadt	78
Abbildung 4.25:	Systemplan KINEROS2-Modell Delbrück	78
Abbildung 4.26:	Niederschlagssummenlinien der drei Stationen Büren, Ebbinghausen und Delbrück Kläranlage mit dem Intensitätsverlauf der Station Boke.....	82
Abbildung 4.27:	Prozentuale Veränderung der Gesamtabflussmenge bei Veränderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_s , berechnet mit KINEROS2 am Gebietsauslass Ahden.....	83
Abbildung 4.28:	Mit KINEROS2 simulierte Volumenanteile von Interzeption, Infiltration, Abfluss und Gebietsrückhalt am Gebietsniederschlag.....	86
Abbildung 4.29:	Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Ahden bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 08.08.07 17:30).....	87
Abbildung 4.30:	Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Henglarh bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 08.08.07 17:30).....	87
Abbildung 4.31:	Simulierte Abflussganglinie des Oberflächenabflusses am Gebietsauslass in Delbrück bei dem Niederschlagsereignis im August 2007 (Simulationsbeginn 09.08.07 19:00).....	88
Abbildung 4.32:	Einfluss der Intensitätsverteilung des Niederschlags auf den zeitlichen Verlauf der Abflussganglinie (Maniak, 2005)	96
Abbildung 4.33:	Empfohlener Niederschlagsverlauf (DVWK 1984)	97
Abbildung 4.34:	Abflussganglinien am Gebietsauslass in Ahden, modelliert mit Niederschlägen unterschiedlicher Dauer (D) und Jährlichkeit (T) nach KOSTRA-DWD-2000. Niederschlagsverlauf DVWK-verteilt.	98
Abbildung 4.35:	Abflussganglinien am Gebietsauslass in Henglarh	98
Abbildung 4.36:	Abflussganglinien am Gebietsauslass in Delbrück.....	99
Abbildung 4.37:	(A) Landoberflächen- und (B) Gerinneabfluss in CASC2D (Julien et al., 1995).....	103
Abbildung 4.38:	Volumenbilanzierung auf Raster-DGM-Basis mit FloodArea (geomer, 2005).....	104
Abbildung 4.39:	Funktionsweise des Hydro_as-2d-Hilfsprogramms "Ausdünnen", gezeigt ist ein trianguliertes Gitter	107
Abbildung 4.40:	Verfeinerung des Ausgangsgitters in der Innenstadt von Delbrück.....	108
Abbildung 4.41:	Histogramm der Abweichungen der berechneten Wassertiefen Original-DGM - ausgedünntes DGM	110
Abbildung 4.42:	Berechnete Wasserspiegellage in Henglarh (DGM5).....	111
Abbildung 4.43:	Abfluss über den Modellrand (untere Randbedingung) in Henglarh	112
Abbildung 4.44:	Abfluss über den Modellrand (untere Randbedingung) in Ahden.....	112
Abbildung 4.45:	Sensitivität der berechneten Wasserstände bei Variation der Stricklerbeiwerte für die Simulation des August-2007-Ereignisses in Ahden, ausgedünntes TIN	114
Abbildung 4.46:	Relative Abweichung der berechneten Wasserstände in Ahden bezogen auf die Standardrauhigkeiten.....	114
Abbildung 4.47:	In Hydro_as-2d und FloodArea zu Grunde gelegte Rauigkeitsbeiwerte sowie Nutzungsgrenzen nach ATKIS, Ausschnitt Ortslage Ahden.....	115
Abbildung 4.48:	Simulation des Ereignisses August 2007, berechnete Wasserstände in Ahden [m]	117
Abbildung 4.49:	Berechnete Wasserstände am Kirchplatz in Delbrück für das Ereignis August 2007 [m].....	119
Abbildung 4.50:	Berechnung von Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit am Kirchplatz in Delbrück, an ausgewählten Knoten sind die Geschwindigkeiten in m/s gekennzeichnet.....	119
Abbildung 4.51:	Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der FloodArea-Simulation August 2007 in Ahden ..	121
Abbildung 4.52:	Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der FloodArea-Simulation August 2007 in Delbrück.....	122
Abbildung 4.53:	Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der CASC2D-Simulation August 2007 in Ahden	123
Abbildung 4.54:	Überschwemmungsgebiet auf Grundlage der CASC2D-Simulation August 2007 in Delbrück	124

Abbildung 4.55: Räumliche Verteilung der Wasserstandsunterschiede (FloodArea vs. Hydro_as-2d) im Untersuchungsgebiet Delbrück.....	126
Abbildung 4.56: Überschwemmungsgebiete in Ahden infolge Starkregen	127
Abbildung 4.57: Überschwemmungsgebiete in Delbrück infolge Starkregen.....	128
Abbildung 4.58: Hydraulischer Längsschnitt HQ100 mit Achse und Kartendarstellung des spezifischen Durchflusses	128
Abbildung 4.59: Vorschlag für den prinzipiellen Aufbau einer Starkregengefahrenkarte	131
Abbildung 4.60: Angepasste Klassifizierung der Überflutungstiefe.....	132
Abbildung 4.61: Angepasste Klassifizierung der Fließgeschwindigkeit	133
Abbildung A.1: Hangneigung der einzelnen Rasterzellen in Grad im Projektgebiet Ahden.	A-2
Abbildung A.2: Hangneigung der einzelnen Rasterzellen in Grad im Projektgebiet Henglarn.	A-3
Abbildung A.3: Hangneigung der einzelnen Rasterzellen in Grad im Projektgebiet Delbrück.....	A-4
Abbildung A.4: Bodentypen im Gebiet Ahden.	A-5
Abbildung A.5: Bodentypen im Gebiet Henglarn.....	A-6
Abbildung A.6: Bodentypen im Gebiet Delbrück.	A-7
Abbildung A.7: Synthetische Abflussganglinien Ahden, T = 20a.....	A-13
Abbildung A.8: Synthetische Abflussganglinien Ahden, T = 50a.....	A-13
Abbildung A.9: Synthetische Abflussganglinien Ahden, T = 100a.....	A-14
Abbildung A.10: Synthetische Abflussganglinien Ahden, T = 200a.....	A-14
Abbildung A.11: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 20a	A-15
Abbildung A.12: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 50a	A-15
Abbildung A.13: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 100a.....	A-16
Abbildung A.14: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 200a.....	A-16
Abbildung A.15: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 20a.....	A-17
Abbildung A.16: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 50a.....	A-17
Abbildung A.17: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 100a.....	A-18
Abbildung A.18: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 200a.....	A-18

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

ALK	Automatisiertes Liegenschaftskataster
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AWG	Anfangswassergehalt
BFI	Blattflächenindex
BK 50	Bodenkarte 1 : 50.000
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CN	Curve Number
DGK 5	Deutsche Grundkarte 1 : 5.000
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	Deutsche Industrienorm
DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
GIS	Geographisches Informationssystem
GK 50	Geologische Karte 1 : 50.000
HRB	Hochwasserrückhaltebecken
ID	Identifizierungsnummer
ISO	International Organisation for Standardization
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
MGN	Maximierte Gebietsniederschläge für Deutschland
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW
N-A-Modell	Niederschlag-Abfluss-Modell
PEN	Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags
SCS	Soil Conservation Service
TIN	Triangulated Irregular Network
USDA	U.S. Department of Agriculture

Symbole

Großbuchstaben

A_{Bd}	$[L^2]$	Fläche der Bodensäule
C	$[-]$	Speicherkoeffizient (spezifische Feuchtekapazität)
C_{veg}	$[L]$	Interzeptionsspeicher
D	$[T]$	Niederschlagsdauer
ET_{act}	$[L T^{-1}]$	aktuelle Gesamtverdunstung
EV_{act}	$[L T^{-1}]$	Evaporation des Bodens
G	$[-]$	Skalierungsparameter für die Länge der Kapillaren
ΔH	$[L]$	hydraulische Potentialdifferenz
I	$[L^3]$	kumulative Infiltration
I_N	$[L T^{-1}]$	Intensität des Bestandsniederschlags
IV_{act}	$[L T^{-1}]$	Interzeptionsverdunstung
K_s	$[L T^{-1}]$	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
L	$[L]$	längste Fließstrecke im Einzugsgebiet
L_{Bd}	$[L]$	Länge der Bodensäule
N	$[L]$	Niederschlag
Q	$[L T^{-1}]$	stationäre Strömungsrate aus der Mariott'schen Flasche
Q_{INTab}	$[L T^{-1}]$	Abfluss aus dem Interzeptionsspeicher
S_{veg}	$[L]$	Speicherkapazität der Vegetationsdecke
T	$[T]$	Jährlichkeit der Niederschlagshöhe
TR_{act}	$[L T^{-1}]$	Pflanzentranspiration
S	$[L L^{-1}]$	mittleres Gefälle längs der Fließstrecke im Einzugsgebiet
S_O	$[L L^{-1}]$	Oberflächengefälle
S_f	$[L L^{-1}]$	Reibungsfälle
V	$[L^3]$	Abflussvolumen aus der Mariott'schen Flasche
W_{feucht}	$[M]$	Gewicht der frischen Bodenprobe
$W_{trocken}$	$[M]$	Gewicht der ofentrockenen Bodenprobe

Kleinbuchstaben

d_B	[L]	Innendurchmesser der Bodensäule
g	[L T ⁻²]	Schwerebeschleunigung
h	[L]	hydraulische Höhe
hN	[L]	Niederschlagshöhe
i	[L T ⁻¹]	Infiltrationsrate
k_{St}	[T L ^{-1/3}]	Rauhigkeitskoeffizient nach Strickler
m	[-]	Parameter für den Fließzustand
m_f	[M]	Masse der festen Bestandteile des Bodens
n	[L ^{1/3} T ⁻¹]	Rauhigkeitskoeffizient nach Manning
p	[L T ⁻¹]	Niederschlagsrate
q	[L ³ T ⁻¹]	volumetrische Wasserflussdichte
t	[T]	Zeit
t_c	[T]	Konzentrationszeit
t_v	[T]	Verzögerungszeit
u	[-]	Formparameter der KOSTRA-Verteilungsfunktion
v	[L L ⁻¹]	Fließgeschwindigkeit
w	[-]	Formparameter der KOSTRA-Verteilungsfunktion
x	[L]	Raumachse entlang der Fließrichtung

Griechische Kleinbuchstaben

α	[-]	hydraulischer Koeffizient
φ	[-]	Porenvolumen
γ	[-]	Formparameter
ν	[L ² T ⁻¹]	kinematische Viskosität des Wassers
ϑ	[L ³ L ⁻³]	Volumetrischer Wassergehalt
ϑ_a	[L ³ L ⁻³]	Anfangswassergehalt
ϑ_i	[L ³ L ⁻³]	Sättigungsdefizit des Bodens
ϑ_r	[L ³ L ⁻³]	Residualwassergehalt
ϑ_s	[L ³ L ⁻³]	Sättigungswassergehalt
ρ_B	[M L ⁻³]	Lagerungsdichte
ρ_f	[M L ⁻³]	Dichte der Festsubstanz des Bodens
ρ_w	[M L ⁻³]	Dichte des Wassers
ψ	[-]	Abflussbeiwert
ψ_m	[L]	Matrixpotential
ψ_h	[L]	Gravitationspotential

A. Anhang



Hangneigung [Grad]

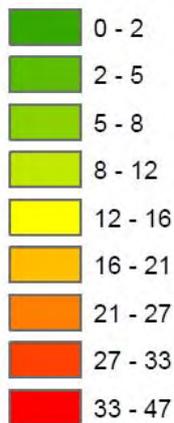
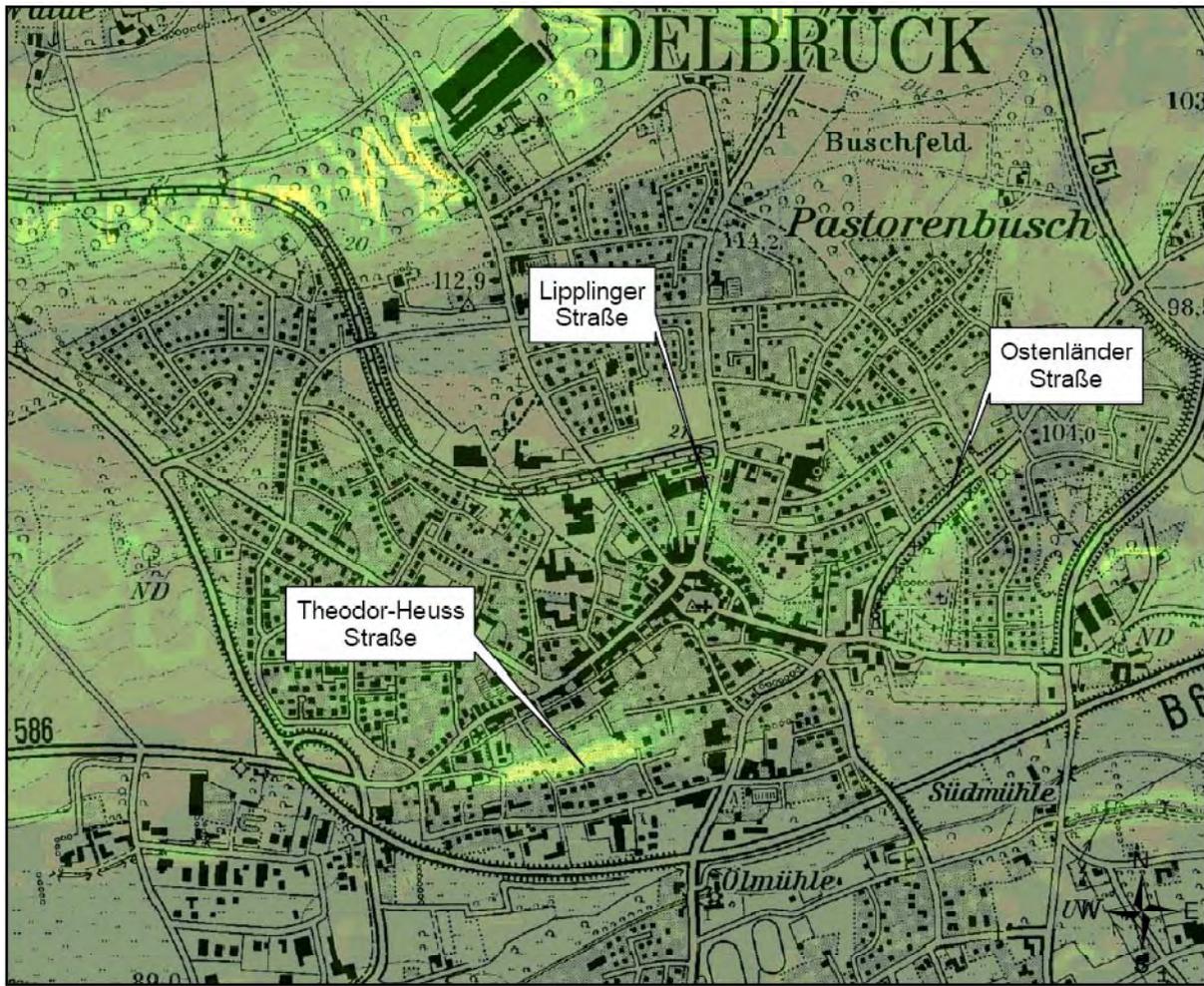


Abbildung A.1: Hangneigung der einzelnen Rasterzellen in Grad im Projektgebiet Ahden.



Hangneigung [Grad]

0 125 250 500 m

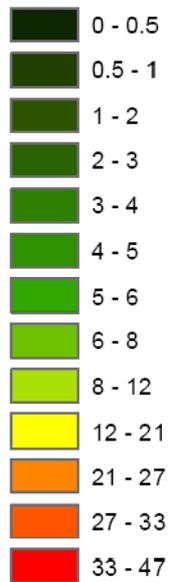


Abbildung A.3: Hangneigung der einzelnen Rasterzellen in Grad im Projektgebiet Delbrück.

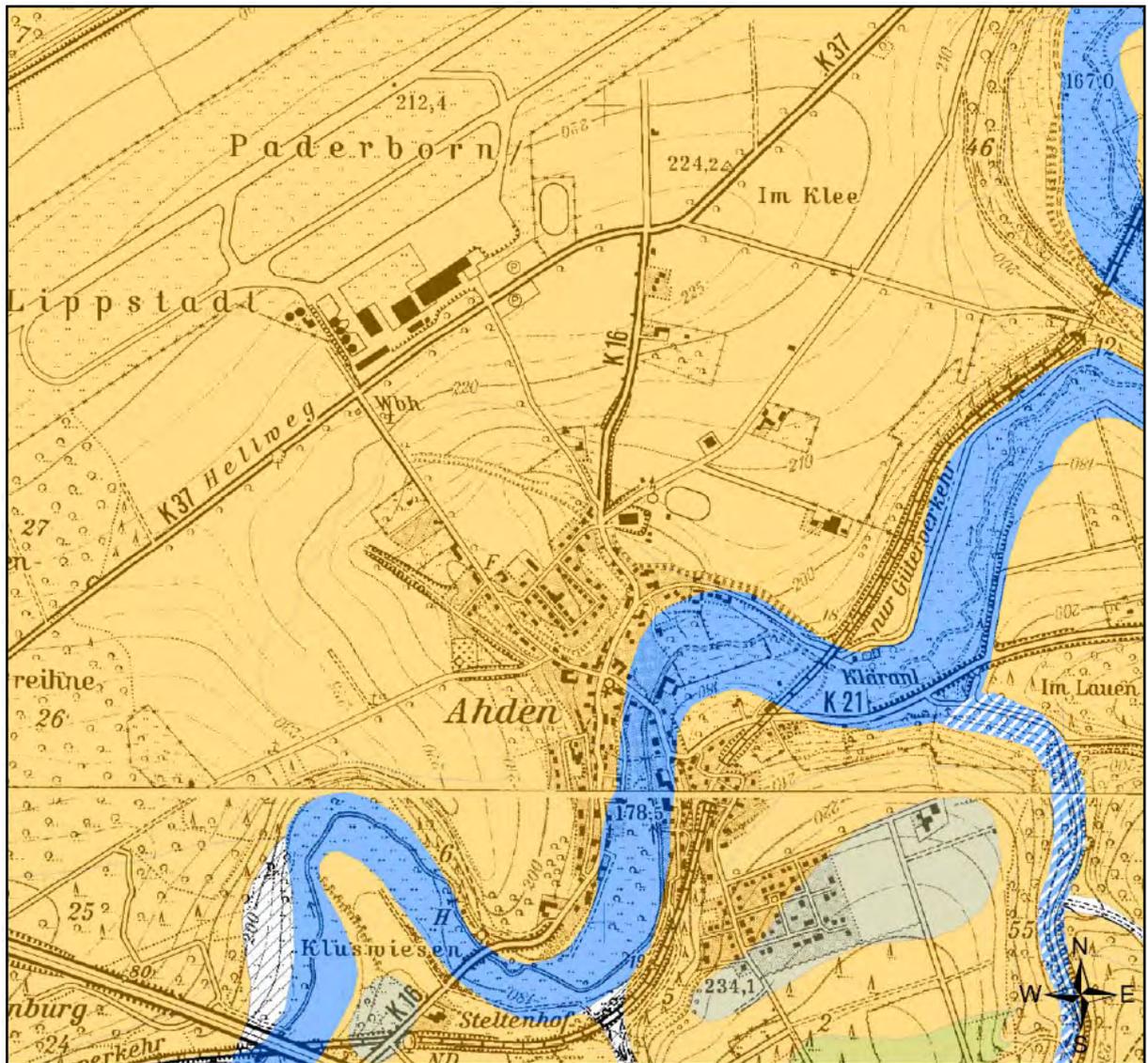
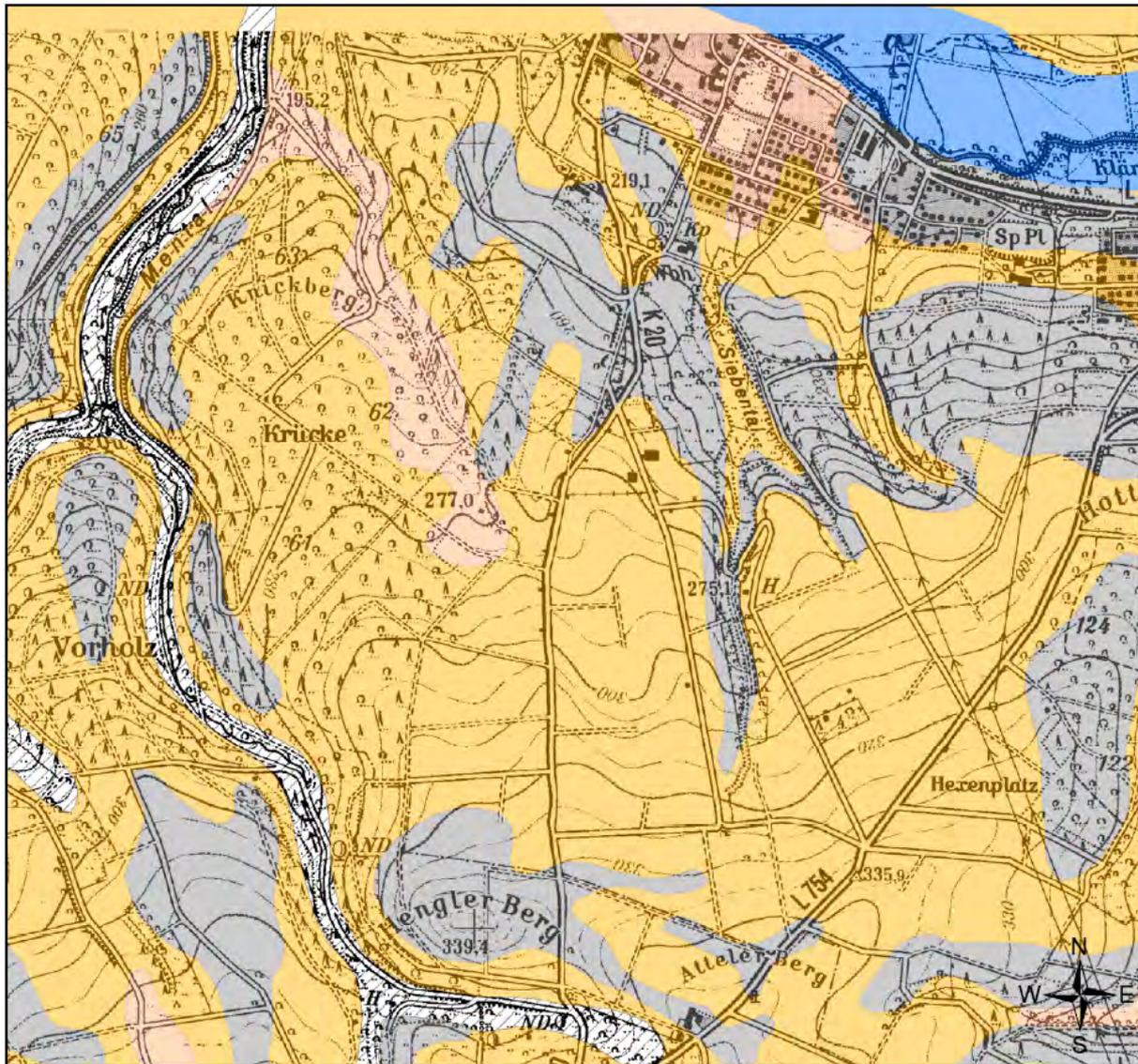
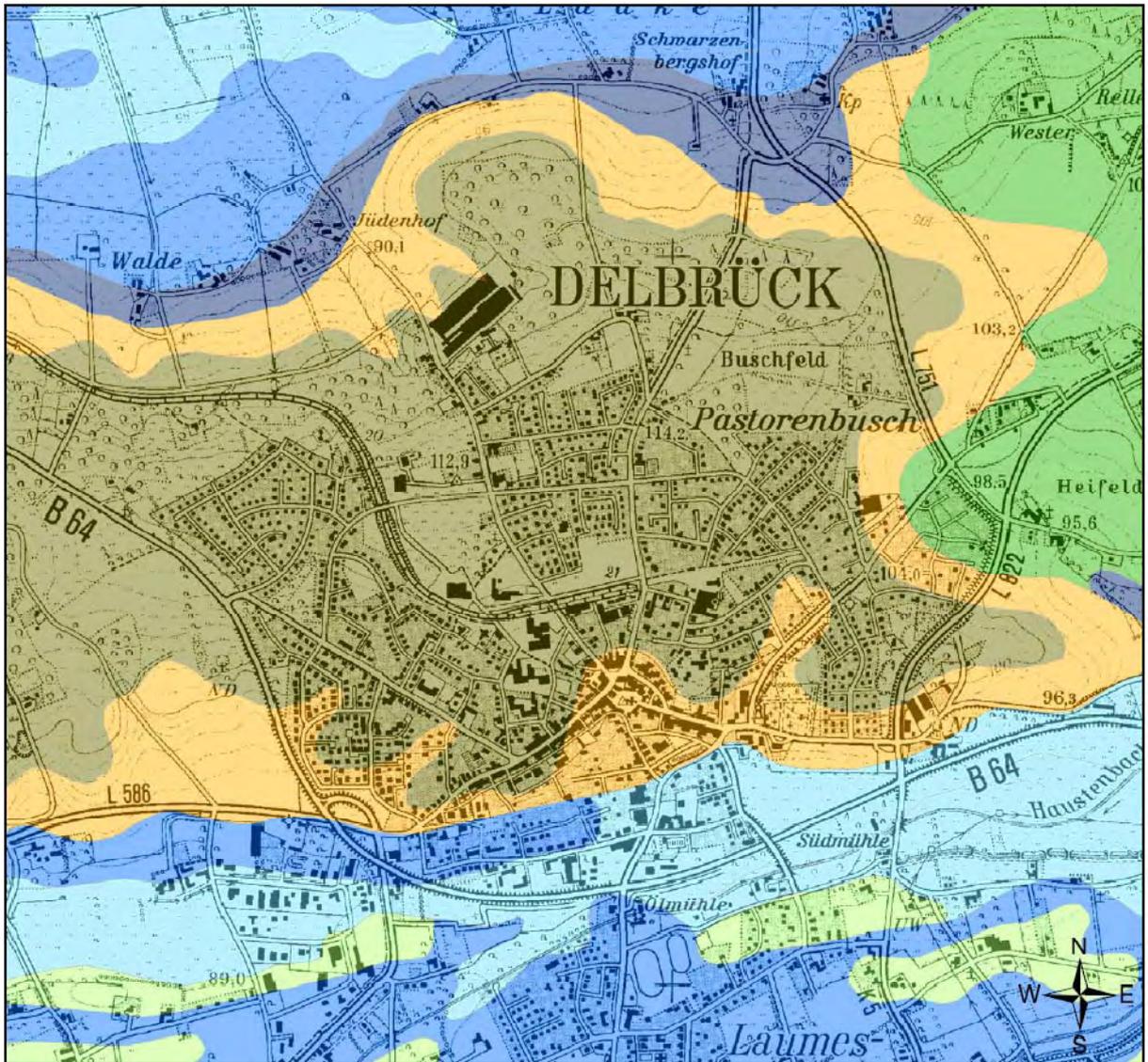


Abbildung A.4: Bodentypen im Gebiet Ahden.



- Parabraunerde
- Braunerde
- Rendzina
- Gley-Vega
- Kolluvisol

Abbildung A.5: Bodentypen im Gebiet Henglar.



0 125 250 500 m

- Braunerde
- Pseudogley
- Gley mit Grobblockbeimengung
- Gley
- Anmoorgley
- vergleyter Podsol
- Podsol

Abbildung A.6: Bodentypen im Gebiet Delbrück.

Tabelle A.1: Bodensäuleneigenschaften mit Auflistungen der jeweiligen Abweichung, die auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind.

Variable	Symbol	Wert	Abs.Fehler Δ	Rel. Fehler δ
Durchmesser der Bodensäule	d_{Bd}	9,4 cm	0,05 cm	0,5 %
Fläche der Bodensäule	A_{Bd}	69,4 cm ²	0,75 cm ²	1,1 %
Länge der Bodensäule	L_{Bd}	7,2 cm	0,05 cm	0,7 %

Tabelle A.2: Potentialdifferenz im Versuchsaufbau, Fließrate und errechnete Werte der hydraulischen Leitfähigkeit der einzelnen Proben mit den statistischen Unsicherheiten der Einzelmessungen

Probe	Variable	Wert	Abs. Fehler	Rel. Fehler
A 1a	Potentialdifferenz ΔH [cm]	4,70	0,10	2,1%
A 1b	ΔH [cm]	1,90	0,10	5,3%
A 1c	ΔH [cm]	15,10	0,10	0,7%
A 2a	ΔH [cm]	0,40	0,10	25,0%
A 2b	ΔH [cm]	1,30	0,10	7,7%
A 2c	ΔH [cm]	4,40	0,10	2,3%
H 1a	ΔH [cm]	12,30	0,10	0,8%
H 1b	ΔH [cm]	4,80	0,10	2,1%
H 1c	ΔH [cm]	30,50	0,10	0,3%
H 2a	ΔH [cm]	1,30	0,10	7,7%
H 2b	ΔH [cm]	2,60	0,10	6,3%
H 2c	ΔH [cm]	2,30	0,10	4,3%
A 1a	Durchflussrate Q [cm ³ d ⁻¹]	1,55	0,02	1,0%
A 1b	Q [cm ³ d ⁻¹]	4,18	0,03	0,7%
A 1c	Q [cm ³ d ⁻¹]	0,70	0,01	0,8%
A 2a	Q [cm ³ d ⁻¹]	9,42	0,03	0,3%
A 2b	Q [cm ³ d ⁻¹]	0,30	0,01	0,3%
A 2c	Q [cm ³ d ⁻¹]	1,08	0,02	1,7%
H 1a	Q [cm ³ d ⁻¹]	3,31	0,02	0,6%
H 1b	Q [cm ³ d ⁻¹]	7,30	0,24	3,4%
H 1c	Q [cm ³ d ⁻¹]	1,88	0,02	0,3%
H 2a	Q [cm ³ d ⁻¹]	8,25	0,06	0,7%
H 2b	Q [cm ³ d ⁻¹]	7,30	0,07	0,9%
H 2c	Q [cm ³ d ⁻¹]	9,25	0,08	0,8%
A 1a	ges. Leitfähigkeit K_s [cm d ⁻¹]	49,27	1,32	2,7%
A 1b	K_s [cm d ⁻¹]	328,99	17,97	5,5%
A 1c	K_s [cm d ⁻¹]	6,93	0,11	1,6%
A 2a	K_s [cm d ⁻¹]	35183,70	8808,34	25,0%
A 2b	K_s [cm d ⁻¹]	10,13	0,79	7,8%
A 2c	K_s [cm d ⁻¹]	124,42	3,91	3,1%
H 1a	K_s [cm d ⁻¹]	40,18	0,65	1,6%
H 1b	K_s [cm d ⁻¹]	227,22	9,43	4,1%
H 1c	K_s [cm d ⁻¹]	9,22	0,12	1,4%
H 2a	K_s [cm d ⁻¹]	947,79	74,25	7,8%
H 2b	K_s [cm d ⁻¹]	681,76	43,96	6,4%
H 2c	K_s [cm d ⁻¹]	601,02	27,71	4,6%

Tabelle A.3: Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S24-Z47 (Ahden) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation

S24-Z47	0.5		1		2		5		10		20		50		100		PEN-Extr. 200	
	h_N	r_N	h_N	r_N														
5 min	3.2	105.2	4.9	163.4	6.6	221.6	9.0	298.4	10.7	356.6	12.4	414.8	14.8	491.7	16.5	549.9	18.8	627.9
10 min	5.4	90.2	7.8	130.3	10.2	170.3	13.4	223.3	15.8	263.3	18.2	303.4	21.4	356.3	23.8	396.4	27.2	452.6
15 min	6.9	76.1	9.8	108.3	12.6	140.5	16.5	183.1	19.4	215.3	22.3	247.5	26.1	290.0	29.0	322.2	33.1	367.6
20 min	7.8	65.1	11.1	92.7	14.4	120.3	18.8	156.7	22.1	184.3	25.4	211.9	29.8	248.3	33.1	275.9	37.8	315.3
30 min	9.0	49.8	13.0	72.0	16.9	94.1	22.2	123.4	26.2	145.6	30.2	167.8	35.5	197.1	39.5	219.2	45.2	250.9
45 min	9.7	36.1	14.5	53.9	19.4	71.7	25.7	95.2	30.5	113.1	35.3	130.9	41.7	154.4	46.5	172.3	53.4	198.0
60 min	10.0	27.8	15.5	43.1	21.0	58.3	28.3	78.5	33.8	93.8	39.2	109.0	46.5	129.2	52.0	144.4	59.9	166.3
90 min	11.6	21.5	17.4	32.3	23.3	43.1	31.0	57.4	36.8	68.2	42.7	79.0	50.4	93.3	56.2	104.1	64.9	120.2
2 h	12.9	17.9	19	26.4	25.1	34.8	33.1	46.0	39.2	54.5	45.3	62.9	53.4	74.1	59.5	82.6	68.7	95.4
3 h	14.9	13.8	21.4	19.8	27.8	25.8	36.4	33.7	42.9	39.7	49.4	45.7	57.9	64.4	59.6	74.5	69.0	69.0
4 h	16.5	11.4	23.2	16.1	30.0	20.8	38.9	27.0	45.7	31.7	52.5	36.4	61.4	68.2	47.3	78.9	54.8	54.8
6 h	19.0	8.8	26.1	12.1	33.3	15.4	42.8	19.8	50.0	23.2	57.2	26.5	66.7	73.9	34.2	85.8	39.7	39.7
9 h	21.8	6.7	29.4	9.1	37.1	11.4	47.2	14.6	54.8	16.9	62.4	19.3	72.5	80.2	24.7	93.3	28.8	28.8
12 h	24.0	5.6	32.0	7.4	40.0	9.3	50.5	11.7	58.5	13.5	66.5	15.4	77.0	85.0	19.7	99.0	22.9	22.9
18 h	25.3	3.9	34.8	5.4	44.2	6.8	56.7	8.7	66.1	10.2	75.6	11.7	88.1	97.5	15.0	115.9	17.9	17.9
24 h	26.6	3.1	37.5	4.3	48.4	5.6	62.8	7.3	73.8	8.5	84.7	9.8	99.1	110.0	12.7	132.8	15.4	15.4
48 h	33.7	2.0	45.0	2.6	56.3	3.3	71.2	4.1	82.5	4.8	93.8	5.4	108.7	120.0	6.9	143.5	8.3	8.3
72 h	32.2	1.2	45.0	1.7	57.8	2.2	74.7	2.9	87.5	3.4	100.3	3.9	117.2	130.0	5.0	155.1	6.0	6.0

 r_N in mm, h_N in l/(s ha)

Tabelle A.4: Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S25-Z47 (Henglar) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation

S25-Z47	0.5		1		2		5		10		20		50		100		PEN-Extr. 200	
	h_N	r_N	h_N	r_N														
5 min	3.2	105.2	4.9	163.4	6.6	221.6	9.0	298.4	10.7	356.6	12.4	414.8	14.8	491.7	16.5	549.9	18.8	627.9
10 min	5.4	90.2	7.8	130.3	10.2	170.3	13.4	223.3	15.8	263.3	18.2	303.4	21.4	356.3	23.8	396.4	27.2	452.6
15 min	6.9	76.1	9.8	108.3	12.6	140.5	16.5	183.1	19.4	215.3	22.3	247.5	26.1	290.0	29.0	322.2	33.1	367.6
20 min	7.8	65.1	11.1	92.7	14.4	120.3	18.8	156.7	22.1	184.3	25.4	211.9	29.8	248.3	33.1	275.9	37.8	315.3
30 min	9.0	49.8	13.0	72.0	16.9	94.1	22.2	123.4	26.2	145.6	30.2	167.8	35.5	197.1	39.5	219.2	45.2	250.9
45 min	9.7	36.1	14.5	53.9	19.4	71.7	25.7	95.2	30.5	113.1	35.3	130.9	41.7	154.4	46.5	172.3	53.4	198.0
60 min	10.0	27.8	15.5	43.1	21.0	58.3	28.3	78.5	33.8	93.8	39.2	109.0	46.5	129.2	52.0	144.4	59.9	166.3
90 min	11.5	21.2	17.2	31.8	22.9	42.4	30.4	56.3	36.1	66.9	41.8	77.5	49.4	91.4	55.1	102.0	63.7	117.9
2 h	12.6	17.5	18.5	25.6	24.3	33.8	32.1	44.5	37.9	52.7	43.8	60.8	51.5	71.6	57.4	79.7	66.5	92.3
3 h	14.4	13.3	20.4	18.9	26.5	24.6	34.6	32.0	40.7	37.7	46.7	43.3	54.8	50.7	60.9	56.4	70.7	65.4
4 h	15.7	10.9	22.0	15.3	28.2	19.6	36.5	25.3	42.7	29.7	49.0	34.0	57.3	39.8	63.5	44.1	73.9	51.3
6 h	17.9	8.3	24.4	11.3	30.8	14.3	39.4	18.3	45.9	21.3	52.4	24.3	61.0	28.2	67.5	31.2	78.7	36.4
9 h	20.2	6.2	27.0	8.3	33.7	10.4	42.6	13.2	49.4	15.2	56.1	17.3	65.0	20.1	71.8	22.1	83.9	25.9
12 h	22.1	5.1	29.0	6.7	35.9	8.3	45.1	10.4	52.0	12.0	58.9	13.6	68.1	15.8	75.0	17.4	87.8	20.3
18 h	25.8	4.0	33.3	5.1	40.7	6.3	50.5	7.8	57.9	8.9	65.3	10.1	75.1	11.6	82.5	12.7	98.8	15.2
24 h	29.6	3.4	37.5	4.3	45.4	5.3	55.8	6.5	63.8	7.4	71.7	8.3	82.1	9.5	90.0	10.4	109.8	12.7
48 h	33.7	2.0	45.0	2.6	56.3	3.3	71.2	4.1	82.5	4.8	93.8	5.4	108.7	6.3	120	6.9	143.5	8.3
72 h	32.2	1.2	45.0	1.7	57.8	2.2	74.7	2.9	87.5	3.4	100.3	3.9	117.2	4.5	130	5.0	155.1	6.0

r_N in mm, h_N in l/(s ha)

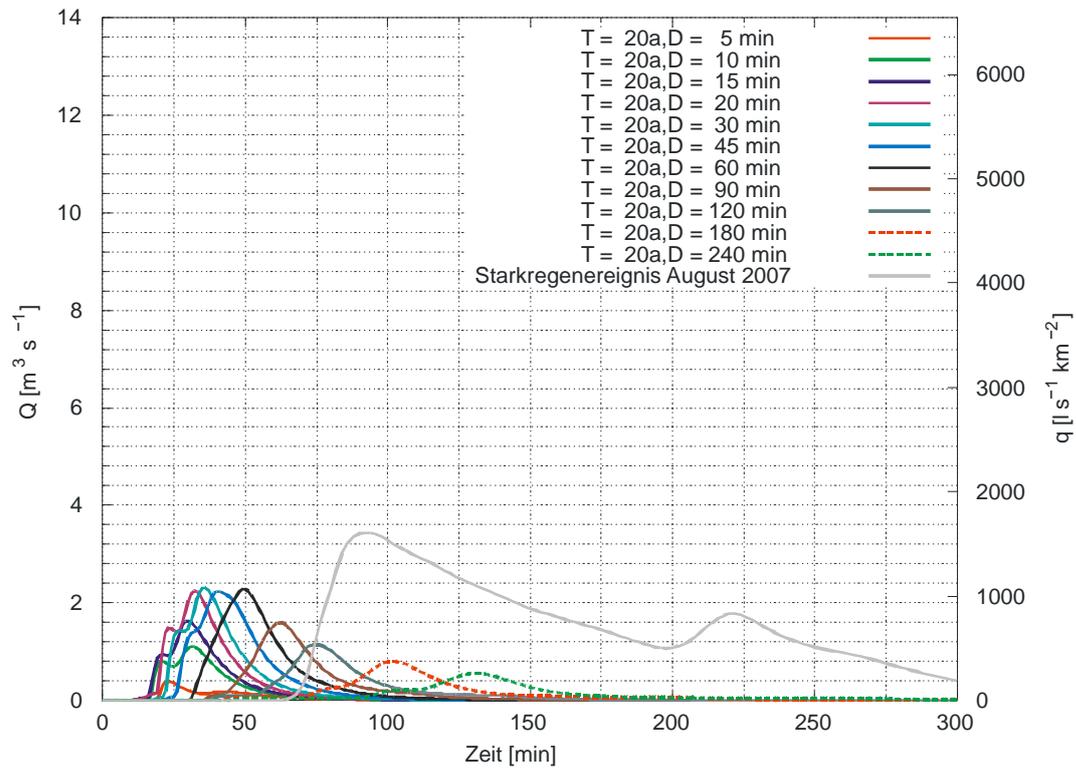
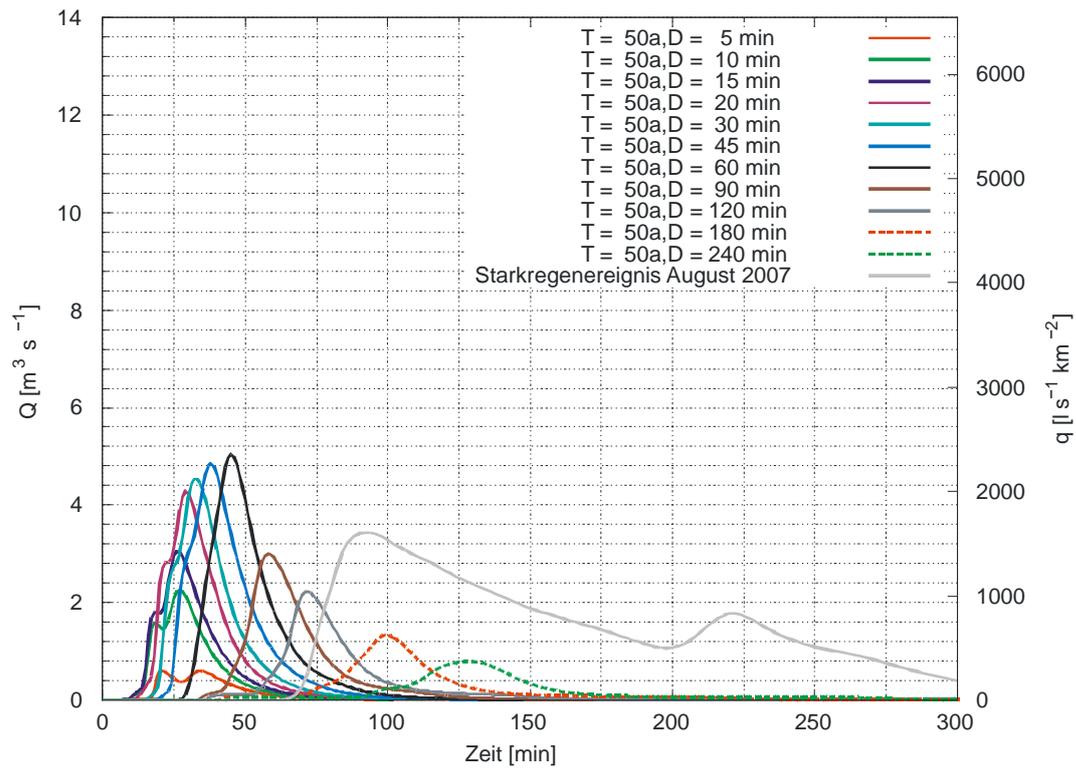
Tabelle A.5: Niederschlagshöhen und -spenden für das Rasterfeld S25-Z47 (Delbrück) nach KOSTRA-DWD2000 sowie PEN-Extrapolation

S23-Z45	0.5		1		2		5		10		20		50		100		PEN-Extr. 200	
	h_N	r_N	h_N	r_N														
5 min	3.0	99.6	4.9	163.4	6.8	227.2	9.3	311.5	11.3	375.2	13.2	439.0	15.7	523.3	17.6	587.1	20.1	670.1
10 min	5.3	88.9	7.8	130.3	10.3	171.7	13.6	226.5	16.1	267.9	18.6	309.4	21.8	364.1	24.3	405.6	27.7	462.2
15 min	6.9	76.1	9.8	108.3	12.6	140.5	16.5	183.1	19.4	215.3	22.3	247.5	26.1	290.0	29.0	322.2	33.1	367.6
20 min	7.9	65.8	11.1	92.7	14.4	119.6	18.6	155.2	21.9	182.1	25.1	209.1	29.4	244.6	32.6	271.6	37.3	310.5
30 min	9.2	51.0	13.0	72.0	16.7	92.9	21.7	120.5	25.5	141.4	29.2	162.4	34.2	190.0	38.0	210.9	43.4	241.3
45 min	10.2	37.6	14.5	53.9	18.9	70.1	24.7	91.6	29.1	107.9	33.5	124.1	39.3	145.6	43.7	161.9	50.2	186.0
60 min	10.6	29.5	15.5	43.1	20.4	56.6	26.9	74.6	31.8	88.2	36.6	101.8	43.1	119.7	48.0	133.3	55.3	153.5
90 min	12.0	22.1	17.0	31.4	22.0	40.7	28.6	53.0	33.6	62.3	38.7	71.6	45.3	83.9	50.3	93.2	58.2	107.7
2 h	13.0	18.0	18.1	25.1	23.2	32.2	30.0	41.6	35.1	48.7	40.2	55.8	46.9	65.2	52.0	72.3	60.4	83.9
3 h	14.6	13.5	19.8	18.3	25.1	23.2	32.0	29.6	37.2	34.5	42.5	39.3	49.4	45.7	54.6	50.6	63.6	58.9
4 h	15.8	11.0	21.1	14.7	26.5	18.4	33.5	23.3	38.9	27.0	44.2	30.7	51.2	35.6	56.6	39.3	66.1	45.9
6 h	17.7	8.2	23.1	10.7	28.6	13.2	35.8	16.6	41.3	19.1	46.8	21.7	54.0	25.0	59.5	27.5	69.7	32.3
9 h	19.7	6.1	25.3	7.8	30.9	9.5	38.4	11.8	44.0	13.6	49.6	15.3	57.0	17.6	62.6	19.3	73.6	22.7
12 h	21.3	4.9	27.0	6.3	32.7	7.6	40.3	9.3	46.0	10.6	51.7	12.0	59.3	13.7	65.0	15.0	76.6	17.7
18 h	23.7	3.7	29.8	4.6	35.8	5.5	43.8	6.8	49.9	7.7	55.9	8.6	63.9	9.9	70.0	10.8	82.1	12.7
24 h	26.1	3.0	32.5	3.8	38.9	4.5	47.4	5.5	53.8	6.2	60.1	7.0	68.6	7.9	75.0	8.7	87.5	10.1
48 h	36.7	2.1	45.0	2.6	53.3	3.1	64.2	3.7	72.5	4.2	80.8	4.7	91.7	5.3	100.0	5.8	120.5	7.0
72 h	35.2	1.4	45.0	1.7	54.8	2.1	67.7	2.6	77.5	3.0	87.3	3.4	100.2	3.9	110.0	4.2	132.0	5.1

 r_N in mm, h_N in l/(s ha)

Tabelle A.6: Rauigkeitsklassen nach ATKIS-Einteilung einschließlich gewählter Strickler-Beiwerte (Stocker und Schwaller, 2003)

Rauigkeitsklasse aus den ATKIS-Daten (ohne Generalisierung)	Rauigkeitsbeiwert nach Strickler k_{st} [m ^{1/3} s ⁻¹]
Ackerland	15
Flächen besonderer funktionaler Prägung	17
Flughafen	30
gemischte Nutzung	13
Friedhof	17
Gehölz	9
Grünanlage	20
Grünland	20
Industrie und Gewerbe	10
Platz	36
Sonderkultur	20
Sport- und Freizeitanlage	30
Teich	50
Verkehrsfläche	40
Wald	10
Wohnbaufläche	13

Abbildung A.7: Synthetische Abflussganglinien Ahden, $T = 20a$ Abbildung A.8: Synthetische Abflussganglinien Ahden, $T = 50a$

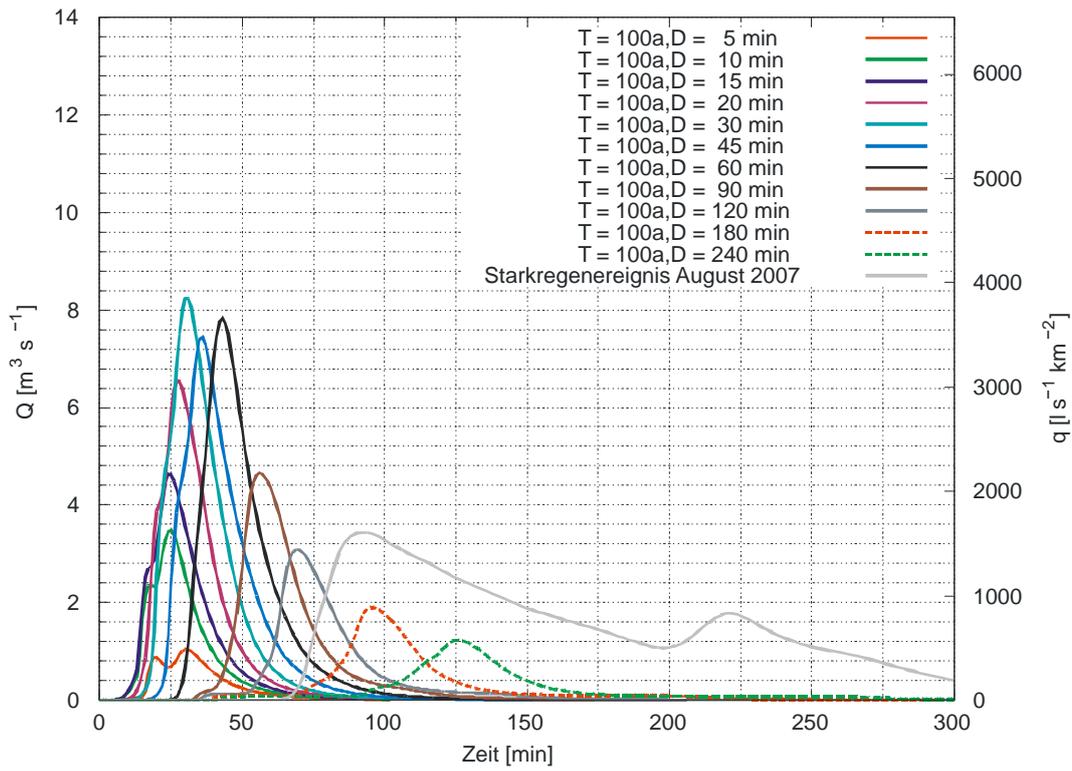


Abbildung A.9: Synthetische Abflussganglinien Ahden, $T = 100a$

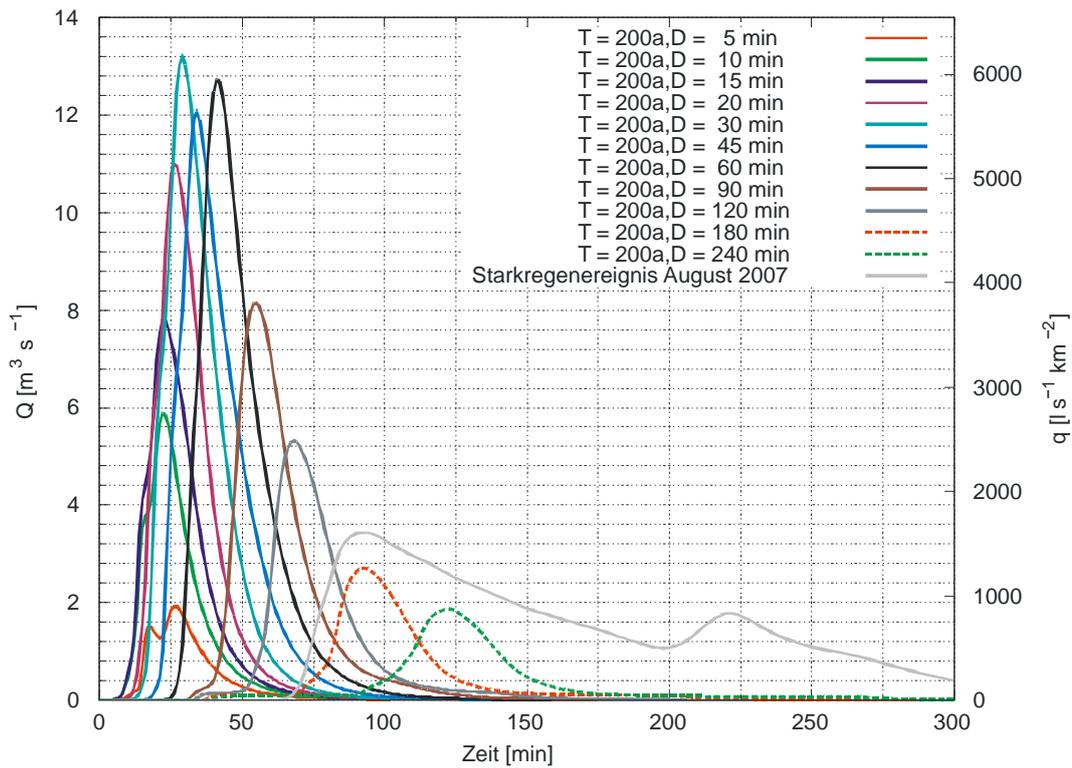


Abbildung A.10: Synthetische Abflussganglinien Ahden, $T = 200a$

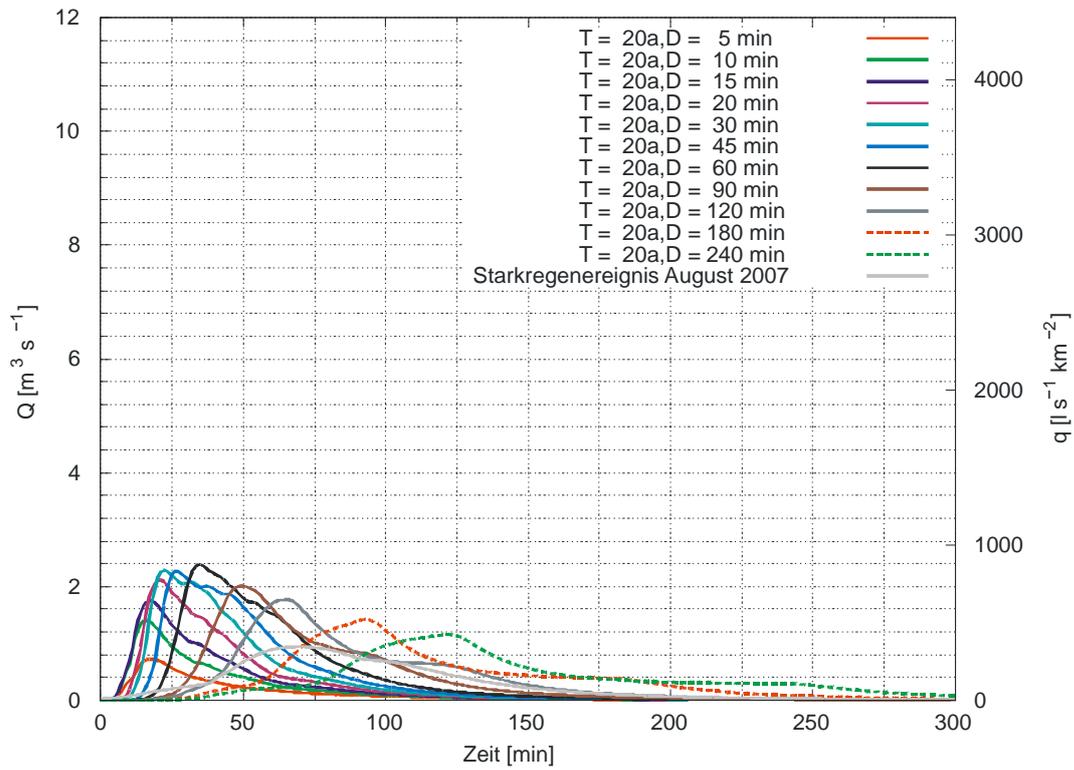


Abbildung A.11: Synthetische Abflussganglinien Henglar, T = 20a

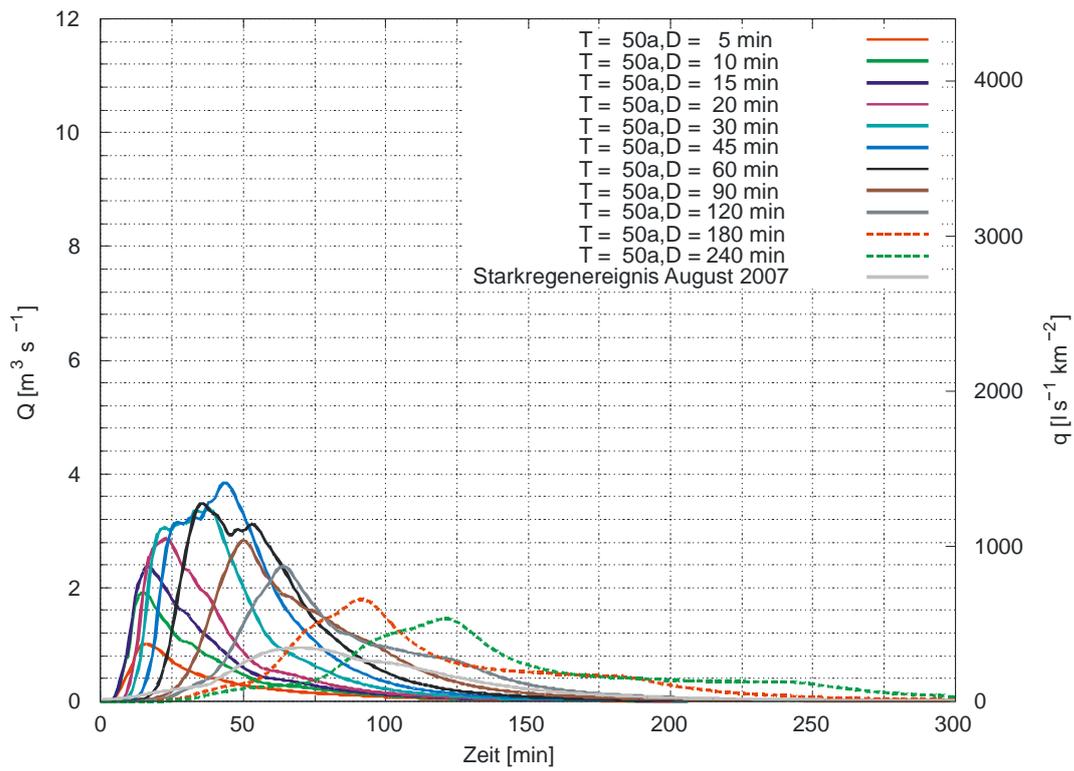


Abbildung A.12: Synthetische Abflussganglinien Henglar, T = 50a

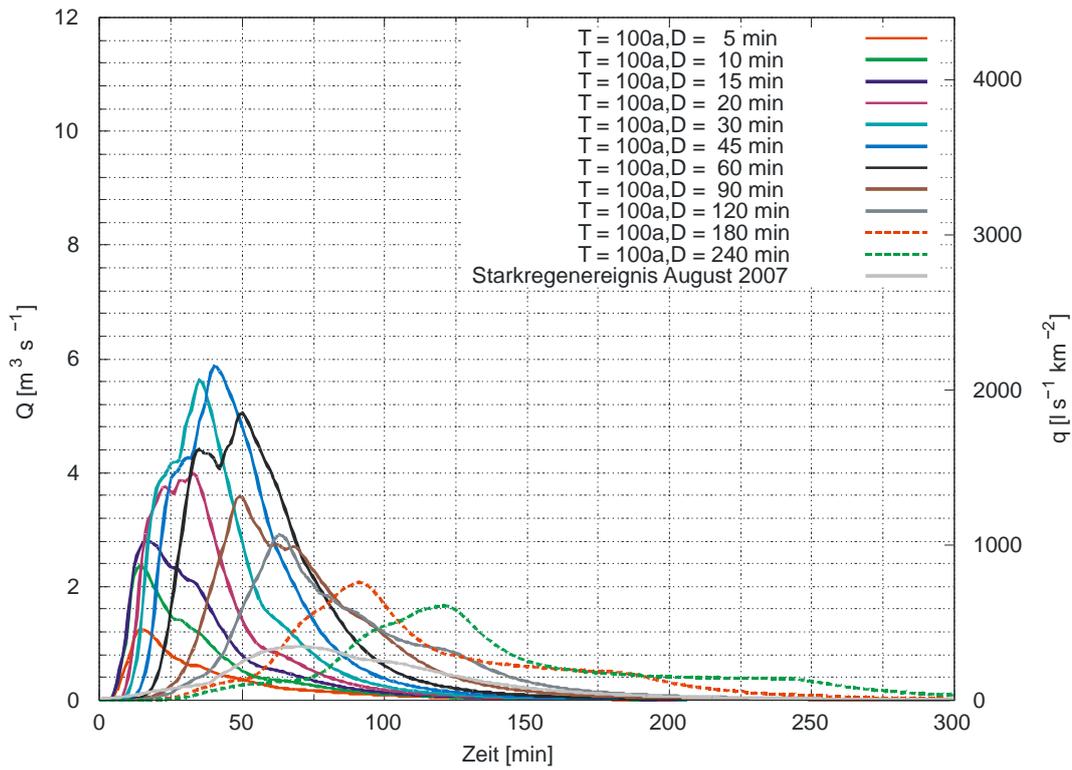


Abbildung A.13: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 100a

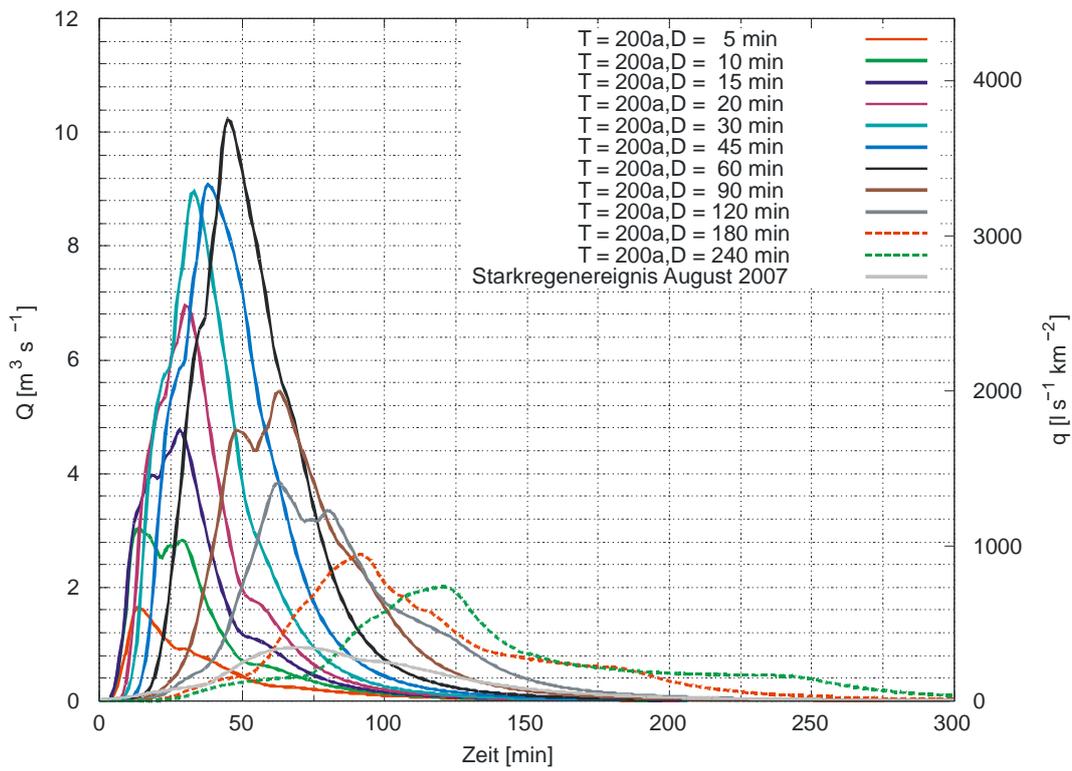


Abbildung A.14: Synthetische Abflussganglinien Henglarn, T = 200a

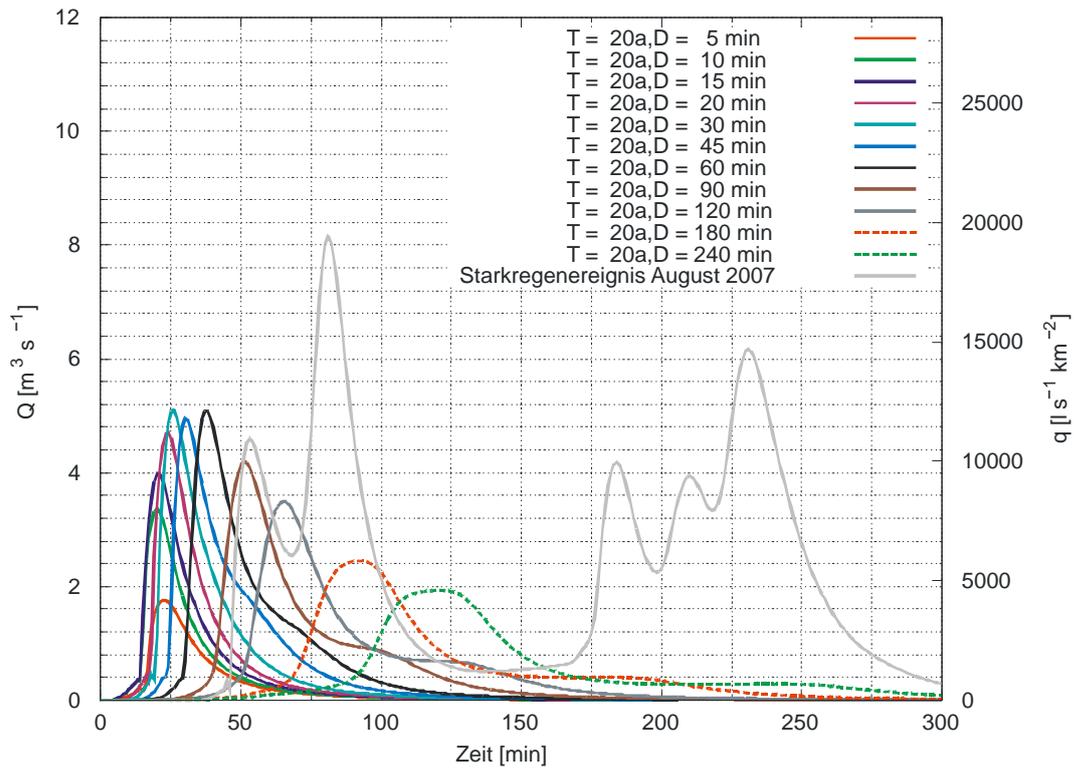


Abbildung A.15: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 20a

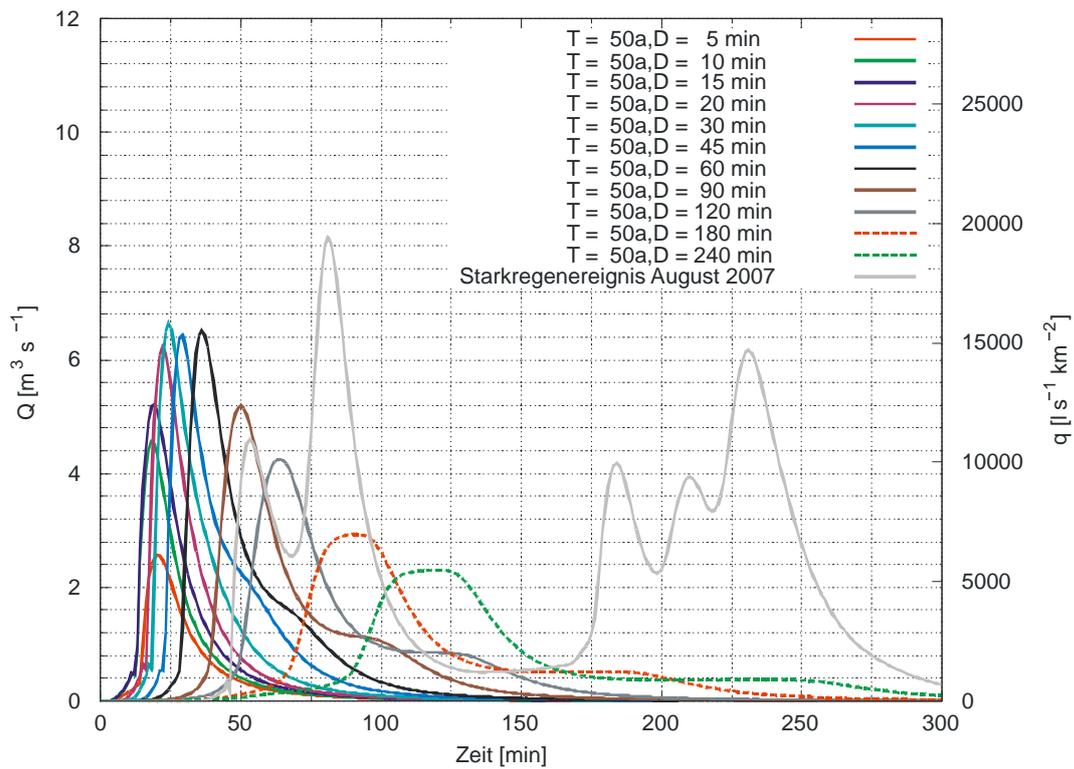


Abbildung A.16: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 50a

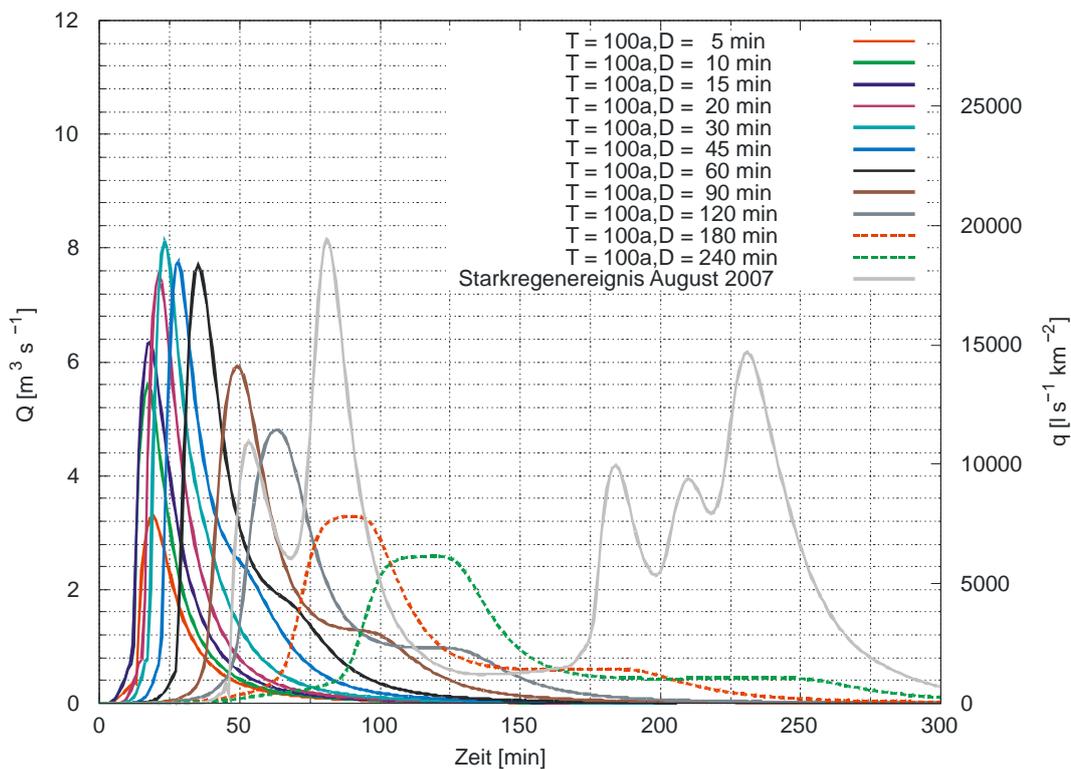


Abbildung A.17: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 100a

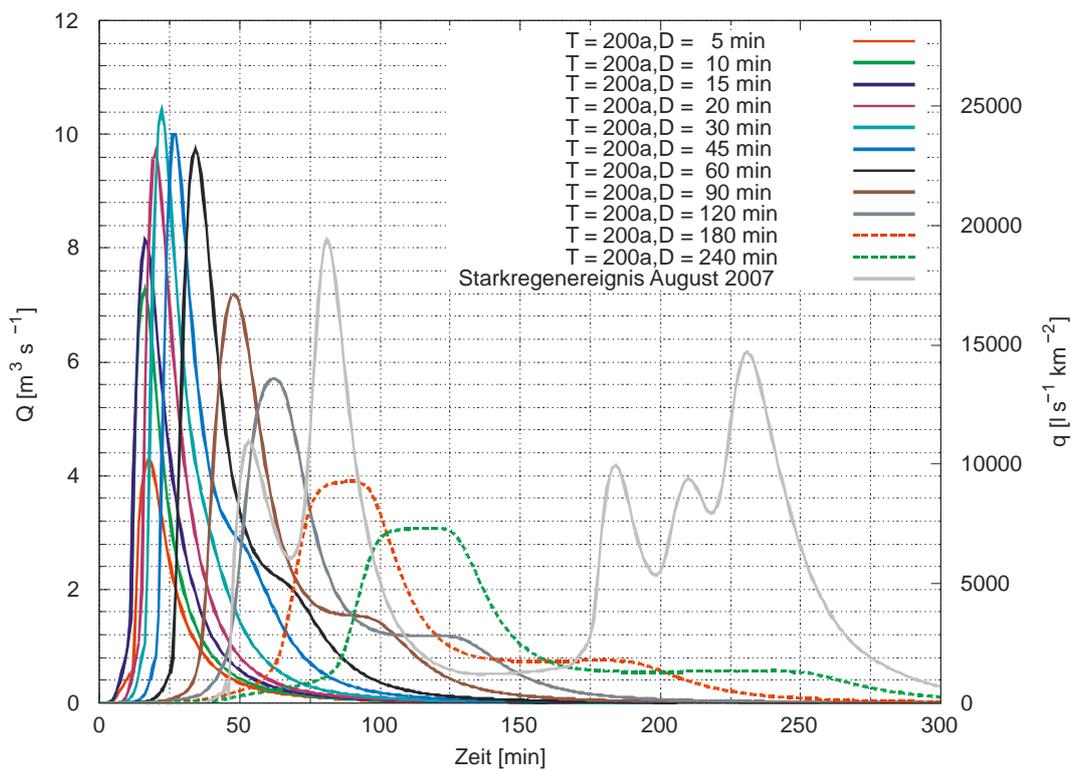


Abbildung A.18: Synthetische Abflussganglinien Delbrück, T = 200a

Kartenanlage

Kartenanlage 1: Starkregengefahrenkarte Ahden

Kartenanlage 2: Starkregengefahrenkarte Henglar

Kartenanlage 3: Starkregengefahrenkarte Delbrück