

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG.....	5
DANKSAGUNG	6
VORBEMERKUNG.....	7
I. EINFÜHRUNG	10
I.1. UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND MOTIVATION.....	10
I.2. AUFGABENSTELLUNG.....	11
I.3. VORGEHENSWEISE	12
II. FORSCHUNGSSTAND UND METHODEN	14
II.1. STAND DER FORSCHUNG.....	14
II.1.1. Wandel der Forschungsschwerpunkte seit dem 19. Jahrhundert	14
II.1.2. Stand der Forschung in der Überschwemmungsflächenprognose und - vorhersage.....	16
II.1.3. Stand der Forschung im Bereich der Druckwasserflächenprognose/- vorhersage.....	17
II. 2. METHODEN DER INUNDATIONSFLÄCHENERFASSUNG	18
II.2.1. Überblick über die gängigen Methoden der Inundationsflächenbestimmung	19
II.2.2. Einsatz von Satellitenbilddaten zur Inundationsflächenerfassung.....	23
II.2.3. Im Rahmen des Promotionsprojekts angewandte Methoden der Inundationsflächenerfassung	24
III. HYDROGEOGRAPHISCHE MERKMALE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	33
III.1. NATÜRLICHER ZUSTAND.....	33
III.1.1. Geologische Merkmale des Oberrheingebietes	33
III.1.2. Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet	34
III.1.3. Die Ausbildung des Reliefs in der Rheinniederung	36
III.1.4. Interaktion von Fluss und Grundwasser.....	39
III.1.5. Abflussregime des Rheins	42
III.1.6. Einfluss des Klimas die Hochwasserdynamik im	45
Untersuchungsgebiet.....	45
III.2. ANTHROPOGENE VERÄNDERUNGEN	48
III.2.1. Die Oberrheinkorrektur und ihre Folgen im Untersuchungsgebiet.....	51
III.2.2. Weitere Ausbaumaßnahmen am Rhein	55
III.2.3. Intensivierung der Nutzung der Rheinaue im zwanzigsten Jahrhundert. ...	56
III.2.4. Gesamteinfluss der seit dem 19. Jh. erfolgten anthropogenen Eingriffe auf die Inundationsdynamik des Rheins	57
III.2.5. Errichtung von Hochwasserpoldern und Renaturierungsmaßnahmen.....	60
IV. ERPROBUNG FERNERKUNDLICHER METHODEN DER INUNDATIONSFLÄCHENBESTIMMUNG IM UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	61
IV.1. GEWINNUNG VON LUFTBILDMATERIAL	61
IV.2. AUFBEREITUNG UND AUSWERTUNG DER LUFTBILDER	64
IV.2.1. Analoge Auswertungsverfahren.....	64
IV.2.2. Auswertung der Luftbilder mit Hilfe digitaler Bildbearbeitungssysteme	64
IV.2.3. Identifizierung von Wasserflächen im Luftbild.....	67
IV.2.4. Vektorisierung von klassifizierten Luftbildern mit dem Vector Tool von IMAGINE.....	71
IV.2.5. Digitalisierung von Inundationsflächen am Bildschirm.....	71

V. ERGEBNISSE DER EMPIRISCHEN INUNDATIONSFLÄCHENKARTIERUNGEN	72
.....	
V.1. URSACHEN UND AUSMAß DER ÜBERSCHWEMMUNGEN DER UNTERSUCHTEN HOCHWASSEREREIGNISSE	73
V.1.1. Ursache der Hochwasserereignisse mit jährlicher (und höherer) Eintrittswahrscheinlichkeit (WQ1)	74
V.1.2. Beschreibung der Inundationen von Hochwasserereignissen mit jährlicher (und höherer) Eintrittswahrscheinlichkeit (WQ1)	76
V.1.3. Ursache der beobachteten „Jahrhunderthochwasser“ (WQ20 bis WQ100)	79
V.1.4. Beschreibung der Inundationen von 1999 (WQ 20 bis WQ100)	80
V.2. ERGEBNISSE DER DRUCKWASSERFLÄCHENUNTERSUCHUNGEN IM SOMMER 1999	83
V.2.1. Burglache und Falkenhof bei Waldsee (Beispiel I: „echte“ Druckwasserflächen)	83
V.2.2. Auf der Au (Beispiel II: „Echte“ Druckwasserfläche mit guter Rheinanbindung)	85
V.2.3. Kollerinsel (Beispiel III: Sickerwassersammelflächen und Druckwasserflächen)	86
V.2.4. Schänzels (Beispiel IV: Ausbreitung von Druckwasserwellen in ungespannten Verhältnissen)	88
V.3. MODELL DER AUSBREITUNG VON DRUCKWASSERWELLEN IM UNTERGRUND	88
V.3.1. Modell für länger anhaltende Wasserstandserhöhungen (Abb. 89.)	89
V.3.2. Modell für die Interaktion Fluss-Grundwasser bei einem „Jahrhundert“ Hochwasser (Abb. 90.)	89
V.3.3. Modell für vorübergehend erhöhten Wasserstand (Abb. 91. und 92.)	89
V.3.4. Modell für den Druckwassertyp „Schänzels“ (Abb. 93.)	90
V.3.5. Modell für den Druckwassertyp „Burglache“ (Abb. 94. bis 97.)	90
V.4. TYPISIERUNG VON INUNDATIONSFLÄCHEN ANHAND DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	90
V.4.1. Unterscheidung von Überschwemmungsflächen nach der Herkunft des einströmenden Wassers	91
V.4.2. Unterscheidung der Inundationsflächen nach dem Substrat	92
V.4.3. Unterscheidung der Inundationsflächen in Abhängigkeit vom für eine Flutung abhängigen Wasserstand	93
V.4.4. Herkunft des Wassers in den Druckwasserflächen	93
V.4.5. Vorschlag für eine Terminologie zur Charakterisierung von Inundationsflächen	94
VI. ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG HISTORISCHER KARTEN	96
.....	
VI.1. QUANTIFIZIERUNG DER HISTORISCHEN LANDNUTZUNG UND DES LANDSCHAFTSWANDELS IN DER RHEINNIEDERUNG	97
VI.1.1. Zustand und Wandel der Landschaft im Untersuchungsgebiet von 1856 bis 1875	97
VI.1.2. Wandel der Landschaft im Untersuchungsgebiet von 1856 bis 1999	98
VI.2. GENESE DER DIREKTEN INUNDATIONSFLÄCHEN	99
VI.2.1. Böllenwörth	99
VI.2.2. Auwald im Süden und Osten der Rheinhäuser Weide	100
VI.2.3. Insel Horn	101
VI.2.4. Ergebnisse	101

VI.3. DIE HISTORISCHE LANDNUTZUNG ALS INDIKATOR FÜR REZENTE DRUCKWASSERFLÄCHEN.....	102
<i>VI.3.1. Der Zusammenhang zwischen historischer Landnutzung und rezenter Druckwasserdynamik.....</i>	102
<i>VI.3.2. Das räumliche Muster der Landnutzung im Jahre 1856</i>	105
<i>VI.3.3. Quantitativer Vergleich zwischen den im Jahre 1856 extensiv bewirtschafteten Flächen und den während des Pfingsthochwassers 1999 kartierten Inundationsflächen.....</i>	105
<i>VI.3.4. Kritische Diskussion der Ergebnisse anhand von Beispielen</i>	107
VII. GIS-BASIERTES MODELL ZUR PROGNOSE DER RÄUMLICHEN AUSBREITUNG VON HOCHWASSEREREIGNISSEN	111
VII.1. AUFGABEN UND ZIELE DES INUNDATIONSFLÄCHENMODELLS.....	113
VII.2. SAMMLUNG UND GIS-IMPLEMENTIERUNG ALLER	114
EMPIRISCHEN INUNDATIONSFLÄCHENDATEN	114
VII.3. ERSTELLUNG EINES DIGITALE GELÄNDEHÖHENMODELLS.....	114
VII.4. SIMULATION VON INUNDATIONEN AUF DGHM-GRUNDLAGE IM GIS.....	115
VII.5. VERGLEICH DER IM GIS SIMULIERTEN MIT	116
DEN TATSÄCHLICH BEOBACHTEN INUNDATIONEN.....	116
VII.6. ERARBEITUNG DER INUNDATIONSFLÄCHENPROGNOSEN.....	117
<i>VII.6.1. Direkte Inundationsflächen</i>	117
<i>VII.6.2. Sickerwassersammelflächen</i>	119
<i>VII.6.3. Druckwasserflächen</i>	121
VII.7. RESUMÉ.....	124
VIII. OFFENE AUFGABEN UND FORSCHUNGSFRAGEN.....	126
VIII.1. NUTZUNG DES ERARBEITETEN INUNDATIONSFLÄCHENMODELLS ZUR HOCHWASSERWARNUNG UND –VORHERSAGE	126
<i>VIII.1.1. Die Notwendigkeit von Wasserstands- und Inundationsflächenvorhersagen.....</i>	126
<i>VIII.1.2. Verbreitung von Inundationsflächendaten in einem internetbasierten Hochwasserinformationssystem</i>	127
VIII.2. OFFENE FORSCHUNGSFRAGEN	130
<i>VIII.2.1. Interpretation von hochwasserbedingten Vegetationsveränderungen im Luftbild</i>	130
<i>VIII.2.2. Erfassung der druckwasserbedingten Schäden in der Aue</i>	130
<i>VIII.2.3. Inundationsflächenmodellierung und Erhebung empirischer Inundationsflächendaten für andere Flussgebiete</i>	131
VIII.3. ÜBERTRAGBARKEIT DER ERGEBNISSE AUF ANDERE UNTERSUCHUNGSGEBIETE .	131
IX. ZUSAMMENFASSUNG	133
X. ANHANG.....	138
X.1. BEGRIFFSKLÄRUNG	138
X.2. ÖKOLOGIE, BRUTPLÄTZE UND BEKÄMPFUNG DER	140
CULICINAEN AM OBERRHEIN	140
<i>X.2.1. Stechmückenarten am Oberrhein.....</i>	140
<i>X.2.2. Ökologie und Brutplätze der Aedes vexans.....</i>	141
<i>X.2.3. Biologische Stechmückenbekämpfung am Oberrhein</i>	144
XI. LITERATUR	147
X.1. NACHWEIS DER ZITIERTEN MONOGRAPHIEN UND ZEITSCHRIFTEN	147

X.2. NACHWEIS DER ZITIERTEN LITERATUR UND PRESSEMITTEILUNGEN AUS DEM INTERNET	162
X.3. NACHWEIS DES VERWENDETEN HISTORISCHEN KARTENMATERIALS	163

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, und dass alle wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommenen Stellen dieser Arbeit unter Angabe der Quellen einzeln kenntlich gemacht sind.

Heidelberg, 20. Oktober 2002

Richard Leiner

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt

an erster Stelle Herrn Prof. Dr. Heinz Karrasch für das Engagement, mit denen er mein Promotionsprojekt förderte. Er war mir stets ein väterlicher Ratgeber.

Ebenso Herrn Prof. Dr. Werner Fricke für freundlichen Rat und die Ermunterung zu diesem Projekt und dafür, dass er meine Begeisterung für die Fernerkundung weckte und förderte.

Herrn Dr. Norbert Becker und Herrn Dr. Christian Weiser für Ihren Rat und die Ermunterung zu diesem Projekt, die Finanzierung einer Befliegung des Untersuchungsgebietes von Mannheim bis Karlsruhe sowie die Möglichkeit das GIS-System der KABS aufzubauen.

Herrn Prof. Dr. Peter Meusburger und Herrn Prof. Dr. Hans Gebhardt für den freundlichen und unkomplizierten Zugang zu Ihren PC-Pools.

Den an diesem Forschungsprojekt beteiligten Diplomanden Gernot Hilpisch, Clemens Jakobs und Andreas Kirrstein, die mit viel Engagement ihre Themen bearbeiteten und sehr gute Diplomarbeiten ablieferten.

Dem Fluglehrer Walter Graf und seinem Schüler Frank Pettersen, mit denen ich die wichtigsten Befliegungen des Untersuchungsgebietes 1999 durchführte und die großzügig auf jegliche Entlohnung verzichteten. Leider konnte ich dem dritten Cessna-Piloten, Herrn Pitthan, mit dem ich zwei Befliegungen auf der Strecke Mannheim-Karlsruhe durchführte, nicht mehr für seine großzügige und freundliche Hilfe danken, da er kurze Zeit nach unserem letzten gemeinsamen Flug aufgrund eines Motorschadens abstürzte und tödlich verunglückte.

Herrn Prof. Dr. Doug Stow für die herzliche Aufnahme an der San Diego State University und für den unbürokratischen Zugang zu den CESAR Lab-Rechnern. Ebenso den dortigen graduated students Alex, Peter und Mike für Hilfe am Rechner und auf dem Surfbrett, sowie Danilo Suntal für die Herstellung des Kontakts zur SDSU.

Herrn Micheal Neutzler danke ich dafür, dass er mich für die Rheinauen und ihre Überschwemmungsprozesse begeisterte, ebenso den weiteren Stechmückenbekämpfern im Distrikt Waldsee, Otterstadt, Speyer - namentlich Axel Wenke, Florian Hillenkamp, Jörg, Urs, Peer, Andy, Leif und Fabian, die mir beim Kartieren der Inundationsflächen wichtige Hinweise gaben.

Herrn Dr. Manfred Löscher vom Gymnasium Sandhausen verdanke ich die kostenlose Nutzung seiner Bohrausrüstung sowie fachkundige und tatkräftige Unterstützung bei den Bodensondierungen im Untersuchungsgebiet.

Dem Helikopterpiloten Pitt Merkatores möchte ich für den unvergesslichen Flug während des Februarhochwassers 1999 von Speyer bis zum Taubergießen danken.

Zu danken habe ich auch den zahlreichen Studenten und Studentinnen, welche mir im Rahmen von Geländepraktika und drei Projektseminaren bei der Vermessung und Kartierung des Untersuchungsgebietes halfen.

Mein Dank gilt auch der Graduiertenförderung des Landes Baden-Württemberg und dem DAAD, ohne deren finanzielle Unterstützung die umfangreichen Geländeuntersuchungen, Befliegungen und Luftbilddauswertungen nicht hätten durchgeführt werden können.

Herrn Schuhkraft vom geomorphologischen Labor danke ich dafür, dass ich mir für die Durchführung Geländepraktika das Nivellement ausleihen konnte.

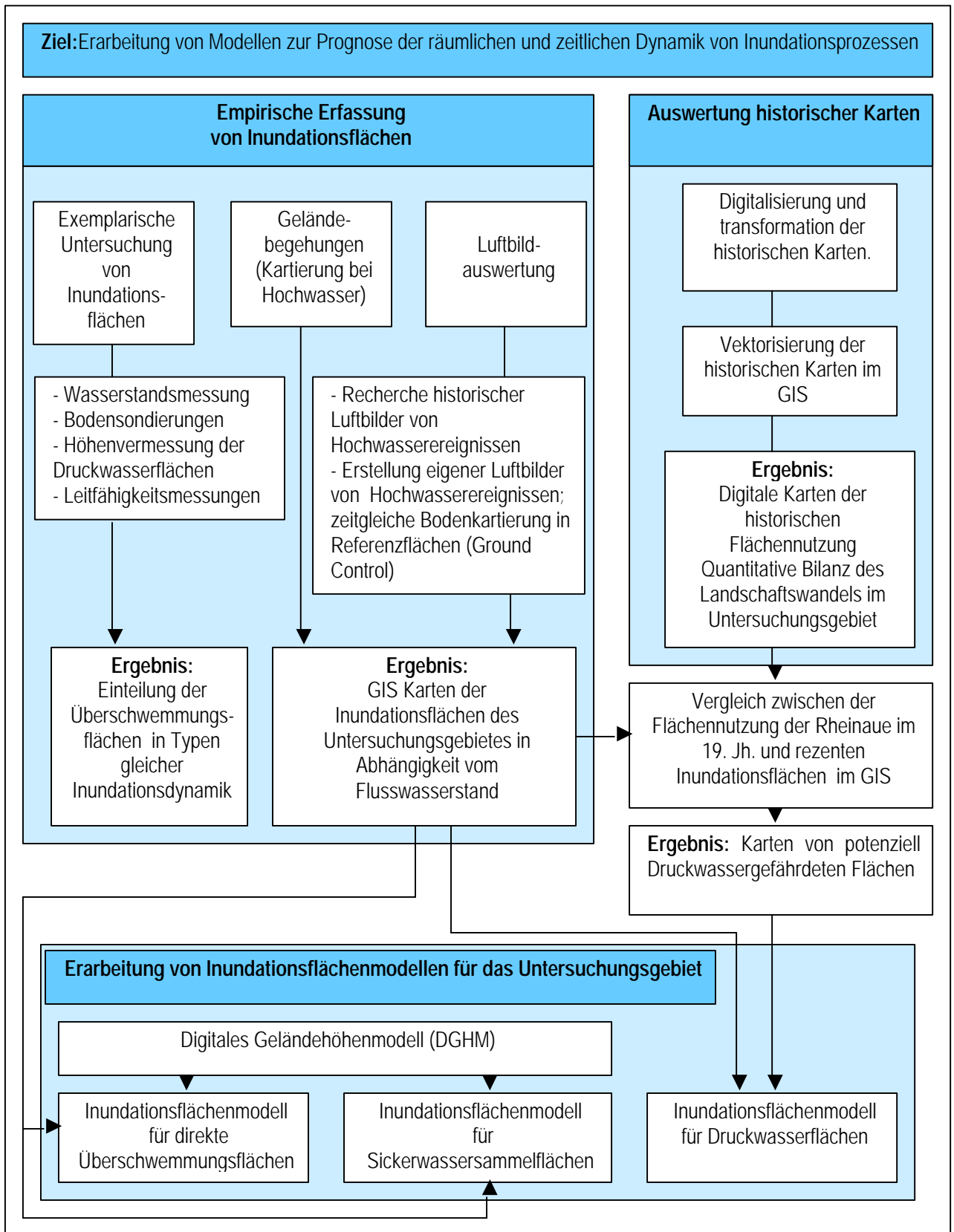
Und nicht zuletzt meinen Eltern Maja Leiner und Prof. Dr. Bernd Leiner, die mir meine langjährige Ausbildung finanzierten, sowie meinem Bruder Bastian Leiner, der es verstand, mich auch in Zeiten schwerer Krankheit am Lachen zu halten.

Vorbemerkung

Die vorliegende Dissertation basiert auf Datenerhebungen für den Zeitraum von 1997 bis Anfang 2001. Aufgrund schwerer Krankheit hat sich die vollständige Erstellung des Textteils und der Abbildungen um mehr als ein Jahr verzögert. Inhaltlich ist die Arbeit jedoch bereits im Mai 2001 abgeschlossen worden.

Abkürzungsverzeichnis

DGM	Digitales Geländemodell
DGHM	Digitales Geländehöhen Modell
DGK oder DGK5	Deutsche Grundkarte (Maßstab 1:5.000)
DWF	Druckwasserfläche („echte“ Druckwasserfläche im Gegensatz zu einer Sickerwassersammelfläche (SWSF))
GIS	Geoinformationssystem
GCP	Ground Control Point (Passpunkt)
GLA	Generallandesarchiv Karlsruhe
GSO/H	Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein/Hochrhein
HQ100	Hochwasserabfluss mit einer statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren
HW100	Hochwasserstand mit einer statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren
HVZ	Hochwasser Vorhersage Zentrale des Landes Baden-Württemberg in Karlsruhe
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IRP	Integriertes Rheinprogramm des Landes Baden-Württemberg
KABS	Kommunale Aktionsgemeinschaft zur Bekämpfung der Stechmückenplagen e.V.
KHR	Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
MW	Mittelwasserstand MW Speyer = 367 cm
o.J.	ohne Jahresangaben
SW Bilder	Schwarzweiß-Luftbilder
SWSF	Sickerwassersammelfläche
TK25	Topographische Karte im Maßstab 1:25.000 (in der vorliegenden Arbeit sind die Karten des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg damit gemeint)
WHG	Wasserhaushaltsgesetz



Einführende Übersicht zur Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit

I. Einführung

I.1. Untersuchungsgegenstand und Motivation

Hochwasser und Überschwemmungen sind natürlicher Bestandteil der Dynamik eines jeden Flusses. Ein naturbelassener Fluss besitzt kein festes Bett, sondern verändert kontinuierlich und zuweilen auch sprunghaft seinen Lauf. Das Geoökosystem der Flussauen ist an den Wechsel von Überschwemmung und Trockenheit angepasst und auf regelmäßige Inundationen angewiesen. Gerade weil die Auen über ein kleinräumiges und sich beständig veränderndes Mosaik von trockenen und feuchten Standorten verfügen, zählen sie zu den Lebensräumen Mitteleuropas mit der größten Artenvielfalt und –dichte.

Für den Menschen haben Hochwasserereignisse hingegen oftmals einen bedrohlichen Charakter, wie nicht zuletzt die „Jahrhundertflut“ an der Elbe im Sommer 2002 drastisch und öffentlichkeitswirksam vor Augen führte. Bedrohlich sind Überschwemmungen aber nur dann, wenn menschliche Siedlungen und Infrastruktur zuvor in der Aue errichtet wurden. Ursprünglich waren die Flussauen frei von Siedlungen. Ein Hochwasser konnte folglich auch keinen Schaden anrichten. Römische und mittelalterliche Siedlungsgründungen am Oberrhein entstanden fast ausschließlich auf hochwassersicheren Standorten. Auch unterlag die im Holozän weiträumig ausgetiefte Flussaue aufgrund der hohen Grundwasserstände und regelmäßigen Überschwemmungen zunächst nur einer extensiven landwirtschaftlichen Nutzung (siehe MUSALL 1969 und 1971). Mit dem Beginn des industriellen Zeitalters und der Neuordnung Deutschlands durch Napoleon wurden erstmals groß angelegte und langfristig geplante Eingriffe am Rhein vorgenommen. Die Begradigung des Oberrheins unter Tulla war eine der ingenieurtechnischen Glanzleistungen des 19. Jahrhunderts (siehe TULLA 1825). Die nach der Begradigung einsetzende Tiefenerosion des Flusses war ein durchaus erwünschter und einkalkulierter Effekt, da hierdurch auch der Grundwasserspiegel in der Aue sank und neue landwirtschaftliche Nutzfläche gewonnen werden konnte. Gemessen an den selbst gesetzten Zielen war die Tulla'sche Rheinbegradigung ein voller Erfolg. Ihr folgten weitere Eingriffe. Unter Max Honsell begann an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert die Niedrigwasserregulierung und Schiffbarmachung des Flusses (siehe HONSELL 1885). Der Ausbau des Oberrheins zur Energiegewinnung erfolgte Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts und fand erst in den 70er Jahren mit der Errichtung der Staustufe Iffezheim seinen Abschluss (siehe VIESER 1973 und 1985).

Einhergehend mit diesen verschiedenen Ausbauphasen vollzog sich die Transformation der Flussniederung von einer extensiv zu einer intensiv genutzten Kulturlandschaft. Die durch den Rheinhauptdamm vom Strom abgetrennte Altaue wurde zunächst als Ackerland und später, vor allem seit den 60er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts, als Gewerbe- und Industriefläche genutzt. In einigen Fällen wurden sogar noch vor wenigen Jahren Wohngebiete in der Altaue ausgewiesen bzw. neue Gebäude errichtet. Weiterhin erfuhr die verbliebene rezente Aue vor allem in der Nähe der Ballungszentren (Mannheim/Ludwigshafen; Karlsruhe) eine unkontrollierte, intensive Nutzung als Freizeit- und Naherholungsgebiet (siehe MODROW 1981). Im Vertrauen auf den technischen Hochwasserschutz wurden im Zuge dieser Nutzungsintensivierung beträchtliche Investitionen in einstmals vom Rhein regelmäßig überschwemmte Flächen getätigt. Ein Dammbruch hätte heute katastrophale Folgen. Bei einem 200-jährlichen Hochwasserereignis mit Spitzenabflüssen von mehr als 5.000 m³/s am Pegel Maxau (ein derartiges

Hochwasser ereignete sich glücklicherweise seit 1882/83 nicht mehr) wären, nach Prognosen aus dem Jahr 1997 (GEWÄSSERDIREKTION SÜDLICHER OBERRHEIN/ HOCHRHEIN 1997; S.3.), schätzungsweise 700.000 Menschen in 95 Städten in der Oberrheinebene von Überschwemmungen betroffen gewesen. Der damals prognostizierte Schaden lag bei über 10 Milliarden Mark. Doch selbst wenn die Dämme standhalten ist bei größeren Hochwasserereignissen (wie z.B. in den Jahren 1999 und 2001) regelmäßig mit Schäden in den mittlerweile bebauten Flächen der Altaue zu rechnen. Bei derartigen Hochwasserereignissen kommt es in der Aue zur intensiven Infiltration von Flusswasser in den Untergrund und einem Grundwasserrückstau. In vermeintlich durch den Rheinhauptdamm geschützten Gebieten der Altaue tritt dann oberflächlich Grundwasser an der Oberfläche aus und führt zu flächenhaften Überschwemmungen, feuchten Kellern und Schäden an Gebäudefundamenten. Bis 1999 fanden diese sogenannten „Druckwasserflächen“ in Forschung und behördlicher Praxis kaum Beachtung. Aus heutiger Sicht ist zu konstatieren, dass das gegenwärtig in zahlreichen Flussauen bestehende räumliche Muster der Flächennutzung oftmals ohne hinreichende Beachtung (oder Kenntnis) der realen Bedrohung durch Hochwasser entstand.

Eine wesentlichen Ursache hierfür ist der bis heute bestehende Mangel an verlässlichen Daten und Modellen zur Prognose der Überschwemmungsflächendynamik die sich während eines Hochwasserereignisses in diesen Gebieten abspielt. Für die Vorhersage von *Wasserständen* stehen für die wichtigsten amtlichen Messpegel am Rhein bereits seit Jahren operationell erprobte und bewährte Modelle zur Verfügung (siehe HOMAGK 1998). Modelle, welche *realistische*, d.h. räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Vorhersagen (oder auch nur Prognosen) der beim Eintritt dieser Wasserstände zu erwartenden *Überschwemmungsflächen* berechnen, liegen hingegen heute noch nicht vor (siehe auch Stand der Forschung). Bezüglich der Inundationsflächendynamik einer Flussaue stellen sich für die angewandte Forschung und für die Praxis eine Reihe von Fragen: Welche Flächen einer Flussniederung werden bei einem bestimmten Wasserstand überschwemmt? Wie lange verbleibt das Wasser in einer einmal überschwemmten Fläche? Wie groß ist das Hochwasserrisiko an einem bestimmten Standort? Bei der Erstellung von kommunalen Bauleitplänen und von Flächennutzungsplänen im Auebereich sind diese Fragen ebenso von Bedeutung wie bei Renaturierungsmaßnahmen oder für die biologische Stechmückenbekämpfung. Private Bauherren und Campingplatznutzer haben ebenso ein begründetes Interesse an der Entwicklung von Inundationsflächenvorhersagen wie Versicherungsgesellschaften. Dies ist das Problemfeld, mit dem sich die vorliegende Promotionsarbeit befasst.

I.2. Aufgabenstellung

I.) Erarbeitung von Modellen zur Prognose der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Inundationsprozessen in einem Untersuchungsgebiet

Zentrales Anliegen dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines GIS-basierten Modells, welches beispielhaft für ein Untersuchungsgebiet am Oberrhein das zu erwartende Ausmaß der Überschwemmungen in der Rheinniederung in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand liefert. Da bisherige Überschwemmungsflächenmodelle das Phänomen der Druckwasserflächen nicht bzw. nur unzureichend berücksichtigen¹, ist

¹ siehe auch I.X. Stand der Forschung

auf die Prognose der Dynamik dieses Überschwemmungsflächentyps besonderes Gewicht zu legen.

II.) Erprobung und Entwicklung von Methoden zur Erfassung von Inundationsflächen
Methoden der Inundationsflächenkartierung sind im Untersuchungsgebiet zu erproben und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Ferner sind Methoden zu entwickeln, welche in der Lage sind, potenzielle Druckwasserflächen zu identifizieren und räumlich abzugrenzen.

III.) Empirische Kartierung der rezenten Inundationsprozesse in einem Untersuchungsgebiet

Um das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Inundationsflächenmodell zu kalibrieren und zu verifizieren, gilt es, für das Untersuchungsgebiet empirische Vergleichsdaten von Hochwasserereignissen zu gewinnen. Die rezenten und in der Vergangenheit bereits abgelaufenen Inundationsprozesse (insbesondere die der Druckwasserflächen) sind in ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik zu erfassen, zu dokumentieren und in einfachen induktiven Modellen grundsätzlich zu beschreiben. Eine beispielhafte, in ihrer Methodik aber auch auf andere Untersuchungsgebiete übertragbare Erhebung und Aufbereitung dieser Daten im GIS stellt deshalb einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

I.3. Vorgehensweise

Die vorliegende Promotionsarbeit wurde am Geographischen Institut der Universität Heidelberg unter der Leitung von Prof. Dr. H. KARRASCH durchgeführt. Die Geländearbeiten im Untersuchungsgebiet erstreckten sich von 1999 bis 2001 und konnten aufbauen auf Erfahrungen und Hochwasserkartierungen, welche der Autor bereits im Rahmen seiner Diplomarbeit gewonnen hatte (LEINER, R. (1998): Mikroskalige Inundationsflächenkartierung am nördlichen Oberrhein). Die Mittel für die umfangreichen Gelände- und Fernerkundungsarbeiten beschränkten sich auf ein Promotionsstipendium des Landes Baden-Württemberg. Die Kommunale Aktionsgemeinschaft zur Bekämpfung der Stechmückenplage (KABS) stellte im Februar 1999 einen Helikopter zur Erstellung von Luftbilder der Überschwemmungsflächen bereit. Die weiteren Luftbildflüge von Mai bis August 1999 mussten selbst finanziert werden. Eine Auswertung des umfangreichen Luftbildmaterials konnte dank eines DAAD Stipendiums im Jahre 2001 am CESAR lab der San Diego State University (USA) vorgenommen werden. Für drei Arbeitsbereiche wurden im Rahmen des Promotionsprojektes Diplomarbeiten vergeben:

HILPISCH, G. (2001): Hochwassersimulation am nördlichen Oberrhein mit Hilfe eines GIS; JACOBS, C. (2002): Landschaftswandel im 19. Jahrhundert und rezente Druckwassergefährdung in den Auen des mittleren Oberrheins zwischen Phillipsburg und Mannheim – Eine Auswertung im GIS.; KIRSTEIN, A. (2002): Die zeitliche und räumliche Dynamik von Druckwasserflächen in den Rheinauen zwischen Mannheim und Altlußheim. Eine Modelluntersuchung zur Beurteilung von kleinräumigen Überschwemmungsflächen.

Die umfangreichen Kartierungen, Bodensondierungen, Wasserstands- und Geländehöhenmessungen während des Hochwasserjahres 1999 wurden mit der Unterstützung von Studierenden des Geographischen Instituts im Rahmen von zwei Projektseminaren und drei Geländepraktika durchgeführt.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich am Arbeitsplan des Promotionsprojektes und sei im folgenden kurz skizziert:

In Kapitel II (Forschungsstand und Methoden) wird zunächst der Stand der Forschung und die in Forschung und Praxis gebräuchlichen Methoden der Inundationsflächenerfassung betrachtet. Aufgrund des Mangels an verlässlichen Inundationsflächendaten und der sich daraus ergebenden Notwendigkeit, im Rahmen des Projektes selbst Inundationsflächendaten zu gewinnen, lag auf der Erprobung und Entwicklung geeigneter Erhebungsmethoden ein besonderes Augenmerk.

In Kapitel III (Hydrogeographische Merkmale des Untersuchungsgebietes) werden die hydrogeographischen Besonderheiten des Untersuchungsgebietes vorgestellt. Um die sich im Gelände abspielenden rezenten Inundationsprozesse verstehen und modellieren zu können, war es unerlässlich, die physiogeographische und anthropogeographische Ausstattung des Untersuchungsgebietes eingehend zu betrachten. Gerade bei der Untersuchung von Druckwasserflächen erwies sich der genaue Blick auf die Genese der morphologischen Aue und dem räumlichen und zeitlichen Wandel der hydrogeographischen Einflussfaktoren als hilfreich.

Die wichtigsten Ergebnisse der empirischen Geländearbeiten und Überschwemmungsflächenkartierungen von 1997 bis 2001 sind in Kapitel IV (Ergebnisse der terrestrischen und fernerkundlichen Inundationsflächenkartierungen) dargestellt. Hochwasserkartierungen im Gelände und die Interpretation umfangreichen Luftbildmaterials lieferten wasserstandsabhängige Überschwemmungsflächenkarten des Untersuchungsgebietes. Die erstmalig angewandte Methode der Interpretation von Ernteschäden im Luftbild als Indikator für Druckwasseraustritte bewährte sich und kann für künftige Untersuchungen empfohlen werden. Ferner konnte für exemplarisch ausgewählte Druckwasserflächen durch Wasserstandsmessungen, Wasserleitfähigkeitsmessungen und Bodensondierungen die Inundationsdynamik geklärt werden. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurden die beobachteten Überschwemmungsflächen in drei verschiedene Inundationstypen aufgeteilt: In direkte Inundationsflächen, Druckwasserflächen und Sickerwassersammelflächen. Während für die rezente Aue eine ausreichende Anzahl von Überschwemmungsflächenkartierungen für verschiedene Wasserstände gewonnen werden konnten, blieb für die Druckwasserflächen in der Altaue die Frage nach der maximalen Ausdehnung offen. Es musste nach weiteren Daten und Methoden gesucht werden, welche die grundsätzlich von Druckwasseraustritten bedrohten Flächen in der Altaue räumlich eingrenzen.

Diese Methode konnte gefunden werden in Form einer GIS- gestützten Analyse historischer Karten. Die Flächennutzung der historischen Rheinstromatlanten wurde als Indikator für die rezente Verbreitung von Druckwasserflächen genutzt. Ferner konnte über die Untersuchung der Genese junger Verlandungsflächen eine Methode entwickelt werden, wie sich Flächen, welche bereits bei geringem Anstieg des Rheinwasserstandes (etwa 1,7m ü. MW) überschwemmt werden, identifizieren lassen. In Kapitel V. (Ergebnisse der Auswertung historischer Karten) sind die Ergebnisse dargestellt.

In Kapitel VI (GIS-basiertes Modell zur Prognose der räumlichen Ausbreitung von Hochwasserereignissen) wurde zunächst auf Grundlage eines digitalen Geländehöhenmodells (DGHM) des Untersuchungsgebietes ein einfaches, höhenbasiertes Inundationsflächenmodell entwickelt. Der Vergleich der berechneten Inundationsflächen mit den tatsächlich kartierten erbrachte teilweise erhebliche Abweichungen. Für jeden der drei Druckwassertypen wurde deshalb ein eigenes induktives Modell erstellt. Als Ergebnis wurden für die Rheinwasserstände bis 9,0 m am Pegel Speyer die zu erwartenden Inundationsflächen im Untersuchungsgebiet in Kartenform dargestellt.

Die Untersuchungen zeigten, dass eine Modellierung von Überschwemmungsflächen ohne umfangreiche Referenzdaten leicht zu falschen Ergebnissen führt und insbesondere bei der Modellierung von Druckwasserflächen ein induktiver Modellansatz dem deduktiven Modellansatz vorzuziehen ist.

II. Forschungsstand und Methoden

II.1. Stand der Forschung

II.1.1. Wandel der Forschungsschwerpunkte seit dem 19. Jahrhundert

Vom neunzehnten Jahrhundert bis in die siebziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts wiesen wissenschaftliche Untersuchungen über die Rheinaue bzw. die Hydrogeographie des Flusses eine überwiegend ingenieurtechnische Orientierung auf. Diese Forschung stand in engem Zusammenhang mit den verschiedenen Ausbauphasen des Oberrheins. Unter TULLA entstanden im Rahmen der Rektifikartion des Oberrheins grundlegende Studien über Gerinne und Hydrodynamik des Stromes (TULLA (1825)). Ebenso wurde die Erstellung der für die badische Kartographie wegweisenden Rheinstromatlanten maßgeblich von ihm beeinflusst. Im Jahre 1828 wurden die ersten Rheingrenzatlanten herausgegeben, denen weitere aus den Jahren 1838, 1852 und 1872 folgten. Als Fortsetzung dieser Arbeiten nach Norden folgten in den Jahren 1856 und 1875 die für das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Promotionsarbeit bedeutsamen Atlanten mit dem Grenzverlauf zwischen Baden und Bayern (SALABA (1997), S.21). Auch die Ausbaumaßnahmen im Zuge der Schiffbarmachung des Rheins unter Max Honsell waren begleitet von intensiven Untersuchungen zur Hochwasserdynamik (siehe z.B. HONSELL, M. (1883): Die Hochwasserkatastrophe am Rhein 1882. sowie HONSELL, M. / TEIN, M. v. (1891): Auftreten und Verlauf der Hochwasser von 1824, 1845, 1852, 1876 und 1882/83) aber auch zur natürlichen Hydrodynamik des Stromes im Naturzustand, wie HONSELLs Vortrag auf dem 7. Geographentag im Jahre 1887 belegt (HONSELL, M. (1887): Der natürliche Strombau des Deutschen Oberrheins). Mit dem Beginn des Ausbaus des Oberrheins zur Energiegewinnung zu Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts erfuhr der technische Wasserbau eine weitere Hochphase. Das Betonbett des Grand Canal d'Alsace und die Staustufenkette bis Iffezheim sind eindrucksvolle Beispiele für technischen Wasserbau des 20. Jahrhunderts. Noch bis in die 1970er Jahre war die Fachdiskussion über die Bewältigung der, durch die anthropogene Veränderung des Flusslaufs ausgelösten Probleme (Tiefenerosion, Grundwasserspiegelabsenkung und Hochwasser-

verschärfung), von ingenieurtechnischen Lösungsvorschlägen (Sohlenpanzerung und Schwellenbau im Gerinne, Verstärkung der Dämme) geprägt (siehe beispielsweise GRAEWE (1975), DIETZ/ PULINA (1975)). Die Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die hydrogeographischen Verhältnisse des Rheins waren zwar grundsätzlich bekannt, detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen des Geoökosystems des Rheins, der Inundationsdynamik in den Rheinauen oder der Dokumentation des Istzustands der hydrologischen und biotischen Verhältnisse liegen aus dieser Zeit nicht vor.

Erst in den 1970er Jahren erlangte die Erforschung von geoökosystemaren Zusammenhängen in den Rheinauen an Bedeutung. Besonders die Publikationen SCHÄFERS zeugen vom einem Wandel der wissenschaftlichen Blickrichtung und waren eng mit seiner politischen Forderung nach einer Renaturierung der Altauen verbunden (Vgl. z.B. SCHÄFER 1973, 1976, 1978). Ebenfalls zu Anfang der 1970er Jahre erschienen MUSALLs Studien zum Wandel der Kulturlandschaft der Rheinaue (siehe MUSALL 1969 und 1971).

Die Gefahr der Hochwasserverschärfung durch den Oberrheinausbau hatte sich bereits frühzeitig abgezeichnet (Vgl. VIESER (1973) und (1985)) und führte 1968 zur Gründung der Hochwasserstudienkommission (HSK). Der im Jahre 1978 vorgelegte Abschlußbericht ist bis heute das grundlegende Werk zur Abflusssdynamik des Oberrheins (HSK (1978) und (1980)). Dabei lag der Schwerpunkt der Arbeit auf der statistischen Auswertung verfügbarer Pegeldaten und der Berechnung des zu erwartenden Ablaufs der Wasserstände und Abflüsse von Extremereignissen. Der Abschlußbericht im Februar 1978 wies deutlich auf die Hochwassergefahren, welche die Verkürzung des Rheinlaufs und der Verlust der meisten Überschwemmungsflächen nach sich zogen, hin (siehe hierzu auch KARRASCH 1988). Die Konsequenz war die politische Forderung nach der Schaffung neuer Retentionsflächen. Nach den negativen ökologischen Auswirkungen der Probeflutungen in den Poldern Altenheim I und II entschloss sich das Land Baden- Württemberg 1988 das „Integrierte Rheinprogramm“ (IRP) umzusetzen, das die Renaturierung der Rheinauen als gleichberechtigtes Ziel neben eine Wiederherstellung des 200-jährigen Hochwasserschutzes stellte. Während bis dahin die Erforschung der Hydrologie des Oberrheins überwiegend von, im mesoskaligen Bereich angesiedelten, Themen - wie großräumiger Hochwasserschutz, Vorhersage der Rheinabflüsse, Berechnung des Grundwasserkreislaufs und Prognose der Entwicklung von Grundwasservorräten - dominiert wurde, ist seit der Mitte der 1980er Jahre, zunächst noch im Rahmen von Planfeststellungsverfahren, eine verstärkte angewandte Forschung zur Klärung hydrologischer und geoökosystemarer Zusammenhänge in kleineren Gebietseinheiten zu verzeichnen (siehe die Veröffentlichungen der LFU im Rahmen des IRP: z.B. LFU (1990): Erfassung von Abflußhindernissen in der Rheinaue zwischen Karlsruhe und der Landesgrenze bei Mannheim; LFU (1991): Flutungen der Polder Altenheim I und II; LFU (1999): Auswirkung der ökologischen Flutungen der Polder Altenheim. Ergebnisse des Untersuchungsprogramms 1993-1996)). In der Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg (LfU) befassen sich die Abteilungen 41: *Fließgewässer/ Integrierter Gewässerschutz* und 43: *Hydrologie/ Hochwasservorhersage* seit den 1990er Jahren mit zahlreichen Studien zu diesem Thema.

Mit der Thematik der Umweltverträglichkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen bzw. Möglichkeiten der Auenrenaturierung befasst sich das WWF-Auen-Institut in Rastatt unter der Leitung von DIESTER (siehe z.B. WWF (1989): Umweltverträglichkeitsprüfung von Hochwasserschutzmaßnahmen im Raum Breisach. oder WWF(1992): Untersuchungen über ökologische

Entwicklungsmöglichkeiten der Rheinniederung im Bereich der Murgmündung durch Erweiterung der Überflutungsflächen).

Zusammenfassend und vereinfachend gesagt existiert eine intensive Erforschung des Geoökosystems von Flußauen überhaupt erst seit den 1970er Jahren. Bis in die 1980er Jahre lag der Schwerpunkt auf der Klärung geoökosystemarer Wechselwirkungen innerhalb der Flußauen und dem Wandel der Kulturlandschaft. Erst in den letzten 15 Jahren ist eine angewandte Erforschung der Hydrodynamik einzelner Auenabschnitte zu beobachten. Bis heute ist die mikroskalige Untersuchung der Flußauen dabei von biologischen Forschungsansätzen und Methoden geprägt (siehe z.B. WEISER/ GLOWITZ (1990); SPANG (1994)). Neben die qualitative Erforschung der Flußauen treten seit etwa 10 Jahren auf Geographische Informationssysteme (GIS) gestützte, angewandte quantitative Untersuchungen. Einhergehend mit der stetig wachsenden Leistungsfähigkeit von Rechnern, Software (GIS) und der Verfügbarkeit von digitalen Raumdaten (Höhenmodelle) wird derzeit in verschiedenen Projekten die Entwicklung komplexer hydrodynamischer bzw. hydrogeographischer Modelle forciert.

In den letzten Jahren erfolgte in mehreren Projekten die Modellierung großräumiger Überschwemmungsflächenprozesse auf der Grundlage hochaufgelöster digitaler Geländehöhenmodelle (s.u.). Das Umweltministerium Baden-Württemberg plant derzeit, die Vorhersagen der HVZ künftig nicht mehr auf Wasserstandsdaten zu beschränken sondern auch in Form von Überschwemmungsflächenkarten (Gefahrenkarten) zu verbreiten.

II.1.2. Stand der Forschung in der Überschwemmungsflächenprognose und -vorhersage

Für die *Wasserstandsvorhersage* der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg (HVZ) wird am Oberrhein von Basel bis Worms ein synoptisches Modell eingesetzt (siehe hierzu HOMAGK (1995), S. 35-48). Die Ergebnisse der Vorhersagemodelle für die Zuflüsse (z.B. Kinzig, Neckar) gehen als Input ein. Das Synoptische Hochwasserablaufmodell ist ein konzeptionelles Speicher-kaskadenmodell, bei dem die Parameter über hydraulische Berechnungen ermittelt werden. Es benutzt als Input die Abfluss- und Wasserstandsdaten sowie die Systemdaten des Gerinnes einschließlich der erforderlichen hydraulischen und geometrischen Daten der Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein (HOMAGK, LUDWIG (1998), S.160). Die für die einzelnen amtlichen Messpegel berechneten Wasserstandsvorhersagen sind u.a. telefonisch und über das Internet abrufbar.

Alle derzeit bestehenden Modelle, welche auf Basis von Wasserstandsdaten eine Überschwemmungsflächenprognose/-vorhersage erstellen, benötigen hierzu eine GIS-Komponente, welche ein digitales Geländemodell (DHM) des jeweils betrachteten Flussabschnitts verwaltet.

Für das Neckareinzugsgebiet wurde in einem Pilotprojekt im Bereich der Gewässerdirektion nördlicher Oberrhein (Kunzmann) zur Bewertung und Verbesserung des vorhandenen Hochwasserschutzes am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (Universität TH Karlsruhe) das hydrodynamisch-numerische Modell IKoNE entwickelt. Es lassen sich sogenannte Gefahrenkarten, d.h. Karten der durch Überschwemmungen bedrohten Flächen für Hochwasserereignisse verschiedener Jährlichkeiten berechnen (siehe OBERLE, THEOBALD, NESTMANN (2000); IKoNE Heft 4 (2002)). Der Einsatz von IKoNE für alle größeren Gewässer Baden-Württembergs ist grundsätzlich geplant.

Für ein Untersuchungsgebiet am Oberrhein wurde vom Ingenieurbüro LUDWIG ein numerisches Modell zur Simulation von Damnbrüchen entwickelt, welches in den nächsten Jahren in Baden-Württemberg zum Einsatz kommen wird. Allerdings sind zuvor noch die notwendigen Datengrundlagen zu schaffen (hochaufgelöstes DHM). Neben diesen Modellen sind in Deutschland in den letzten zwei Jahren weitere Überschwemmungsflächenmodelle entwickelt worden bzw. zum Einsatz gekommen. Beispielfähig wären zu nennen:

- *ZÜRS* ist ein Zonierungssystem für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GdV). Wesentliche Aufgabe des Systems ist die Visualisierung von Überschwemmungsszenarien. Die GdV nutzt das System zur Erstellung von Zonen unterschiedlicher Hochwassergefährdung. Die räumliche Auflösung ist im Straßen- und Hausnummernbereich. Die Datengrundlage des Systems bilden Digitale Geländemodelle (DHM 25, DHM50, DHM100), digitales Gewässernetz, Pegeldata (hydrologische Daten), Digitale Überschwemmungsgrenzen der Wasserwirtschaftsverwaltungen (soweit vorhanden), Digitales Straßennetz und Gebäudeinformationen sowie versicherungstechnische Daten. (MÜLLER (2002)).
- Die Firmen Geomer/ Ingenieurgemeinschaft Ruiz-Rodriguez+Zeisler bieten mit der Software *FloodArea* ein in ArcView (Desktop GIS) implementierbares System zur Berechnung von Überschwemmungsbereichen aus vorgegebenen Wasserspiegellagen oder Abflussganglinien. *FloodArea* nutzt dabei das GRID-Datenmodell von ArcView Spatial Analyst (JÄGER (2002)).
- *FLORIAS* („flood risk assessment system“) ist ein GIS-Modell-System zur Abschätzung von Hochwasserrisiken, welches ein Abflussvorhersagemodell und ein Modell zur Ausweisung von Überschwemmungsflächen auf der Grundlage eines GIS koppelt. Über eine gemeinsame Oberfläche können Vorhersage- und Szenarioberechnungen durchgeführt, sowie die berechneten Überschwemmungsflächen und ökonomischen Schadenspotentiale kartographisch und tabellarisch visualisiert und analysiert werden (HERRMANN, S. TINZ, M. (2002)).

II.1.3. Stand der Forschung im Bereich der Druckwasserflächenprognose/-vorhersage

Keines der soeben vorgestellten Überschwemmungsflächenmodelle berücksichtigt die Interaktion zwischen Fluss- und Grundwasser während eines Hochwasserereignisses. Die Existenz von Druckwasserflächen wird von diesen Modellen weitgehend ignoriert. Seit dem Hochwasserereignis von 1999 (Rhein/Donau) ist die Problematik der Druckwasserflächen bei den Wasserwirtschaftsämtern jedoch deutlich in den Vordergrund getreten. Bekannt ist die Existenz dieser Druckwasseraustritte, seit Menschen in der Rheinaue siedeln. Bereits 1939 entwarf HOFMANN in seiner Dissertation ein einfaches schematisches Querschnittsmodell zur Beschreibung der Entstehung von Druckwasserflächen in der Rheinaue, das von SCHÄFER (1973 a, 1973b, 1976) übernommen und weiterentwickelt wurde.

Wasserstandsänderungen im Fluss können sehr schnelle und weitreichende Auswirkungen auf das Grundwasser haben (WEGNER, 1997). Hierbei breiten sich jedoch vorwiegend Druckwellen im Untergrund aus, ohne dass nennenswerte Wassermengen ausgetauscht werden. Die in Flußauen typischerweise vorkommende große Wasserstandsdynamik führt auf der Ebene der Stoffverlagerung

zu sehr komplexen Ausbreitungsmustern, die ohne explizite Berücksichtigung der Wasserstandsdynamik kaum zu interpretieren sind (WHITNING, 1997). Das Hauptproblem bei der Simulation von Druckwasserflächen ist der Mangel an hochaufgelösten Kartierungen des Untergrundes. Die Kenntnis der räumlichen Verteilung von wasserleitenden und -hemmenden Sedimenten ist jedoch die Voraussetzung zur Modellerstellung. Eine detailliertere Untersuchung von Fließ- und Ausbreitungsprozessen kann nur auf Grundlage hinreichend aufgelöster Tracerexperimente erfolgen (DEHNERT, 1998) bzw. setzt ein dichtes Netz von Grundwassermesspegeln und Bodensondierungen voraus. Der Aufwand zu Erhebung derartiger Daten ist beträchtlich und wurde bisher lediglich für kleinere Auegebiete im Rahmen von Retentionsflächenuntersuchungen vorgenommen (z.B. an der Elbe bei Lenzen (siehe HOLFELDER (1999)) und bei verschiedenen Polderflächenuntersuchungen am Oberrhein).

Es ist zu konstatieren, dass der tatsächliche Austausch zwischen Fluss- und Grundwasser einen dynamischen Prozess darstellt, welcher sich in einem deduktiven Modell höchstens ansatzweise und nur unter in der Praxis für größere Flächen nicht finanzierbarem Aufwand darstellen lässt. Da sich mit den bisherigen deduktiven Modellansätzen die Dynamik von Druckwasserflächen für größere Untersuchungsgebiete de facto nicht beschreiben lässt, wurde für die vorliegende Arbeit ein induktiver Modellansatz gewählt (s.u.).

II. 2. Methoden der Inundationsflächenerfassung

Für die Bedürfnisse der Raumplanung, der Renaturierung von Flußauen oder der Erstellung von praxistauglichen Inundationsflächenmodellen sind Referenzdaten über das Ausmaß tatsächlich abgelaufener Hochwasserereignisse unerlässlich. Dies gilt umso mehr, wenn wie in der vorliegenden Arbeit ein induktiver Schwerpunkt bei der Modellierung von Inundationsflächen gewählt wird. Bis heute wird das räumliche Ausmaß von Überschwemmungen in der Regel jedoch weder von Kommunen, Wasserwirtschaftsämtern noch von sonstigen Behörden dokumentiert. Für das Untersuchungsgebiet lagen beispielsweise zu Beginn dieses Forschungsprojektes noch keine empirisch gewonnenen wasserstandsabhängigen Überschwemmungsflächenkartierungen vor. Doch nicht etwa mangelndes Interesse an derartigen Informationen ist als Ursache für den akuten Mangel an Inundationsflächendaten zu sehen, sondern vielmehr die Schwierigkeit, welche sich bei der Erfassung der hochdynamischen – sich zeitlich und räumlich rasch wandelnden – Überschwemmungsflächen ergeben. Ein Ansteigen oder Absinken des Rheins um wenige Dezimeter kann das Ausmaß der überschwemmten Flächen im Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit um Hunderte von ha verändern. Bereits die Erhebung homogener Inundationsflächendaten – d.h. die räumlich exakte Dokumentation aller Überschwemmungen zu einem bestimmten Zeitpunkt - stellt daher ein erhebliches methodisches bzw. organisatorisches Problem dar.

So verwundert es nicht, dass die Luftbilder und Inundationsflächenkarten, welche im Rahmen dieser Arbeit vom Frühsommerhochwasser des Rheins 1999 angefertigt wurden, derzeit die einzigen verfügbaren Dokumente zu diesem Ereignis sind und mittlerweile den Baden-Württembergischen Wasserwirtschaftsbehörden (Oberrheindirektion Karlsruhe) als Planungsunterlagen dienen. Eine wesentliche Aufgabe der vorliegenden Arbeit bestand angesichts dieses Mangels an empirisch ermittelten

Inundationsflächendaten darin, geeignete Methoden der Überschwemmungsflächenerfassung zu erproben bzw. zu entwickeln.

Im Abschnitt II.2.1. wird zunächst ein Überblick über die gegenwärtig in der Praxis angewandten Methoden gegeben. In Abschnitt II.2.2. wird kurz der Einsatz von Satellitenbilddaten zur Inundationsflächenkartierung diskutiert, bevor schließlich in Abschnitt II.2.3. die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewandten Erfassungsmethoden vorgestellt werden.

II.2.1. Überblick über die gängigen Methoden der Inundationsflächenbestimmung

In der behördlichen Praxis und der anwendungsorientierten Forschung befassen sich eine Reihe von Organisationen und Institutionen mit der Kartierung bzw. der Abschätzung des Ausmaßes und der räumlichen Lage von Überschwemmungsflächen. Neben den amtlichen, von den Wasserwirtschaftsbehörden durchgeführten Überschwemmungsausweisungen sind hier vor allem die Inundationsflächenkartierungen der KABS² (biologische Stechmückenbekämpfung) zu nennen. Regionalplaner haben vorrangig im Rahmen der Erstellung von Flächennutzungsplänen ein Interesse an Inundationsflächendaten, in der Regel aber nicht die Mittel, um eigenständige Studien in Auftrag zu geben.

II.2.1.1. Überschwemmungsflächenkartierungen im Rahmen der biologischen Stechmückenbekämpfung (KABS-Atlanten)

Die umfangreichsten Kartierungen der Überschwemmungsflächen in der Rheinaue wurden von der KABS im Rahmen der biologischen Stechmückenbekämpfung seit der zweiten Hälfte der 1970er Jahre vorgenommen. Die Ergebnisse der Kartierungen sind in unveröffentlichten Atlanten dargestellt (KABS 1996). Im Jahre 1996 hat die KABS begonnen, die Atlantendaten in ein GIS zu implementieren, die Arbeiten sind mittlerweile (2002) nahezu abgeschlossen. Ziel der Kartierungsarbeiten ist die Erfassung aller Stechmückenbrutplätze im Gebiet der Mitgliedskommunen. Die Karten dienen zum einen gegenüber den Regierungspräsidien und anderen Behörden zur Dokumentation der im Rahmen der Stechmückenbekämpfung notwendigerweise durch Mitarbeiter der KABS zu betretenden Auen- und Naturschutzgebiete, zum anderen sind sie für die Planung, die Informationsübermittlung und Abrechnung der sommerlichen Bekämpfungsmaßnahmen ein unerlässliches Hilfsmittel.

Die Karten der KABS basieren auf *Geländebegehungen* der Kommunalbetreuer während der sommerlichen Hochwasserereignisse und Kartierungen von *Vegetationsindikatoren*. Trotz ihres Detailreichtums sind sie für die dieser Arbeit zugrundeliegende Aufgabenstellung nicht hinreichend exakt, da sie zur Identifizierung von Stechmückenbrutplätzen und nicht aber für eine wasserstandsabhängige Inundationsflächenkartierung erstellt wurden:

- Den *Geländebegehungen* liegt kein einheitliches Bemessungshochwasser zugrunde, sondern sie entstanden zumeist aufgrund von Beobachtungen der Mitarbeiter im Außendienst während der zahlreichen Hochwasserereignisse. Es

² KABS: Kommunale Aktionsgemeinschaft zur Bekämpfung von Stechmückenplagen

lassen sich deshalb anhand dieser Karten leider keine exakten Aussagen treffen, welche Flächen bei einem bestimmten Wasserstand überschwemmt werden.

- Ferner wurden von der KABS die Rheinaueflächen ihrer Mitgliedskommunen vor allem mit Hilfe *floristischer Indikatoren* in mehrere Überschwemmungszonen unterteilt. Die verwendeten Methoden machen sich die jeweils unterschiedliche Sensibilität verschiedener Pflanzen- und Tierarten gegenüber Überschwemmungen zunutze. Ihr Vorteil besteht in erster Linie darin, dass auch zu Zeiten von Niedrigwasserständen Aussagen über die ungefähre Häufigkeit und Andauer von Überschwemmungen einer bestimmten Fläche getroffen werden können ³.

So kommt beispielsweise die Wassersumpfkresse (Rorippa amphibia) als Pionierpflanze in der Zone der offenen Schlicke vor. Diese Zone kann bis zu 300 Tage im Jahr überschwemmt sein. Die Schilfzone markiert den Bereich des oberen Mittelwassers, die im Mittel immerhin noch etwa ein halbes Jahr überschwemmt ist. Die Zone des Weichholz-Auenwaldes liegt im Bereich des oberen Hochwassers und ist im Mittel nur noch an 10 Tagen im Jahr überschwemmt (BECKER/ GLASER/ MAGIN (1996); S.82).

Diese Methode ist gut für die Identifikation von Stechmückenbrutplätzen geeignet. Da Häufigkeit und Dauer der Überschwemmungen aber nicht die einzigen Faktoren sind, welche den Standort bestimmter Pflanzenformationen beeinflussen, ist die genaue Zuordnung von Ausmaß und Anzahl der tatsächlich gefluteten Flächen zu einem definierten Hochwasserstand auf diesem Wege nicht möglich. Ferner ist die Geländearbeit abhängig vom Vegetationsstadium der Flora und arbeits-, zeit- und kostenintensiv, da die Kartierung vor Ort einen hohen Qualifikationsgrad des Personals bezüglich botanischer und biologischer Kenntnisse voraussetzt. Auch an der LfU Baden-Württemberg wurden im Rahmen des IRP zahlreiche Untersuchungen zu den Überschwemmungsflächen in den Rheinauen anhand floristischer und faunistischer Indikatoren vorgenommen ⁴.

Die Erhebungen der KABS wurden in der Regel in der TK25 ⁵ festgehalten, und stoßen deshalb rasch an die Grenzen der Darstellbarkeit von kleineren gefluteten Flächen.

Zusammenfassend betrachtet ist zu konstatieren, dass die Methode der Inundationsflächenbestimmung über Vegetationsindikatoren zwar für die Identifizierung von Stechmückenbrutplätzen gut geeignet, für die Aufgabenstellung der vorliegenden Dissertation jedoch nicht brauchbar ist. Als Grundlage zur exakten Bestimmung des tatsächlichen Überschwemmungsausmaßes definierter Wasserstände sind Vegetationsindikatoren geeignet.

³ Zu floristischen Indikatoren zur Abgrenzung von Überschwemmungsflächen siehe KABS Atlanten sowie HUMBERG (1988); zu faunistischen Indikatoren zur Abgrenzung auentypischer Standorte siehe SPANG (1994).

⁴ Siehe z.B. LfU (1999)

⁵ Die Ergebniskarten haben den Maßstab 1:10 000, basieren aber auf der TK25

II.2.1.2. Ausweisung von Überschwemmungsgebieten im Rahmen der bundesdeutschen Raum- und Landesplanung und der Wasserhaushaltsgesetze

Ein weiterer Anwendungsbereich für Inundationsflächenkartierungen ist die behördliche Ausweisung von Überschwemmungsgebieten. Das politische Ziel einer vorausschauenden Hochwasservorsorge findet in zahlreichen Normen zur Raum- und Landesplanung sowie dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) seinen Niederschlag. Neben dem rein technischen Hochwasserschutz kommt der Erhaltung und Förderung natürlicher Überflutungsflächen eine besondere Bedeutung zu. Wichtigstes Instrument der Flächenvorsorge ist der §32 WHG, der den jeweiligen Wasserwirtschaftsverwaltungen und Landkreisen die *Ausweisung von Überschwemmungsgebieten* auferlegt. Allerdings orientiert sich die Ausweisung von gesetzlichen Überschwemmungsflächen nicht ausschließlich an hydrographischen Erkenntnissen:

Da die Ausweisung einer Fläche als Überschwemmungsgebiet rechtliche Konsequenzen (vorrangig in Bezug auf die Nutzungsrechte) nach sich zieht, handelt es sich vielmehr um einen behördlichen Abwägungsprozess zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Interessen. Dennoch ist der erste Schritt in diesem Prozess die Ermittlung der tatsächlichen räumlichen Ausdehnung definierter Wasserstände. Das behördliche Feststellungsverfahren sowie die Rechtswirkung von Feststellungen sind hier nicht näher zu betrachten. Vielmehr ist für die vorliegende Arbeit von Interesse, mit Hilfe welcher Verfahren die jeweiligen Behörden Überschwemmungsgebiete identifizieren.

Methodik und Vorgehensweise bei der fachlichen Abgrenzung von Überschwemmungsflächen sind Ländersache und werden in der Regel in Form von Verordnungen in den jeweiligen Bundesländern festgelegt. Die Ausweisungsziele und Festlegungsvorgaben der einzelnen Länder weichen z.T. erheblich voneinander ab. Im folgenden wird deshalb in II.2.1.2.1. eine kurze Übersicht über die Unterschiede in der Methodik bei der Überschwemmungsgebietsausweisung der einzelnen Bundesländer gegeben. Da die Ausweisungsmethoden im Bereich des Untersuchungsgebietes am Oberrhein von besonderem Interesse sind, wird unter II.2.1.2.2. nochmals genauer auf die Methoden der Oberrheinanlieger Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz eingegangen. Die Ausführungen stützen sich in erster Linie auf eine unveröffentlichte Studie des Ministeriums für Umwelt und Verkehr (Baden-Württemberg) vom November 1997 (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 1997).

II.2.1.2.1 Überblick über die Methodik der Überschwemmungsflächenausweisung in den Bundesländern

Da im WHG keine hinreichend genaue Definition von „Überschwemmungsflächen“ erfolgt, ergeben sich Unterschiede zwischen Untersuchungsverfahren der Länder bereits bei der Wahl des Bemessungshochwassers. Es kann ein historisches Ereignis oder ein synthetisch mit hydrologischen und hydraulischen Verfahren ermitteltes bzw. berechnetes Hochwasserereignis darstellen. Häufig wird das statistisch ermittelte HQ100 als Ausweisungsgrundlage angesetzt (z.B. Hessen, Thüringen, Schleswig-Holstein), aber auch die Verwendung historischer Ereignisse (in Bayern, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt wird z.B. das höchste bekannte Hochwasser herangezogen) oder von Hochwasserereignissen mit kleineren oder größeren Wahrscheinlichkeiten ist verbreitet (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 1997, S. 53).

Auch die verwendeten Kartengrundlagen sind nicht einheitlich. In der Regel werden aber als Arbeitskarten die DGK5 oder Höhenflurkarten im Maßstab 1:2.500 oder größer verwendet. Großräumige Betrachtungen erfolgen auf Grundlage der TK25 oder einer TK im Maßstab 1:10.000. Verzeichnisse mit Flurstücken, welche von der Ausweisung eines Überschwemmungsgebietes betroffen sind, erfolgen auf Grundlage von Liegenschaftskarten im Maßstab 1:1.500. In einigen Fällen geschieht dies schon auf der Grundlage digitaler Liegenschaftskarten (Hessen).

Doch zurück zur Ermittlung der Bemessungshochwasser:

Für die Bestimmung der Überschwemmungslinie des jeweiligen Bemessungshochwassers kommen also im wesentlichen zwei Verfahren zur Anwendung: a) Die *Kartierung und Beschreibung historischer Hochwasserereignisse* und b) die *Ermittlung der Überflutungsbereiche* im deduktiven Modell *anhand synthetischer Bemessungshochwasser*.

zu a) *Kartierung und Beschreibung historischer Hochwasserereignisse:*

Für die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten anhand historischer Hochwasserereignisse werden alle Informationen zusammengetragen, welche bereits abgelaufene Hochwasserereignisse in ihrem Verlauf und Ausmaß dokumentieren. Dazu gehören insbesondere:

- ?? Hochwassermarken
- ?? bekannte Wasserstände
- ?? Ausuferungslinien, Geschwemmsellinien, Fließspuren
- ?? Begehung des Gebietes
- ?? Befragung ortskundiger Personen
- ?? Luftbildaufnahmen des abgelaufenen Hochwassers

In einigen Bundesländern werden zusätzlich zu den Beobachtungen und Aufnahmen abgelaufener Hochwasser mittels einfacher hydraulischer Verfahren ergänzende Wasserspiegellageberechnungen durchgeführt und/oder auf seltenere Ereignisse extrapoliert (z.B. HQ 200 in Rheinland-Pfalz).

zu b) *Ermittlung der Überflutungsbereiche anhand synthetischer Bemessungshochwasser:*

Mittels hydrologischer Modelle werden die Scheitelabflüsse der Bemessungshochwasser bestimmt und über hydraulische Berechnungsverfahren in Wasserspiegellinien umgesetzt. Anhand von Kartengrundlagen, Querschnitten oder digitalen Geländemodellen wird die Wasserspiegellage dann mit dem Geländemodell verschnitten und der Grenzverlauf der entsprechenden Hochwasserlinie bestimmt.

II.2.1.2.2. Überschwemmungsflächenausweisungen in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz

Das (in Abschnitt III.: Das Untersuchungsgebiet noch näher vorgestellte) Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit liegt in den beiden Bundesländern Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Die Bestimmungen zur Überschwemmungsflächenausweisung in den beiden Ländern soll deshalb kurz etwas eingehender betrachtet werden:

Aufgrund der "Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zur Einführung des Verordnungsmusters für Überschwemmungsgebiete" vom 8. Februar 1990 haben die

jeweiligen Wasserwirtschaftsämter bzw. die Gewässerdirektionen in Baden-Württemberg die Herstellung von Überschwemmungsgebietskarten zu veranlassen. Die Abgrenzung der Überschwemmungsflächen bezieht sich auf bereits abgelaufene Hochwasser mit einer Jährlichkeit von 50 bis 100. Die Unterlagen, anhand derer die Wasserstände dieser Hochwasserlinien vorgenommen werden, sind Geschwemmsellinien der bedeutendsten Hochwasser der letzten Jahre, Befragungen vor Ort, vermessungstechnische Aufnahmen im Gebiet, eine Begehung des Gebietes sowie die Auswertung von während eines Hochwasserereignisses erstellten Luftbildaufnahmen (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 1997; S. 27). Sind Geschwemmsellinien von Hochwasserereignissen größerer Jährlichkeit vorhanden, so sind diese als Grundlage zu nehmen. Sind nur Hochwasserereignisse kleinerer Jährlichkeit vorhanden, so ist mittels hydrologischer und hydraulischer Berechnungen das Überschwemmungsgebiet abzugrenzen. Die Darstellung der Überschwemmungsgebiete erfolgt als Übersichtsplan in der TK 25. Eine detaillierte Darstellung hat auf Grundlage von Flurkarten im Maßstab 1:2.500 oder 1:1.500 (mit Flurstücksnummern) zu erfolgen.

In Rheinland-Pfalz ist die fachliche Grundlage für die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten das "Verordnungsmuster zur Feststellung von Überschwemmungsgebieten" vom 31. Januar 1991. Das Staatliche Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft grenzt die Überschwemmungsflächen anhand von bereits vorhandenen Unterlagen (Methodik wie in Baden Württemberg: Geschwemmsellinien, Luftbildern, – s.o.) über bereits abgelaufene Hochwasser ab.

Bemessungsgrundlage ist in Rheinland-Pfalz im Unterschied zu Baden-Württemberg zunächst das größte durch Aufzeichnungen belegte Hochwasser, mindestens jedoch ein Bemessungsereignis mit einer Jährlichkeit von 50 bis 100 Jahren. Wurden nur Ereignisse geringerer Jährlichkeiten beobachtet, wird über vereinfachte Wasserspiegelberechnungen extrapoliert. Darüber hinaus werden auch die Überflutungsgrenzen für das HQ100 und das HQ200 bestimmt. Die Darstellung der Grenzen der Überschwemmungsgebiete erfolgt in der DGK5 (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG 1997; S. 37f).

Einen Überblick über die am nördlichen Oberrhein angewandten Methoden der Inundationsflächenerfassung geben Tab.1. und Tab.2..

II.2.2. Einsatz von Satellitenbilddaten zur Inundationsflächenerfassung

Zur Erfassung von Inundationsflächen bietet sich der Einsatz von Satellitenbilddaten zunächst scheinbar an. Seit Jahren werden in einer Vielzahl von Forschungsprojekten Satellitenbilddaten zur Bestimmung von Überschwemmungsflächen eingesetzt. Eine Reihe von kommerziellen Anbietern hat Software zur automatisierten oder zumindest teilautomatisierten Identifizierung von Inundationsflächen auf der Basis von Satellitenbilddaten entwickelt. Dies gilt insbesondere für Radardaten (z.B. SARMap und GAMMA⁶) . Satellitenbilddaten

⁶ Die Firma SARMap bietet mit SARscape ein modulares Softwaretool an, mit dem auf einfacher Basis Radar - Szenen ausgewertet und somit Überflutungen kartiert werden können. Die ganze Software lässt sich in ArcView (Desktop GIS) implementieren. Eine volle ERS Radarszene (100 x 100 km) kann in weniger als einer Stunde verarbeitet werden. Unterstützte Satelliten: ERS, Radarsat-1, und JERS-1. (<http://www.sarmap.ch>). Die Firma GAMMA prozessiert Radardaten, welche für Hochwassermonitoring geeignet sind. (<http://www.gamma-rs.ch>). Für einen guten Überblick über aktuelle

Systeme sind allerdings weniger für Detailkartierungen, sondern lediglich zur Erstellung kleinmassstäblicher Übersichtskarten geeignet (siehe z.B. Abb. 1. und Abb. 2.). Die gegenwärtigen Preise für räumlich hoch aufgelöste Satellitenbilddaten sind noch zu hoch, um eine Verwendung auf operationeller Basis zuzulassen (siehe Abb. 3.). Da Hochwasserereignisse häufig mit einer dichten Bewölkung einhergehen können optische Satellitenbildsysteme oftmals keine Daten von den Inundationsprozessen liefern. Zudem liegen für die meisten Hochwasserereignisse des zwanzigsten Jahrhunderts kaum auswertbare Datensätze vor - bzw. der Arbeits- und Kostenaufwand für ihre Beschaffung und Auswertung steht in keinem Verhältnis zu ihrer (im Vergleich zu Luftbilddaten) geringen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Satellitenbilddaten stellen für Hochwasseruntersuchungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgenommen wurden, gegenwärtig noch keine Hilfe dar. Zur Bestimmung der Inundationsflächen waren herkömmliche panchromatische SW-Luftbilder besser geeignet. Dies ist insofern bemerkenswert, als das satellitengestützten Verfahren im Vergleich zum klassischen Luftbilddatenauswertung in der Forschung eine wesentlich größere Aufmerksamkeit entgegengebracht wird.

II.2.3. Im Rahmen des Promotionsprojekts angewandte Methoden der Inundationsflächenerfassung

Datenrecherche und Behördenbesuche ergaben recht bald, dass die für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit benötigten Inundationsflächendaten bisher noch nicht erhoben wurden. Weder die KABS noch die zuständigen Behörden verfügten zu Beginn des Promotionsprojekts im Jahre 1999 über entsprechende Inundationsflächenkartierungen oder -modelle. Bereits zu Beginn des Projekts stand deshalb fest, dass die Entwicklung und Erprobung von geeigneten Methoden der Inundationsflächenerfassung neben der eigentlichen Datenerfassung den zeit- und arbeitsaufwendigsten Teil des Promotionsprojekts ausmachen würde. Bei den angewandten Methoden ist grob zu unterscheiden zwischen *Erhebungsmethoden im Gelände* (Kartierungen bei Geländebegehungen; Wasserstandsmessungen; Substratuntersuchungen), *Fernerkundlichen Methoden* und der *GIS-gestützten Analyse historischer Karten*. Zur letzten Methode ist zu sagen, dass sie erstmals bei der Ermittlung von rezenten Inundationsflächen eingesetzt wurde und sich insbesondere für die Ermittlung von druckwassergefährdeten Arealen als tauglich erwiesen hat.

II.2.3.1. Erhebungsmethoden im Gelände

II.2.3.1.1. Inundationsflächenkartierungen durch Geländebegehungen während eines Hochwasserereignisses

Die terrestrische Datenaufnahme anhand von *Geländebegehungen* zum Zeitpunkt der Hochwasserereignisse erlaubt unter Verwendung geeigneter Kartengrundlagen (DGK5) eine differenzierte Erfassung der Überschwemmungsflächen. Während fernerkundliche Methoden nur bei geeigneten Rahmenbedingungen (geringe Bewölkung, keine Vegetationsabdeckung der Inundationsflächen) angewandt werden

Forschungsprojekte und Produkte im Bereich der fernerkundlichen Inundationsflächenerkennung siehe WUNDERLE, OESCH (2001).

können, ist eine Geländebegehung und -kartierung das einfachste, aber auch zuverlässigste empirische Erhebungsverfahren. Letztlich ist es die einzige Methode, die absolute Gewissheit darüber bringt, ob und wann eine potentielle Inundationsfläche auch tatsächlich überflutet wird. Die systematische Kartierung der Überschwemmungsflächen erfordert je nach geforderter zeitlicher Auflösung der Daten regelmäßige (in aller Regel tägliche) Kontrollgänge im Gelände, um den Wasserstandsrückgang in den gefluteten Flächen zu dokumentieren. Trotz dieser Vorteile kommt diese Methode in der Praxis aufgrund des intensiven Zeit- und Personalaufwandes kaum zur Anwendung: Eine qualitativ hochwertige terrestrische Kartierung lässt sich nur mit einem kurzfristig verfügbaren, mit dem Untersuchungsgelände vertrauten und nach einem einheitlichen Kartierverfahren arbeitendem und entsprechend geschultem Team durchführen. In der Praxis und außerhalb des universitären Betriebes übersteigen die Personalkosten für derartig qualifizierte Mitarbeiter deutlich die Kosten der weiter unten noch vorgestellten fernerkundlichen Methoden.

Bei den am Geographischen Institut der Universität Heidelberg im Rahmen von Geländepraktika durchgeführten Überschwemmungsflächenkartierungen zeigte sich, dass den Studenten vor allem das Abschätzen der Größe der Überschwemmungsflächen Schwierigkeiten bereitete. Intensive Schulungen vor Ort sind deshalb nötig, um falsche bzw. uneinheitliche Flächenabschätzungen zu vermeiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden von Januar bis Dezember 1997 sowie von April 1999 bis Sommer 2000 die Überschwemmungsflächen aller im Untersuchungsgelände abgelaufenen Hochwasserereignisse dokumentiert, in ein GIS implementiert und ausgewertet. Die Datenaufnahme erstreckte sich insgesamt über etwa 90 Geländetage und war mehrmals mit Übernachtungen im Versuchsgelände verbunden.

Im folgenden sei kurz die Vorgehensweise, wie sie bei verschiedenen Geländepraktika im Rahmen des Promotionsprojektes mit Hilfe von Geographiestudenten der Universität Heidelberg durchgeführt wurden, skizziert:

a) Vorbereitungen

Da aus Gründen der Datenhomogenität zwischen Beginn und Abschluss der einzelnen Erhebungen nicht allzu viel Zeit (bzw. Veränderungen innerhalb der betrachteten Inundationsflächen) verstreichen durfte, war vor Beginn der eigentlichen Datenerhebung eine Reihe von Vorbereitungen notwendig:

?? Informationssammlung

Die Sammlung von Informationen über die Überschwemmungsdynamik im Untersuchungsgebiet umfasste im wesentlichen Literaturrecherchen, die unten noch zu erläuternde Auswertung historischer Rheinstromkarten und den Besuch von Forschungseinrichtungen, welche sich mit den Rheinauen befassen. Informationen über aktuelle und z.T. unveröffentlichte Forschungsprojekte in den Rheinauen konnten über die LFU in Karlsruhe (z.B. REG KA (1991), OBERRHEINAGENTUR (1996), das Auen - Institut des WWF in Rastatt (z.B. WWW-AUEN-INSTITUT (1992)), sowie die Wasserwirtschaftsämter Mannheim und Speyer und nicht zuletzt die KABS in Waldsee gewonnen werden. Die ökologischen Feinkartierungen der KABS erwiesen sich bei den Kartierungen im Gelände als das wertvollste Hilfswerkzeug.

?? Erstellen der Kartengrundlage

Von der Generalisierung der zugrunde liegenden Kartengrundlage hängt die Genauigkeit der späteren Inundationsflächenkarten ab. Bei den Untersuchungen im Untersuchungsgebiet diente die DGK5 als Arbeitsgrundlage. Genauere Karten waren von den zuständigen Behörden nicht flächendeckend zu erhalten bzw. verfügten nicht über Höhenangaben. Für eine Verwendung der DGK5 spricht auch, dass sie für den gesamten Oberrhein vorliegt und künftige Inundationsflächenkartierungen an diese Arbeit anschließen können. Von Nachteil ist dagegen die geringe Aktualität der DGK5. Für die Inundationsflächenkartierungen ist aber vor allem eine genaue Wiedergabe des Reliefs von Bedeutung, weshalb mangelnde Aktualität in der Darstellung von Straßen, Siedlungs- und Vegetationsflächen weniger ins Gewicht fällt. Für die Arbeiten im Gelände erwies es sich als günstig, die Blätter der DGK5 um 70% auf ein DIN A 3 Format zu verkleinern und nach Abschluss der Geländearbeiten umzuzeichnen.

?? Geländeerkundung

Vor Beginn der eigentlichen Datenerhebung muss sich der Kartierer mit dem Untersuchungsgelände bereits vertraut machen, um bei Hochwasser die Datenerhebung zügig durchführen zu können. Es empfiehlt sich, eine erste Begehung des Geländes im Winter vorzunehmen, wenn die üppige Auenwaldvegetation noch nicht die Sicht versperrt. Ist man bis zum Einsetzen der Vegetationsperiode noch nicht mit der Gestalt des Reliefs und der potentiellen Überschwemmungsflächen vertraut, besteht die Gefahr, dass bei sommerlichen Hochwasserereignissen Wasserflächen im dichten Pflanzenbewuchs übersehen werden. Besonders die Brennnesseln erschweren in den späten Sommermonaten mit Wuchshöhen von bis zu 2 m die Sicht und behindern die Arbeiten ganz erheblich.

Ferner empfiehlt es sich, das Untersuchungsgebiet bei niedrigen Rheinwasserständen kennenzulernen, um abschätzen zu können, wie groß die Inundationen überhaupt sind. Die besten Anfahrtswege zu den potentiellen Überschwemmungsflächen sind ebenfalls in aller Ruhe zu erkunden. Zahlreiche Wege sind in den Rheinauen für den Autoverkehr gesperrt, was zeitaufwendige Umwege mit dem Pkw bzw. lange zu Fuß zu bewältigende Strecken zur Folge hat. Für die Kartierungen hat sich das Fahrrad als optimales Fortbewegungsmittel in den Rheinauen bewährt.

b) Datenerhebung

Der Wasserstand des Rheines kann innerhalb weniger Tage um mehrere Meter ansteigen und wieder absinken (s.u.) – die Überschwemmungen im Untersuchungsgebiet zeitgleich für einen definierten Wasserstand durch Geländebegehungen zu erfassen, gestaltet sich angesichts derartig rascher Wasserstandsänderungen als äußerst problematisch. Das angestrebte Ziel der Geländearbeiten ist es aber, synchrone Daten über das zu einem bestimmten Pegelstand zugehörige Überschwemmungsausmaß zu erhalten. Angesichts der geringen Geschwindigkeit, mit der eine Geländekartierung überhaupt durchgeführt werden kann, ist es unmöglich, mit dieser Methode eine völlig homogene Datenbasis zu gewinnen. Da der Rhein bei Hochwasser wesentlich rascher ansteigt, als er anschließend absinkt (s.u.), ist es je nach dem Ziel der Kartierung oftmals sinnvoll, mit den Kartierungsarbeiten erst zu beginnen, wenn der Wasserstand seinen Höchstwert erreicht hat. Anhand der telefonischen Ansagen des Pegels Speyer ließ

sich der Zeitpunkt des zu erwartenden Höchststandes sehr gut abschätzen⁷. Kartierungen sind immer stromabwärts durchzuführen.

c) Aufbereitung und Auswertung der Daten

Nach dem Abschluss der Datenaufnahme werden die Ergebnisse der Geländekartierung in eine unbeschmutzte Karte übertragen und über ein Digitalisiertablett als Vektordateien ins GIS implementiert. Datum, Uhrzeit sowie der Wasserstand des nächst gelegenen amtlichen Messpegels zum Zeitpunkt der Erhebung müssen in jedes Kartenblatt eingetragen werden. Zuordnung, Nummerierung und Archivierung der Daten sind selbstverständliche Schritte, die keiner weiteren Erläuterung bedürfen. Anhand der archivierten Daten werden die Inundationsflächenkarten erstellt. Es können nun im GIS Karten dargestellt und für weitere Analysen herangezogen werden, die den Maximalwasserstand mehrerer Hochwasserwellen dokumentieren oder den Verlauf eines einzigen Hochwassers.

II.2.3.1.2. Wasserstandsmessungen

Die Messung der Wasserstandsänderungen in den einzelnen Inundationsflächen während eines Hochwasserereignisses war die zweite, auf Geländearbeiten beruhende Methode zur Erfassung der Inundationsdynamik. Anhand von Luftbildern, Gesprächen mit ortskundigen Personen (KABS-Mitarbeitern) und Beobachtungen, die während der ersten Kartierungen im Gelände gemacht werden konnten, wurde Anfang 1999 ein Netz von einfachen Messpegeln im Untersuchungsgebiet errichtet. Zumeist handelte es sich um Holzlatten von 2,5 m Länge, die ca. 50 cm tief in den Boden getrieben wurden. In etwa 1,60 cm Höhe über dem Boden wurde auf den Meßlatten ein Nullpunkt markiert und von diesem aus täglich der Wasserstand abgelesen. Da eine Messgenauigkeit von +/- 0,3cm für die Zwecke des Projekts genügte, war diese einfache Art der Wasserstandsmessung ausreichend. Die absolute Höhe wurde mit Hilfe eines optischen Nivelement-Meßgerätes bestimmt. Die Wasserstandsmessungen verfolgten zwei Ziele:

Zum einen dienten die Daten der Verifizierung des Inundationsflächenmodells, da Messungen des Rheinwasserstands im Untersuchungsgebiet lediglich für den amtlichen Pegel Speyer vorlagen. Es wurden deshalb Anfang April 40 Messpegel in der rezenten Aue zwischen Mannheim und Speyer aufgestellt. Während des Hochwasserereignisses im Juni 1999 kamen die Pegel jedoch kaum zum Einsatz, da dieses Hochwasser mit fast 5m über MW ein Aufsuchen der meisten Messstellen unmöglich machte. Die Höhe des maximalen Wasserstandes konnte aber dennoch bestimmt werden: Während des Hochwassermaximums wurde der Wasserstand an verschiedenen Bäumen markiert und nach dem Rückgang der Inundationen eingemessen. Zudem wurde innerhalb von Auebereichen, die während des Hochwassers nicht begehbar waren, der maximale Wasserstand über den markanten Sedimentniederschlag an den Bäumen eingemessen (siehe Abb. 4.).

⁷ Der telefonische Ansedienst der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest informiert täglich über den Abfluss des Rheins an der Staustufe Kembs sowie über die Wasserstände der wichtigsten Rheinpegel. Detaillierte Informationen zum Verlauf der Hochwasserwellen an den Messpegel geben die viertelstündlich aktualisierten Ansedienste der einzelnen amtlichen Messstationen. Ferner lassen sich im Internet täglich unter <http://www.uis-extern.um.bwl.de/lfu7hvz> die wichtigsten Wasserstands- und Abflussganglinien als Tabelle und Grafik, sowie Lageberichte und ausgewählte Vorhersagen der HVZ abrufen.

?? Zum anderen wurden auch in bereits bekannten Druckwasserstellen bzw. außendeichs gelegenen Senken Meßlaten errichtet. Dadurch konnte während der verschiedenen Hochwasserereignisse im Jahr 1999 die Wasserstandsentwicklung in den Druckwasserflächen mit derjenigen des Rheins verglichen und so Rückschlüsse auf das Inundationsverhalten dieser Flächen geschlossen werden (Ergebnisse siehe Kapitel VI).

II.2.3.1.3. Bodensondierungen

Neben ihrer Lage zum Rhein ist die Beschaffenheit des Untergrundes (das Vorhandensein von Grundwasser leitenden oder hemmenden Sedimentschichten) der wichtigste Einflussfaktor für das Inundationsverhalten von Druckwasserflächen. Intensive Untersuchungen der holozänen Sedimente des Untersuchungsgebietes waren im Rahmen unseres Forschungsprojektes nicht möglich. In mehreren Druckwasserflächen, die während des Junihochwassers von 1999 durch ihre ungewöhnliche Wasserstandsentwicklung aufgefallen waren, wurden jedoch im Rahmen von drei Geländepraktika Bodensondierungen vorgenommen⁸. Es konnte so anhand exemplarischer Beispiele zumindest qualitativ der Zusammenhang zwischen Beschaffenheit des Untergrundes und Inundationsdynamik der entsprechenden Fläche untersucht werden. Oftmals konnte das „individuelle“ Inundationsverhalten der Druckwasserflächen durch diese Untersuchungsmethode geklärt werden. Mehrere Meter mächtige Tone waren vor allem bei älteren, d.h. noch vor der Rheinbegradigung verlandeten Schluten nachweisbar. Diese Flächen reagierten erwartungsgemäß langsamer auf Wasserstandserhöhungen des Rheins. Andererseits stand einmal eingedrungenes Wasser über Monate hinweg in diesen Senken und verdunstete bzw. versickerte erst allmählich. Eine Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abschnitt V..

II.2.3.2. Inundationsflächenkartierung anhand von fernerkundlichen Methoden

Die Möglichkeit, das Ausmaß von Inundationen auch bei mehreren hundert km² großen Untersuchungsgebieten innerhalb weniger Stunden dokumentieren zu können, ist der entscheidende Vorteil der Fernerkundung gegenüber den bisher vorgestellten Methoden. Extreme Hochwasserereignisse wie das Junihochwasser 1999 am Oberrhein lassen sich ohne fernerkundliche Methoden nicht mehr dokumentieren, da großflächige Überschwemmungen durch Geländebegehungen nicht mehr flächendeckend erfassbar sind. Bei derartigen Ereignissen ist ein Großteil der Forstwege im Untersuchungsgebiet überschwemmt, so dass der Einsatz von Booten bei Kartierungsarbeiten im Gelände notwendig wäre. Während sich das Problem der Homogenität bzw. der Vollständigkeit der Datenerhebung bei der Fernerkundung im Vergleich zu Kartierungen durch Geländebegehungen kaum stellt, liegt die problematischste Aufgabe dieser Methode in der richtigen Interpretation der Bilder. Was für die Luftbildinterpretation im allgemeinen gilt, trifft auf die Erfassung von Überschwemmungsflächen in erhöhtem Masse zu: Ohne detaillierte Bodenkontrollen und ein umfassendes Wissen des Luftbildinterpreten über die Eigenheiten des betrachteten Geländes ist eine Interpretation nur von geringem Wert. Das Erscheinungsbild von Überschwemmungsflächen bzw. ihre Wiedergabe in Luft- und Satellitenbildern weist eine große Variationsbreite auf - je nach Bodenart,

⁸ An dieser Stelle sei meinem früheren Lehrer am Gymnasium Sandhausen, Herrn Dr. Manfred Löscher, für beratende Unterstützung und die unentgeltliche Bereitstellung seines Bohrgerätes für die Geländepraktika am Geographischen Institut der Universität Heidelberg ausdrücklich gedankt.

umgebender Vegetation, Sedimentführung des Wassers, aufschwimmendem Getreibsel, Wassertiefe oder durch den Sonnenstand bedingten Spiegelungseffekten (um nur einige der Einflussfaktoren genannt zu haben) auf der einen Seite und den Aufnahmeeigenschaften des Fernerkundungssensors auf der anderen Seite.

Trotz der mittlerweile relativ kostengünstig verfügbaren, hoch auflösenden Ikonos Daten⁹ wird auch in Zukunft das Flugzeug bei der Erfassung von Inundationsflächen die wichtigste Fernerkundungsplattform bleiben. Das Hauptproblem bei der Nutzung von Satellitenbildern für diesen Anwendungsbereich liegt in ihrer geringen zeitlichen Auflösung. Während Satelliten in der Regel erst nach mehreren Tagen ein zweites Bild von einem Hochwasserereignis liefern können, ist eine auf Flugzeuge gestützte Datenerfassung sogar im Stundentakt möglich. Ein weiterer entscheidender Vorteil von Flugzeugen gegenüber Satelliten ist die Möglichkeit, unterhalb von Wolken zu fliegen und so auch bei einer geschlossener Wolkendecke Luftbilder zu erstellen. Dieser Gesichtspunkt ist in seiner Bedeutung für die Datenerhebung nicht zu unterschätzen, denn oftmals gehen Hochwasserereignisse mit wolkenreichen Witterungsverhältnissen einher. Beispielsweise wurden im Juni 1999 zwei der im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Befliegungen mit einer Cessna bei leichtem Regen unterhalb einer völlig geschlossenen Wolkendecke vorgenommen. Auch an den anderen Befliegungstagen im Juni 1999 war zumeist starke Bewölkung vorherrschend – Satellitenbilder hätten das Ausmaß der Überschwemmungen an diesen Tagen nicht bzw. nur lückenhaft wiedergeben können.

Neben Luftbildern aus professionellen Luftbildflügen wurden während der Hochwasserereignisse im Jahr 1999 auch eigene Luftbilder von den Überschwemmungsflächen erstellt. Im Februar 1999 stellte die KABS einen Helikopter für die Luftbildaufnahmen zur Verfügung. Der Vorteil von Helikoptern ist ihre hohe Wendigkeit in der Luft. Der Pilot kann flexibel auf die Wünsche des Photographen eingehen, das für Flugzeuge obligatorische „Fliegen in Streifen“ entfällt, da auch engen Flussbiegungen ohne Mühe gefolgt werden kann. Gegen einen Helikopter als Fernerkundungsplattform sprechen vor allem die hohen Charterkosten von 1000 bis 2000 DM/ Flugstunde.

Als kostengünstigere Fernerkundungsplattform mit Charterpreisen von etwa 300DM/ Flugstunde bewährte sich in diesem Promotionsprojekt eine Cessna mit Heimatflughafen Mannheim in insgesamt neun Einsätzen. Für die Querstrebe an der rechten Tragfläche wurde in Eigenbau eine Kameraaufhängung angefertigt, welche Platz für 2 Spiegelreflexkleinkameras bzw. digitale Photo- oder Videokameras bietet. Die zahlreichen, im Rahmen des Projekts ausgewerteten Luftbilder lassen sich in *selbst erhobene* und von *professionellen Befliegungsunternehmen erstellte* unterteilen:

- *Selbst erhobene Luftbilder*

Durch Befliegungen des Untersuchungsgebietes während verschiedener Hochwasserereignisse in den Jahren 1997 und 1999 entstand eine große Zahl von Inundationsflächenbildern des Untersuchungsgebietes. Aus Mangel an entsprechenden Projektmitteln wurden die Bilder mit einfacher technischer Ausstattung (zwei Kleinbild Spiegelreflexkameras und eine digitale Videokamera) erstellt. Die Kosten für die zwei Helikopterbefliegungen wurden von der KABS übernommen, die neun Cessna Befliegungen aus eigenen Mitteln finanziert. Bei den selbst erstellten Aufnahmen handelt es sich überwiegend um photogrammetrisch nur schwerlich auswertbare Schrägluftbilder. Eine Übertragung der auf ihnen

⁹ Eindrucksvolle Beispiele von bis in den Meterbereich aufgelösten Ikonos Bildern finden sich unter <http://www.spaceimaging.com/level2/level2gallery.htm>

abgelichteten Inundationsflächen in eine topographische Karte setzt eine intensive visuelle Interpretation der Aufnahmen voraus. Die Mehrzahl der Bilder liegen als Kleinbild-Diapositiv oder als digitales Video vor. Gute Ergebnisse konnten auch mit SW - Infrarotfilmen erzielt werden.

- *Luftbildmaterial aus professionellen Befliegungen*

Aus dem Luftbildarchiv des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg konnte eine Reihe von auswertbaren Luftbildszenen zur Inundationsflächenanalyse herangezogen werden. Zudem wurden vom Landesvermessungsamt Senkrechtaufnahmen des Untersuchungsgebietes vom Juli 1999 gekauft. Die meisten dieser aus professionellen Befliegungen (Reihenmesskammeraufnahmen) stammenden Luftbildszenen waren leider nicht während eines Hochwassers, sondern teilweise erst Monate danach entstanden, so dass sich die Auswertung auf die Interpretation von Hochwasser bedingten Vegetationsveränderungen konzentrierte. Die meisten Luftbilder lagen als panchromatische SW-Photos vor. Anhand einer Luftbildszene des Untersuchungsgebietes aus dem Jahre 1975 konnte auch die Wiedergabe von Inundationsflächen in farbigen Infrarotbildern (Falschfarbenluftbild) analysiert werden.

II.2.3.3. GIS gestützte Auswertung historischer Karten

Die Begradigung des Rheins wurde bereits im 19. Jh. von zahlreichen Untersuchungen begleitet. Anhand der detaillierten, zeitgenössischen topographischer Karten, anhand von Urkunden, Verträgen, Plänen und anderen historischen Quellen lässt sich der Wandel der Rheinauen hervorragend nachvollziehen.

Die ältesten erhaltenen Darstellungen des Untersuchungsgebietes finden sich in den Protokollen der "großen Oberrhein- und Niederrhein-Befahrungen". Es handelt sich hierbei um die schriftlichen Aufzeichnungen der Rheinbefahrungen, die von Kurpfalz zur Festlegung ihrer Hoheitsrechte auf dem Rhein vom 15. bis zum 18. Jahrhundert vorgenommen wurden. Sie wurden mit Hilfe von Forst- und Fischereimeistern und Einwohnern der angrenzenden Gemeinden durchgeführt und beschreiben genau die beiderseits des Stromes gelegenen Auen, Wörthe, Inseln sowie die jeweiligen Nutzungen und Besitzstände (MUSALL 1969; S.348). Für das Untersuchungsgebiet sind besonders die großen Rheinbefahrungen von 1571 und 1575 aufschlussreich, sowie die kleine Rheinbefahrung von 1580, welche mit der Rheinstromkarte des Speyrer Malers Wilhelm Besserer die erste großmaßstäbige Darstellung des Bereichs Speyer-Worms enthält (GLA Abt 77/5714; GLA Abt 77/5712; MUSALL 1969, S.651). Weitere Protokolle entstanden 1590 und 1668 (GLA 77/5711; GLA 77/5879). Ab dem Ende des 17. und Anfang des 18. Jahrhunderts sind bereits mehrere, z.T. recht genaue topographische Karten größeren Maßstabs für die Oberrheinlande erhalten. Vor allem unter französischer Herrschaft wurde im 17. Jahrhundert das linke Rheinufer detailliert kartiert. Im Laufe des 18. Jahrhunderts entstand eine große Zahl von Karten und Plänen. Besonders gegen Ende des 18. Jahrhunderts sind exakte großmaßstäbige Unterlagen für Teilstrecken erhalten, welche die Niederungslandschaft mit dem Rhein genau wiedergeben. Die anlässlich der Rheinkorrektur angelegten Pläne und Kartenwerke leiten schließlich schon über zur amtlichen Topographie des 19. Jahrhunderts und geben eine klare topographische Vorstellung aus der Zeit unmittelbar vor der Korrektur (siehe MUSALL 1969; S.151). Besonders hervorzuheben ist die „Rheingrenzkarte“ im Maßstab 1:20.000. Mit ihr begründete Tulla von 1824 bis 1828 die

Landesvermessung und topographische Landesaufnahme im Großherzogtum Baden (siehe BECK (o.J)). Die Rheingrenzkarten prägten den weiteren topographischen und kartographischen Stil der badischen Landesaufnahme. Die Kartenwerke genügen den heutigen geodätischen Anforderungen an topographischen Karten und übertreffen die aktuellen Kartenblätter der Landesvermessungsämter in ihrem ästhetischen Erscheinungsbild bei weitem. Rheingrenzkarten wurden von Basel bis Sandhofen bei Mannheim zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Ein Nachweis der untersuchten Karten befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.

Vielfach wurde der durch die Rheinbegradigung ausgelöste Landschaftswandel qualitativ untersucht (z.B. MUSALL 1968, 1969 und 1971, REINHARD 1974, DÖRRER 1984), so dass heute bereits ein recht genaues Bild vom Wandel dieser Kulturlandschaft vorliegt. Eine detaillierte quantitative Auswertung und Analyse der Kartenwerke des 19. Jahrhunderts ist dagegen bisher trotz ihrer außerordentlich hohen Qualität noch nicht erfolgt. Die Grundidee bei den im Rahmen des Promotionsprojektes durchgeführten GIS-gestützten Analysen historischer Karten besteht darin, angelehnt an die in der Fernerkundung übliche „change detection“, durch den Vergleich von Luftbildern, Topographischen Karten bzw. einzelnen GIS Informationsebenen mit den historischen Karten Veränderungen zu erkennen und diese räumlich und quantitativ zu beschreiben. Die Interpretation der so gewonnenen Daten kann dann wiederum für Rückschlüsse auf z.B. die Entstehung oder räumliche Verbreitung von rezenten Inundationsflächen genutzt werden.

Folgenden Fragen wurde im Rahmen des Projektes bei der historischen Kartenanalyse nachgegangen:

- a) Wie hat sich die Landschaft in der Rheinaue seit der Rheinbegradigung (nicht qualitativ, sondern quantitativ) gewandelt? (*Quantitativer Landschaftswandel*)
- b) Ist die historische Nutzungsstruktur ein Indikator für die räumliche Verbreitung rezenter Druckwasserflächen? Die Rheinkorrektur unter Tulla stand im Zeichen der Gewinnung von landwirtschaftlicher Nutzfläche. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Flächen ihrer höchstmöglichen Nutzung zugeführt, „in Wert“ gesetzt wurden. Die in den Rheinstromkarten verzeichneten „nassen Wiesen“ sind deshalb als deutliche Indikatoren für das einstige Auftreten von Druckwasserflächen zu interpretieren. Ein Vergleich der historischen Landnutzung mit den Ergebnissen der Inundationsflächenkartierungen im GIS gibt Antwort auf die Frage, inwieweit die historische Landnutzung auch als Indikator für die rezente Verteilung von Druckwasserflächen genutzt werden kann.
- c) Können aus den historischen Karten weitere Hinweise auf die räumliche Verteilung von rezenten Inundationsflächen gewonnen werden? In den Rheinstromatlanten ist der Verlauf des Rheins sowie die Verteilung von Sand und Kiesbänken im 19. Jh. genauestens verzeichnet. Sofern diese Flächen nicht auch heute noch zum Gerinnebett des Flusses zählen, handelt es sich hierbei um sehr junge Verlandungsflächen und um rezente Inundationsflächen. In einem Vergleich des ehemaligen Rheinbetts mit den heutigen Überschwemmungsflächen im GIS ist die Frage zu klären, bei welchen Wasserständen diese Flächen geflutet werden.

Eine erste GIS-gestützte Analyse historischer Karten im Hinblick auf die Genese und Verbreitung von Stechmückenbrutplätzen erfolgte bereits in der Diplomarbeit von LEINER 1997. Im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit wertete CLEMENS JAKOBS in seiner Diplomarbeit die Badischen Rheinstromatlanten von 1856 und

1875 für den größten Teil des Untersuchungsgebietes im GIS aus. JAKOBS ging dabei vor allem den Fragen

a) (*Quantitativer Landschaftswandel*) und

b) (*historische Flächennutzung als Indikator für Druckwasserflächen*) nach.

Sowohl die Ergebnisse seiner Arbeit, als auch die zusätzlich und parallel dazu vorgenommenen Auswertungen im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden in Abschnitt VI. diskutiert.

III. Hydrogeographische Merkmale des Untersuchungsgebietes

Anhand eines Untersuchungsgebiets in der Rheinniederung bei Speyer wurden im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit die soeben vorgestellten Methoden der Inundationsflächenerfassung erprobt, die Ergebnisse der Fernerkundungs- und Feldarbeiten in ein GIS implementiert, analysiert und als Grundlage für die Erarbeitung eines Inundationsflächenmodells genutzt. Das eigentliche Untersuchungsgebiet umfasst die Rheinniederung zwischen Rheinhausen und der südlichen Gemarkungsgrenze der Stadt Mannheim (siehe Abb. 5. und Abb. 6.). In Ost-West Richtung bildet die Böschung der Hochgestade seine morphologische Grenze. Es befindet sich inmitten der Mäanderzone des Oberrheins. Nicht zuletzt um abschätzen zu können, inwieweit die in diesem Gebiet gewonnenen Ergebnisse auch für andere Flusssysteme gültig sind, ist es notwendig, die hydrogeographischen Charakteristika des Untersuchungsgebietes näher zu beleuchten. Nach klassisch geographischer Einteilung werden dabei zunächst die natürlichen Grundlagen und anschließend die anthropogenen Eingriffe in den Naturhaushalt und ihre Folgen abgehandelt. Auf eine eingehende Darstellung wird verzichtet, da zu diesem Themenkomplex bereits zahlreiche Untersuchungen vorliegen und die für das Untersuchungsgebiet relevante Literatur bereits in der Diplomarbeit des Verfassers ausführlich vorgestellt wurde (siehe LEINER 1997).

Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen liegt vielmehr auf den Faktoren, welche die Entstehung von Inundationsflächen und insbesondere von Druckwasserflächen im Untersuchungsgebiet beeinflussen.

III.1. Natürlicher Zustand

Zu den wichtigsten physiogeographischen Faktoren, welche die Entstehung und Ausdehnung von Überschwemmungsflächen im natürlichen, vom Menschen unbeeinflussten Zustand bestimmen, zählen Geologie (und hier vor allen Dingen die Interaktion von Rhein- und Grundwasser), Klima (Niederschläge im Rheineinzugsgebiet), die Abflussdynamik des Rheins sowie die Morphologie des Reliefs in der rezenten und potentiellen Überschwemmungsaue.

III.1.1. Geologische Merkmale des Oberrheingebietes

Als Oberrhein wird der Rheinabschnitt zwischen Basel und Mainz bezeichnet. Der Strom verlässt bei Basel das enge Tal des Hochrheins und erstreckt sich in der breiten, aus fluvialen Ablagerungen aufgebauten Oberrheinischen Tiefebene. Die Rheinebene mit etwa 300 km Länge und bis zu 50 km Breite ist Teil eines weitläufigen Bruchsystems. Für eine ausführliche Darstellungen der komplexen tektonischen Hebungs- und Senkungsprozesse in der Oberrheinebene und ihrer Randgebirge sei auf ILLIES 1967 und 1982 verwiesen.

Bei der Untersuchung der heutigen Inundationsflächen des Flusses und ihrer Interaktion mit dem Grundwasser ist in erster Linie das Pleistozän von Interesse: Die heutige Oberflächenform der Rheinebene ist vorrangig das Ergebnis der seit den Eiszeiten wirkenden geomorphologischen Prozesse. Hauptsteuerungsfaktor waren die Klimaänderungen der letzten 1,5 Millionen Jahre. Etwa 100 m bis maximal 382 m (Heidelberger Loch) mächtige Schotter wurden in diesem Zeitraum in der

Oberrhinebene abgelagert. Ihnen kommt heute eine wichtige Funktion als Grundwasserleiter und -speicher zu. Der Aufschüttungsprozess erfolgte im wesentlichen während der letzten vier Eiszeiten im Vorfeld der Gletscher. In den wärmeren Zwischeneiszeiten und dem Holozän grub sich der Rhein dagegen wieder in die jungen Aufschüttungen ein.

Gegen Ende der Würmeiszeit nahm die Erosionstätigkeit des Flusses zu. In die Niederterrasse schnitt sich der Rhein eine im Mittel ca. 6 km breite Überschwemmungsebene ein, die heutige „Rheinniederung“ (auch „Talaue“ genannt), in der sich unser Untersuchungsgebiet befindet. Anhand des Hochgestades, der Terrassenkante von Rheintalniederterrasse zur Rheinniederung, lässt sich das Ausmaß der vor der anthropogenen Korrektur eingetretenen Tiefenerosion des Flusses deutlich ablesen. Nach ILLIES (1982; S.11) sind Ursache der unterschiedlich starken Ausbildung des Hochgestades junge, erst seit den letzten 20 000 Jahren wirkende tektonische Prozesse, die eine unterschiedlich starke Vertikalbewegung verschiedener Abschnitte der Oberrhinebene bewirken (siehe Abb. 7.c.):

Nördlich von Basel bis zum Isensteiner Klotz beträgt die Höhe der Hochgestade 20 bis 22m und sinkt bis Breisach auf Null ab. Talabwärts bis etwa Straßburg bleibt die Eintiefung sehr gering und erst nördlich von Straßburg, zwischen Rastatt und Karlsruhe, ist wieder ein Anstieg der Hochgestade auf 10 m bis 14 m zu erkennen. Besonders zwischen Karlsruhe und Mannheim ist der Steilabfall deutlich ausgeprägt. Nördlich Mannheim nehmen die Hochgestade bis ins Mainzer Becken ab, wo sie schließlich gänzlich verschwunden sind (ILLIES 1982, S.11). Ohne auf Abschnitt III.2. (Anthropogene Einflüsse) vorgreifen zu wollen, sei an dieser Stelle auf die Bedeutung des Hochgestades als Siedlungsstandort hingewiesen. Dort, wo die Hochgestade ausgebildet sind, begrenzen sie deutlich die morphologische Aue des Rheins und trennen hochwassergefährdete von hochwassersicheren Bereichen (siehe Abb. 8.)¹⁰. Die ältesten Siedlungen im Untersuchungsgebiet reihen sich wie Perlen an einer Kette entlang des Hochgestaderandes, da diese Standorte trotz ihrer Nähe zum Fluss sicher vor Hochwasser waren. Erst in der Neuzeit entstanden unterhalb des Hochgestades in größerem Maße dauerhafte Siedlungen. Dass derartige Siedlungen trotz umfangreicher Dammbauten nach wie vor gefährdet sind, hat nicht zuletzt das Elbhochwasser im August 2002 mit drastischer Deutlichkeit gezeigt.

III.1.2. Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet

Aufgrund der stärkeren Absenkung der Grabenschollen im Osten des Untersuchungsgebietes sind dort die größten Sedimentmächtigkeiten ausgebildet

¹⁰ Siedlungen wurden im Bereich der Oberrhenniederung seit Anbeginn der Besiedelungsgeschichte bis ins 19. Jh. hinein auf dem hochwassersicheren Hochgestade mit möglichst großer Nähe zum Fluss errichtet. Beispielsweise gründeten die Römer das heutige Speyer auf einer Hochgestadenzunge, welche direkt bis zum Rhein hin vorstößt. Dieser bevorzugte Standort ermöglichte trotz seiner unmittelbaren Nähe zum als Transportweg und Fischgrund wichtigen Strom die Errichtung einer hochwassersicheren Siedlung (bzw. eines Militärlagers). Erst seit der Mitte des 20. Jh. sind trotz der nach wie vor bestehenden Hochwassergefahr in der Speyerer Rheinniederung in größerer Anzahl Neubaugebiete und Gewerbeansiedelungen entstanden.

(Heidelberger Loch). Nach Westen, zur Vorderpfalz hin, dünnen die Sedimentmächtigkeiten aus (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) 1987, S.20).

Die grundwasserführenden quartären und pliozänen Lockergesteine gliedern sich im untersuchten Bereich des Oberrheingrabens bis zur westlichen Verbreitungsgrenze des hydrogeologisch bedeutsamen Oberen Tones in die in Tab. 3. dargestellten Einheiten (Vgl. Abb. 9. / MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) 1987, S.14). Die drei quartären Grundwasserleiter haben zwar untereinander und auch zum pliozänen Grundwasserleiter hydraulische Verbindung, besitzen jedoch jeweils eine gewisse Eigenständigkeit.

Der *Obere Grundwasserleiter* besteht vorwiegend aus sandigen Kiesen und kiesigen Sanden, wobei der Kiesanteil nach Westen hin in der Vorderpfalz geringer wird. Auch die Mächtigkeit des Oberen Grundwasserleiters nimmt nach Westen hin ab. Rechtsrheinisch beträgt die Mächtigkeit 25 bis 50 m, während sie linksrheinisch auf 20 bis 25 m und bereichsweise bis 10 m abnimmt. In diesem Grundwasserleiter spielen sich die für die Entstehung von druckwassergespeisten Inundationsflächen hydrologisch bedeutsamen Prozesse ab (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) 1987, S.29).

Der *Obere Zwischenhorizont* trennt weithin den Oberen Grundwasserleiter vom Mittleren Grundwasserleiter und bewirkt bei einer flächenhaften Mächtigkeit von 10 bis 40 m eine ausgeprägte hydraulische Stockwerksbildung. Hauptbestandteil des Oberen Zwischenhorizonts ist der obere Ton mit einer Mächtigkeit von maximal 35 m. Gebietsweise weist er jedoch auch beträchtliche Lücken auf, wie z.B. südöstlich von Mannheim-Rheinau. Im Bereich des Untersuchungsgebietes scheint der Obere Zwischenhorizont aber geschlossen vorzuliegen. Erst im Westen, im Bereich der randlichen Grabenscholle dünnt der überwiegend sandig-schluffige Obere Zwischenhorizont bereichsweise auf ca. 10 m und mehr aus.

Es ist bei den folgenden Betrachtungen von einer hydrologischen Trennung des Oberen Grundwasserhorizonts von den tieferliegenden Grundwasserhorizonten im Bereich des Untersuchungsgebietes auszugehen. Die Grundwasserkörper unterhalb des Oberen Zwischenhorizonts haben nur bei langfristigen und großräumigen Änderungen der hydrologischen Rahmenbedingungen (z.B. langfristige Abnahme der Grundwasserspeisung durch anhaltende Trockenperioden, starke anthropogene Wasserentnahme aus den Unteren Grundwasserleitern) Einfluss auf die Überschwemmungsflächendynamik des Untersuchungsgebietes. Sie bedürfen deshalb hier keiner näheren Betrachtung.

Der Obere Grundwasserleiter mit seinen pleistozänen Sanden und Kiesen wird im Bereich der Rheinniederung von den *holozänen Sedimenten* des Rheins überdeckt (siehe Abb. 9.). Bis zum Beginn der anthropogenen Eingriffe in das Gerinne des Rheines war der gesamte Bereich zwischen den Hochgestaden in die Erosions- und Sedimentationsprozesse des mäandrierenden Stromes eingebunden. Das *Holozän* baut sich in der Aue des Untersuchungsgebietes aus einer Abfolge von etwa 20 bis 25 m mächtigen Grob-, Mittel- und Feinkiesen sowie Sanden und Aulehmen auf. Die Schichtung bzw. Sortierung der fluvialen Sedimente erfolgte in natürlichem Zustand durch die Erosions- und Akkumulationsprozesse im sich ständig verändernden Gerinne des Flusses. Das heutige Muster in der räumlichen Verteilung der wasserhemmenden Feinsedimente und der wasserleitenden Kiese und Sande des Holozäns resultiert aus den Erosions- und Sedimentationsprozessen im Gerinne des Rheins bzw. seinen kontinuierlichen und sprungartigen Bettverlagerungen.

Bevor nun auf die Interaktionsprozesse zwischen Flusswasser bzw. Uferfiltrat und dem von den seitlichen Randgebirgen rheinwärts strömenden Grundwasser eingegangen wird, soll zunächst die Entstehung des holozänen Musters aus wasser hemmenden und –leitenden Sedimenten näher betrachtet werden. Die räumliche Verteilung von Wasserleitlinien und –barrieren beeinflusst maßgeblich das räumliche Muster der rezenten Inundationsprozesse:

III.1.3. Die Ausbildung des Reliefs in der Rheinniederung

Der Talboden der Oberrheinebene ist von Süden nach Norden geneigt: Von Weil am Rhein bei Basel mit 250 m ü. NN sinkt er auf 83,5 m ü. NN an der Mainmündung bei Mainz (siehe auch SCHÄFER 1978, S. 9). Das Gefälle nimmt vom Süden bei Isenstein mit etwa 1m/km nach Norden hin auf 0,1m/km hin ab. Aufgrund des unterschiedlich stark abnehmenden Gefälles hatten sich vor dem Beginn größerer anthropogener Eingriffe unterschiedliche Gerinnetypen ausgebildet: Im Süden die Furkationszone und im Norden die Mäanderzone. Dazwischen befand sich eine Übergangszone, die keinem der beiden Typen eindeutig zuzuordnen ist (siehe Abb. 10.).

III.1.3.1. Die Furkationszone

Dieser Abschnitt zwischen Basel und der Murgmündung bei Rastatt wird auch südlicher Oberrhein genannt. Das durchschnittliche Gefälle beträgt 0,087%; die Länge beträgt rund 202 km (TITIZER, KREBS 1996, S.16). Aufgrund der Gefällsverminderung gegenüber dem Hochrhein sedimentierte der Fluss im Oberrheinischen Tiefland Kiese und Schotter. Der Charakter der Furkationszone mit hoher Morphodynamik und einer Vielzahl von Inseln war in der breiten Talniederung besonders gut ausgeprägt. Die 30-40 km breite Ebene des Oberrheinischen Tieflandes zwischen Vogesen und Schwarzwald bot Raum für eine bis zu 12 km breite Aue (TITIZER, KREBS 1996, S.17). Der Rhein floss langsam in unregelmäßigen, stark gewundenen, durch Inseln und Kiesgründe voneinander getrennten Armen (siehe Abb. 11. und Abb. 12.). Das Gerinnebett war in mehr oder weniger parallel laufende Rinnen mit einer meist in der Mitte liegenden, schwach mäandrierenden Hauptrinne aufgespalten. Das Seitwärtswandern des Stromes hatte bescheidene Ausmaße. Eine seitwärtswandernde Rinne traf sehr bald auf eine Nachbarrinne und vereinigte sich mit ihr. Jedes Hochwasserereignis beeinflusste den Lauf des Stromes. Alte Seitenarme verschwanden, neue entstanden. Bei Überschwemmungen beherrschte der Strom die ganze Breite der Talaue (SCHÄFER 1973, S.20).

Den im Furkationsabschnitt des Rheins abgelagerten Sedimenten fehlt die klare Ordnung im Gefüge, wie sie für die Sedimente des Mäanderabschnitts gilt (s.u.). Die Erosions- und Sedimentationsverhältnisse in der Furkation schwanken wenig. Es lagern sich entsprechend der relativ einheitlich vorherrschenden Transportkraft nur bestimmte Korngrößen ab. So werden feinere Sedimente aufgrund der im Vergleich zum Mäanderbereich stärkeren Strömung und aufgrund des Mangels an größeren Stromschattengebieten stromabwärts gefrachtet. Die Sedimente der Furkationszone weisen deshalb ein *recht homogenes Bild* auf. Es lagern sich überwiegend *in ihrer Korngröße kaum schwankende Kiese* ab. Tonbestandteile fallen kaum an. Eine Schichtung der Sedimente ist immer nur auf kleine Bereiche beschränkt (SCHÄFER 1973, S.20-22).

III.1.3.2. Die Mäanderzone

Die Mäanderzone, auch als „Nördlicher Oberrhein“ bezeichnet, erstreckt sich von Karlsruhe bis Mainz. Das durchschnittliche Gefälle beträgt nur noch 0,025%, die Länge liegt bei 135 km (TITIZER; KREBS 1996, S.16). Aufgrund der reduzierten Strömungsenergie reagiert der Wasserkörper verstärkt auf lokale, morphologische Gegebenheiten im Gerinnebett. Der Stromstrich als Linie höchster Wassergeschwindigkeit pendelt aus der Mitte des Wasserkörpers heraus und verursacht eine verstärkte Seitenerosion (siehe Abb. 13. sowie TITIZER; KREBS 1996, S.17). Die Mäanderamplitude wächst mit abnehmendem Gefälle. Im Abschnitt Karlsruhe-Speyer liegt sie bei 2-4 km und steigt zwischen Worms und Mainz auf 5-7 km an. Dementsprechend stellt sich auch die Bildung von Auen und Altrheinarmen und Inundationsflächen in veränderter Form dar (TITIZER; KREBS 1996, S.18.).

In einem mäandrierenden Gerinne überwiegt die Seitenerosion gegenüber der Tiefenerosion. Erosion am Prallhang bedeutet stets Sedimentation am Gleithang. Da im Flussquerschnitt verschiedene Stromgeschwindigkeiten herrschen, kommt es bei der Sedimentation zu einer Sortierung der Korngrößen. Im stärker bewegten Sohlenbereich kommen die groben Kiese, in den oberen Zonen des Gleithanges und zudem nach oben gestaffelt die Feinkiese, Grobsande, Feinsande und schließlich die Auelehme zur Ablagerung (siehe Abb. 14.). Die Schichtenfolgen weisen im Idealfall immer die gleiche Neigung und die gleiche vertikale Sortierung nach Korngrößen auf. Im Gegensatz zu den ungeordneten Sedimentkörpern der Furkationzone ist die Flussaue der Mäanderzone von horizontal übereinanderliegenden, aber in sich schräg geschichteten Sedimentkörpern geprägt (SCHÄFER 1973a, S. 20). Aufgrund der starken Wasserstandsschwankungen des Rheins im Jahresverlauf variiert die Transportkraft des Flusses. Daraus resultieren Veränderungen in der Schräge der abgelagerten Schichten und der Korngrößenfolge. Zwar bleibt die Abfolge vom Gröberen zum Feineren immer bestehen, bei Hochwasser verschiebt sich die Sortierung aber aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeiten im Schnitt nach oben, bei Niedrigwasser wird sie gestaucht. So erklärt sich, dass sich in die kontinuierliche Schrägschichtung einheitlichen Korn Schichtpakete bald gröberen (=Hochwasser) und bald feineren (=Niedrigwasser) Korn einschleiben.

Die durch die skizzierte Korngrößensortierung entstehenden horizontalen Schichten mit kiesigen, wasserdurchlässigen Sedimenten spielen bei der weiter unten in dieser Arbeit diskutierten Druckwasserflächendynamik eine große Rolle, da die durchlässigen Sedimentpakete auch nach einer künstlichen oder natürlichen Verlegung des Flussbettes und der Verlandung der Altarme im Untergrund verbleiben und als Leitbahnen des während eines Hochwasserereignisses in den Untergrund einsickernden Uferfiltrats dienen. Entsprechend der starken Krümmung des einstigen Flussbettes verlaufen viele dieser Sedimentablagerungen in länglichen, manchmal fast senkrecht vom heutigen Rheingerinne wegführenden Linien, weshalb sich hochwasserbedingte Druckwellen rasch auch in die flussfernen Bereiche der Aue fortpflanzen können. Eine Abdeckung dieser Leitbahnen durch die spätere Ablagerung wasserundurchlässiger, schlickig-toniger Sedimente beeinträchtigen die Leitfähigkeit der Kiesschichten nicht, solange diese irgendwie in Verbindung mit dem Hochwasser stehen. Die Versiegelung der Leitbahnen führt lediglich dazu, dass sich die Ausbreitung der Druckwasserwelle unter gespannten Bedingungen ausbreitet. Wasseraustritte sind dann im Allgemeinen nicht am tiefsten Punkt von in der Nähe befindlichen Geländesenken, sondern an der geringmächtigsten Stelle der abdichtenden Tonpakete zu erwarten.

Die Mächtigkeit von durch fluviale Prozesse abgelagerten Sedimenten ist im flussnahen Bereich stets größer als im flussfernen: Tritt der Fluss über die Ufer, wird die Fließgeschwindigkeit des jenseits des eigentlichen Gerinnebettes fließenden Wassers durch zahlreiche Faktoren (Gefälleverminderung, erhöhte Reibung, Umlenkung der Fließrichtung, geringere Wassertiefe) rasch vermindert. In Folge der abgebremsten Fließgeschwindigkeit können größere, im Wasser mitgeführte Kornfraktionen nicht mehr weiter transportiert werden. Im Strömungsschatten kommt es besonders an den Prallufeln mit flussseitig steilem Anstieg und landseitig sanftem Abfall zur Akkumulation und Ausbildung von Uferdämmen. Uferwälle entstehen durch die Wanderbewegung der Mäander und der grobkörnigen Sedimentation an den Gleithängen, die parallel zur Prallhangerosion verläuft und auch bei relativ hohen Fließgeschwindigkeiten stattfindet (TITIZER, KREBS 1996, S.18). Im Untersuchungsgebiet bei Speyer lassen sich beispielhaft ausgebildete Uferwälle und Uferdämme in der Rheinhausener Weide / Rathswörth erkennen.

Die strömungsbedingte horizontale Korngrössensortierung vertikaler Ablagerungen ist aber nur einer der fluvialen, geomorphologischen Prozesse, welche zur Ausbildung von wasserleitenden Sedimentschichten in der Mäanderzone führen. Hält der Vorgang der Flussverlagerung durch Erosion und gleichzeitige Sedimentation lange genug an, schert der Mäanderbogen immer weiter seitwärts aus und krümmt sich asymmetrisch in Strömungsrichtung ein. Im Bogenscheitel der Mäanderkrümmung lagern sich im Bereich der größten Strömungsgeschwindigkeiten die größten Sedimente, wie z.B. Kiese, ab. In seinem Ingestions- und seinem Egestionsast entstehen aufgrund geringerer Fließgeschwindigkeiten sandige Ablagerungen (SCHÄFER 1973a, S.13 ff.). Diese häufig quer zum Talverlauf von den Seiten und von oben her mit Sanden eingefasste „Kiesdome“ sind im Zusammenhang mit der oberflächennahen Grundwasserbewegung von Bedeutung (siehe Abb. 15.). Sie wurden aber im Untersuchungsgebiet bereits größtenteils im Zuge der Kiesgewinnung ausgeräumt (z.B. Binsfeld).

Die Verlagerung des Rheingerinnes vollzog sich aber nicht immer nur in Form eines allmählichen Einschneidens in den Prallhang, sondern auch in Sprüngen. Es ist zu unterscheiden zwischen progressiven und regressiven Sprüngen (SCHÄFER 1973a, S. 24ff):

Ein *progressiver Sprung* führt zu einer Flusslaufverlängerung. Aufgrund plötzlich erhöhter Wassermassen und größerer Erosionsenergie springt der Strom aus seiner Bogenkrümmung heraus und sucht sich einen neuen, längeren Weg (siehe Abb. Abb. 16. oben). Im Oberrheintal war der Auslöser progressiver Sprünge oftmals Eisstauung. Das Dorf Rudolsheim wurde 1821 durch einen progressiven Sprung zerstört und aufgegeben. Auch die Ausweitung der Mäanderbögen im Untersuchungsgebiet (Rheinhäuser Weide, Angelwald, Koller) erfolgte wahrscheinlich in Form von progressiven Sprüngen.

Ein *regressiver Sprung* beendet das beständige Seitwärtswandern eines Mäanderbogens. Die Ausweitung des Bogens verlängert den Talweg und vermindert das Gefälle im Strombett solange, bis bei einem Hochwasser mit höherer Strömungsenergie der Fluss sein Bett verlässt und sich in Richtung des größeren Gefälles sein neues Bett gräbt. (Abb.16. unten). Ein Beispiel für einen regressiven Sprung findet sich Ende des 16. Jh. bei Altrip, als der Rhein bei einem Hochwasser seinen Lauf verkürzte.

Mit jedem progressiven oder regressiven Sprung entstehen stillgelegte Bogenteile des Mäanders - die Altrheine. Altrheinarme stehen noch eine gewisse Zeit als mäßig

durchflossene Arme mit dem Hauptstrom in Verbindung. Aufgrund der in den Armen nachlassenden Strömungsgeschwindigkeit stellen sie Sedimentationsräume innerhalb des Gerinnes dar. Die Mündungen des Altrheins in den Hauptstrom verschließen sich bereits lange vor der Verlandung des Bogens (siehe Abb. 17.). Der Sedimentverschluss der Ingestion liegt zeitlich immer vor dem Verschluss der Egestion. Deutlich ist dieser Vorgang im Untersuchungsgebiet an den bereits vollständig verlandeten Ingestionen des otterstädter Altrheins (Böllenwörth) und der Runkedebunk im Süden der Rheinhäuser Weide zu erkennen. Der Verschluss der Ingestion erfolgt hauptsächlich bei Hochwasser durch grobkörnige Sedimente wie Kiese und Sande, wogegen sich in der Egestion eher feinkörnige Sedimente wie Sande und Tone ablagern (siehe Abb. 17.4.). Nach dem endgültigen Verlanden von Ingestion und Egestion bleibt für lange Zeit ein beidseitig abgeschlossenes Stillwasser (Sichelsee) erhalten, das nur bei starkem Hochwasser oberflächlich mit frischem Wasser versorgt wird. Die weitere Verlandung erfolgt durch bei Hochwasser eingetragene Feinsedimente und durch eigene Niedermoorbildung, die häufig in ein Schilffeld übergeht.

Die Rheinauen unterlagen im Naturstromregime des Rheins aufgrund der oben geschilderten fluviodynamischen Prozesse einem allmählichen aber beständigen Wandel: Erosion durch den wandernden Strom, Sedimentation und Verlandung in vom Fluss wieder verlassenen Gerinneteilen bis zu einer - manchmal erst nach Jahrtausenden - erneut einsetzenden Erosion des Flusses in seine alten Ablagerungen ¹¹. Letztlich lässt sich die geomorphologische Wirkung des mäandrierenden Flusses mit gleichzeitiger, aber räumlich versetzter Erosion und Sedimentation als ein "Durchpflügen" der älteren Schichtpakete aus früheren Mäandersedimentationen beschreiben. Einst abgelagertes Sedimentationsgut wird flussabwärts weggeführt, von oben kommende Sedimente lagern sich anstelle der weggeführten ab. Die weiter unten in Abschnitt III.2. beschriebenen anthropogenen Eingriffe verhindern seit Mitte des 19. Jh. die natürlichen Erosions- und Akkumulationsprozesse im Fluss und führten zu schwerwiegenden Änderung der geoökologischen Dynamik in der Aue. Dennoch ist die Kenntnis der einst wirksamen geomorphologischen Prozesse bei einer Untersuchung der rezenten Inundationsdynamik unerlässlich, da das durch sie gebildete räumliche Muster von morphologischen Senken und Rinnen, von wasserleitenden und wasserhemmenden Sedimenten noch heute das Auftreten von Überschwemmungsflächen (insbesondere von Druckwasserflächen) und die Interaktion von Fluss und Grundwasser beeinflusst.

III.1.4. Interaktion von Fluss und Grundwasser

In den stark wasserdurchlässigen pleistozänen Ablagerungen der Oberrheinebene bewegt sich das Grundwasser weitgehend frei und bildet eines der größten Grundwasservorkommen Mitteleuropas (GALLUSSER, SCHENKER 1992, S.13). Die Hydrogeologie der Oberrheinebene ist - wie bereits geschildert - durch einen ausgeprägten Grundwasserstockwerksbau gekennzeichnet. Der größte Anteil des Grundwassers stammt aus dem unterirdischen Zustrom von den Randgebirgen mit hohen Niederschlagswerten (1000 -1200 mm). Maxima und Minima der Grundwasserstände treten in Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen in den

¹¹ Bis zu ihrer vollständigen Verlandung waren vom Hauptstrom abgetrennte Altrheinarme die am häufigsten überschwemmten Flächen der Rheinaue und bevorzugte Eiablageplätze von *Aedes vexans*.

Randgebirgen mit etwa einem halben bis ganzen Jahr Verzögerung auf (SCHÄFER 1978, S.14). Der Wasserstand der Rheinniederung wird unter natürlichen Bedingungen vom Rheinwasserstand geprägt. Er dient dem Grundwasser als Vorfluter, weshalb Wasserstandsänderungen im Fluss direkte Auswirkungen auf den durchlässigen Grundwasserkörper haben: steigende Rheinwasserstände stauen sogleich das in der Aue befindliche Grundwasser auf; tiefe Rheinwasserstände ziehen beträchtliche Grundwassermengen aus der Ebene und den Auen ab. Bevor mit der Rheinbegradigung die Tiefenerosion des Gerinnebettes einsetzte und ein Großteil der Aue durch Dämme vom Strom abgeschnitten wurde, war die Interaktion zwischen Flusswasser bzw. Uferfiltrat und dem Grundwasser erheblich größer als heute – wenn auch das genaue Ausmaß nicht mehr genauer quantifiziert werden kann. Heute macht sich der Grundwassereinfluss des Rheins lediglich bei großen Hochwasserereignissen bzw. in Dammnähe und in den Grundwasserleitbahnen verlandeter Altrheinarme bemerkbar.

Die Ausführungen in Abschnitt III.1.3. zeigten, das im Untersuchungsgebiet nicht von einem homogenen holozänen Grundwasserkörper, sondern von einem komplexen räumlichen Muster von wasserleitenden und wasserstauenden Sedimenten auszugehen ist. Überall, wo der Rhein zusammenhängende Kiespakete ablagerte, machen sich vom Rheinwasserstand induzierte hydraulische Änderungen rasch auch in den weiter vom Strom entfernten Teilen der Niederung bemerkbar. Die bedeutendsten Kiesablagerungen befinden sich in den Sedimentdömen entlang des ehemaligen Bogenscheitels der Mäander sowie in den Strombetten der durch regressive oder progressive Sprünge abgeschnittenen Mäander. Obwohl letztere durch Verlandungsprozesse allmählich von z.T. mehrere Meter mächtigen, wasserstauenden Auenlehmen bedeckt wurden, spielen sie nach wie vor als Leitbahnen bei der Druckwasserflächenentsehung eine wichtige Rolle (siehe auch SCHÄFER ,1973, S. 28 und MATTHESS, 1958, S.18). Gerade in derartig gespannte Grundwasserkörper werden Druckänderungen aufgrund von Wasserstandsänderungen des Flusses rasch weitergegeben und können zu oberflächlichen Druckwasseraustritten führen (MATTHESS, 1958, S.17). Während westlich des Hochgestades die Grundwasserhöhenlinien etwa parallel zum Rhein laufen, die Strömungsrichtung also senkrecht auf den Rhein zu gerichtet ist, wird der Verlauf der Grundwassergleichen dagegen vorrangig durch die verschiedenen alten Rheinläufe bestimmt (MATTHESS 1958. S.18). Auch nach der völligen Verlandung der abgeschnittenen Mäanderbögen läuft in den Kiesen des alten Flusslaufs ein beständiger Grundwasserstrom. Sie erfüllen in gewissem Umfang die Funktion eines Vorfluters (MATTHESS 1958, S.28).

Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung von Rhein und Grundwasser stehen also bei größeren, bzw. länger andauernden Hochwasserereignissen auch in größerer Entfernung vom Fluss zahlreiche Senken und tieferliegende Geländepartien der Rheinniederung unter Wasser. Im letzten Jahrhundert verwendete man den Ausdruck „Quellwasser“ für diese Flächen (RIEHL 1857, S.11); bei den Rheinanliegern und der KABS ist die Bezeichnung „Druckwasserflächen“ üblich, an der Elbe spricht man von „Qualmwasser“. Diese Senken werden nun nicht durch den ausufernden Fluss geflutet, sondern füllen sich durch aus dem Untergrund aufquellendes Wasser. Während einem bestimmten Pegelstand relativ einfach das Ausmaß der zugehörigen ufernahen, direkt überschwemmten Flächen über eine Bestimmung der Höhenlage der betroffenen Flächen zugeordnet werden kann, wird die Entstehung der Druckwasserflächen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst und ist nicht immer von der relativen Höhe der Senke zum Fluss abhängig. Obwohl die Existenz von Druckwasserflächen jedem Auenanwohner geläufig ist, haben sie in

der fachlichen Literatur wenig und bei der behördlichen Überschwemmungsflächen-Ausweisung bisher *keine* Beachtung gefunden¹². Dies ist umso erstaunlicher, da sie in durch Dämme vermeintlich vor Wasser geschützten und entsprechend intensiv genutzten Flächen auftreten und erhebliche Schäden anrichten. Einer der wesentlichen Gründe für die mangelnde Beachtung dieses Phänomens dürfte in ihrem schwer prognostizierbaren und seltenen Auftreten zu sehen sein. Ob und wo Druckwasser austritt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Zu nennen wären:

- ?? Wasserstandshöhe und Andauer des Hochwassers
- ?? Höhe des dem Hochwasserereignis vorausgehenden Grundwasserstandes, bzw. Ausmaß der Wassersättigung des Bodens
- ?? Ausmaß des Grundwasserzustroms von der Rheintalniederterrasse bzw. der Rheinniederung zum Rhein hin; genaue Fließrichtung der Grundwasserströme
- ?? Wasserleitfähigkeit des Untergrunds (z.B. Vorkommen von undurchlässigen Auelehmen oder durchlässigen Kiesbahnen)

Die Frage, ob und wann bei einem Hochwasserereignis Druckwasserflächen auftreten, ist für eine praxistaugliche Prognose von Inundationsflächen von entscheidender Bedeutung: Druckwasserflächen waren 1999 im Hochwassergebiet fast ausschließlich für die Onsiteschäden an Gebäuden, Wegen und landwirtschaftlichen Nutzflächen verantwortlich. Die Schäden entstanden auf Flächen, die scheinbar vor Hochwasser durch Dämme geschützt waren und deshalb in den letzten Jahrzehnten in zunehmendem Maße eine Nutzungsintensivierung erfuhren (z.B. mehrere Gewerbegebiete in Speyer). Eine Identifizierung von Druckwasserflächen ist ferner für die biologische Stechmückenbekämpfung bedeutsam, da diese ideale Brutbedingungen für Stechmücken bieten¹³. Auf das Vorhandensein der wechselseitigen Beeinflussungen von Grundwasser und Rhein wird in der Literatur oftmals hingewiesen, eine systematische und quantitative Bearbeitung dieses Themas ist bisher jedoch für den Oberrhein noch nicht erfolgt.

Aus diesem Grund kam der Beobachtung von Druckwasserflächen bei der Datenaufnahme im Gelände ein besonderes Augenmerk zu. Erste Hinweise auf das Ausmaß des Einflusses des Rheinwasserstandes auf den Grundwasserstand im Untersuchungsgebiet geben die Arbeiten von MATTHESS anhand von Grundwasserstandsmessungen auf der Ludwigshafener Parkinsel (MATTHESS 1958, S.14f). Die Ergebnisse dürften sich in etwa auch auf die Grundwassersituation

¹² Mittlerweile haben die seit 1999 aufgetretenen großen Hochwasserereignisse am Oberrhein, an Oder und nun an der Elbe zu einer Wahrnehmung des Problems geführt. Zu Beginn der Promotionsarbeiten Anfang 1999 spielten Druckwasserflächen bei der behördlichen Raumplanung noch keine Rolle.

¹³ Natürliche Fressfeinde der Stechmückenlarven wie z.B. Fische kommen dort nicht vor und das Wasser erreicht selten Tiefen von mehr als einem Meter, weshalb das zunächst kalte Wasser sich in den Sommermonaten leicht erwärmt. Vor allem aber reagiert der Wasserstand der Druckwasserflächen nur verzögert und allmählich auf die Abflussänderungen des Rheins: Die Brutstätten an den Ufern des Flusses werden rasch überschwemmt und fallen aber fast ebenso schnell wieder trocken. In den Druckwasserflächen hinter den Winterdeichen haben die Stechmückenlarven zumeist eine größere Chance, ihre Entwicklung zum Fluginsekt vor dem Trockenfallen der Brutstätte zu beenden, da hier ein einmal erreichter Wasserstand auch bei einem schnellen Abfall der Rheinwasserstände nur verzögert absinkt. Aufgrund ihrer unregelmäßigen bzw. schwer vorhersehbaren Entstehung stellen Druckwasserflächen die für die biologische Stechmückenbekämpfung am aufwendigsten zu handhabenden Flächen dar. Häufige Kontrollfahrten von Mitarbeitern zu diesen Flächen sind notwendig, um den Zeitpunkt des Grundwasseraufquellens und des Schlüpfens der Stechmücken nicht zu verpassen.

im Untersuchungsgebiet übertragen lassen: In der Nähe des Rheinufer (bis 30 m Entfernung) zeigen die Grundwasserspiegelschwankungen eine direkte Abhängigkeit vom Rhein, wobei ihre Amplituden nicht oder nur wenig geringer sind als die des Rheines. In 30 bis 205 m zeigten die Messungen ein tägliches Mitgehen, die entfernteren Punkte folgten in ihren Maxima und Minima dem Rhein mit einem Tag Verzögerung nach (siehe Abb. 18.).

Die Druckwasserproblematik ist ein zentrales Thema dieser Arbeit und wird weiter unten, bei der Diskussion der empirischen Ergebnisse noch eingehend behandelt, weshalb dieses Thema hier nicht weiter vertieft werden soll.

Als weitere Einflüsse auf den Wasserstand der Oberen Grundwasserleiter sind neben der Tiefenerosion durch die Rheinbegradigung die begleitenden Meliorationsmaßnahmen und die Trink- und Brauchwasserentnahme zu nennen:

In den ausgedeichten Flächen sorgten die *Meliorationsmaßnahmen* für einen weiteren Abfall des Grundwasserstandes. Zahlreiche Entwässerungsgräben von mit Schleusen versehenen Auslasswerken führten austretendes Grundwasser rasch in den Rhein ab. Die Rheinhäuser Weide auf Speyrer Gemarkung wurde im letzten Jahrhundert sogar mit dampfbetriebenen Pumpen entwässert. Angaben über das genaue Ausmaß der Grundwasserabsenkung durch diese Maßnahmen liegen nicht vor.

Einen ebenso starken Eingriff in das Gefüge des Grundwassers stellen die *Trink- und Brauchwasserentnahmen* des 20. Jh. dar. Das Grundwasser der nördlichen Ober-rheinebene deckt den immensen Bedarf der öffentlichen Wasserversorgung der Rhein-Neckar-Region fast vollständig. Die seit dem Anbeginn der regelmäßigen Grundwassermessungen beständig sinkenden Wasserstände führten seit den 1970er Jahren zu intensiven Untersuchungen und Bilanzierungen der Grundwasservorräte in der Rheinebene. Die Grundwasserentnahme in der Vorderpfalz (zwischen Speyer und Worms) belief sich 1965 auf etwa 63,5 Mio. m³, stieg bis 1976 auf 81,2 Mio. m³ an und sank bis 1983 wieder auf 65,8 Mio. m³ (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG, (1987), S.43). Der größte Teil des Wassers wurde aus den tieferen Grundwasserleitern gefördert. Dennoch umfassten die Wasserentnahme aus dem oberflächennahen Grundwasser 1983 etwa 14 Mio. m³. Im Zeitraum 1973/1983 bewirkten die Entnahmen im Bereich Schifferstadt-Waldsee-Neuhofen eine Absenkung des Wasserstands des Oberen Grundwasserleiters von etwa 25 cm (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG, (1987), S.90). Die Verlagerung der Entnahmen vom oberflächennahen Grundwasser auf tieferes Grundwasser im Wasserwerk Waldsee wird, sofern sich der Obere Grundwasserleiter wieder regeneriert, langfristig wieder einen leichten Anstieg des Grundwasserstandes und eine leichte Zunahme der Druckwasserflächen zur Folge haben. Bei Speyer dürfte gegenüber den 60er und 70er Jahren infolge der Rücknahme der Grundwasserförderung des Wasserwerks Speyer sowie der Stilllegung der Erdölraffinerie Speyer und der damit verbundenen Einstellung der Förderung des Betriebswassers ein Anstieg des Grundwasserspiegels und folglich auch eine leichte Zunahme der Druckwasserflächen eingetreten sein (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1987), S.90).

III.1.5. Abflussregime des Rheins

Das Abflussverhalten des Rheins im Oberrheingebiet ist von seinem alpinen Einzugsgebiet bestimmt. Hochrhein und südlicher Oberrhein verfügen über ein

glaziales Abflussregime Abbildung mit einer hohen mittleren Wasserführung in den Monaten Mai bis August. Verantwortlich für die hohen sommerlichen Wasserstände ist die Schneeschmelze in über 1800 m in den Alpen. Die Alpenrandseen üben einen dämpfenden Einfluss auf die Abflussschwankungen aus. Der Einfluss der randlichen Mittelgebirge (Vogesen und Schwarzwald) ist relativ bescheiden. Die Seitenzuflüsse aus den Vogesen (Ill, Moder, Sauer) und dem Schwarzwald (Wiese, Dreisam, Murg, Kinzig) haben bei Hochwasser allerdings zusammengenommen einen nachweisbaren Einfluss auf die Wasserführung des Rheins (GALLUSSER, SCHENKER 1992, S.11). Ab Mannheim wird der Einfluss des Neckars deutlich; das Abflussregime des Rheins weist im Untersuchungsgebiet deutlich nivo-glaziale Züge auf.

Trotz eines insgesamt ausgeglichenen Abflusses verfügt der Rhein für einen Fluss dieser Größe über erstaunlich große Schwankungen. Seit 1921 ergaben sich am Pegel Maxau folgende Abflusswerte:

niedrigster gemessener Wert:	340 m ³ /s
höchster (amtlich) gemessener Wert:	4540 m ³ /s
mittlerer täglicher Abfluss:	1252 m ³ /s

Das ergibt ein Abflussverhältnis von ca. 1:4:13.

Für die Abflussverhältnisse im eigentlichen Untersuchungsgebietes ist eine Betrachtung der Pegel Maxau und Speyer von Interesse – der Pegel Speyer, weil er inmitten des Untersuchungsgebietes liegt und der Pegel Maxau, weil er außerhalb des Rückstaubereichs des Neckars lokalisiert ist und eine bis in das Jahr 1889 zurückreichende Messreihe aufweist.

In Abb. 19. sind die Wasserstandsganglinie der Pegel Maxau und Speyer, berechnet aus den mittleren täglichen Wasserständen des Zeitraums 1948/1997, dargestellt. Das glaziale Abflussregime des Rheins im Untersuchungsgebiet ist wiederum an den hohen durchschnittlichen Tageswasserständen in Juni und Juli und den Niedrigwasserständen im Winter ablesbar. Die täglichen Durchschnittswerte von Abfluss und Wasserstand geben aber noch keine Hinweise auf die jahreszeitliche Verteilung der hohen und extremen Wasserstände. In Abb. 20. ist für jeden Kalendertag aufgeschlüsselt, wie oft seit 1889 der Pegelstand von 7m, - das entspricht einem Wasserspiegelanstieg von mehr als 2m ü. MW 1948/97 -, erreicht wurde. Es wird deutlich, dass hohe Wasserstände nicht nur auf die generell abflussreichen Sommermonate beschränkt sind: Hohe Wasserstände mit mehr als 2m ü. MW 1948/97 traten in den letzten hundert Jahren gehäuft Ende November bis Anfang Januar, Mitte Februar bis Mitte März sowie von Mitte Mai bis Mitte Juli auf. Eine häufige Ursache für die Hochwasserereignisse in Februar und März sind westliche Tiefausläufer, welche in einer Verbindung von Niederschlägen im Einzugsgebiet mit einem Abschmelzen des Schnees in den Randgebirgen und den niederen Lagen der Alpen extreme Abflüsse bedingen. Die sommerlichen Spitzenhochwasser entstehen durch die Überlagerung der durchschnittlich hohen Wasserführung des Rheins mit ausgiebigen Niederschlägen im weiteren Einzugsgebiet (GALLUSSER, SCHENKER 1992, S.12). Die Dezemberhochwasser, auch „Advents-Hochwasser“ genannt (SCHÄFER 1978, S.11), entstehen oft durch die Kombination von Niederschlägen mit mehrmaliger Schneeschmelze in den niederen Höhenlagen aufgrund von Warmlufteinbrüchen der „Weihnachts-Westwetterlage“.

Langanhaltender, ergiebiger und verbreiteter Regen im Einzugsgebiet stellt am Rhein die wesentliche meteorologische Voraussetzung für Hochwasser dar. Solche Ereignisse können durch die Erhöhung des Abflusses von Regenwasser auf gefrorenem oder wassergesättigtem Boden oder durch entsprechenden Vorregen noch verstärkt werden. Eine plötzlich eintretende, umfassende Schneeschmelze durch Regenfälle, hohe Temperaturen und starken Wind kann die Gefahrensituation erhöhen (SCHÖNWIESE 1997, S.3). Ein gutes Beispiel hierfür sind die Witterungsverhältnisse, welche das verheerende Hochwasser von 1882/83 auslösten.

Durch die Dokumentation der Ereignisse im „Jahresbericht des Centralbureaus für Meteorologie und Hydrographie im Grossherzogtum Baden“ handelt es sich um eines der am besten überlieferten historischen Hochwasserereignisse am Oberrhein (CENTRALBUREAU FÜR METEOROLOGIE DES GROSSHERZOGTUMS BADEN 1883, S.61-64):

Ende November ließen starke Regenfälle in Verbindung mit dem Abschmelzen des in den vorangegangenen Tagen gefallenen Schnees den Rhein anschwellen. Der Mittelrhein am Zufluss von Main, Nahe, Lahn und Mosel wurde besonders betroffen. In Maxau wurde als Maximalwasserstand 710 cm erreicht (CENTRALBUREAU FÜR METEOROLOGIE DES GROSSHERZOGTUMS BADEN 1883, Beilagen 3a, S.69). Nach dem Absinken der Wasserstände trat eine Frostperiode ein, so dass der wassergesättigte Boden, wo er noch nicht mit Schnee überdeckt war, gefror. Ab dem 21. Dezember fielen außergewöhnlich starke Niederschläge mit einem Niederschlagsmaximum am 26/27 Dezember. Das Maximum der Niederschläge lag im Schweizer Jura, im Alpenvorland und im Schwarzwald. In drei Tagen fielen beispielsweise in Höchenschwand im Schwarzwald 213 mm. Zugleich trat bei stürmischen südwestlichen Winden eine rasche Erwärmung ein. In Karlsruhe stieg das Thermometer auf 11°C an. Zu den Niederschlägen kam infolgedessen ein schnelles Abschmelzen großer Schneemassen bei größtenteils gefrorenem und mit Wasser gesättigtem Boden. Während der Bodensee kaum anstieg, erreichte den Rhein über die Aare eine beträchtliche Hochwasserwelle, die durch die Gewässer des Schwarzwaldes und der Vogesen noch verstärkt wurde. Am Pegel Maxau erreichte der Abfluss seinen größten bisher gemessenen Wert von 4610 m³/s; der Wasserstand erreichte 825 cm.

Während in den Massenmedien und der Öffentlichkeit vor allem Extremwasserstände mit oftmals katastrophalen Sach- und Personenschäden wahrgenommen werden, sind für ökologische Untersuchungen, die biologische Stechmückenbekämpfung oder Belange der Renaturierung und Landschaftspflege in Flußauen vor allem die kleineren Inundationsereignisse mit weit höherer Eintrittswahrscheinlichkeit von Interesse.

Da aber die auenökologisch interessanten Flächen (sowie die Mehrzahl der *Aedes vexans* Brutstätten, die bei 1,7 m bis 1,8 m ü.MW. liegen) nicht in den Überschwemmungsflächen der Extremhochwasser mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von über 100 Jahren sondern im Bereich der jährlich oder mehrmals im Jahr eintretenden Hochwasser liegen, ist auch eine Betrachtung der Entwicklung der Wasserstände zwischen 0,5 und 3m ü. MW. notwendig.

In Abb. 21. ist für den Pegel Maxau für jedes Jahr seit 1889 die Anzahl der Tage aufgeführt, an denen ein Tageswasserstand von 725cm überschritten wurde. Der Pegelstand von 725cm entspricht einer Erhöhung des Wasserspiegels über dem Mittelwasserstand 1948/97 von rund 250 cm (zum Vergleich: Das

Jahrhunderthochwasser 1882/83 erreichte am Pegel Maxau einen Wasserstand von 825cm). Die Abbildung macht deutlich, dass derartige Wasserstände bis in die 1940er Jahre hinein ein seltenes Ereignis darstellten. Seit den 1950er Jahren sind Wasserstände über 725cm bereits etwas häufiger zu verzeichnen und mit dem Jahr 1977 kehrt sich das Bild geradezu um. Waren Wasserstände von mehr als 2,50m ü. MW 1948/97 zuvor ein seltenes Ereignis mit einer Jährlichkeit von mehr als 3 Jahren, so werden sie nach 1977 zu einem fast jährlich wiederkehrenden Ereignis.

Die Frage nach der Ursache für die soeben dargelegte, statistisch eindeutig nachweisbare Zunahme erhöhter Wasserstände ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, muss aber hier aufgrund Ihrer Bedeutung für die künftige Inundationsflächenentwicklung kurz gestreift werden. Interessanterweise zeigt die bis 1889 zurückreichende Messreihe am Pegel Maxau, dass die Hochwasserereignisse mit den höchsten Abflüssen keineswegs diejenigen mit den höchsten Wasserständen waren. Ein Blick auf Tab. 4., in der die größten Hochwasserereignisse seit Beginn der Messungen in Maxau aufgetragen sind, zeigt, dass bei den Hochwasserereignissen der letzten Jahrzehnte bei etwa gleich großen gemessenen Abflüssen die Wasserstände deutlich höher waren. So lag der maximale Wasserstand des Hochwassers vom Dezember/Januar 1882/83 um 50cm unter dem des Hochwasserereignisses vom Mai 1999– und das, obwohl 1882/83 der Abfluss um ca. 70m³/s höher war als 1999! Dies belegt anschaulich, dass die Veränderungen des Rheingerinnes zumindest zum Teil für die Entwicklung mitverantwortlich sind. Am wahrscheinlichsten ist deshalb eine Kombination von sowohl klimatischen Veränderungen (statistisch nachweisbare Zunahme der Starkniederschläge im Einzugsgebiet; s.u.) als auch anthropogen bedingten Verluste der natürlichen Überschwemmungsflächen (die Staustufe Iffezheim wurde 1977 in Betrieb genommen; s.u.).

III.1.6. Einfluss des Klimas die Hochwasserdynamik im Untersuchungsgebiet

Sind die Ursache der Hochwasserhäufung klimatische Änderungen im Einzugsgebiet des Flusses? Haben sich die Niederschlagsmengen bzw. ihre räumliche oder jahreszeitliche Verteilung im Einzugsgebiet verändert und korrelieren diese Veränderungen mit der Hochwasserdynamik?

Mit den im Rheingebiet vorherrschenden westlichen Winden überqueren atlantische feuchte Luftmassen aus Südwesten bis Norden Mitteleuropa. Ihre Ausläufer beeinflussen das südliche Rheingebiet zwar nur schwach, beim Auftreten von Westwetterlagen fallen im Winter jedoch überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Besonders bei Luftströmungen aus Südwesten treten vor allem am Oberrhein infolge der staubedingten Niederschläge Hochwasserereignisse auf. In den Alpen ergeben sich dann in den höheren Lagen dauerhafte Schneedecken oder starke Regenereignisse (ENGEL 1997, S.12). Als Beispiel hierzu sei auf die weiter unten näher beschriebenen Starkniederschläge im Einzugsgebiet der Aare verwiesen, welche das Pfingsthochwasser 1999 verursachten. Die Entwicklung der historischen Witterungsverhältnisse und deren Einfluss auf die Entstehung von Extremabflüssen des Rheins hat KRAHE untersucht (KRAHE 1997, S. 57ff). Die Arbeit bezieht sich allerdings überwiegend auf die Hochwassersituation am Mittel-

und Niederrhein. Sie vermittelt aber dennoch einen Eindruck vom Klimawandel im Einzugsgebiet des Oberrheins:

KRAHES Auswertung der historischen Klimaschwankungen und der Hochwasserentwicklung zeigt, dass stärkere Sommerhochwasser am Mittel- und Niederrhein seit den letzten Jahrzehnten des 16. Jh. kaum noch eine Rolle spielen. In den Jahrhunderten davor scheinen sie öfter aufgetreten zu sein und führten mitunter zu erheblichen Schäden. Die Witterung der hydrologischen Winterhalbjahre weist im Rheingebiet eine große natürliche Variabilität auf. Einzelne extreme Winter (z.B. streng und trocken, kalt und schneereich, mild und niederschlagsreich) können gehäuft sowohl von Jahr zu Jahr variieren, als auch von Jahrzehnt zu Jahrzehnt. Dennoch lassen sich für die jüngere Geschichte drei Zeitabschnitte nachweisen, in denen ein bestimmter Witterungstyp dominierte (KRAHE 1997, S.80f):

a) Mittelalterliches Klimaoptimum: Zur Zeit des mittelalterlichen Klimaoptimums gab es mehrere Perioden, in denen warme und niederschlagsreiche Winter vorherrschten. Die Winter scheinen gegenüber den heutigen wärmer, die Niederschläge dagegen geringer ausgefallen zu sein. Extreme Hochwasser traten in diesen Wintern seltener auf.

b) Kleine Eiszeit: Für die kleine Eiszeit sind Gruppen außerordentlicher Strengwinter nachgewiesen. In diesen dominierten die Eishochwasser, deren Hauptursache aber nur teilweise in extremen Niederschlägen zu suchen sind. Es häuften sich kalte und schneereiche Winter, die zu Zeiten der Schneeschmelze zu extremen Hochwassern führten.

c) 20. Jahrhundert: Die letzten 100 Jahre sind durch die außergewöhnlich große Anzahl warmer und niederschlagsreicher Winter geprägt, was die große Hochwasserhäufung dieses Jahrhunderts mit erklären könnte.

Hinsichtlich der für Mitteleuropa im Verlauf der letzten 100 Jahre festgestellten Zunahme der mittleren Jahrestemperaturen (0,6-0,7°C) weist ENGEL bei seiner Ursachenanalyse der Rheinhochwasser einen Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung, Niederschlagserhöhung bzw. -umverteilung und Zunahme des Rheinabflusses hin (ENGEL 1997, S.16f): Die niedrigsten (NQ) und höchsten (HQ) Abflüsse verschiedener Rheinpegel zeigen seit 1891 ansteigende Tendenzen. Allerdings verläuft die Entwicklung alternierend, gelegentlich durch mehrere Phasen des Rückgangs unterbrochen. Die Entwicklung der Jahresniederschlagssummen für das Rheingebiet und die der Abflüsse weist deutliche Parallelen auf; das heißt: neben gleicher Gesamttendenz lassen sich auch gleiche Einzelphasen abgrenzen.

Im Auftrag der LfU wurden unter der Leitung von SCHÖNWIESE die langfristigen Veränderungen des Niederschlags in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1891 bis 1994 untersucht. Auch hier kam man zu den gleichen Ergebnissen (siehe SCHÖNWIESE 1997): Für das Sommerhalbjahr konnten keine nennenswerten Veränderungen des Niederschlags festgestellt werden. Die Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr hat dagegen in den letzten 100 Jahren deutlich zugenommen; im Mittelgebirge um maximal 100 bis 200mm. Auch die Jahresniederschlagsmenge erhöhte sich signifikant. Insgesamt ist ein Trend zu Extremereignissen feststellbar: In den letzten 60 Jahren hat die Häufigkeit der winterlichen Starkniederschläge in fast ganz Baden-Württemberg signifikant zugenommen (SCHÖNWIESE 1997, S.1ff).

Es ist nach diesen Untersuchungen also davon auszugehen, *dass in den letzten 100 Jahren die Niederschlagsmengen im Winter angestiegen und im Sommer eher gleichgeblieben sind.* Eine tiefergehende Betrachtung der historischen,

niederschlagsbedingten Abflussänderungen des Oberrheins und mögliche zukünftige Veränderungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen¹⁴.

Da auch lokale Niederschläge hochwasserunabhängig einen, wenn auch geringen, Einfluss auf die Grundwasserspeisung und die Entstehung von Überschwemmungsflächen haben können, sei im folgenden noch ein kurzer Blick auf die Niederschlagsverhältnisse im Untersuchungsgebiet selbst geworfen:

Das Klima der Vorderpfalz ist geprägt durch milde Temperaturen und den Regenschatten der westlichen Gebirge (Haardt, Pfälzerwald). Der Einfluss von autochthonen Niederschlägen und oberflächlicher Abflüsse auf den Wasserstand des Rheins ist *vernachlässigbar*. Die höchsten Niederschlagswerte werden im Sommerhalbjahr (Höchstwert August) oftmals in Form von heftigen Konvektionsniederschlägen erreicht. Den größten Anteil an der Grundwasserneubildung haben die Niederschläge in den benachbarten Randgebirgen. Die Niederschläge im Lee des Pfälzerwaldes liegen im langjährigen Mittel (1960/83) unter 550 mm, während westlich in Haardt und Pfälzerwald zwischen 700 mm und 900 mm gemessen werden (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG 1987, S.34). Nach Osten steigen die Niederschlagssummen auf 650 mm, in der Luvlage des Odenwaldes auf über 800 mm an. Neben der Höhe des Niederschlags ist vor allem die Intensität und die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge maßgeblich für die Größenordnung der Grundwasserneubildung. In der Regel sind die im Winterhalbjahr fallenden Niederschläge maßgebend. Außerhalb der Vegetationsperiode kann bei geringer Evapotranspiration ein hoher Prozentsatz des Niederschlags in den Untergrund einsickern. Die geringen und ungünstig verteilten Niederschläge der Vorderpfalz (Niederschlagsmaximum im Sommerhalbjahr) sind kaum in Form von oberflächlichem Abfluss und Grundwasserbildung wirksam. Vielmehr geben die in den Gebirgen entspringenden Bäche der Vorderpfalz noch Wasser an den Oberen Grundwasserleiter ab, bevor sie in den Rhein münden. Nach LEHR beträgt der Wasserverlust des Speyerbachs zwischen seinem Eintritt in die Rheinebene und der Mündung in den Rhein in Speyer etwa 17% (LEHR in MATTHESS 1958, S.13). Wichtigster Grundwasserspeiser der Rheinebene sind deshalb die Grundwasserzuflüsse von den Randgebirgen. Länger anhaltende Trockenheits- bzw. Niederschlagsperioden beeinflussen den Grundwasserstand in der Rheinebene erst mit einer Verzögerung von etwa einem halben bis ganzen Jahr (SCHÄFER 1978, S.14a).

¹⁴ Es sei hier auf die Arbeiten von WILDENHAHN (1986); KRAHE; LIEBSCHER und WITTE (1988); BARDOSSY und CASPARY (1990) und (1995), WEIGL (1996); SCHÖNWIESE (1997) sowie BRONSTERT (1996) und (1997) verwiesen

III.2. Anthropogene Veränderungen

Aufgabe dieses Abschnittes ist es, die anthropogenen Eingriffe und ihre Folgen für die Inundationsflächendynamik im Untersuchungsgebiet darzustellen. Die schwerwiegendsten Folgen bestanden und bestehen in direkten Eingriffen wie z.B. die künstliche Verlegung des Gerinnes, der Unterbindung fluvialer Erosions- und Sedimentationsprozesse durch Uferbefestigungen und Ausbaggerung des Flussbettes, den Bau von Staustufen, die großflächige und tiefreichende Kiesentnahme, die Errichtung von Dämmen und der Verbauung der Altaue mit Gewerbe-, Industrie-, Freizeit und Siedlungsflächen, der Errichtung von Entwässerungsgräben sowie der Entnahme von Grundwasser. Ferner wären noch großflächige Veränderungen im Einzugsgebiet des Flusses zu nennen, welche Einfluss auf den oberflächlichen Abfluss von Niederschlägen haben wie z.B. Veränderungen der Vegetationszusammensetzung durch die land- und forstwirtschaftliche Nutzung oder Oberflächenversiegelung.

In chronologischer Folge wird im folgenden die Geschichte der anthropogenen Eingriffe und ihre Auswirkungen unter den Aspekten für die Forschungsfrage relevantesten Aspekten (Intensivierung der Landnutzung, wasserbauliche Maßnahmen und Besiedlung der Aue) für das Untersuchungsgebiet zusammengefasst:

Anthropogen bedingte Veränderungen der Hydrogeographie des Rheins lassen sich - zunächst vor allem durch Veränderung der Vegetationsbedeckung im Einzugsgebiet (z.B. durch Waldrodung) beschränkt - bis in die Jungsteinzeit nachweisen. Untersuchungen der Auesedimente ergaben mit der Entwicklung der Agrarlandschaft korrelierende Phasen verstärkter Sedimentation. Archäologische Funde, welche auf eine ackerbauliche Nutzung der Aue selbst schließen lassen, sind auf ca. 4000 v.Chr. datiert (MUSALL 1969 S.39).

Aus der Steinzeit sind Siedlungen in den Wäldern der Aue und vor allem auf dem Hochgestade bekannt; für den nördlichen Oberrhein sind Pfahlbauten und Grabhügel aus der Hallstattzeit (800-400 v.Chr.) nachgewiesen (TITTIZER, KREBS 1996, S. 23). Keltische Besiedlungsspuren finden sich aber auch in der Aue selbst wie z.B. die Huttenheimer Grabhügel belegen. Trotz dieser frühen Hinweise auf Ackerbau und Besiedlung im Auebereich ist davon auszugehen, dass die Aue sich weitestgehend noch im Naturzustand befand bzw. extensiv genutzt wurde: Die Rheinniederung war aufgrund ihrer häufigen Überschwemmung und Durchnässung für den Ackerbau kaum geeignet, wenn auch die fruchtbaren Böden Ackerbauern immer wieder anzogen. Die vorherrschende Art der Landnutzungen wie Waldweide, Jagd bzw. Fischfang sowie Holzentnahme aus den Auwäldern dürften bis zu Beginn des Mittelalters ohne nennenswerte Auswirkungen auf das natürliche Gerinnebett des Rheins geblieben sein.

Mit der Eisenzeit und vor allem seit dem Eindringen der Römer lässt sich dagegen eine verstärkte Auelehmbildung in der Rheinniederung nachweisen, die auf eine Rodung der Wälder im oberen Einzugsgebiet bzw. verstärkte Bodenerosion hindeutet. Pollenanalysen zufolge war in weiten Teilen des römischen Germaniens der Anteil des Kulturlandes ähnlich hoch wie heute (TITTIZER, KREBS 1996, S. 24.). Um etwa 100 v.Chr. erreichten die Römer den Bereich des Untersuchungsgebietes und begannen mit der Gründung von Militärlagern, aus denen oftmals blühende Städte und Siedlungen hervorgingen (z.B. Civitas Nemetum / Spira / Speyer; Alta Ripa / Altrip) und den für die römische Besiedlungspolitik so typischen Einzelhöfe (Villa Rustika). Der Rhein hatte als Schiffahrtsweg eine wichtige Verkehrsfunktion

inne, stellte durch die Hochwassergefahr aber auch eine Bedrohung der flussnahen Siedlungsstandorte dar. So verwundert es nicht, dass sich die römischen Siedlungen fast ausschließlich am Rande des Hochgestades befanden. Besonders günstig waren Standortsituationen wie in Speyer, wo das Hochgestade nur wenige Hundert Meter vom Hauptstrom entfernt lag. Der vermutlich erste Versuch einer künstlichen Laufverlegung des Rheins – die heute als „Oder“ bezeichnete längliche, isolierte Wasserrinne nordöstlich von Speyer - wird ebenfalls den Römern zugeschrieben. Mit dem Untergang des römischen Reiches verringerte sich die Einwohnerzahl zahlreicher Siedlungen. Siedlungskontinuität ist nur für die größeren Siedlungen nachweisbar und vor allem im ländlichen Raum wurden zahlreiche Einzelhöfe aufgegeben, die landwirtschaftliche Nutzfläche verringert oder zumindest extensiviert. Sollten römische Gutshöfe oder Wirtschaftsgebäude in der Rheinniederung des Untersuchungsgebietes bestanden haben (archäologisch sind bisher meines Wissens keine nachgewiesen worden), so ist davon auszugehen, dass sie in dieser Phase des kulturellen und ökonomischen Niedergangs aufgegeben wurden.

Die fränkisch-allemanische Landnahme stellte die nächste große Siedlungsgründungsphase im Untersuchungsgebiet und den Ursprung der meisten dörflichen Siedlungen auf der angrenzenden Niederterrasse dar. Die –heim Endungen zahlreicher Ortsnamen vor allem im rechtsrheinischen Bereich weisen auf ihren Ursprung hin (z.B. Hockenheim, Altlußheim, Oftersheim). Ihr frühes Bestehen ist wird oft durch den Lorscher Kodex aus dem 8./9. Jahrhundert belegt. Auch die Aue selbst wurde in dieser Phase zum Siedlungsraum und wurde verstärkt landwirtschaftlich genutzt (MUSALL 1969, S.43) Mit Beginn der Karolingischen Rodungspolitik und dem hochmittelalterlichen Bevölkerungswachstums wurden von 800-1200 n.Chr. die oberrheinischen Hartholzauewälder gerodet. Die Folge der Rodungen war eine Erosion, die wiederum eine verstärkte Bildung von Auelehmdecken und Uferwällen nach sich zog. Die Wald-Feld-Flächenverteilung hatte sich vom 7. Jh. mit $\frac{3}{4}$ Wald zu $\frac{1}{4}$ Feld bis ins 13. Jh. in ein Verhältnis von $\frac{1}{4}$ Wald zu $\frac{3}{4}$ Feld umgekehrt (TITTIZER, KREBS 1996, S. 24.).

Zwischen 1300 und 1770 machte sich die feucht-kühle Klimaperiode der sogenannten kleinen Eiszeit mit erhöhten Niederschlagsmengen und intensiven Laufveränderungen am Oberrhein bemerkbar. MUSALL spricht von zwei auffälligen Perioden starker Laufveränderungen: Die erste beginnt nach der Mitte des 16. Jh. und läuft nach einem Höhepunkt um die Jahrhundertwende Mitte des 17. Jh. aus; die zweite Periode beginnt in der ersten Hälfte des 18. Jh. und reicht bis zur Tullaschen Korrektur (MUSALL 1982, S. 26f). Die Rheinniederung erfuhr trotz der Hochwassergefahren in der mittelalterlichen Ausbauphase eine weitere Besiedelung, vor allem durch Einzelhöfe. Doch im Spätmittelalter ist erstmals wieder ein deutlicher Siedlungsrückgang zu konstatieren. Die zumeist älteren Siedlungen auf den Hochgestaden konnten sich halten; zahlreiche jüngere Siedlungen in der Aue wurden dagegen zerstört oder aufgegeben. Seit dem 14. Jh. sind erstmals künstliche Laufveränderungen des Flusses in Form von Durchstichen für den Oberrhein nachweisbar: Liedolsheim 1391, Germersheim 1396, Neuportz 1515, Jockgrim 1541, Kembs 1560, Daxlanden 1625 und Dettenheim 1762 (MUSALL 1982, S. 22 und 25ff). Es bleibt aber anzumerken, dass diese Schlingendurchstiche keinen Bestand gegen die natürliche Flussdynamik hatten und der Einfluss des Menschen auf die Abflussdynamik des Rheins eher indirekt aus einer Veränderung der Vegetationszusammensetzung und Rodungen im Einzugsgebiet resultierte.

Trotz dieser langen Geschichte menschlicher Siedlung und Nutzung sei nochmals betont, dass die Rheinaue um 1600 noch wenig landwirtschaftlich genutzt wurde –

Wälder und Grünland dominierten das Erscheinungsbild der Aue. Ackerbau erfolgte in der Rheinniederung wahrscheinlich lediglich in geringem Ausmaß auf durch Ringdämme vor Hochwasser geschützten Dammfeldern bzw. auf den wenigen erhöhten und weitestgehend druckwassersicheren Standorten. Waren diese Ackerflächen auch klein und die Dammerrichtung vergleichsweise aufwendig, so lieferten sie aufgrund der fruchtbaren Auelehme doch überdurchschnittliche Erträge (JAKOBS 2002, S.40f).

Das 17. Jahrhundert war geprägt durch die Verwüstungen des Dreissigjährigen Krieges, denen mit einer kurzen Friedenspause der Pfälzische Erbfolgekrieg nachfolgte. Die Bevölkerungszahlen gingen in dieser vom Krieg stark betroffenen Region zurück; Siedlungen wurden zeitweilig sogar aufgegeben und die landwirtschaftlichen Nutzung der ohnehin wenig intensiv genutzten Aue ging zurück. Die Kriegswirren hatten auch eine Vernachlässigung der Hochwasserschutzmaßnahmen zur Folge. Die dezimierte Bevölkerung war nicht mehr in der Lage, die vorhandenen Wasserschutzbauten zu erhalten. Die Dämme wurden beschädigt und zerfielen bei den großen Hochwasserereignissen, die besonders nach der Mitte des 17. Jahrhunderts auftraten. Von den Kriegseinwirkungen waren auch die Altrheine betroffen. Wegen ihrer wichtigen Funktion als Fischgründe genossen sie in Friedenszeiten eine ständige Pflege und Säuberung. In Kriegszeiten schritten dagegen die Verlandungs- und Verwilderungsprozesse wieder stärker voran (MUSALL 1971, S.655).

Die bisherigen Ausführungen zeigten, dass die Aue bis zum Ende des 17. Jahrhunderts nur in vergleichsweise geringem Ausmaß genutzt wurde. Siedlungen (v.a. Einzelhöfe) existierten in der Rheinniederung nur in wenigen Einzelfällen und wasserbauliche Maßnahmen wie Dämme und künstliche Verlegungen des Gerinnes hatten nur lokalen Charakter ohne nennenswerten Einfluss auf die fluviale Dynamik des gesamten Flusses.

Die erste Phase intensiver Kultivierung begann erst mit der Beruhigung der politischen Lage im 18. Jahrhundert. Vor allem das starke Bevölkerungswachstum zog eine Intensivierung bzw. Neugewinnung von Anbauflächen nach sich. Das Ackerland wurde in der Aue auf Kosten der Auewälder und des Grünlandes deutlich ausgeweitet. Auch das Grünland selbst erfuhr durch Entwässerungsmaßnahmen eine deutliche Zunahme des Anteils von Wiesen gegenüber den oft nassen Weiden und Bruchländereien. Gleichzeitig ermöglichte die Erschließung neuer Grünfütterflächen und vor allem die Einführung neuer Futterpflanzen in der Viehhaltung eine Verschiebung weg von der Weidewirtschaft hin zur Stallfütterung. Zur Intensivierung der Landwirtschaft trug auch die Einführung von Tabak und Kartoffel bei. Die Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf die Aue wird auch durch die Gründung zahlreicher Einzelhöfe in der Aue deutlich (JAKOBS 2002, S.41).

Eine Bedrohung des neugewonnenen Kulturlandes durch Rheinhochwasser war aber selbstverständlich weiterhin gegeben. Mitte des 18. Jahrhunderts heißt es, der Rhein breche zwischen Selz und Mannheim an so vielen Stellen ein, dass man sich darauf beschränken müsse, die gefährlichsten zu suchen und zu schützen. Bei Ketsch wird berichtet, der Rhein dringe hier stark auf das „hohe rote, sandige Ufer“ ein und nehme täglich davon viel hinweg (MUSALL 1971, S.655). Die nicht in einem grossräumigen Zusammenhang stehenden einzelnen Massnahmen wie vereinzelt Uferbefestigung, Dammbauten oder Bettverlegungen blieben in ihrer Wirkung nach wie vor lokal begrenzt.

Dies war die Situation, bevor Anfang des 19. Jahrhunderts das „Jahrhundertprojekt“ der Rektifikation des Stromes nach den Plänen von Tulla in Angriff genommen wurde.

III.2.1. Die Oberrheinkorrektion und ihre Folgen im Untersuchungsgebiet

Die seit dem 19. Jahrhundert im Untersuchungsgebiet durchgeführten wasserbaulichen Veränderungen hatten erheblichen Einfluss auf die Hydrodynamik der Inundationsflächen, weshalb sie im folgenden genauer abgehandelt werden.

III.2.1.1 Erste Regulierungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet

Der Versuch der Menschen, die natürliche fluviale Dynamik des Flusses zu bändigen, korrelierte seit jeher mit der Kultivierung der Flussaue. In dem Maße, wie die Kultivierung und Besiedlung der Rheinniederung vorangetrieben wurde, wuchs auch das Bedürfnis, neugewonnenen Flächen vor Hochwasser zu schützen. Vor Tulla waren bereits eine Reihe von lokalen Maßnahmen zur Flussregulierung in Angriff genommen worden:

Den Römern wird bereits ein versuchter Durchstich bei Speyer (sog. Oder) zugeschrieben, ohne dass allerdings eindeutige Beweise hierfür vorliegen. Der erste nachweisbare Durchstich erfolgte 1391 bei Sondernheim. Im Jahr 1617 wurde zum Schutz der Dörfer Neupotz und Leimersheim ein Durchstich erfolgreich ausgeführt. Die Folge war jedoch eine verstärkte Bedrohung des flussabwärts gelegenen Linkenheim, so dass auch hier Ende der 1620er Jahre ein Durchstich ausgeführt wurde, der allerdings keine unmittelbare Verbesserung der Situation brachte (MUSALL 1971a, S.388). Im Untersuchungsgebiet selbst wurden keine Durchstiche vor dem 19. Jh. ausgeführt. Der Rhein selbst jedoch verkürzte seinen Lauf in einem natürlichen regressiven Sprung zwischen Waldsee und Altrip in der Zeit zwischen 1580 und 1590. Dem Sprung waren seit der Mitte des 16. Jh. große Hochwasserereignisse vorangegangen. Um 1700 wurde ein weiterer natürlicher Durchbruch bei Mechtersheim, der Phillipsburg vom Rhein abgeschnitten hätte, durch einen Dammbau erfolgreich verhindert (MUSALL 1971a, S.388).

III.2.1.2. Politische Rahmenbedingungen

Erst mit der Neuordnung Deutschlands durch Napoleon und der Schaffung des Großherzogtums Baden wurde es möglich, den Strom über Hunderte von Kilometern hinweg in ein einheitliches Flussbett zu zwingen und weite Teile der Aue durch Ausdeichung in - damals dringend benötigte - landwirtschaftliche Nutzfläche umzuwandeln. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die 1817 bis 1885 andauernden Korrektionsarbeiten in erster Linie zur Festlegung einer französisch-badischen (bzw. nach 1815 einer bayrisch-badischen) Grenzlinie dienten. Landgewinnung und Hochwasserschutz der Rheinanliegergemeinden waren zwar erwünscht und geplant, aber dennoch zweitrangige Ziele. Dies unterscheidet die Tullaschen Maßnahmen in der Zielsetzung deutlich von allen früheren flussbaulichen Projekten. Zahlreiche Widerstände mussten vor Beginn der eigentlichen Arbeiten ausgeräumt werden (eine gute Zusammenfassung hierzu findet sich bei JAKOBS 2002, S. 44 ff):

Von Seiten der Rheinanliegergemeinden wurden die Pläne zur Regulierung des Rheins ohne große Begeisterung aufgenommen, da sie nach der Flussbauordnung von 1807 die Unterhaltung der Dämme in Fronarbeit zu leisten hatten. Auf Bestreben

Tullas wurde die Fron 1816 durch einen Steuerzuschlag abgelöst und die Arbeiten von staatlich bezahlten Lohnarbeitern durchgeführt (JAKOBS 2002, S.45). Der größte politische Widerstand gegen die Rektifikationsarbeiten kam von den Anliegerstaaten am Mittel- und Niederrhein, insbesondere von Preußen, da man eine Verschärfung der Hochwassergefahr fürchtete. Nach langwierigen Verhandlungen einigte man sich darauf, einige der geplanten Eingriffe nicht durchzuführen. Die nie ausgeführten Durchstiche bei Speyer, Altrip und Neckarau zählten hierzu.

III.2.1.3. Durchstiche im Untersuchungsgebiet

Die sechs im Untersuchungsgebiet gelegenen Durchstiche wurden allesamt nach dem zweiten Staatsvertrag zwischen Baden und Bayern von 1825 durchgeführt:

Rheinsheimer Durchstich Nr.2:

Vollendung des Durchstichs 1826; Aufnahme des Talweges 1832

Meckesheimer Durchstich:

Vollendung des Durchstichs 1837; Aufnahme des Talweges 1844

Oberhausener Durchstich:

Vollendung des Durchstichs 1842; Aufnahme des Talweges 1844

Angelhofer Durchstich:

Vollendung des Durchstichs 1826; Aufnahme des Talweges 1876 (50 Jahre!)

Otterstadter Durchstich:

Vollendung des Durchstichs 1833; Aufnahme des Talweges 1845

Ketscher Durchstich

Vollendung des Durchstichs 1833; Aufnahme des Talweges 1839

Zwei der Durchstiche, der Rheinsheimer Durchstich Nr. 2 und der Angelhofer Durchstich, wurden sogleich nach Vertragsabschluß von 1825 ausgeführt, wogegen die Proteste seitens Preußens und anderer Rheinanlieger den Beginn der Arbeiten an den anderen Durchstichen verzögerte.

Die obige Liste macht deutlich, dass der Rhein nicht immer sein neues Bett bereitwillig annahm: Am Otterstädter Durchstich vergingen 12, am Angelhofer Durchstich sogar mehr als 50 Jahre, bis der Fluss den neuen Talweg annahm.

III.2.1.4. Die Auswirkungen der Oberrheinkorrektion

Die schwerwiegendste Folge der Oberrheinkorrektion stellte die Tiefenerosion des Flusses dar. Mit der Korrektion wurde der Lauf insgesamt um 81,8 km (ca. 23%) verkürzt. Die Erosions- und Transportleistung des südlichen Oberrheins betrug schon vor der Korrektion 600.000-700.000 t Material pro Jahr, das er aus dem eigenen, bis zu 12 km breiten, Bett entnahm. Als dieselben Mengen nach der Korrektion aus dem neuen, lediglich 200-250 m breiten Bett entnommen wurden, stellte sich eine – von Tulla durchaus vorhergesehene und erwünschte - starke Tiefenerosion ein. Die Folge war eine Absenkung des Grundwasserstandes in der Rheinebene; nördlich der Isensteiner Schwelle erreichte die Tiefenerosion mit 6-8m ihr stärkstes Ausmaß (VIESER 1985, S. 34.f; TITTIZER, KREBS 1996, S. 27ff). Im Bereich des Untersuchungsgebietes fand allerdings teilweise wieder eine Wiederaufhöhung statt: MUSALL gibt für den Rhein bei Philippsburg eine Vertiefung der Stromssole um 1,26

m bis 1861 an, die bis 1884 durch Akkumulation im Flussbett wieder um 0,45 m reduziert wurde (MUSALL 1969 S.201). Nach unabhängig voneinander durchgeführten Berechnungen von PICHL und HORN liegt die Tiefenerosion von 1820 bis 1950 bzw. bis 1970 bei Speyer und Ketsch bei 1,6 m (PICHL 1958, S.325; HORN 1977, S.214). Noch DÖRRER ist die Stromsohle im Bereich des Untersuchungsgebietes um etwa 2m abgesunken (DÖRRER 1984, S.113).

Diese Änderungen der Stromsohle sind bei dem Vergleich von rezenten mit historischen Wasserständen und Inundationsflächen zu berücksichtigen.

Die Vertiefung der Stromsohle bedingte wiederum ein Absinken des Grundwasserspiegels in der Aue. Dadurch wurde eine deutliche Ausweitung des Ackerlandes auf vormals feuchte Grünlandstandorte möglich. Ehemals feuchte Waldstandorte wurden wiederum in Grünland und teilweise sogar in Ackerland umgewandelt (quantitative Untersuchungen hierzu s.u.). Neben einer Ausweitung der Nutzflächen erfolgte auch eine Aufwertung der vorhandenen Flächen z.B. die Bestockung der Waldflächen mit wirtschaftlich wertvolleren Holzarten oder die Gewinnung trockener Wiesen aus Feuchtwiesen und Weiden (JAKOBS 2002, S. 52). Aus ökologischer Sicht waren die Folgen der Rheinkorrektur eindeutig negativ. Hochwasserereignisse lösten zwar über aufquellendes Grundwasser noch vielerorts Vernässungen aus, bewirkten aber seltener flächenhafte, strömende Überflutungen. Die Korrektur bedeutete die Zerstörung des zuvor für die Aue so typischen Mosaiks von sich beständig wandelnden trockenen und feuchten Standorten: Natürliche Aue- und Retentionsflächen wurden auf die Bereiche der Dammvorländer reduziert; die Seitenerosion des Flusses wurde unterbunden; die Zahl der Inseln und Kiesbänken im Gerinne ging dramatisch zurück; neu entstandene Altarme verlandeten rasch (VIESER 1985, S. 34.f; TITTIZER, KREBS 1996, S. 27ff). Das Ende der natürlichen Morphodynamik des Flusses bedrohte und reduzierte zahlreiche vom beständigen Prozess des Wandels abhängige Tier- und Pflanzenarten bzw. Gesellschaften. Die Grundwasserabsenkung löste eine „Versteppung“ (DÖRRER 1984, S.113) aus, einen Sukzessionsprozess hin zur Verbreitung von Artengesellschaften, die sich den trockeneren Standortbedingungen besser anpassten. Die Verlandung der Altarme hatte in Verbindung mit der Uferbefestigung im Hauptstrom den Verlust der wichtigsten Laichplätze für viele Fischarten zur Folge. Innerhalb weniger Jahrzehnte versank die Rheinfischerei in der Bedeutungslosigkeit.

Die vom Hauptstrom abgeschnittenen Altrheine boten günstige Eiablageplätze für Stechmücken. In den ersten Jahrzehnten nach der Tullasche Korrektur waren sie bei Hochwasser noch direkt mit dem Strom verbunden. RIEHL schildert 1857 die Situation in den direkt an den Altrheinen gelegenen Dörfern nach dem Abschluss der Arbeiten an den Durchstichen (RIEHL 1857, S.10f):

„In dem Maße als das Hauptbett des Stromes geradliniger und Wasserreicher wird, versumpfen und verlanden die abgeschnittenen Seitenarme, die Altrheine. (...). Die Dörfer (...) sind in der heißen Jahreszeit häufig in eine so stinkende Sumpfluft gehüllt, die aus dem unmittelbar vor den Häusern stagnierenden Wasser aufsteigt, dass man dann kaum anders als mit verhaltener Nase in ihre Straßen einwandern kann. (...). Es sind diese Altrheine jedenfalls nur sehr allmählig trocken zu legen, da sie durch das Rheinwasser, welches in der Tiefe den Kies- und Sandboden durchdringt, das sogenannte „Quellwasser“, mit dem Hauptstrom trotz der Dämme in Verbindung bleiben. Der Spiegel der Altrheine steigt und fällt mit der Rheinflut.“

Der Verlandungsprozess der bei der Oberrheinkorrektur geschaffenen Altrheinarme dauert im Prinzip bis in die Gegenwart an. Dabei sind zwei Entwicklungen zu

beobachten: Zum einen gibt es die bereits größtenteils verlandeten Flächen wie z.B. die Böllenwörth bei Otterstadt. Sie befinden sich nach wie vor in einem permanenten Verlandungsprozess: Laub und Totholz füllt allmählich die noch vorhandenen Senken und Schluten. Nur an wenigen Stellen (zumeist an den quer zur Strömungsrichtung gebauten Waldwegen) ist nach einem Hochwasser überhaupt Erosionstätigkeit festzustellen. Insgesamt war während der sich von 1997 bis 2001 hinstreckenden Geländearbeiten ein eindeutiges Überwiegen der Akkumulationsprozesse zu beobachten, was ein weiteres Auffüllen der auch bei starken Hochwasserereignissen nur gering durchströmten Schluten und Senken und die weitere Einebnung der Reliefunterschiede in der rezenten Aue zur Folge haben dürfte.

Zum anderen wurden Altarme oftmals im Zuge der Kiesgewinnung vollständig ausgeräumt und in „Baggerseen“ mit Rheinanschluss umgewandelt (wie z.B. der Otterstädter oder der Angelhofer Altrhein). Diese Altarme werden von Baggerschiffen weiterhin ausgetieft und können mit ihrer steilen Uferböschung und den wenigen verbleibenden Verlandungsflächen den durch die Entkiesung zerstörten Lebensraum für die auenspezifischen Tier- und Pflanzenarten nicht ersetzen.

III.2.1.5. Begleitende Meliorationsmaßnahmen und ihre Folgen

Eine eingehende Betrachtung der die Oberrheinkorrektion begleitenden Meliorationsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet findet sich bei JAKOBS (2002, S.53 f):

Im Zuge der „in Wert“ Setzung der neuen, dem Rheinstrom mühsam abgerungenen Flächen wurden umfangreiche Entwässerungsmaßnahmen durchgeführt. Eine Methode bestand darin, das natürliche Gefälle auszunutzen und ein enges Netz von rheinparallelen Gräben flussabwärts in den Fluss münden zu lassen. Stellenweise wurden Dampfpumpen installiert – im Untersuchungsgebiet z.B. auf Speyerer Gemarkung und auf der Rheinschanzinsel (MUSALL, 1969 S. 202f). Bei diesen Maßnahmen wurde offensichtlich der Effekt der sich zeitgleich vollziehenden Sohlenerosion und die dadurch bedingte Grundwasserabsenkung unterschätzt: Viele der zuvor zu feuchten Wiesen büßten aufgrund Wassermangels an Ertrag ein und mussten wieder bewässert werden. Ein solches Bewässerungsgebiet entstand beispielsweise um die Domäne Insultheim im Hockenheimer Rheinbogen. Es wurde dort ein in den Rheinstromatlanten des 19. Jahrhunderts detailliert verzeichnetes Netz von Be- und Entwässerungsgräben geschaffen. Aus den Karten lassen sich sogar die angewandten Bewässerungsmethoden erschließen.

Teilweise machten die Bewässerungsverfahren eine großflächige Planierung bzw. einen aufwändigen Umbau des Geländes notwendig. Das Wasser für die Bewässerung lieferte der Kraichbach. Planierungsarbeiten wurden auch auf Ackerland durchgeführt – so z.B. von der Zuckerfabrik Waghäusel, die große Areale des Hockenheimer Rheinbogens gepachtet hatte. Um zu vermeiden, dass der fruchtbare Oberboden nach der Planierung eine ungleichmäßige Mächtigkeit hatte, hob man ihn zunächst ab, planierte das Gelände und trug ihn wieder auf (ZAHN 1914 S. 151). Eine weitere Methode bestand darin, feuchten Standorten wie z.B. moorigen Wiesen Kieselsäure zuzugeben – in dem Glauben, man verbessere damit die Bodeneigenschaften. Erst später erkannte man, dass der eigentliche Vorteil dieser Zugabe in einer Verfestigung des zuvor weichen Bodens und in einer Erhöhung des Geländes bestand (ZAHN 1914, S.145). Auch die systematische Maulwurfsjagd durch hauptberufliche Maulwurfsjäger wurde als Bodenverbessernde Maßnahme betrieben, bis dieses Tier allmählich Anfang des 20. Jahrhunderts als Nützlichling erkannt wurde.

Aus heutiger Sicht mutet es fast schon befremdlich an, mit welchem Aufwand die landwirtschaftliche Aufwertung der neu gewonnenen Flächen betrieben wurde. Es darf aber nicht vergessen werden, dass die Meliorationsmaßnahmen in die Frühphase der Industrialisierung fallen. Chemischer Dünger und andere heute selbstverständliche Mittel zur Ertragssteigerung standen der damaligen Landwirtschaft, welche die Nahrung für eine exponentiell wachsende Bevölkerung bereitstellen musste, noch nicht zur Verfügung. Die Neugewinnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche war in Deutschland an ihre natürliche Grenzen gestoßen. Die Flussauen waren mit die letzten Flächen, die noch für eine Neugewinnung von Ackerland genutzt werden konnten. Nur in diesem Zusammenhang können die Nutzungsintensivierung der landwirtschaftlichen Nutzfläche unter erheblichem Arbeitsaufwand und mit oftmals nur geringen Ertragssteigerungen angemessen bewertet werden. Die Folgen dieser Maßnahmen wirken sich auf die Hydrodynamik des Untersuchungsgebietes bis heute aus. Auch wenn die Ent- und Bewässerungsgräben größtenteils ihre Funktion weitestgehend eingebüßt haben und nicht mehr in Stand gehalten werden, stellen sie bei Hochwasser noch immer Leitlinien für Druckwasserflächen und den oberflächlichen Abfluss dar. Erst durch die Meliorationsmaßnahmen wurden die ehemaligen Auen endgültig in kultivierbare Flächen überführt und die Voraussetzung für die nächste (und in ihren Folgen wohl dramatischste) „Phase“ der Nutzungsintensivierung, – die Errichtung von Industrie-/Gewerbe- und Wohnflächen in der einstigen Aue, – geschaffen (s.u.)

III.2.2. Weitere Ausbaumaßnahmen am Rhein

Die Oberrheinkorrektur stand am Anfang einer ganzen Reihe weiterer wasserbaulicher Maßnahmen. Da diese aber nicht im Untersuchungsgebiet selbst durchgeführt wurden, bzw. im Untersuchungsgebiet selbst keine so weitreichenden Folgen wie die Tulla'sche Rheinbegradigung haben, sind sie der Vollständigkeit halber nur kurz aufgeführt, - auch wenn ihre Wirkung auf das Geoökosystem des Flusses teilweise noch folgenschwerer ist, als die eigentliche Rheinbegradigung:

?? Die Rheinregulierung zur Schiffbarmachung des Rheins (2. Ausbauphase 1907-1940)

Ziel der weiteren Ausbaumaßnahmen waren die Schiffbarmachung des Rheins bis Basel, eine weitere Gewinnung von Nutzflächen aus den ehemaligen Rheinauen, sowie ein verstärkter Hochwasserschutz. Unter Max Honsell erfolgte zwischen 1907 und 1940 die Niedrigwasserregulierung. Das Flussbett wurde durch den Bau von Buhnen (siehe Abb. 22. die auch bei Niedrigwasser eine Fahrrinne von 2-2,5 m Tiefe gewährleisten, weiter eingeengt. (VIESER 1985, S. 34f). Die Uferbefestigung wurde weiter ausgebaut und die Trennung von Fluss und Aue verstärkt. Die letzten Sandbänke verschwanden aus dem Rheinstrom, bzw. wurden regelmäßig abgetragen, da sie für die Schifffahrt eine Gefahr darstellten (siehe auch Abb. 23. Abb. 24. und Abb. 25.).

?? Der Oberrheinausbau zur Energiegewinnung (3. Ausbauphase 1928-1975)

Die tiefgreifendsten Veränderungen des Oberrhein-Geoökosystems traten in der Phase der Kanalisierung und des Staustufenbaus ein. Der Oberrheinausbau lässt sich in drei große Abschnitte gliedern (VIESER 1985, S. 36f.):

I. Grand Canal d'Alsace zwischen Basel und Breisach

Bereits 1932 hatte Frankreich mit dem Bau der Staustufe Kembs und des Grand Canal d'Alsace (Rheinseitenkanal) begonnen, um den Rhein zur Energiegewinnung zu nutzen. Frankreich verfügte durch den Versailler Vertrag von 1919 über die alleinigen Rechte der Energienutzung am Oberrhein und durch den Marshallplan von 1948 auch über das Geld zum Weiterbau des Rheinseitenkanals. Der Kanal wurde als abgedichtete Betonrinne erstellt, die zwischen Basel und Breisach den Großteil der Wassermassen des Flusses aufnimmt. Im Restrhein verblieb lediglich eine Wassermenge von durchschnittlich 30-50m³/s, was eine Absenkung des Wasserstands (und damit auch des Grundwassers) um 2-3 m bewirkte. Um eine weitere Grundwasserabsenkung zu verhindern, wurde 1965 im Restrhein bei Breisach ein Stausystem errichtet.

II. Schlingenlösung zwischen Breisach und Straßburg

Aufgrund der negativen Folgen des Rheinseitenkanals rückte Frankreich nach anhaltenden Protesten der Bundesregierung und vor allem Baden-Württembergs von dem ursprünglichen Vorhaben, den Kanal bis nach Straßburg fortzusetzen, ab. Im Oberrheinausbauvertrag von 1956 wurde die sogenannte Schlingenlösung konzipiert. Bei der Schlingenlösung sollte das bestehende Rheinbett so weit wie möglich seine bisherige Funktion behalten. Es wurden 4 Stauhaltungen errichtet. Zu den Kraftwerken und Schleusen wurde jeweils ein Stichkanal abgeleitet (Schlinge), der unterhalb der Staustufe wieder in den Rhein geführt wurde.

III. Vollausbau im Strom

Der Ausbau des Rheins konnte nicht, wie ursprünglich geplant, bei Straßburg beendet werden, weil durch die Stauregulierung eine verstärkte Sohlenerosion unterhalb der Straßburger Staustufe ausgelöst wurde. Man versuchte durch den Bau der Stauanlagen Gamsheim (1974) und Iffezheim (1977), die Sohlenerosion zu stoppen. Obwohl diese Stauanlagen sich bereits im Bereich geringen Gefälles befinden, trat das Problem der Sohlenerosion nach Vollendung der Staustufen auch hier auf. Das Problem wird gegenwärtig durch die regelmäßige Zugabe großer Mengen von Rheinkies direkt unterhalb des Stauwehrs Iffezheim bewältigt: Indem man 1984 begann, das fortgeschwemmte Geschiebe durch jährlich ca. 170.000 Tonnen Kies (!) zu ersetzen, brachte man sowohl die Erosion als auch die Notwendigkeit eines weiteren Staustufenbaus zum Stillstand.

III.2.3. Intensivierung der Nutzung der Rheinaue im zwanzigsten Jahrhundert.

Während die durch den Dammbau neu gewonnenen Flächen im neunzehnten Jahrhundert noch eine fast ausschließlich landwirtschaftliche Nutzung erfuhren, ist für das zwanzigste Jahrhundert eine Bebauung eines erstaunlich großen Teils dieser Flächen mit Industrie-, Gewerbe- und Siedlungsgebieten, mit militärischen Anlagen und vor allem mit zahlreichen Freizeitflächen (z.B. Zeltplätze, Dauercampinganlagen, Sportplätze, Vereinshäuser, Parkanlagen) festzustellen. Ein Teil dieser Flächen wird bei stärkeren Hochwasserereignissen nach wie vor überschwemmt, - seit einigen Jahren kann man sogar von einer regelmäßigen Überschwemmung sprechen. Ferner sind auch die im Untersuchungsgebiet befindlichen Mülldeponien zu erwähnen (Mülldeponie nördlich von Speyer und die BASF-Sondermülldeponie Flozgrün), die beide inmitten druckwasserreicher Gebiete errichtet wurden.

Während die Siedlungsfläche der im Untersuchungsgebiet gelegenen Gemeinden (z.B. Speyer, Otterstadt und Waldsee) bis zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts noch von der morphologischen Grenze der überschwemmungssicheren

Hochgestadekante begrenzt wurde, entstanden in den letzten Jahrzehnten verstärkt auch große Neubaugebiete in der ehemaligen Rheinaue. In Abb. 26. wird dieser Prozess des Vordringens der Siedlungen in die Altaue am Beispiel der Stadt Speyer verdeutlicht. In den Abbildungen ist der in der Rheinniederung befindliche Teil der Speyerer Gemarkung grün, die bebauten Flächen jeweils für das Jahr 1856 und das Jahr 1999 rot dargestellt. In Speyer entstanden in der ehemaligen Überschwemmungsaue des Rheins ausgedehnte Industrie- und Gewerbeflächen wie z.B. Fabriken, Großhandelsniederlassungen, das Technikmuseum, ein Großleinwandkino und der Flughafen Speyer. Die ehemalige „Rheinhäuser Weide“ wurde mit einer Erdölraffinerie und weiteren Industrie- und Gewerbebetrieben bebaut und in „Parkstadt am Rhein“ umbenannt. Die gleiche Entwicklung ist im Nordosten Speyers, im Bereich der Gemarkung „Schlangenwyhl“ zu beobachten. In den letzten Jahren wurden dort Flächen, auf denen während der großen Hochwasserereignisse von 1983 und 1999 Druckwasseraustritte zu beobachten waren, mit verschiedenen Handels- und Gewerbebetrieben bebaut (siehe hierzu Abb. 27. und Abb. 127.).

Es bleibt anzumerken, dass all diese Flächen in höchstem Maße von den Überschwemmungen eines extremen Hochwasserereignisses bedroht sind – sei es durch immer wieder aufquellendes Druckwasser (s.u.) oder gar durch einen Dambruch.

Die bereits erwähnte Kiesgewinnung stellt neben der Bebauung der Altaue den tiefgreifendsten Eingriff in den Naturhaushalt der Aue dar. In Abb. 28. sind diejenigen Flächen im Untersuchungsgebiet rot dargestellt, in denen im zwanzigsten Jahrhundert Kies abgebaut wurde. Es wird deutlich, dass der Abbau große Teile der ehemaligen Auflächen unwiederbringlich zerstört und in offene Baggerseen verwandelt hat. In ökologischer Hinsicht sind diese Seen aufgrund ihrer steilen Uferböschung und ihrer vorwiegenden Nutzung als Badesee mit Liegestrand oder Freizeitbebauung (z.B. Binsfeld) als nicht wertvoll einzustufen und stellen keinen Ersatz für die verloren gegangenen Aueflächen dar.

III.2.4. Gesamteinfluss der seit dem 19. Jh. erfolgten anthropogenen Eingriffe auf die Inundationdynamik des Rheins

Die Folgen der Tulla'schen Oberrheinkorrektion wurden bereits ausgiebig diskutiert. Die Folge der daran anschließenden Maßnahmen und Eingriffe (Ausbau des Flusses für die Schifffahrt, Staustufenbau, Kiesgewinnung, Bebauung der Rheinniederung, intensivierete Flächennutzung) sind nochmals große Teile der ehemaligen Überschwemmungsaue überformt bzw. zerstört worden. Die Gesamtwirkung dieser Veränderungen auf das Geoökosystem der Rheinniederung sind beträchtlich und wurden erst in den letzten Jahrzehnten in ihrer Tragweite erkannt. Eine umfassende Diskussion dieser Folgen ist nicht Aufgabe der vorliegenden Arbeit – vielmehr sei im folgenden zusammenfassend auf die Veränderungen in der Inundationsflächendynamik fokussiert:

a) Verlust an natürlichen Überschwemmungsflächen

Bis zu Beginn der Korrektionsarbeiten des Oberrheins ist die gesamte Rheinniederung zur potentiellen Überschwemmungsfläche extremer Hochwasser zu zählen. Der Verlust an regelmäßig überschwemmten Flächen lässt sich anhand der Verringerung der Weichholz- und Hartholzaue-Standorte ablesen. Heute ist die Vegetationszusammensetzung der Talauenflächen zu 78% als naturfern und nur

noch zu 2,3% als naturnah einzustufen; große Teile der Aue sind durch Verkehrswege o.ä. versiegelt. Genaue Angaben in Form einer Flächenbilanz liegen nicht vor (TITTIZER, KREBS (1996), S.34). Im am stärksten umgeformten Oberrheinabschnitt zwischen Basel und Karlsruhe gingen im Zeitraum von 1820 bis 1950 von den ursprünglich rund 1000 km² naturnaher Überschwemmungsflächen etwa 730 km² verloren. Durch die weiteren Ausbaumaßnahmen zwischen Basel und Iffezheim von 1950 bis 1977 wurden die verbliebenen 270 km² Überschwemmungsflächen um weitere 130 km² reduziert (VIESER (1985) S. 40, GALLUSSER, SCHENKER (1996), S. 62f; siehe auch Abb. 29.)

b) Grundwasserspiegelabsenkung und Reduzierung von Druckwasserflächen

Ausgelöst durch die Begradigung des Hauptstromes, kam es fast im gesamten Lauf zu einer Eintiefung der Flusssohle. Häufig überschwemmte Uferpartien erfuhren eine relative Hebung gegenüber dem alten Mittelwasserstand. Aufgrund der Vorfluterfunktion des Rheins senkte sich der Grundwasserspiegel in der Rheinebene auf ein durchschnittlich 2 m tieferes Niveau ein. Im südlichen Oberrheingebiet wird die Verringerung des Grundwasservorkommens auf ca. 3 Milliarden m³ geschätzt¹⁵. Der Grundwasserspiegelabfall äußerte sich auch in einem Trockenfallen bisheriger regelmäßig überschwemmter bzw. durchfeuchteter Flächen. Druckwasserflächen, die zu Beginn des 19. Jh. noch dicht oberhalb des Grundwasserspiegels lagen und bereits bei geringen Wasserspiegelerhöhungen des Rheins unter Wasser standen, werden heute selbst bei Hochwasser kaum noch geflutet. Untersuchungen über den Rückgang und Wandel der Druckwasserflächen im Vor- oder Hinterdeichgebiet liegen bisher nicht vor.

c) Zunahme von hohen Wasserständen

In Abschnitt III.1.5. wurde bereits betont, dass seit spätestens den 70er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts eine deutliche Zunahme von extremen Wasserständen im Untersuchungsgebiet festzustellen ist. Es wurde bereits in Tab.4. gezeigt, dass aber die extremen Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte trotz geringerer Abflüsse an den Messpegeln höhere Wasserstände erreichten als vergleichbare Hochwasserereignisse des 19. Jahrhunderts. Die Zunahme erhöhter Wasserstände ist folglich zumindest teilweise direkt auf die Reduzierung der direkten Überschwemmungsflächen zurückzuführen, da dem Fluss bei gleichem Abfluss ein verkleinertes Hochwasserbett zur Verfügung steht.

d) Steigende Gefahr von extremen Abflusswerten

Neben diesem rein von einer Reduzierung des Gerinnequerschnitts verursachten Wasserstandsanstieg kann es durch die Verkürzung der Gesamtließstrecke zu einer Erhöhung der Spitzenabflüsse kommen:

Dass der Verlust des Großteils der natürlichen Überschwemmungen insbesondere im Zusammenhang mit dem Ausbau des Rheins zu einer „Kraftwerkskette“ eine Hochwasserverschärfung unterhalb der Ausbaustrecke mit sich bringen würde, zeichnete sich bereits während den Baumaßnahmen in den 50er und 60er Jahren ab. Im Jahre 1968 gründeten die Rheinanliegerstaaten die „Hochwasser - Studienkommission für den Rhein (HSK). Ihre Aufgabe war die Untersuchung der Hochwasserverschärfung am Rhein zwischen Basel und Worms. Der 1978

¹⁵ siehe STOLZENBURG, H.; <http://www.mcfish.de/Text-Rheinhistorie.htm>

vorgelegte Abschlußbericht ist noch heute eine der maßgeblichsten Veröffentlichungen zur Hochwasserdynamik des Rheins. Die Studie machte deutlich, dass die Verringerung der Retentionsgebiete seit 1955 in zweierlei Hinsicht eine abflusserhöhende Wirkung hatte. Zum einen verursachte der Abfluss im schmaleren Bett eine erheblich schneller abfließende und weniger abgeflachte Hochwasserwelle. Zum anderen führte diese Beschleunigung der Hochwasser zu höheren Abflüssen durch die Überlagerung der Rheinwelle mit den Scheiteln der Nebenflusswellen. Die Rheinwellen kommen infolge des Ausbaus bis Au-Neuburg demnach in Straßburg im Schnitt um 15,5 h und in Maxau und Worms um rund 40 h früher an als vor dem Ausbau. Ein Extremereignis wie das Hochwasser von 1882/83 hätte heute noch wesentlich höhere Abflüsse: 1882/83 erreichte die Neckarwelle Worms 3 Tage vor der Rheinwelle und verursachte eine sehr breite Welle mit zwei deutlichen Scheiteln. Durch die Beschleunigung der Rheinwelle nach dem Ausbau würden sich heute bei gleichen Rahmenbedingungen beide Wellen vereinigen und einen 1820 m³ größeren Abfluss erzeugen - siehe Abb. 30.(VIESER 1985, S.41f).

Zwar wurde durch den Bau der zehn Staustufen und die Bettregulierung im Südlichen Oberrhein eine rund 1000-jährliche Hochwassersicherheit erreicht - jedoch auf Kosten des Hochwasserschutzes der stromabwärts liegenden Siedlungen. Nach dem Bau der Staustufe Iffezheim stieg am nördlichen Oberrhein die Hochwassergefahr von einem 200-jährlichen Ereignis auf ein 50 bis 60 jähriges an. Erst mit der Realisierung eines ersten Teils der geplanten Hochwasserrückhaltemaßnahmen ist wieder ein Schutz gegen ein 80 bis 100- jähriges Hochwasser erreicht worden – s.u. (KARRASCH (1988), ISRK (1997), S.20-22, KLAIBER (1997), S.242).

e) Stagnation in der Entwicklung von Inundationsflächen durch die Unterbindung der natürlichen Erosions- und Sedimentationsprozesse

Wie bereits dargelegt, ist die Entstehung von Inundationsflächen eng mit der einstmals für den Rhein so typischen Verlagerungen des Gerinnebetts bzw. dem Wechselspiel von Erosion und Akkumulation des Stroms verknüpft. Mit zu den ökologisch wertvollsten Inundationsflächen der Aue zählen die am häufigsten überschwemmten, d.h. die tiefliegenden, zumeist aus Schluten, Gießen oder Altarmen hervorgehenden Geländesenken. Durch Laufbegradigung, Bühnen- und Staustufenbau, durch Uferbefestigung und Ausbaggerungen des Flussbetts ist eine fluviodynamische Entstehung dieser morphologischen Senken heute nahezu vollständig unterbunden. Die Erosionsprozesse wurden somit fast vollständig unterbunden. Die Akkumulationsprozesse hingegen sind im wesentlichen verändert und verlangsamt, aber nicht im gleichen Maße unterbunden: Die Verlandung der bestehenden, reliktschen Überschwemmungsflächen vollzieht sich aufgrund des verringerten Transports von Bettfracht zwar erheblich langsamer als in der Zeit vor der Oberrheinkorrektur, jedoch ist im Untersuchungsgebiet eine allmähliche Verlandung rezenter Inundationsflächen durch abgestorbene Pflanzen, angeschwemmtes Holz und Zivilisationsabfälle sowie feine Auelehmlagerungen nach wie vor zu beobachten. Langfristig ist deshalb mit einer weiteren Auffüllung der rezenten, tiefliegenden Inundationsflächen zu rechnen, ohne dass neue Geländesenken bzw. Inundationsflächen in der Aue entstehen. Die wenigen jüngeren morphologischen Senken entstanden durch Entkiesung und Ausbaggerung der Altarme. Dabei entstanden jedoch in der Regel keine Überschwemmungsflächen, sondern für das Geoökosystem der Flussaue wertlose Stillgewässer mit steilen Uferböschungen.

III.2.5. Errichtung von Hochwasserpoldern und Renaturierungsmaßnahmen

Die HSK hatten in ihrem Abschlußbericht von 1978 deutlich auf die Hochwassergefahren, die der Oberrheinausbau von 1950-1977 verursachte, hingewiesen. Um den früheren 200-jährlichen Hochwasserschutz wieder herzustellen, verständigten sich Frankreich und Deutschland 1982 darauf, rund 212 Mio. m³ (mittlerweile sind 288 Mio. m³ geplant) Rückhalteraum bereitzustellen. Über die Hälfte davon hat das Land Baden-Württemberg zu erbringen. Die Kosten betragen insgesamt etwa 0,75 Mrd. Euro. Mit einem Abschluss der Baumaßnahmen wird nicht vor 2010 gerechnet (ISRK 1997, S. 6, 27); in Pressemitteilungen wird mittlerweile 2015 als Abschlussjahr angegeben. Im Untersuchungsgebiet wurde mit der Umgestaltung der Kollerinsel als Polderfläche im Jahr 2000 begonnen, die Arbeiten an der Insel Flozgrün sind bereits abgeschlossen, die Rheinschanzinsel bei Philippsburg soll in naher Zukunft auch zur Polderfläche umgewandelt werden. Es zeigte sich bei der Umsetzung der Vereinbarung bald, dass die Hochwasserrückhaltung nicht, wie zunächst vorgesehen, auf einige wenige Standorte konzentriert werden kann. Mit der Zustimmung der Landesregierung Baden-Württembergs zum „Integrierten Rheinprogramm“ (IRP) im Jahre 1988 tritt neben das Ziel der Wiederherstellung des 200jährigen Hochwasserschutzes die Wiederherstellung einer ökologisch intakten und naturnahen Auenlandschaft (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG 1994, H.10, S. 1). Wichtigste Maßnahme bei der Umsetzung dieses Konzepts ist die Renaturierung eines Teils der ehemaligen Auenflächen durch Dammrückverlegungen oder durch den Bau von Poldern. Dammrückverlegungen entschärfen die Gefahr bei Extremabflüssen, schaffen aber für Hochwasserereignisse mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten keine zusätzlichen Retentionsflächen. Der Bau von durchströmten, über Ein- und Auslasswerke regulierbare Polder erlaubt eine ökologische Flutung. Flutungen zur Hochwasserrückhaltung allein reichen für die Entwicklung von Auebiotopen nicht aus, da sie zu selten erfolgen, nur kurze Zeit andauern und zu schnell die maximale Überflutungshöhe erreichen. Bei ökologischen Flutungen werden die Bauwerke so gesteuert, dass die Polder entsprechend den Abflüssen des Rheins geflutet werden¹⁶. Die geplanten bzw. fertiggestellten Rückhalteräume sind in Abb. 31. dargestellt.

¹⁶ Für weitere Informationen zum Konzept der ökologischen Flutung sei auf die Arbeiten von DIESTER, dem Leiter des WWF-Aueninstituts in Rastatt verwiesen.

IV. Erprobung fernerkundlicher Methoden der Inundationsflächenbestimmung im Untersuchungsgebiet

Da bereits die Gewinnung von räumlich hoch aufgelösten Inundationsflächendaten ein erhebliches methodisches Problem darstellt, werden im folgenden Kapitel nicht nur die *Ergebnisse* der empirischen Datenerhebung im Untersuchungsgebiet (Abschnitt V.) und der GIS-gestützten Auswertung historischer Karten (Abschnitt VI.), sondern auch die Erfahrungen, welche mit den zur Datengewinnung verwendeten fernerkundlichen *Methoden* gemacht wurden (Abschnitt IV.), vorgestellt

Zu den Eingangs formulierten Zielen dieser Arbeit zählt die Erprobung von zur Inundationsflächenerfassung geeigneten Erhebungsmethoden. Unter den zur Verfügung stehenden Erhebungsmethoden zählt die Fernerkundung aus Gründen der Kosten- und Arbeitszeitoptimierung zu den vielversprechendsten. Die Schwierigkeit bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten besteht in der Identifizierung von Inundationsflächen im Luftbild, da sie in ihrem Erscheinungsbild stark variieren und Fehlinterpretationen leicht möglich sind. Aufgrund der Möglichkeiten, welche die digitale Luftbildauswertung bezüglich einer effizienten Inundationsflächenerfassung bietet, seien die während der Arbeiten im Untersuchungsgebiet gewonnen Erfahrungen im folgenden vorgestellt.

IV.1. Gewinnung von Luftbildmaterial

Den ersten Schritt stellt die Suche nach bereits vorhandenem, verwertbarem Luftbildmaterial dar. Anhand der Wasserstandstatistiken der Pegel Maxau und Speyer konnten die Zeitfenster, für welche Luft- oder Satellitenbilder des Untersuchungsgebietes von Interesse für die Inundationsflächenidentifizierung sind, genau eingegrenzt werden. Anfragen nach entsprechendem, den räumlichen und zeitlichen Kriterien des Forschungsprojektes entsprechendem Datenmaterial bei den Luftbildstellen der Landesvermessungsämter Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie von kommerziellen Satellitenbilddienstleistern förderten nur wenige brauchbare Szenen zutage: Im Zeitraum von 1930 bis 1999 konnten lediglich für 2 der 14 größeren Hochwasserereignisse im Untersuchungsgebiet Luftbildszenen ausfindig gemacht werden (siehe Tab. 5.). Erfreulicherweise befanden sich einige Luftbildszenen von kleineren Hochwasserereignissen im Bereich des Untersuchungsgebietes bereits im Luftbildarchiv des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg, was in erster Linie dem Engagement des ehemaligen Leiters der Fernerkundungsabteilung Prof. Dr. W. FRICKE und insbesondere seinem Interesse für Luftbilder aus dem Rhein-Neckar-Raum zu verdanken ist. Zu Satellitenbildern sei nur kurz wiederholt, dass ihre Nutzung zur Inundationsflächenerkennung in der Fachliteratur breit diskutiert wird (s.o.) und bereits eine Reihe von kommerziellen Softwareprodukten zur automatisierten Auswertung von Landsat u.a. Systemen bereit steht. Bei der Recherche nach geeigneten Satellitenbildszenen für das Untersuchungsgebiet erwies sich das vorhandene bzw. verfügbare Material für die Zwecke der vorliegenden Arbeit als nicht brauchbar. Die potentiell für eine Auswertung in Frage kommenden Satellitenbildszenen schieden

aufgrund zu geringer räumlicher Auflösung bzw. eines zu hohem Wolkenbedeckungsgrad von vorne herein aus.

Bei den für das Untersuchungsgebiet aufschlussreichen Luftbildszenen, die in Abschnitt V noch genauer betrachtet werden, handelt es sich überwiegend um panchromatische SW Aufnahmen. Lediglich vom 14.7.1975 liegen Farbinfrarotaufnahmen vor. Die Luftbildszenen wurden alle mit standardmäßigen Reihenmesskammern aufgenommen. Die Maßstäbe schwanken je nach Aufnahmehöhe zwischen ca. 1:10.000 und 1:38.000 (siehe Tab. 6.).

Um nach diesen nicht sehr ergiebigen Rechercheergebnissen sicherzustellen, dass während der Arbeiten im Untersuchungsgebiet im Falle eines Hochwassers die Erstellung von Luftbildern nicht dem Zufall überlassen bleibt, war bereits im Projektplan die Erhebung eigener Luftbilder vorgesehen. Im Februar 1999 konnten mit einem von der KABS zur Verfügung gestellten Helikopter erstmals selbst in einem größeren Umfang Luftbilder von den Überschwemmungen im Untersuchungsgebiet geschossen werden¹⁷. Da die Mittel für das Forschungsvorhaben erst ab dem 1. April bereit standen, waren zum Zeitpunkt dieses Hochwasserereignisses noch keine logistischen Vorbereitungen für die Datenerhebung getroffen worden. Es war deshalb noch nicht möglich, wie geplant photogrammetrisch auswertbare Senkrechtluftbilder anzufertigen. Die Dokumentation des Hochwasserereignisses musste sich auf die Aufnahme von Schrägluftbildern beschränken.

Die Ausrüstung für die Befliegung wurde kurzfristig innerhalb weniger Stunden improvisiert und bestand aus einer DVD Video Handycam der Firma SONY, einer Kleinformat Spiegelreflex Kamera mit 50 mm Objektiv (NIKON), und einer Mittelformat Spiegelreflexkamera. Das Filmmaterial bestand aus Sensia II Filmen von FUJI mit 100 und 400 ASA, sowie Infrarotfilmen von KODAK und KONIKA. Die charakteristische Absorption elektromagnetischer Strahlung von Wasser im nahen Infrarot legte die Verwendung von Infrarotfilmen¹⁸ nahe (siehe Abb. 32.).

Auf den Zeitraum des Hochwassers im Mai/ Juni 1999 konzentrierte sich der Großteil der Cessnabefliegungen. Die letzten Flüge fanden im August 1999 statt und dienten in erster Linie dem Vergleich der verschiedenen Filme. Erwartungsgemäß konnten die besten Ergebnisse mit dem bereits bei der ersten Befliegung im Februar 1999 eingesetzten SW Kleinbildfilm High Speed Infrared von KODAK in Verbindung mit einem Infrarotfilter erzielt werden. Die Schrägluftbilder in Abb. 33. und Abb. 34. illustrieren die Eigenschaft des Infrarotfilms besser als die Senkrechtaufnahmen: Deutlich sind die hell erscheinenden Bäume und der Waldboden von den tiefschwarzen Wasserflächen zu unterscheiden. Selbst dunkle Schatten erscheinen in einem helleren Ton als das Wasser, so dass kleine, inmitten des Waldes gelegene Überschwemmungsflächen hier besser als auf anderen Filmarten identifiziert werden können. Die geringe Schärfe der Bilder resultiert aus der relativ geringen Lichtempfindlichkeit des Films und der starken Lichtabsorption des Infrarotfilters. Aufgrund der dadurch erforderlichen kleinen Blende und langen Belichtungszeiten von 1/60 bzw. 1/125 Sekunde wirkten sich die hochfrequenten Vibrationen im Cockpit des Helikopters auf die Bildqualität aus.

Um die Sicht beim Photographieren nicht einzuschränken, wurde die Beifahrertür des Helikopters ausgehängt. Für Versuchszwecke wurden bei der ersten Befliegung im Februar durch Hinauslehnen aus der Helikopterkanzel nahezu lotrechte Luftbilder

¹⁷ Beispiele von Luftbilder und Videoaufnahmen des Februarfluges befinden sich auf den dieser Arbeit beiliegenden CD-ROMs

¹⁸ Die verwendeten Infrarotfilme waren neben dem sichtbaren Spektrum auch für die Wellenlängenbereiche von 0,78 µm bis 1,0 µm empfindlich

geschossen. Die anschließende Auswertung dieser "Senkrechtaufnahmen" mit der Software IMAGINE 8.2. am GI der Universität Heidelberg lieferte brauchbare Ergebnisse und führte zu dem Entschluss, eine Kameraaufhängung für künftige „Do it yourself“ Senkrechtaufnahmen zu bauen: In einem Probeflug erwies sich die selbst gebaute Helikopter-Kamerahalterung als funktionstüchtig und praxistauglich.

Die nächste Gelegenheit, die Kameraaufhängung einzusetzen, hätte sich bereits wenige Tage nach ihrer Fertigstellung beim Mai/Juni Hochwasser 1999 ergeben. Das Ausmaß der Überschwemmungen war jedoch so enorm, dass die KABS ihre Helikopter von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang zur Stechmückenbekämpfung einsetzte und nicht wie geplant dem Promotionsvorhaben für Bildflüge zur Verfügung stellen konnte. Hinzu kam, dass im für die Luftbilderstellung vorgesehenen Helikopter das Funkgerät ausfiel und aufgrund des Dauereinsatzes auch in den nächsten Wochen nicht repariert werden konnte. Ohne Funk war der Pilot aber nur noch berechtigt, Agrarflüge durchzuführen (Stechmückenbekämpfung) – nicht aber weitere Insassen mitzunehmen (Bildflug). Trotz intensiver Vorbereitungen konnten die Luftbilder vom Mai/Juni Hochwasser von 1999 deshalb bedauerlicherweise auch wieder nur durch improvisierte Befliegungen als Schrägluftbilder und nicht wie geplant als Senkrechtaufnahmen realisiert werden:

Am Mannheimer Flughafen konnte ein Fluglehrer, Herr Walter Graf, als Pilot für das Promotionsvorhaben gewonnen werden. Er vermittelte auch die beiden anderen Piloten des Projekts: Herrn Pettersen und Herrn Pitthan¹⁹. Die Piloten waren so freundlich, die Bildflüge ohne jegliche Bezahlung durchzuführen. Lediglich die Charterkosten der Maschinen mussten privat finanziert werden. So konnten trotz des Ausfalls des Helikopters doch noch Befliegungen des Untersuchungsgebietes durchgeführt und die Entwicklung der Inundationsflächen des Frühsommerhochwassers von 1999 detailliert dokumentiert werden²⁰. Nachdem sich Versuche, ohne bzw. mit offener Beifahrertür zu fliegen und so eine möglichst senkrechte Ausrichtung der Kamera zu erzielen, aufgrund der bei einer Cessna im Vergleich zu einem Helikopter wesentlich höheren Mindestgeschwindigkeit (und dem entsprechend stärkeren Fahrtwind) als nicht praktikabel erwiesen, wurden durch die Seitenfenster der Cessna Schrägluftbilder der Inundationsflächen geschossen. Zwar wurde auch zu Beginn des Hochwassers, als sich abzeichnete, dass der Helikopter für die Bildflüge nicht mehr rechtzeitig einsatzbereit sein würde, in den Universitätswerkstätten eine Kameraaufhängung zur lotrechten Kamerabefestigung für die Cessna in Auftrag gegeben. Doch bedauerlicherweise konnte diese nicht mehr vor dem Abklingen des Hochwassers fertiggestellt werden. Leider ereignete sich zwischen der Fertigstellung und Erprobung der beiden Kameraaufhängungen (Helikopter / Cessna) bis zur Einstellung der Feldarbeiten im Herbst 2000 im Untersuchungsgebiet kein größeres Hochwasserereignis mehr, so dass die beiden Kameraaufhängungen nicht mehr zum Einsatz kamen.

Auch wenn es sich deshalb bei den selbst erhobenen Luftbildern lediglich um photogrammetrisch schwer auswertbare Schrägluftbilder handelt, so muss doch betont werden, dass sie für eine visuelle Auswertung nach wie vor von enormen Wert sind. Letztlich sind sie die einzigen Luftbilder, die das Hochwasserereignis von 1999

¹⁹ Herr Pitthahn, ebenfalls Fluglehrer in Mannheim, verunglückte 1999 tödlich bei einem Schulungsflug in Speyer aufgrund eines während der Startphase auftretenden Motorschadens der Cessna. Der tragische Unfall ereignete sich eine Woche nach unserem letzten gemeinsamen Bildflug. Es sei ihm an dieser Stelle nochmals für seine großzügige und freundliche Hilfe gedankt.

²⁰ Beispiele von Luftbilder- und Videoaufnahmen der Befliegungen im Mai/Juni befinden sich auf den dieser Arbeit beiliegenden CD-ROMs

am Oberrhein überhaupt flächendeckend dokumentieren und werden mittlerweile bei mehreren Behörden für Planungszwecke oder Illustrationen genutzt.

IV.2. Aufbereitung und Auswertung der Luftbilder

Eine photogrammetrische *Auswertung der Schrägluftbilder* ist nicht möglich bzw. aufgrund des damit verbundenen Arbeitsaufwandes nicht sinnvoll. Ihre Auswertung bestand in einem rein visuellen Vorgang, der erst unter Zuhilfenahme topographischer Karten oder Senkrechtaufnahmen zu brauchbaren Ergebnissen führte. Üblicherweise werden die Informationen der Schrägluftbilder vom Interpreten frei Hand in eine Kartenvorlage übertragen. Die Schrägluftbilder sind bezüglich ihrer Inhalte leichter und eindeutiger zu interpretieren als entsprechende Senkrechtaufnahmen. Ideal ist deshalb eine Kombination aus Schräg- und Senkrechtluftbildern, um sowohl die Geometrie, als auch die Klassifizierung der untersuchten Flächen vollständig und richtig zu umzusetzen.

Für die *Auswertung der Senkrechtluftbilder* stehen die üblichen analogen und digitalen Auswertungsverfahren zur Verfügung:

IV.2.1. Analoge Auswertungsverfahren

Mit Hilfe eines optisch mechanischen Luftbildumzeichners von ZEISS wurden für Vergleichszwecke anhand von 10 Senkrechtaufnahmen Inundationsflächenkarten gezeichnet. Die geometrische Genauigkeit der mit dem Luftbildumzeichner erstellten Karten lag nur um etwa 5-10 Meter unter der der computergenerierten Karten (s.u.) – und das bei deutlich geringeren Bearbeitungszeiten. Bei Auswertungsarbeiten von panchromatischen SW-Luftbildern, die unter starkem Zeitdruck stehen und bei denen es nicht auf eine metergenaue Dokumentation der Überschwemmungen ankommt, ist deshalb die Nutzung eines klassischen Luftbildumzeichners und die anschließende Vektorisierung der erstellten Papierkarten am Digitalisiertablett einer rein rechnergestützten Luftbildauswertung vorzuziehen.

IV.2.2. Auswertung der Luftbilder mit Hilfe digitaler Bildbearbeitungssysteme

Dennoch bietet die *digitale Luftbildauswertung* mit den Methoden der Bildverbesserung und der automatisierten Klassifizierung vielversprechende Möglichkeiten zur effektiven Inundationsflächenerkennung. Sie stellte auch den Schwerpunkt der fernerkundlichen Auswertungsarbeiten dieses Projektes dar und konnte dank eines DAAD- Stipendiums auf eine Einladung von Prof. Dr. STOW hin am CESAR Lab der San Diego State University in San Diego / Kalifornien durchgeführt werden²¹.

Inwieweit rechnergestützte Luftbildanalysen eine Arbeitserleichterung gegenüber einer analogen Auswertung darstellen, hängt letztlich von der Frage ab, ob es mit der verfügbaren Soft- und Hardware möglich ist, Klassifizierungsmethoden zu entwickeln, welche im Luftbild Inundationsflächen eindeutig von nicht überschwemmten Flächen zu trennen vermögen.

Neben der Leistungsfähigkeit der Software und der Erfahrung des Bearbeiters hängt der Erfolg einer rechnergestützten Klassifizierung von der Art und Qualität der zu bearbeitenden Luftbilder ab. Das für unser Untersuchungsgebiet verfügbare Luftbildmaterial bestand zum überwiegenden Teil aus am Rechner aufgrund ihres geringen spektralen Informationsgehaltes nur schwer zu analysierenden panchromatischen SW Bildern. Hinzu kam, dass viele Luftbilder nicht genau zum

²¹ An dieser Stelle sei mein besonderer Dank an Prof. Dr. Doug Stow und die freundliche Hilfe der Dozenten und Studenten des "Center for Earth System Analysis Research" (CESAR) am Geographical Department der San Diego State University ausgesprochen

Zeitpunkt des Hochwasserereignisses erstellt wurden, sondern teilweise erst Wochen danach. Das Ausmaß der Überschwemmungen konnte aus den Luftbildszenen nur über die Interpretation von Indikatoren (z.B. anhand von Ernteschäden) erschlossen werden.

Dennoch konnten, – wie die folgenden Abschnitte zeigen werden – auch unter diesen erschwerten Bedingungen mit den Methoden der digitalen Bildbearbeitung befriedigende Interpretationsergebnisse erzielt werden. Das ist für die Praxistauglichkeit der verwendeten Analyseverfahren insofern von Bedeutung, als das die geringe Verfügbarkeit von geeignetem Luftbildmaterial keine Ausnahme sondern vielmehr die Regel ist. Während in den ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts keine Alternativen zu panchromatischen SW-Filmen existierten, werden sie auch gegenwärtig trotz der Entwicklung von Farbfilm und hoch auflösenden digitalen Aufnahmetechniken bei Bildflügen noch häufig verwendet. Künftige Untersuchungen und Forschungsvorhaben zur Dynamik von Inundationsflächen in anderen Flusssystemen werden deshalb auch bei der Suche nach Luftbildmaterial vor allem auf panchromatisches SW Bildmaterial zurückgreifen müssen.

Während die Schrägluftbilder aus eigenen Befliegungen von vorne herein nur für eine visuelle Auswertung gedacht waren, wurden sämtliche Senkrechtluftbilder der Reihenmesskammerbefliegungen mit den Mitteln der digitalen Bildbearbeitung aufbereitet und im GIS ausgewertet.

Digitalisierung der analogen Originaldaten

Die Digitalisierung der im Original als Kontaktabzug bzw. Mutterlichtpause vorliegenden Luftbilder erfolgte mit einem herkömmlichen, in anderen Fernerkundungsprojekten allerdings bereits bewährten Flachbrettscanner. Der Scanprozess wurde mit großer Sorgfalt durchgeführt, da er auf die Qualität aller weiteren Bearbeitungsschritte erheblichen Einfluss hat. Als Farbtiefe für den Scan der SW-Photos wurden 8-bit Graustufen mit 256 Grauwerten gewählt. Bei der Wahl der Auflösung war ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Dateigröße der digitalen Bilder zu finden. Um eine Pixelgröße, der eine Kantenlänge in Natura von 1m oder besser entspricht, zu erhalten, wurde die DPI Zahl in Abhängigkeit vom Originalmaßstab über folgende Formel bestimmt: räumliche Auflösung (Strecke in Natura die von einer Pixelkantenlänge repräsentiert wird) = $(M \times 2,54) / (dpi \times 100)$ in Metern, wobei M = Maßstabszahl, dpi = Scan Auflösung in dpi (dots per inch). Beispiel: Für die SW-Luftbildszene vom 18.7.1999 mit einer Maßstabszahl von etwa 18 000 wurde eine Auflösung von 600dpi gewählt, um eine Pixelgröße zu erhalten, der eine Kantenlänge von 0,76 m in Natura entspricht.

Bei einer weiteren Verkleinerung der Pixelkantenlänge wäre die Größe der erzeugten Bilddatei nicht mehr handhabbar gewesen, da der Anstieg des weiter benötigten Speicherplatzes einer quadratischen Wachstumsfunktion folgt. Die Arbeiten mit der Software 8.2 IMAGINE am Geographischen Institut der Universität Heidelberg zeigten, dass Luftbilddateien mit 30 MB von der Luftbildsoftware nicht mehr bearbeitet werden konnten. An den Rechnern im CESAR Lab mit 523MB Arbeitsspeicher und einer 8.4. IMAGINE Lizenz waren allerdings auch noch Dateien über 50 MB gut bearbeitbar.

Geometrische Korrektur

Die geometrische Korrektur der Luftbilder erfolgte mit den Werkzeugen der Software IMAGINE 8.4. von ERDAS. Bei diesem sehr zeitaufwendigen Verfahren (ca. 3 – 4 Arbeitswochen) wurden die gescannten Luftbilder über *Passpunkte*, – in der

englischsprachigen Literatur Ground Control Points (GCP), – von denen sowohl die Koordinaten im Gelände, als auch ihre Lage auf dem Luftbild bekannt waren, geometrisch entzerrt. Aufgrund der zentralperspektivischen Abbildungseigenschaften von Photographien, die eine zum Bildrand hin anwachsende Verzerrung bedingen, wurde nach Möglichkeit nur der Kernbereich der Luftbilder in Nadirnähe verwendet. Während die 1999er Luftbildszene über eine stereoskopische Überdeckung von 60% bzw. 20% verfügte, mussten bei den 1983er Bildern auch die Randbereiche genutzt werden. Zunächst wurde die aktuellste und räumlich hochaufgelöteste Luftbildszene (Luftbildszene vom 18.7.1999 mit Maßstab 1:18 000) georeferenziert. Mehrtägige Versuche, im Rahmen eines Geländepraktikums Passpunktkoordinaten im Gelände mit Hilfe eines Differential GPS der KABS (GPS 12cX gekoppelt mit der differential Black Box der Firma GARNMINS) einzumessen, scheiterten daran, dass der Differentialempfang die meiste Zeit versagte.

Die Gauss Krüger-Koordinaten der Passpunkte mussten deshalb über das GCP-Tool von IMAGINE am Digitalisiertablett von den DGK 5 Kartenblättern entnommen werden. Als Passpunkte wurden zumeist sowohl auf der DGK 5, als auch den Luftbildern eindeutig identifizierbare Straßenkreuzungen und –abzweigungen gewählt. Pro Luftbild wurden mindestens 25 GCPs verwendet. Das Resampling erfolgte mit der "nearest neighbour" Methode, da für die Zwecke der Inundationsflächeninterpretation eine möglichst unverfälschte Wiedergabe der ursprünglichen Grauwertverteilung im transformierten Luftbild oberste Priorität besitzt. Die große Anzahl von Passpunkten pro Luftbild ließ die Verwendung eines geometrischen Transformationsmodells zweiter polynomischer Ordnung zu. Als neues Projektions- bzw. Koordinatensystem für die entzerrten und resampten Luftbilder wurde Gauss-Krüger gewählt (Transformationsparameter in Tab. 7.). Plots der zu einem Mosaik zusammengeführten Luftbilder vom 8.6.1983 (Originalmaßstab ca. 1:34.000) und vom 18.7.1999 (Originalmaßstab ca. 1:18.000) befinden sich im Anhang.

Rektifikation (rectification) der übrigen Luftbildszenen

Die sehr sorgfältig georeferenzierte Luftbildszene vom 18.7.1999 diene nun als Grundlage für die Rektifizierung aller anderen vorliegenden Luftbilder. Als Passpunkte wurden neben Straßenkreuzungen auch einzelstehende Bäume oder andere auf beiden Luftbildern eindeutig identifizierbare Objekte gewählt. Die Zahl der GCPs lag je nach Maßstab zwischen 30 und 50 Punkten. Resampling Methode, Koordinatensystem sowie alle anderen Transformationsparameter wurden aus der Georeferenzierung der 99er Luftbilder übernommen (siehe Abb. 35.).

Mosaiking

Der Verarbeitungsprozess des Mosaikings,- eines Zusammenfügens der entzerrten Luftbilder zu einer zusammenhängenden Luftbildkarte, - dient in erster Linie einer besseren Wiedergabe der Luftbilder im GIS. Die für dieses Projekt verwendete GIS Software ArcView/ArcInfo gibt Luftbilder in einem nord-süd-orientierten rechteckigen Ausschnitt wieder. Den außerhalb des eigentlichen Luftbildes liegenden Pixeln wird in ArcView der Wert 0 (entspricht dem Pixel Farbwert „Schwarz“) zugeordnet. Zum einen werden dadurch die geometrisch korrigierten Luftbilder mit einem die Analyse störenden schwarzen Rand wiedergegeben, zum anderen belasten die 0-Werte den Speicherplatz und können die Dateien um das 1.5 fache vergrößern. Am einfachsten ließ sich dieses Problem durch das Mosaiking und ein Nord-Süd-orientiertes Clippen der Bilder mit den *Mosaiking*- und *Subset Image* Befehlen von Imagine 8.4. lösen (siehe Abb. 36.).

IV.2.3. Identifizierung von Wasserflächen im Luftbild

Ob Wasserflächen in einem weitgehend automatisierten Bildanalyseprozess am Rechner eindeutig auf einem Luftbild identifiziert werden können, hängt neben der Leistungsfähigkeit der Software vor allem von der Wiedergabe der Wasserflächen im Luftbild ab. Überschwemmungsflächen können bei Hochwasserereignissen in ihrem Erscheinungsbild sehr stark variieren. Ihre Reflexions- und Absorptionseigenschaften gegenüber elektromagnetischer Strahlung wird von zahlreichen veränderlichen Faktoren bestimmt. So haben beispielsweise die Tiefe des Wasserkörpers, das Mitführung von Schwebfracht, das Aufschwimmen von Getreibsel, die Zusammensetzung der Vegetation im Überschwemmungsbereich, die Bodenbeschaffenheit und -nutzung der überschwemmten Fläche oder der Sonnenstand zum Zeitpunkt der Aufnahme einen erheblichen Einfluss auf das Reflexions- und Absorptionsverhalten der Inundationsfläche. Inwieweit die reflektierte Strahlung vom Fernerkundungssensor aufgezeichnet werden kann, hängt wiederum von der spektralen Empfindlichkeit der verwendeten Filme und Filter ab.

Inwieweit nun angesichts dieser zahlreichen, stark von Aufnahme zu Aufnahme variierenden Einflussfaktoren Inundationsflächen anhand eines Luftbildes überhaupt zweifelsfrei identifiziert werden können, war eine der Hauptfragen dieses Promotionsprojekts.

IV.2.3.1. Wasserflächen im panchromatischen SW-Bild

Klassifizierungen werden von einer Luftbildinterpretationssoftware üblicherweise über Verfahren der Grauerterkennung vorgenommen. Bei *überwachten Klassifizierungen* werden anhand von Referenzflächen für die jeweiligen Untersuchungsobjekte (z.B. Strassen, Wiesen, Wasser) charakteristische Grauwerte definiert, in Klassen zusammengefasst und die gewonnene Klassifizierung anschließend auf das gesamte Luftbild angewendet. Dieses Verfahren ist nur dann erfolgversprechend, wenn sich einem Untersuchungsobjekt auch tatsächlich eindeutige und unverwechselbare Grauwertcluster zuordnen lassen.

In panchromatischen SW Luftbildern werden Inundationsflächen keineswegs durch charakteristische Grauwertbereiche repräsentiert, sondern verfügen über eine erstaunliche Variationsbreite, wie die Beispiele in Abb. 37. verdeutlichen: In jeder der 4 Abbildungen ist eine Wasserfläche mit einem kleinen Rechteck gekennzeichnet. Das Histogramm auf der rechten Seite zeigt für die markierten Wasserflächen die Anzahl der Pixel je Grauwert an. Die Grauwerte, welche im panchromatischen SW-Bild Wasser bzw. die für uns interessanten Inundationsflächen repräsentieren, liegen zwischen 0 und 242 – reichen also von vollkommenem Schwarz bis fast Weiß. Ein auf einer rechnergestützten Grauwertanalyse von Panchromatischem SW-Luftbildmaterial basierendes Verfahren kann somit für eine Identifizierung von Inundationsfläche von vorne herein als untauglich ausgeschlossen werden und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch nicht weiter verfolgt.

IV.2.3.2. Wasserflächen im Infrarotluftbild

Wasser verfügt im nahen Infrarot über charakteristische, für eine rechnergestützte Luftbildinterpretation nutzbare Absorptionseigenschaften (siehe auch Abb. 32. bis 34.). Wie tief muss der Wasserkörper aber sein, damit eine im Luftbild wiedergegebene Absorption des Infrarot eintritt? Tritt dieser Effekt nur bei tiefen Wasserkörpern oder auch bei den zumeist nur wenige Dezimeter tiefen Inundationsflächen in der Rheinaue auf?

Die Auswertung der IR-Luftbilder von 1975 ergab, dass diese Absorbtionseigenschaft nicht nur für tiefe Wasserkörper wie den Rhein, sondern auch für flache und teilweise sogar vegetationsbestandene Überschwemmungsflächen gilt: In den Abb. 38.a.-d. ist für die auf dem jeweiligen Luftbild mit einem Kästchen markierten Wasserflächen die Häufigkeit der einzelnen Grauwerte in nach den RGB- Bändern getrennten Histogrammen aufgetragen. Während Wasser im blauen und grünen Band keine charakteristische Grauwertverteilung aufweist, ist im (das nahe Infrarot repräsentierenden) roten Band eine Konzentration der Grauwerte um den Wert 11 herum zu erkennen. Bemerkenswert ist, dass selbst Wasserflächen, welche im sichtbaren Wellenlängenbereich spiegeln, im nahen Infrarot elektromagnetische Strahlung noch weitestgehend absorbieren (vgl. Abb. 38.a. und Abb. 38.d).

Die Abb. 38.b. und 38.c. zeigen nur etwa 30 –50 cm hoch überschwemmte Wiesen. Obwohl es sich hier bei den betrachteten Luftbildausschnitten im Gegensatz zu denen in Abb. 38.a. oder 38.d. also um geringmächtige Wasserkörper handelt, ist auch hier eine Konzentration der Grauwerte um den Wert 11 herum zu beobachten. Der Schwerpunkt der Grauwertverteilung wird in diesen Abbildungen allerdings aufgrund von stärker reflektierendem, aus dem Wasserkörper herausragenden Gras und Schilf zu den höheren Grauwerten hin verschoben.

Die Auftrennung des IR Falschfarbenbildes in Abb. 39.a. in seine RGB Bänder (Abb. 39.b bis d) veranschaulicht die Bedeutung der nahezu völligen Absorption von Wasser im nahen Infrarot für die Identifizierung von Inundationsflächen: Deutlich ist im (die Grauwerte des nahen Infrarots repräsentierenden) roten Band (Abb. 39.c.) die nahezu schwarze Wiedergabe von Wasserflächen zu erkennen, wogegen im grünen und blauen Band eine solche Unterscheidung wesentlich schwerer fällt. Bei einer genaueren Betrachtung des roten Bandes werden auch Strukturen sichtbar, die im Falschfarben IR Bild nicht erkennbar waren. So ist beispielsweise in einigen Ackerflächen am Südrand des Saumagens durch die dunkle Darstellung des Bodens eine starke Durchfeuchtung des Untergrundes zu erkennen. Aus Geländearbeiten im Sommer 1999 ist bekannt, dass es sich hierbei um ein Austrittsfenster gespannten Druckwassers handelt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme muss der Boden bereits stark durchfeuchtet gewesen sein.

Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Interpretation der im nahen Infrarot gut zu erkennenden Bodenfeuchte im Hinblick auf die Verbreitung von Druckwasserflächen immer mit zeitgleich zur Luftbilderstellung durchgeführten Bodenuntersuchungen einhergehen muss, da die Gefahr einer Fehlinterpretation in diesen Fällen sehr groß ist.

Mit dem Classifier tool von IMAGINE 8.4. wurden die Farbinfrarotbilder einer *überwachten Klassifizierung* unterworfen. Anhand von 40 Testflächen wurden 4 Klassen gebildet: Klasse 1 (Wald, Acker, Wiese und Gebüsch bzw. Waldrand) Klasse 2 (tiefe Wasserflächen), Klasse 3 (flache Wasserflächen), Klasse 4 (Sonstiges wie z.B. Feldwege). Alle Pixel des Originalbildes wurden anschließend in IMAGINE einer dieser Klassen zugeordnet. Relevant für unsere Untersuchung war ausschließlich die richtige Zuordnung von tiefem Wasser und flachem Wasser. Wie in Abb. 40. zu sehen, konnten mit der unüberwachten Klassifizierung gute Ergebnisse erzielt werden. Große zusammenhängende Wasserflächen wurden zuverlässig der richtigen Klasse zugeordnet. Ferner wurden auch die, selbst bei einer visuellen Interpretation schwer zu identifizierenden, schilfbestandenen Wasserflächen der richtigen Klasse zugeordnet. Allerdings wurden teilweise auch Schlagschatten fälschlicherweise der Klasse "tiefen Wasserflächen" zugeordnet. Ein leichtes "Rauschen" – eine falsche Zuordnung von einzelnen, isolierten Pixeln zur Klasse "tiefes Wasser" - ist ebenfalls

festzustellen. Letzteres ließ sich jedoch leicht in einem Filterungsprozess bzw. durch eine zweite Klassifizierung eliminieren.

Für den Erfolg einer solchen *überwachten Klassifizierung* ist die sorgsame Auswahl der Testflächen entscheidend. Da die Erhebung von Referenzdaten in den Testflächen zeitaufwendig ist, muss der Bearbeiter das Untersuchungsgebiet bereits gut kennen, um die Ausweisung von ungeeigneten Flächen zu vermeiden und den Arbeitsaufwand für den iterativen Klassifizierungsprozess zu minimieren.

IV.2.3.3. Identifizierung von Inundationsflächen im Luftbild anhand von Indikatoren

Der überwiegende Teil des im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfügbaren Luftbildmaterials bestand jedoch leider nicht aus Infrarotbildern, sondern aus panchromatische SW Bildern, welche zudem teilweise erst Wochen nach dem maximalen Wasserstand eines Hochwasserereignisses aufgenommen wurden. Das Ausmaß der Überschwemmungen ist auf diesen Bildern nur noch über Indikatoren erschließbar. Der wichtigste Indikator ist die Veränderung der Vegetationszusammensetzung infolge des temporären Wasserüberangebots. Bei Hochwasserereignissen, die sich im Zeitraum von Mai bis Juli ereignen, weisen vor allem Ackerflächen charakteristische Veränderungen im Pflanzenbewuchs auf. Ernteschäden und ihre Darstellung im Luftbild wurden beim Junihochwasser 1999 durch die zahlreichen Geländebegehungen ausführlich untersucht. Wenn auch aus diesen Vegetationsindikatoren keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Zeitpunkt von Überschwemmungen und Trockenfallen der Fläche gezogen werden können, so zeigen sie doch zumindest an, welche Flächen über mehrere Tage hinweg mit Wasser bedeckt waren. Der deutlichste Indikator ist das Absterben von ganzen Pflanzenarten. Getreide - und auch die meisten anderen agrarisch genutzten Pflanzen - überleben eine Überschwemmung von mehreren Tagen nicht²². Aufgrund der eingangs geschilderten geomorphologischen Prozesse, welche die Rheinniederung seit Beginn des Holozäns geformt haben, ist das Mikrorelief zumeist in lang gezogene Senken, die oftmals auch zu Rinnen, Gräben und Schluten ausgetieft sind, gegliedert. Diese Geländestrukturen prägen das räumliche Muster der Überschwemmungsflächen und sind in Ackerflächen durch den bemerkenswert abrupten Übergang von gesunden zu abgestorbenen Feldfrüchten ablesbar (Beispiele: siehe Abb. 41.).

Auf den überschwemmten Flächen kann es je nach Vegetationsstadium und Pflanzenart zu deutlich im Luftbild erkennbaren Wachstumsstörungen bzw. zum völligen Absterben der Pflanzen kommen. Bei länger anhaltenden Überschwemmungen war im Juni 1999 oftmals die Bildung von Algent Teppichen zu beobachten, welche auch nach Trockenfallen der Flächen im Luftbild deutlich erkennbar waren. Des weiteren markierten Geschwemmte Linien von abgestorbenen Pflanzen, welche von der Strömung verdriftet bzw. in den Druckwasserflächen entsprechend der vorherrschenden Windrichtung auf eine Uferseite geblasen wurden, ehemalige Uferlinien der Inundationsflächen (siehe Abb. 42.).

Eine softwarebasierte Identifizierung von Vegetationsindikatoren über ihre Grauwerte ist im panchromatischen Schwarzweißluftbild nicht sinnvoll. Die Beispiele in Abb. 41.

²² Eine detaillierte Untersuchung über die Wasserresistenz verschiedener Getreide und Gemüsearten bzw. der in der Rheinniederung anzutreffenden Flora sowie die Wiedergabe der durch ein Wasserüberangebot bedingten Vegetationsveränderungen im Luftbild wäre für die Identifizierung von Inundationsflächen mittels fernerkundlicher Methoden von großem Wert.

und Abb. 42. zeigten deutlich, in welcher vielfältigen Formen das hochwasserbedingte Wasserüberangebot in den Druckwasserflächen Ernteschäden bzw. Vegetationsänderungen hervorrufen: Genau wie bei der Identifizierung von Wasserflächen würde bei einem Versuch, Ernteschäden über eine Grauwerterkennung zu klassifizieren, der Arbeitsaufwand den zu erwartenden Nutzen übersteigen. Eine visuelle Interpretation durch einen mit dem Erscheinungsmuster der Vegetationsindikatoren vertrauten Luftbildinterpreten ist weniger arbeitsintensiv und liefert nach wie vor die besseren Ergebnisse.

Eine wichtige Hilfe für derartige visuelle Interpretationen bieten die Verfahren der digitalen Bildverbesserung (Image enhancement). Neben der bisher vorgestellten Klassifizierung anhand von Grauwerten stellt die *Texturanalyse* hier eine weitere Möglichkeit der Flächenerkennung dar: Ein gesundes Kornfeld hat eine andere Textur als ein geschädigtes, eine trockene Wiese eine andere als eine überschwemmte Wiese. Die besten Ergebnisse bei der Aufbereitung von Luftbildern für eine visuelle Interpretation von hochwasserbedingten Vegetationsveränderungen konnten mit einem varianzbasierten Texturfilter erzielt werden. Als Größe für das Filterfenster bewährte sich ein 3x3 Pixel großes Filterfenster, die Anwendung größerer Fenster (5x5 oder 7x7) ergab keine besseren Ergebnisse, sondern resultierte lediglich in einer größeren Unschärfe des Ergebnisbildes.

Wie in Abb. 43. zu erkennen, werden bei der varianzbasierten Texturanalyse Übergänge von einer Textur zur Nächsten hervorgehoben, werden die "Kanten" von Flächen gleicher Textur betont. Dieser Effekt erleichtert bei einer visuellen Interpretation die Unterscheidung zwischen geschädigten und nicht geschädigten Flächen. Flächeneinheiten mit großer "Bewegung" – also Flächen mit hoher Varianz (wie z.B. Wald) werden hell (hoher Grauwert) wiedergegeben. Flächen mit einer gleichförmigen Textur (wie z.B. Wasser) weisen eine niedrigere Varianz auf und werden dunkel wiedergegeben (niedriger Grauwert). Geschädigte Ernteflächen weisen, wie Abb. 43. zeigt, genau wie gesunde Kornfelder eine niedrige Varianz auf und sind nur durch die Form ihrer hellen Begrenzungslinien voneinander zu unterscheiden. Während also durch einen Varianzfilter die Übergänge zwischen zwei Flächen mit unterschiedlicher Textur deutlich hervorgehoben werden, geht die detaillierte Grauwertinformation der Flächen selbst bei diesem Bildbearbeitungsschritt verloren. Diese Information ist nach wie vor am besten in den Grauwerten des Originalbildes erhalten. Um nun sowohl die Texturanalyse als auch die ursprüngliche Grauwertverteilung bei einer visuellen Interpretation im GIS nutzen zu können, wurden beide Informationsebenen zu einem Falschfarbenbild überlagert. Das Ergebnis ist in Abb. 44. dargestellt: Zunächst wurden über das Original-Luftbild je ein Varianz- und ein Skewness-Filter gelegt. Anschließend wurde ein Falschfarbenbild generiert, wobei dem Original-Luftbild das Rote Band, dem varianzbasierten Texturbild das Grüne Band und dem Skewness-basierten Texturbild das Blaue Band zugeordnet wurde. In den so zusammengesetzten Luftbildern sind Ernteschäden und Veränderungen in der Pflanzenszusammensetzung sehr deutlich zu erkennen und ihre Umrisse einfach abgrenzbar. Die Bildaufbereitung war für die Interpretation der panchromatischen SW-Luftbildszenen eine deutliche Arbeitserleichterung. Bei nicht zweifelsfrei auf den Falschfarbenbildern zu interpretierenden Flächen wurden die Originalbilder sowie die Schrägluftbilder aus eigenen Befliegungen zu Hilfe genommen.

IV.2.3.4. Implementierung der Auswertungsergebnisse ins GIS

Als nächstes gilt es, die als Inundationsflächen identifizierten Flächen in ein GIS zu implementieren. Hierzu ist es in der Regel aufgrund geringeren Speicherbedarfs und schnellerer Verarbeitungszeiten vorteilhaft, die als Rasterdaten vorliegenden Klassifizierungsergebnisse vektorisiert – d.h. den Umriss der klassifizierten Flächen als Punkt- und Vektorfiles abzuspeichern und als eine eigene Informationsebene in eine Vektor-GIS zu implementieren. Es kamen zwei verschiedene Vektorisierungsverfahren zum Einsatz:

IV.2.4. Vektorisierung von klassifizierten Luftbildern mit dem Vector Tool von IMAGINE

Ein weiterer Vorteil der softwaregestützten Auswertung von digitalen Luftbildern besteht darin, dass als Rasterdaten vorliegenden Klassifizierungsergebnisse mit Hilfe des Vector Tools von IMAGINE 8.4. (oder anderer Vektorisierungssoftware) bereits automatisiert als (als ArcInfo Coverage abgespeicherte) Polygone vektorisiert werden können. Die mit einer unüberwachten Klassifizierung identifizierten, als Rasterfile vorliegenden Wasserflächen der Infrarotluftbilder von 1975 konnten so problemlos in ArcInfo Coverages transformiert und nach ArcView importiert werden. Für die praktische Arbeit bedeutet dies, dass mit Luftbildern welche während eines Hochwasserereignisses mit im nahen Infrarot empfindlichen Sensoren aufgenommen werden, direkt nach der Georeferenzierung der Bilder bereits erste Überschwemmungsflächenkarten als Vektordaten im GIS vorliegen und weiterverarbeitet werden können. Für Anwendungsbereiche die, wie die biologische Stechmückenbekämpfung, unter hohem Zeitdruck arbeiten, bietet eine derartige Integration von digitaler Luftbilderstellung und Datenauswertung im GIS neue Wege der Arbeitsrationalisierung. Bereits wenige Stunden nach der Durchführung eines Bildfluges liegen Karten der aktuellen Überschwemmungsflächensituation vor und können zusammen mit anderen im GIS abgespeicherten räumlichen Informationen (z.B. Nähe der Überschwemmungsfläche zu Ortschaften oder Potential an Stechmückenlarven) für die Einsatzplanung der aktuellen Stechmückenbekämpfung herangezogen werden.

IV.2.5. Digitalisierung von Inundationsflächen am Bildschirm

Die zweite – mit einem erheblich höheren Arbeitsaufwand verbundene – Methode der Vektorisierung von Inundationsflächen besteht in einer Digitalisierung des Flächenumrisses am Bildschirm. Das Arbeitsprinzip ist das gleiche wie bei einem klassischen opto-mechanischen Luftbildumzeichner. Anstatt auf ein leeres Blatt oder eine Papierkarte zu zeichnen, wird der Umriss der Inundationsflächen direkt am Bildschirm mit der Maus als Eingabewerkzeug abgezeichnet. Der Vorteil gegenüber den mechanischen Luftbildumzeichnern besteht vor allem in einer höheren Präzision, da beim Zeichnen in das Bild gezoomt werden kann. Gute Erfahrungen wurden bei dieser Art der Bildschirmvektorisierung mit der Software ArcView 3.1. gemacht.

V. Ergebnisse der empirischen Inundationsflächenkartierungen

Die auf Geländearbeiten und Luftbildauswertung beruhende Erfassung und Kartierung der Überschwemmungen im Untersuchungsgebiet zwischen Mannheim und Speyer bildete den empirischen Schwerpunkt des Promotionsprojektes.

Zwei Ziele wurden mit den aufwendigen Arbeiten im Gelände und in der Luft verfolgt:

Zum einen die *Erhebung verlässlicher*, d.h. in Raum und Zeit hochaufgelöster *Inundationsflächendaten*. Ohne derartige Daten lässt sich ein Inundationsflächenmodell nicht auf seine Tauglichkeit hin überprüfen. Da es aber gerade einer der Ansprüche dieser Arbeit war, ein einfaches, dafür aber realistisches und praxistaugliches Modell der Inundationsprozesse zu entwickeln, war die Erhebung dieser Daten unerlässlicher Bestandteil des Projektes. Bei der Erhebung von räumlich und zeitlich exakt erfassten Überschwemmungsflächendaten konnte nicht auf die Erfahrungen bisheriger Arbeiten zurückgegriffen werden, weshalb die bereits diskutierten Methoden an die spezifische Aufgabenstellung angepasst wurden.

Zum anderen hatten die Vorarbeiten im Jahre 1997 und die Gespräche mit den „Stechmückenbekämpfern“ der KABS deutlich gemacht, dass das Phänomen der *Druckwasserflächen* bei bisherigen Untersuchungen nicht genügend gewürdigt wurde. In den gängigen Modellen zur Inundationsdynamik des Rheins wurden sie *nicht berücksichtigt* (siehe I. Stand der Forschung). Die geringe Beachtung der Druckwasserflächen steht in einem bemerkenswerten Widerspruch zu ihrer großen Bedeutung für zahlreiche Anwendungsbereiche:

?? großes Schadenspotential von Druckwasser

Durch Hochwasser entstandene Schäden konnten im Untersuchungsgebiet während der Feldarbeiten vor allem durch Druckwasser und nicht etwa durch den ausufernden Rhein beobachtet werden. Während die außendeichs gelegenen Freizeitanlagen wie z.B. Zeltplätze und Clubhäuser auf den Überschwemmungsfall eingerichtet sind, hat man sich bei der Erstellung von neuen Gewerbe- und Wohngebieten vor allem seit den 80er Jahren auf den Schutz der Dämme verlassen und die Gefahr von bei lang anhaltenden Hochwasserereignissen aus dem Untergrund aufquellendem Druckwasser in seiner Bedeutung offensichtlich unterschätzt²³.

?? *Bedeutung von Druckwasserflächen als Stechmückenbrutplatz*

Das Auffinden von Druckwasserflächen und die Kenntnis ihrer Dynamik hat in der biologischen Stechmückenbekämpfung einen außerordentlich hohen Stellenwert. Zum einen befinden sich die Druckwasserflächen oftmals näher an den Wohngebieten als die innendeichs gelegenen Inundationsflächen, weshalb die dort schlüpfenden Stechmücken nur kurze Strecken bis zu den Siedlungen zurücklegen müssen. Zum anderen bieten diese Flächen den Stechmückenlarven oftmals optimale Entwicklungsbedingungen. Die Untersuchungen zeigten, dass in einmal gefluteten Druckwasserflächen das Wasser z.T. erheblich länger stehen blieb als das

²³ Eine systematische und räumlich in den Meterbereich (GPS) aufgelöste Erhebung von Sachschäden in der Rheinaue durch Begehung und Befragung der Anwohner wäre in diesem Zusammenhang sehr aufschlussreich, da gerade in den bebauten Bereichen das Auftreten von Druckwasser mit unseren fernerkundlichen Methoden nicht mehr erfasst werden kann.

in den dem Rhein in Verbindung stehenden Überschwemmungsflächen. In Senken die im Mai 1999 geflutet wurden stand das Wasser teilweise noch bis in den September hinein. Natürliche Fressfeinde der Stechmückenlarven wie z.B. Fische fehlen in Druckwasserflächen. Zudem verhalten sich die einzelne dieser Flächen sehr individuell, was Zeitpunkt und Menge des aufquellenden Wassers anbelangt. Dies erfordert von den Stechmückenbekämpfern erhöhte Aufmerksamkeit, da diese Wasserflächen sonst leicht übersehen werden können bzw. der Zeitpunkt des Larvenschlüpfens verpasst wird.

?? *Schwere Berechenbarkeit von Druckwasserflächen im Modell*

Druckwasserflächen weisen eine erstaunlich Vielfalt bezüglich ihres Inundationsverhaltens auf und stellen für jedes Überschwemmungsflächenmodell eine besondere Herausforderung dar. Die Berechnung und Vorhersage der komplexen Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Uferfiltrat ist mittels deduktiver Modelle für größere Untersuchungsgebiete kaum realisierbar, da bereits die Inputdaten und Werte der beeinflussende Faktoren nicht vorliegen. Druckwasserflächen wurden bei deduktiven Modellen oftmals nur unter unzulässigen vereinfachenden Annahmen berechnet bzw. wurden gar nicht erst in das Modell miteinbezogen.

Ein weiteres bereits eingangs formuliertes Ziel der empirischen Feldarbeiten war es deshalb angesichts dieses bestehenden Mangels an Druckwasserflächenuntersuchungen, ihre Entstehung während verschiedener Hochwasserereignisse zu beobachten, zu dokumentieren und in einem einfachen Modell zu beschreiben, um sie so bei der Erstellung eines Inundationsflächenmodells mit berücksichtigen zu können.

Dieses Vorhaben wird in mehreren Arbeitsschritten realisiert, an deren Ende die Ausweisung von Inundationsflächentypen steht.

V.1. Ursachen und Ausmaß der Überschwemmungen der untersuchten Hochwasserereignisse

Das jeweils unterschiedliche Ausmaß der aufgetretenen Inundationen legt eine Einteilung der Hochwasserereignisse bzw. ihrer Überschwemmungsflächen in zwei Gruppen nahe – in die Überschwemmungen mit einer statistischen Eintrittswahrscheinlichkeit von einem bzw. wenigen Jahren und in außerordentlich starke Ereignisse wie die „Jahrhunderthochwasser“ des Jahres 1999.

Die im folgenden vorgestellten Ergebnisse beruhen im Wesentlichen auf Geländearbeiten und Luftbildaufnahmen aus dem Zeitraum vom 1.1.1997 bis zum 15.1.2001. Ein Teil der ausgewerteten Inundationsflächenkartierungen entstand bereits während der Diplomarbeit (1997) und im Zuge der Vorbereitungen des Promotionsprojekts. Die Hauptarbeit der Datenerhebung erfolgte vom 1.4.1999 bis zum 15.1.2001 (in Abb. 45. rot unterlegt).

In Abb. 45. ist die Wasserstandsganglinie des Rheins am Pegel Maxau während des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich der gewählte Zeitraum als äußerst günstig für die Beobachtung der Inundationsflächen- und insbesondere der Druckwasserflächendynamik erwies: Die schwarze Linie in Abb. 45. bei 449cm markiert den Mittelwasserstand des Pegels der letzten 30 Jahre. Im Beobachtungszeitraum herrschten fast durchgängig überdurchschnittlich hohe Wasserstände vor, lediglich 1997 traten vereinzelt Niedrigwasserstände auf. In den Jahren 1999 und 2000, den Jahren der intensivsten Geländearbeit, lag der

durchschnittliche Wasserstand um etwa 30 cm über dem 30-jährigen Mittel. Bedeutsamer als die generell hohen Wasserstände des Rheins waren jedoch die zahlreichen Hochwasserereignisse, die sich während des Untersuchungszeitraumes ereigneten. Neben den kleineren Hochwasserereignissen mit Spitzen von 600 bis 700 cm (März und Juli/August 1997, Januar/Februar 1998, Februar/März, Mai, Juni und Juli 2000 – siehe auch Abb. 45.) boten vor allem die Hochwasserereignisse des Jahres 1999 ausreichend Gelegenheit zur Untersuchung der Inundationsprozesse im Untersuchungsgebiet.

V.1.1. Ursache der Hochwasserereignisse mit jährlicher (und höherer) Eintrittswahrscheinlichkeit (WQ1)

Die kleineren beobachteten Ereignisse im Jahre 1997 mit Wasserständen bis 700 cm sind in ihrer statistischen Häufigkeit als jährliche Ereignisse einzustufen. Die Inundationen dieser Flächen betrafen vor allem die rezente Aue und flussnahen Druckwasserflächen. Ihre Ursache lag in starken Niederschlägen in Kombination mit Schneeschmelzprozessen in den Alpen, teilweise auch mit der Schneeschmelze in Schwarzwald und Vogesen.

Februarhochwasser 1997

Das *Februarhochwasser* 1997 hatte seine Ursache in westlichen Höhenströmungen, die besonders im Schwarzwald zu starken Niederschlägen und dem Einsetzen der Schneeschmelze führten. Vom 11. bis 28. Februar dominierte über Mitteleuropa eine meist stürmische westliche Höhenströmung. Eingelagerte Tiefdruckgebiete und deren Ausläufer führten im Wechsel grönländische Polarluft, mäßig warme Meeresluft und atlantische Tropikluft nach Deutschland. Dadurch kam es ab dem 11. Februar verbreitet zu Regen-, Schnee-, Hagel- und Graupelschauern und im Schwarzwald und den Vogesen zur Schneeschmelze. Vor allem im Schwarzwald führten Gewitter zu markanten Niederschlägen. So fielen am 25. Februar in Freudenstadt 113 mm, in Besenfeld 129 mm (Nordschwarzwald) und in Gaggenau 125 mm (Nordschwarzwald). Selbst in Karlsruhe wurden 81 mm gemessen (DWD, 1997, Nr. 2, S. 1).

Das Hochwasser baute sich aus zwei Wellen auf (siehe Abb. 46.). Eine erste Welle erreichte den Pegel Speyer am 15. Februar und hatte mit 440 cm ihr Maximum bereits am 16. Februar; bis zum 24. sank der Wasserstand wieder auf 339 cm. Eine zweite Welle traf am 25. Februar ein und ließ den Rhein bis zum 28. Februar um mehr als 2 m auf 570 cm anschwellen. Bis zum 5. März sank der Pegel wieder unter die 420 cm - Marke²⁴.

Sommerhochwasser 1997

Die *frühsommerlichen Hochwasserwellen*, die im langjährigen Vergleich normalerweise Anfang Juni das Versuchsgebiet erreichen, verzögerten sich im Jahr 1997 bis Ende Juni/ Anfang Juli und fielen im Vergleich zu den Vorjahren nur gering aus. Ein wesentlicher Grund hierfür ist in der geringen Schneemächtigkeit in den Alpen und der in den unteren Höhenlagen bereits im Frühjahr erfolgten Schneeschmelze zu sehen. Die sommerlichen Hochwasser wurden 1997 vor allem durch heftige sommerliche Niederschläge ausgelöst. Ihr Schwerpunkt lag in Ostdeutschland und den Ostalpen und bewirkte dort die katastrophalen Hochwasser in Tschechien, in Ungarn und in Ostdeutschland (v.a. im Oderbruch) und damit außerhalb des Einzugsgebietes des Rheins. Von der Gefahr katastrophaler

²⁴ Die Pegeldata wurden freundlicherweise vom BfG Koblenz zur Verfügung gestellt

Hochwasser waren die Abflüsse des Rheins weit entfernt. Mit einem Wasserstand von 591 cm wies er keinen außergewöhnlichen hohen Maximalwert für den Monat Juli auf. Ungewöhnlich war jedoch die Länge, mit welcher der Rhein seine relativ hohen Wasserstände beibehielt (siehe Abb. 46.): Zwischen dem 23. Juni und dem 4. August sank der Rheinstand nur für zwei Tage unter die 470 cm Marke. Das Sommerhochwasser setzte sich aus mehreren, dicht aufeinanderfolgenden Hochwasserwellen zusammen und hatten ihre Ursache in immer neuen Regenfronten: Die Niederschläge des Junis waren in Südwestdeutschland um etwa 50% höher als das Niederschlagsmittel der Jahre 1960-1990. Es kam vom 23. bis 25. Juni aufgrund des Einbruchs überwiegend arktischer Kaltluft aus Fennoskandien in Deutschland verbreitet zu Regen und Schauern mit Gewitter. Im bereits durch Schmelzwasser aus den höheren Lagen der Alpen angeschwollenen Rhein bewirkten diese Niederschläge eine mäßige Hochwasserwelle, die mit 521 cm für den Pegel Speyer am 24. Juni ihr Maximum hatte (entspricht etwa 160 cm ü. MW). Vom 26. bis 30. Juni war unter dem Einfluss eines westeuropäischen Höhentrogess russische Polarluft vorherrschend. Der Vorstoß afrikanischer Tropikluft war vom 28. bis 30. Juni mit Gewittern und Niederschlägen verbunden, die sich aber vor allem in den Ostalpen und Ostdeutschland abregneten. Der Rheinwasserstand sank in diesem Zeitraum und erreichte am 5. Juli in Speyer wieder einen Wasserstand von 458 cm. Die nächste Hochwasserwelle, die das Versuchsgebiet erreichte, wurde durch Starkniederschläge in Süddeutschland (v.a. im Alpenraum) ausgelöst: Vom 6. bis 13. Juli entstand auf der Rückseite eines nach Osten schwenkenden Höhentrogess eine nördliche Strömung. Mit ihr wurde warme Meeresluft, später Tropikluft herangeführt. Die Niederschläge traten vor allem in Süddeutschland auf und erreichten z. B. am 6. Juli in Oberstdorf 30 mm. Die dadurch ausgelöste Hochwasserwelle erreichte im Untersuchungsgebiet am 8. Juli mit 591 cm ihr Maximum (entspricht etwa 230cm ü. MW). Bis zum 18. Juli sank der Wasserstand aber wieder rasch auf 471 cm. Vom 18. bis 23. Juli kam es bei hohem Luftdruck über dem Nordmeer und dem fennoskandischen Raum über Mitteleuropa zur Entwicklung eines Tiefdruckgebietes, das sich nach Osten verlagerte. In Deutschland trat verbreitet Regen auf. Eine typische Vb-Tiefdrucksituation bewirkte Starkniederschläge, die sich aber auf den Norden, Nordosten und Osten konzentrierten. Nicht nur die innerdeutschen Niederschläge, sondern auch die Niederschläge in den östlichen Nachbarstaaten verschärften die Hochwassersituation an Oder, Donau und Neiße. Der Rhein schwoll durch die Niederschläge in diesem Zeitraum hingegen lediglich auf 555cm (21. Juli) an. Dagegen bewirkten die Niederschläge vom 24. und 25. Juli am Rhein eine letzte Hochwasserwelle. Die Ursache waren Tiefausläufer, die Mitteleuropa nordost- bis ostwärts am Südrand einer Hochdruckzone überquerten. Sie führten im Wechsel grönländische Polarluft und atlantische Tropikluft nach Deutschland. Starkniederschläge traten in Mittel- und Süddeutschland am 24. und 25. Juli auf (z.B. Oberstdorf 34 mm am 25.7.); der Rhein stieg am 28. Juli bei Speyer ein letztes mal auf 563 cm an. Die nachfolgenden vereinzelt Niederschläge im Juli und August reichten für einen spürbaren Anstieg des Rheinabflusses nicht mehr aus. Am 11. August erreichte der Fluss die 420 cm Marke und sank bis zum 17. August wieder unter den Mittelwasserstand.

(Wetterdaten aus: DWD (1997), Nr.6, S.1/19; Nr.7, S.1/19 / Die Pegeldaten wurden freundlicherweise vom BfG Koblenz zur Verfügung gestellt).

Dezemberhochwasser 1997

Starke Niederschläge in Alpen, Vogesen und Schwarzwald waren die Ursache des *Winterhochwassers* im Dezember 1997. Der Boden war zum Zeitpunkt des Hochwassers noch nicht gefroren, weshalb die Überschwemmungsflächen keine gravierenden Unterschiede zu den sommerlichen Überschwemmungen aufwiesen. Auch diesmal setzte sich das Hochwasserereignis aus mehreren Wellen zusammen. Die Wasserstandsänderungen erfolgten erstaunlich schnell. Vor Beginn des Winterhochwassers lagen die Wasserstände im Niedrigwasserbereich. Seit Ende Oktober schwankte der Pegel Speyer um die 250 cm. Eine erste, kleine Welle erreichte mit 493 cm am 14.12. ihr Maximum und fiel bereits am Abend des nächsten Tages wieder unter 420 cm. Die zweite Hochwasserwelle zeichnete sich durch den enormen Wasserspiegelanstieg von 2m in 48 Stunden aus. Am 23.12. wurde das Maximum von 578 cm erreicht. Der anschließende Wasserstandsabfall wurde durch eine kleine, nachfolgende Welle mit einem Maximum von 476 cm unterbrochen.

V.1.2. Beschreibung der Inundationen von Hochwasserereignissen mit jährlicher (und höherer) Eintrittswahrscheinlichkeit (WQ1)

Die durch Hochwasserereignisse jährlicher Eintrittswahrscheinlichkeit - d.h. Hochwasserereignisse, deren maximaler Wasserstand jedes Jahr mindestens an einem Tag erreicht wird - entstehenden Inundationen spielen aufgrund ihrer regelmäßigen Wiederkehr im Geoökosystem der Rheinaue eine wichtige Rolle. Die bevorzugten Eiablagehorizonte der Stechmückenart *Aedes vexans* befinden sich nach den Untersuchungen BECKERS etwa bei 170 bis 180cm über dem Mittelwasserstand. Das entspricht am Pegel Speyer einem Wasserstand von 537 bis 547 cm, am Pegel Maxau einem Wasserstand von 645 bis 655 cm²⁵. In Abb. 47. ist jährliche Wiederkehr dieser Wasserstände zumindest seit Mitte der 70er Jahre erkennbar. Die Eiablage der Stechmücken findet also in einer jährlich überschwemmten Zone statt. Ebenso wie die Stechmücken sind auch die anderen Bestandteile des Auenökosystems auf regelmäßige Inundationen angewiesen. Anhand der folgenden exemplarischen Beispiele wird die Frage beantwortet, wie groß die von derartigen Inundationen betroffenen Flächen überhaupt sind, wie der Prozess ihrer Inundation abläuft und um welche Bereiche der Rheinniederung es sich dabei handelt.

In Abb. 48. sind die im folgenden genannten Flur- und Gemarkungsnamen aufgeführt.

V.1.2.1. Überschwemmungsflächen bei Wasserständen von 50 bis 100 cm über dem Mittelwasserstand

Bei den häufig auftretenden Wasserständen zwischen 50 cm und 100 cm über dem Mittelwasserstand werden die niedrigen Uferpartien des Rheins und vor allem der Altrheinarme überschwemmt. Aufgrund der steilen Uferbefestigung des Flussbettes treten am Hauptgerinne selbst keine Überschwemmungen auf. Die ökologisch interessanten Überschwemmungsflächen befinden sich ausschließlich in den Uferbereichen der Altarme. In Abb. 49. sind als Beispiel für diesen Hochwassertyp die am 16.2.1997 kartierten Inundationen abgebildet. Der Wasserstand lag an

²⁵ Die Mittelwasserstände beziehen sich auf den Zeitraum 1971 bis 2000

diesem Tag 440cm am Pegel Speyer (73 cm über dem Mittelwasserstand) und markierte den Scheitel einer kleinen Hochwasserwelle. Bei den rot dargestellten Inundationsflächen handelt es sich fast ausschließlich um Schilfflächen, die direkt vom ansteigenden Rhein bzw. seinen Altarmen her geflutet werden. Lediglich auf der Insel Horn zählt auch eine Druckwasserfläche zu den Inundationen. Es handelt sich hierbei um eine tiefe Schlute, die von zwei Waldwegdämmen zerschnitten wird, im Untergrund aber offensichtlich noch in Verbindung zum Fluss steht.

V.1.2.2. Überschwemmungsflächen bei Wasserständen bis 175 cm über dem Mittelwasserstand

Am 28.2.1997 erreichte eine eingipflige Hochwasserwelle mit 570cm am Pegel Speyer (= 203 cm ü. MW) ihr Maximum, fiel dann aber ebenso rasch wieder ab, wie sie gestiegen war, so dass bereits am 3.3.1997 der Mittelwasserstand wieder erreicht wurde. In Abb. 50. und Abb. 51. ist das Ausmaß der Inundationen am 2.3.1997 dargestellt. Der Wasserstand lag am Tag der Kartierung bei 490 cm am Pegel Speyer (= 125 cm ü. MW). Wieder waren die Schilfgebiete und die Kernbereiche der Weichholzaue an den Uferpartien der Altrheine überschwemmt: Im Nordwesten der Kollerinsel das Naturschutzgebiet „Im Grün“, die Inseln im Otterstädter Altrhein und die Fischergewanne im Süden (siehe Abb. 51.) . In der Böllenwörth füllten sich vom Südwesten her die Schluten und Grabensysteme der verlandeten Egestion des Otterstädter Altrheins. Über den verschilften Böllenwörthgraben drang das Wasser bis in den äußersten Nordwesten der Böllenwörth vor. Neben diesen oberflächlich gefluteten Flächen traten bei diesen Wasserständen bereits zahlreiche kleinere Druckwasserflächen auf. Im Bereich der Fischergewanne füllten sich kleinere Senken durch vom nahen Altrhein einsickerndes Wasser. Ebenso füllten sich aber auch in der Böllenwörth mehr als 500m vom Fluss entfernte zu- und abflusslose Senken innerhalb von 3 Tagen mit Wasser (z.B. Ketscher Teich).

Alle bisher beschriebenen Inundationsflächen befinden sich in der rezenten Aue. Es konnten aber auch bereits bei diesen niedrigen Wasserständen Druckwasserflächen im vom Rheinhauptdamm geschützten Bereich der Kollerinsel festgestellt werden: Am Grund der Schlute „Saumagen“ im Norden der Kollerinsel bildeten sich vier kleinere, mehrere quadratmetergroße Druckwasserflächen.

Auch im Bereich der Rheinhäuser Weide waren wieder die Schilfgebiete überschwemmt. Im Osten des Rheinbogens entstanden von Norden her geflutete Inundationen in den Weichholzaunen. Auf der Insel Horn füllten sich die Schlutensysteme durch von der Runkedebunk hereinströmendes Wasser. Ebenso entstanden zahlreiche Druckwasserflächen.

Neben der Höhe des maximalen Wasserstandes eines Hochwasserereignisses ist vorrangig die Andauer der hohen Wasserstände für die Bildung von Druckwasserflächen verantwortlich, da sich die Infiltration des Flusswassers in den Untergrund und die unterirdische Ausbreitung der Hochwasserwelle ins Landesinnere nur mit einer starken Zeitverzögerung vollzieht. Als anschauliches Beispiel sollen zum Vergleich der soeben vorgestellten Inundationen vom 2.3.1997 die Kartierungen vom 3.8.1997 herangezogen werden:

Am 3.8.1997 lag der Wasserstand mit 486 cm am Pegel Maxau um 4 cm unter dem vom 2.3.1997. Während das Ausmaß der oberirdisch gefluteten Inundationsflächen bei beiden Wasserständen übereinstimmte, weist die Kartierung im August (siehe Abb. 52. und Abb. 53.) wesentlich mehr Druckwasserflächen als beim Hochwasser im März auf (Vgl. Abb. 52. mit Abb. 51.): Druckwasserflächen im „Saumagen“ füllen die ehemalige Schlute fast völlig aus, in der Böllenwörth sind die bereits am 2.3.

beobachtbaren Druckwasserflächen deutlich größer geworden und eine durch Wiesen führende Schlute hat sich ebenfalls mit Wasser gefüllt. Ebenso sind im Bereich der Rheinhäuser Weide im Salmengrund und im Waldabschnitt „Schänzel“ und „Ratswörth“ in mehreren hundert Metern vom Fluss entfernten zu- und abflusslosen Senken weitere Druckwasserflächen hinzu gekommen (Vergleiche Abb. 53. mit Abb. 50.). Aus Abb. 46. geht hervor, dass dem Wasserstand von 486 cm am 3.8.1997 eine fast zwei Monate anhaltende Phase von erhöhten, um die 500cm Marke herum schwankende Wasserständen vorausgegangen war. Die Druckwasserflächen resultierten also nicht aus der letzten Hochwasserspitze vom 5.8.1997 mit 563 cm, sondern aus der bereits Ende Mai begonnenen allmählichen Infiltration von Flusswasser in das Ufersubstrat. Die wenigen am 2.3.1997 beobachteten Druckwasserflächen hatten ihre Ursache dagegen ausschließlich in der eingipfligen Hochwasserwelle mit ihrem Maximum am 28.2.1997.

V.1.2.3. Überschwemmungsflächen bei Wasserständen bis 225 cm über dem Mittelwasserstand

Ein Beispiel für Inundationen bei Hochwasserereignissen mit bis zu 2,25 m über dem Wasserspiegel sind die Kartierungen vom 9.7.1997 mit einem Tageswasserstand von 577 cm am Pegel Speyer (= 2,1 m ü. MW). Der Scheitel der Hochwasserwelle passierte den Pegel Speyer am Vortag mit einem Wasserstand von 591 cm. Die Abb. 54. und Abb. 55. zeigen, dass vor allem die Weichholzaue und die Schlutensysteme mit Altrheinanbindung in der rezenten Aue geflutet wurden. Im Vergleich mit Kartierung vom 3. August (Abb. 52. und Abb. 53.) fällt die vergleichsweise geringe Druckwasserflächenbildung auf. Lediglich in der Böllenwörth und der Insel Horn entstanden die bereits bekannten Druckwasserflächen. Die Druckwasserbildung im Saumagen wurde überlagert von oberflächlich hereinströmendem Wasser: Im Norden der Kollerinsel war eine Schleuse zu spät geschlossen worden.

Aus der geringeren Druckwasserflächenbildung als am 3.8. lässt sich schließen, dass das bereits in den Untergrund infiltrierte Wasser noch nicht bis zu den Senken im Landesinneren vorgesickert war.

V.1.2.4. Zusammenfassung: Das Ausmaß von Inundationen bei Wasserständen bis zu 225cm ü.MW.

Die soeben vorgestellten Beispiele zeigen, dass die Inundationen der Hochwasserereignisse mit jährlicher Eintrittswahrscheinlichkeit nur einen geringen Bruchteil der rezenten Rheinaue überhaupt betreffen – Bezogen auf das betrachtete Untersuchungsgebiet handelt es sich nur um rund 0,03% der rezenten Aue und 0,01% der Rheinniederung. Trotz ihres geringen Flächenanteils zählen sie zu den ökologisch wertvollsten Bereichen der Flussaue. Nur in diesen Zonen ist auch in trockenen Jahren zumindest für einige Tage mit Überschwemmung zu rechnen. Es handelt sich bei diesen Flächen auch um die bevorzugten Eiablagehorizonte von *Aedes vexans*²⁶. Die Beispiele zeigten auch, dass eingipflige, die Aue rasch durchlaufende Hochwasserereignisse mit Wasserständen bis 2,25m ü. MW kaum Druckwasserflächen hervorrufen. Bis auf eine Ausnahme, einer durch den Rheinhauptdamm vom Strom getrennte Schlute, treten Druckwasserflächen im Untersuchungsgebiet bei diesen Wasserständen lediglich im Aussendeichbereich auf. Ihre maximale Wasserfüllung wiesen die beobachteten Druckwasserflächen je nach Entfernung zum Vorfluter 2 bis 4 Tage nach dem Durchlaufen des Hochwasserscheitels auf. Sowohl die oberflächlich gefluteten Inundationen als auch

²⁶ weitere Darstellungen zum Eiablageverhalten von *Aedes Vexans* sind im Anhang finden

die Druckwasserflächen befanden sich in den meisten Fällen innerhalb der ausgedehnten Schlutensysteme der Aue.

V.1.3. Ursache der beobachteten „Jahrhunderthochwasser“ (WQ20 bis WQ100)

Die Inundationen im Jahre 1999 erfassten dagegen nicht nur aufgrund der außerordentlich hohen Maximalabflüsse im Mai/Juni (der Scheitel der Hochwasserwelle lag mit 875cm am 14.5.99 mehr als 4m über dem Mittelwasserstand!), sondern vor allem auch wegen ihrer langen zeitlichen Andauer außerordentlich große Flächen und aktivierten Druckwasserflächen, die seit Jahrzehnten nicht mehr beobachtbar gewesen waren. Die Abb. 56. verdeutlicht die herausragende Stellung des Hochwasserjahres 1999: Auf der X-Achse des Diagramms sind die hydrologischen Jahre vom Bestehen des Pegels Maxau von 1889/90 bis zum Jahre 2000/01, auf der Y-Achse die Anzahl der Tage pro hydrologischem Jahr, an denen ein Wasserstand von 725 cm erreicht wurde, aufgetragen. Im hydrologischen Jahr 1998/99 wurde dieser Wasserstand an mehr als 40 Tagen erreicht bzw. überschritten! Es ist hierbei zu bedenken, dass von Beginn der Messungen an bis in die 1970er Jahre in den meisten Jahren dieser Wasserstand an keinem einzigen Tag und selbst in den Hochwasserjahren 1982/83 und 1987/88 nur an jeweils 17 Tagen überschritten wurde.

Das Hochwasserereignis im Februar/ März 1999 stand in direktem Zusammenhang mit der Schneeschmelze in den Alpen. Eine über 18 Tage andauernde Nordwestwetterlage führte zu einer außergewöhnlichen Schneeakkumulation mit bis zu 5 bis 7 m Schnee im Schweizer Einzugsgebiet des Rheins. Am 20. Februar stieg die Schneefallgrenze auf 1500 m ü. N.N. an. Starkregen verstärkte die Schneeschmelze und verursachte extreme Abflüsse im Schweizer Einzugsgebiet des Rheins (WALKER (o.J), S. 2). Bei Maxau stieg der Rhein innerhalb von 48 Stunden um 4 m an und erreichte am 22.2.99 mit 836 cm seinen maximalen Wasserstand. Allerdings fiel der Wasserstand in den nächsten Tagen wieder rasch (am 2.3. lag der Pegel bereits wieder bei 619cm), weshalb sich auch die Inundationsflächen schnell verkleinerten und die Entstehung von Druckwasserflächen relativ gering blieb.

Der Rhein war von den hohen Wasserständen dieses „Jahrhunderthochwassers“ allerdings noch nicht wieder auf das Niveau des Mittelwasserstandes abgesunken, als bereits das nächste, noch größere „Jahrhunderthochwasser“ folgte. Obwohl in den Massenmedien oftmals die Schneeschmelze als Grund des Rheinhochwassers vom Mai genannt wurde, sind die extremen Starkregen vom 11.- 14.5. und 21.5. in den Nordalpen als die wirkliche Ursache anzusehen (METEOSCHWEIZ S.1-4). Die erste Welle des zweigipfligen Maihochwassers wurde durch Starkniederschläge im Aaregebiet, die zweite durch Niederschläge vor allem im Einzugsgebiet des Bodensees verursacht:

Am 11. Mai kam eine in W-O-Richtung langgestreckte Luftmassengrenze über der Alpennordseite zu liegen. Die feuchte Warmluft wurde zwischen Kaltluft im Norden und den Alpen hochgepresst. Bei konstanter Windrichtung blieb die Zone maximaler Regenintensität am 12. Mai über viele Stunden ortsfest mit z.T. Niederschlägen von über 100 l/m² in 18 Stunden. Punktuell wurden in der Schweiz die höchsten jemals gemessenen Niederschlagswerte gemessen - übertroffen wurden die Regenfälle lediglich von den Niederschlägen im Mai 1906, wobei damals der Niederschlag ab 1200m in Schnee überging. Am 11./12.Mai regnete es dagegen bis in 2700m Höhe! In der Nordostschweiz und im Einzugsgebiet der Aare führten die extremen

Regenfälle zu lokalen Überschwemmungen (vgl. auch Abb. 57.). In der Nacht zum 13. Mai schwoll der Rhein unterhalb von Koblenz auf Rekordhöhe an. In der Altstadt von Rheinfelden stand das Wasser 1,5 m hoch. Der Scheitel der ersten Hochwasserwelle erreichte den Pegel Maxau am 14.5.1999. Die Rückhaltmaßnahmen am Kulturwehr Kehl bewirkten, dass die historische Marke von 883 cm nicht überschritten wurde und der Tageswasserstand bei 875 cm aufhörte zu steigen²⁷(LFU-Pressemitteilung 12.12.2001, S.1.). Während die Extremniederschläge vom 11./12.5. im Bereich des Einzugsgebietes des Rheins vor allem das Einzugsgebiet der Aare betrafen, verschärfte sich die Hochwassersituation vom 20.-22. Mai erneut durch ein weiteres Tief, das nun noch zusätzlich zu den Nordalpen auch Voralberg und Bayern erfasste. Auch hier lagen die Niederschläge lokal über 100 l/m². Am 24. Mai erreichte der Wasserspiegel des Bodensees mit 5,65 m am Pegel Konstanz den höchsten seit 1890 gemessenen Wert. Besonders die nordöstlich in den Bodensee einmündenden Zuflüsse verursachten den Seeanstieg (teilweise lagen die Maximalabflüsse um das 20- bis 30-fache über dem durchschnittlichen Abfluss (Informationen zum Jahrhunderthochwasser 1999). Nach dem Erreichen des Scheitelpunktes der ersten Hochwasserwelle am 14.5. sank in Maxau der Wasserstand bis zum 21.5. wieder auf 768 cm ab. Die vom Bodensee her kommende Hochwasserwelle erreichte den Pegel Maxau mit einem maximalen Tageswasserstand von 826 cm am 24.5.. Die hohen Wasserstände gingen nur allmählich zurück. Auch die Entleerung der Polderflächen, die zur Verminderung des Spitzenabflusses geflutet worden waren, verzögerte das Absinken des Wasserstandes. Am 17. Juni – also erst 24 Tage nach dem Hochwassermaximum - sank der Wasserstand am Pegel Maxau wieder unter die 700 cm Marke. Das lange Verharren des Rheins auf solch ungewöhnlich hohem Niveau bedingte ein lang anhaltendes Infiltrieren von Flusswasser in den Untergrund und die Bildung zahlreicher Druckwasserflächen im Untersuchungsgebiet. Bis zum 5. Juli sank der Rhein bei Maxau weiter auf 607 cm, stieg dann aber infolge von heftigen Starkregen in Süddeutschland (Gewitter vom 4.-8.7. und 12.-20.7.) bis zum 15.7. wieder auf 713 cm an (DWD Pressemitteilung 1999²⁸).

Nach dieser letzten kleineren Hochwasserwelle sanken die Wasserstände rasch ab und fielen am 23.7. wieder unter die 600 cm-Marke.

V.1.4. Beschreibung der Inundationen von 1999 (WQ 20 bis WQ100)

Gänzlich anderer Natur als die von 1997 bis Anfang 1999 beobachteten Inundationen waren die Überschwemmungen der Hochwasser im Februar (ca. WQ20) und an Pfingsten 1999 (ca. WQ100). In beiden Fällen stieg der Rhein

²⁷ In den Massenmedien wurde in den Tagen des Hochwassermaximums berichtet, dass die Überschwemmung der historischen Altstadt von Speyer durch die Manöver am Kulturwehr Kehl verhindert werden konnte bzw. dass die Altstadt bereits überflutet worden sei. Hier ist anzumerken, daß die historische Altstadt um den Speyerer Dom auf dem hochwassersicheren Hochgestade errichtet wurde und auch bei erheblich größeren Hochwasserereignissen nicht gefährdet ist. Allerdings sind seit dem Spätmittelalter und vor allem ab Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts zahlreiche Gebäude bzw. ganze Stadtteile und insbesondere Gewerbeflächen in der Speyerer Rheinniederung errichtet worden. Diese waren 1999 tatsächlich akut von Überschwemmungen bedroht.

²⁸ DWD-Pressemitteilung (1999): Herausragende Wetterereignisse 1999. www.dwd.de/general/200001xx.html

innerhalb weniger Tage über die 800cm Marke des Pegels Maxau (=325 cm ü. MW). Die Inundationen im Februar 1999 verbreiteten sich mit beeindruckender Geschwindigkeit: Ausgehend von einem Niedrigwasserstandniveau von 302 cm am 18.2. am Pegel Speyer (65 cm unter MW) stieg der Wasserstand innerhalb von nur 5 Tagen um über 4,5 m auf 820cm an. An eine Kartierung der sich beständig ausbreitenden Inundationsflächen war nicht zu denken. Die Fotos in Abb. 58. zeigen das Eintreffen der Hochwasserwelle im Februar im Süden der Speyerer Rheinaue (Waldstück „Salmengrund“). Der ausufernde Rhein breitete sich als eine, etwa 10cm hohe, Laub und dünnes Geäst vor sich herschiebende Flutwelle über den nahezu ebenen Waldboden aus. Rauschend schoss das Wasser in jede Geländesenke, die von der Flutwelle erreicht wurde, und füllte sie innerhalb weniger Minuten auf. Der kurz zuvor noch völlig trockene Auwald verwandelte sich innerhalb kürzester Zeit (ca. 20 min.) bis zum Rheinhauptdamm in eine geschlossene Wasserfläche. Der weitere Wasseranstieg vollzog sich weniger spektakulär aber mit unverminderter Geschwindigkeit. In Bereichen ohne Strömung wurde die Wasseroberfläche durch vom Grund her aufströmende Luftbläschen in Bewegung gehalten. Offensichtlich presste das in den Untergrund infiltrierende Flusswasser die in kleinen Holräumen eingeschlossene Luft aus dem Waldboden. Diese Luftbläschen konnten vereinzelt auch noch in den nächsten beiden Tagen beobachtet werden; danach war dieser Prozess aber offensichtlich abgeschlossen und die Luft vollständig aus dem Erdreich gepresst worden.

Sowohl im Februar, als auch an Pfingsten stand das Wasser in der rezenten Aue im Untersuchungsgebiet zeitweise bis zum Rheinhauptdamm – der Anteil der Inundationsflächen an der rezenten Aue betrug zu diesen Zeitpunkten der höchsten Wasserstände folglich nahezu 100 %²⁹. Bereits ein bis zwei Tage nach dem Erreichen des Hochwassermaximums entstanden auch auf der Binnenseite des Rheinhauptdamms erste Inundationsflächen – teilweise inmitten bebauter Areale (z.B. auf dem Firmengelände Isower im Süden Speyers). In unmittelbarer Dammnähe handelte es sich zumeist um am Dammfuß austretendes Sickerwasser, dass sich in Senken sammelte. Aber auch Druckwasseraustritte aus dem Untergrund waren an zahlreichen Stellen der vermeintlich durch Dämme vor Inundationen geschützten Rheinniederung zu beobachten. Das Ausmaß der Überschwemmungen war so gewaltig, dass die Kartierung der einzelnen Flächen nicht mehr mit der gleichen Genauigkeit wie bei den bisher untersuchten Hochwasserereignissen vorgenommen werden konnte. Die zeitliche Veränderung der Inundationsflächen konnte nur noch in besonders interessanten Teilflächen des Untersuchungsgebietes genauer dokumentiert werden. Vordringliches Ziel der Kartierungsarbeiten war es vielmehr, das Gesamtausmaß der Inundationen zu erfassen.

Die Inundationen von Pfingsten 1999 sind für die Kollerinsel in Abb. 59., für die Rheinhäuser Weide in Abb. 60. dargestellt. Die Karten beruhen auf der Auswertung von Luftbildern und Kartierungen im Gelände. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Inundationsflächenkarten zeigen sie nicht die Inundationen eines bestimmten Tages, sondern die größte Ausdehnung aller im Zeitraum vom 13.5. bis zum 18.7.1999 beobachteten Überschwemmungen.

²⁹ Für zahlreiche größere Waldtiere hatte das Hochwasser lebensbedrohlichen Charakter. Sie mussten den Auwald verlassen und sich über den Damm retten – oder ertranken. Bei Otterstadt konnte ich mehrere Rehgruppen dabei beobachtet, wie sie in den Feldern hinter dem Rheindamm vergeblich nach Deckung suchten und teilweise erschöpft in direkter Nähe zu Menschen und Siedlungen liegen blieben.

Der folgende Abschnitt erläutert die Übersichtskarte in Abb. 61. und gibt einen Überblick über das gesamte Ausmaß der Inundationen des Pfingsthochwassers 1999.

Erläuterungen zu Abb. 61.: Überblick über die binnenseitigen Inundationsflächen des Pfingsthochwassers 1999

Die rezente Aue war vollständig überschwemmt, weshalb für diesen Bereich auf weitere Erläuterungen verzichtet wird. Die hinter dem Rheinhauptdamm, teilweise in bebautem Gebiet aufgetretenen Inundationen wurden in diesem Ausmaß bisher noch nicht beobachtet bzw. dokumentiert und erhalten deshalb erhöhte Aufmerksamkeit. Die Erläuterung zu den Inundationen beginnen bei den linksrheinischen Gebieten von N nach S und setzen sich dann rechtsrheinisch ebenfalls von N nach S fort (linksrheinische Inundationen von Nord nach Süd).

Die derzeit in einen Hochwasserpolder umgewandelte Kollerinsel bei Otterstadt wurde zum Zeitpunkt der Überschwemmungen noch intensiv landwirtschaftlich genutzt und durch einen Damm rundherum vor den Fluten des Rheins geschützt. Während des Hochwassers war die Kollerinsel zeitweise von der Außenwelt abgeschnitten und verwandelte sich in eine richtige Insel, da die Fluten des Rheins die Böllenwörth mitsamt der Autostraße nach Otterstadt vollständig durchströmten. Der Hochwasserdamm konnte nicht verhindern, dass Wasser aus dem Untergrund aufquoll. Die Inundationen auf der eingedeichten Fläche führten zu katastrophalen Ernteschäden: Insgesamt 58% der Insel waren von Druckwasserflächen bedeckt.

Nördlich des Otterstädter Altrheins war das Dauercamper-Areal „Auf der Au“ stark von aus länglichen, einem verlandeten Rheinmäander folgenden, Geländesenken austretendem Druckwasser betroffen. Im südwestlichen Teil des Campingareals stand das Wasser teilweise mehr als einen Meter hoch.

Im Bereich des Wasserwerks Waldsee und auf der kleinen Koller waren ebenfalls zahlreiche Inundationsflächen zu finden.

Deutlich zeichneten auch die länglichen, parallel zum gekrümmten Lauf des Hochgestades zwischen Otterstadt und Waldsee liegenden Inundationsflächen den Lauf verlandeter Rheinmäander nach. Nördlich des Pumpwerkes standen mehrerer Hektar Acker und auch die Feldwege auf mehreren hundert Meter Länge unter Wasser. In einem Neubaugebiet im Norden Otterstadts (Ehemaliger Flurstückname: Schmale Behl) trat in einer Baubrache neben Wohnhäusern Druckwasser aus.

Nördlich der Binsfelder Seen traten längliche, die ehemaligen Mäander am Hochgestade nachzeichnende Inundationen auf.

Auf Speyerer Gemarkung trat rund um die Mülldeponie, nahe dem Schlangenwyhl, im Fuchswyhl und im Bereich des Rübsamenwyhls Wasser aus dem Untergrund auf. Für die beiden letztgenannten Flächen ist anzumerken, dass hier erst vor wenigen Jahren Gewerbebetriebe und großflächige Discountmärkte errichtet wurden. Die Bautätigkeiten sind hier noch nicht abgeschlossen und auf 1999 überschwemmten Flächen wurden mittlerweile weitere Gebäude errichtet (vgl. Abb. 127.).

Das Gleiche gilt für die Gewerbegebiete im Süden Speyers – insbesondere für die „Parkstadt am Rhein“. Im Bereich der, in einen Mäanderbogen vom Rhein umflossenen ehemaligen Rheinhäuser Weide traten im Werksgelände der Firma Haltermann, der Firma Isower, neben der Paketverteilerzentrale der Post, auf der Start- und Landebahn des Flughafens Speyer, auf zahlreichen Äckern im Südwesten und in einem Bauerwartungsland im Osten zahlreiche Inundationen auf (siehe Abb. 28).

Die Insel Flozgrün stand nahezu vollständig unter Wasser, so dass Hochwasserdämme, höher gelegene Fahrdämme von Feldwegen sowie die

Sondermülldeponie der BASF wie Inseln aus den Inundationen ragten (siehe Abb. 128). Auch der Bereich zwischen dem Berghäuser Altrhein und dem Hochgestade bei Römerberg wies zahlreiche kleinere Inundationsflächen auf.

Die Schwetzingener Wiesen und die Ketscher Insel wurden vollständig überschwemmt. Nach dem Sinken des Rheinwasserstandes sammelte sich das Wasser in tiefer gelegenen Senken und Schluten und verdunstete bzw. versickerte nur sehr langsam (siehe Abb. 62, Abb. 63., Abb. 64., Abb. 65 und Abb. 66.).

Südlich von Ketsch, im Hockenheimer Rheinbogen, waren drei, vom Rheindamm aus weit ausgreifende Inundationen zu beobachten – im Bereich des ehemaligen Karl-Ludwig-Sees, in den Breitwiesen und am Herrenteich (siehe Abb. 67.a und b.). Die Start- und Landebahn am Herrenteich stand über Wochen hin vollständig unter Wasser (siehe Abb. 68.a und b.). Ferner traten nahezu im gesamten Bereich des Hockenheimer Rheinbogens zwischen Ketsch, Hockenheim und Altlußheim kleinere und größere Inundationsflächen auf (siehe Abb. 69. und Abb. 70.). Zwischen Neulußheim und Rheinhausen waren entlang des Rheinhauptdamms großflächige Überschwemmungen durch am Dammfuß austretenden Sickerwasser entstanden (siehe Abb. 71.).

Weite Teile der Rheinschanzinsel bei Philippsburg östlich des AKW standen unter Wasser. Im Süden zeichnete das aufquellende Druckwasser die Grabenanlagen des ehemaligen Brückenkopfes der Festung Phillippsburg nach (siehe Abb.72.).

V.2. Ergebnisse der Druckwasserflächenuntersuchungen im Sommer 1999

Während des Pfingsthochwassers 1999 wurde die Inundationsdynamik von etwa 20 im Untersuchungsgebiet gelegenen Druckwasserflächen eingehender untersucht (siehe Abb. 73.a. und b.). Neben der Kartierung des Wandels der Inundationen wurden in diesen Flächen auch Bodensondierungen und regelmäßige Wasserstandsmessungen durchgeführt:

Zur Messung der Wasserstandsänderungen wurden 2,5m lange, angespitzte Holzlatten 50 cm tief im Boden getrieben, ein Nullpunkt markiert und von diesem ausgehend täglich die Veränderungen des Wasserstandes gemessen. Die Messgenauigkeit lag bei etwa +/- 3mm.

Außer der Messung der Wasserstandsänderungen wurde die Verteilung von wasserleitenden und -hemmenden Sedimentschichten im Untergrund der Druckwasserflächen untersucht. Zu diesem Zweck wurden in jeder der Druckwasserflächen an mehreren Stellen Bodensondierungen bis in 4m Tiefe vorgenommen.

Im folgenden werden nun anhand einiger exemplarischer Beispiele verschiedene Druckwasserflächen vorgestellt und diskutiert.

V.2.1. Burglache und Falkenhof bei Waldsee (Beispiel I: „echte“ Druckwasserflächen)

Bei der „Burglache“ und dem „Falkenhof“ handelt es sich um zu- und abflusslose Senken, in welchen, nach den 1997 bis 2001 vorgenommenen Beobachtungen frühestens zwei bis drei Tage nach einem Anschwellen des Rheins um mehr als 150

cm ü. MW ein Austritt von Wasser feststellbar ist (siehe Abb. 74.). Beide Flächen liegen in einem bereits weit vor dem Mittelalter verlandeten Altarm des Rheins (bisher ist keine genauere Datierung des Altarms bekannt). Bei der Burglache handelt es sich um eine langgestreckte natürliche Senke, die nach Westen durch eine deutliche, etwa 2 m hohe Böschung begrenzt wird. Die Druckwasserfläche „Falkenhof“ ist dagegen stark anthropogen überprägt. Bereits die Form und der steile Böschungsrand verraten, dass es sich um eine aufgelassene Ton- oder Sandgrube handelt. Die beiden Flächen liegen nur 100 m auseinander, unterscheiden sich aber bei gleicher Grundtendenz deutlich in ihrem Überschwemmungsverhalten. Wie Abb. 75. zeigt, war die Wasserstandsentwicklung in den Druckwasserflächen während des Frühsommerhochwassers 1999 der Ganglinie des Rheins entgegengesetzt: Während der Wasserstand im Fluss vom 24.5. bis zum 2.6. um ca. 120 cm fiel, stieg der Wasserstand in der Burglache um weitere 30 cm. Der höchste Wasserstand wurde in der Burglache sogar erst am 10.6.1999 erreicht – also mehr als drei Wochen nach dem Maximum des Rheinwasserstandes. Nicht ganz so extrem, aber mit der gleichen Tendenz verlief die Entwicklung in der „Falkenhof“-Senke. Während im „Falkenhof“ bereits nach ein bis zwei Tagen Wasseraustritte festzustellen waren, blieb die Burglache noch völlig trocken. Diese Unterschiede im Inundationsverhalten konnte bereits 1997 während einer eingipfligen Hochwasserwelle mit Werten von rund 600 cm am Pegel Speyer beobachtet werden.

Anhand von Vermessungen und Bodensondierungen im Rahmen eines Geländepraktikums im Sommer 2001 konnten die Ursachen für das unterschiedliche Inundationsverhalten der beiden Senken geklärt werden:

Die Vermessung ergab, dass „Falkenhof“ und „Burglache“ in etwa in gleicher Höhe zum Mittelwasserstand des Rheins stehen. Ein Niveauunterschied in Bezug zum Mittelwasserstand des Vorfluters kommt als Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Flächen deshalb nicht in Frage. Die Bodensondierungen lieferten in beide Senken mehrere meterdicke Tonpakete mit darunterliegenden Auenmergel (schluffiger Sand) zutage. Bei den Sondierungen konnten aber im „Falkenhof“ – offensichtlich durch anthropogene Austiefungen entstandene Auenmergelfenster in den Tonschichten gefunden werden: Bei ansteigenden Grundwasserständen bzw. durch bei Hochwasser in den Untergrund infiltriertes Flusswasser wird die „Falkenhof“-Senke durch die bei den Sondierungen entdeckten Quellhorizonte geflutet. Ein allmähliches, und kontinuierliches Ansteigen des Wasserstandes in der Senke ist die Folge. Aufgrund der umgebenden Tonpakete ist bei Hochwasser von gespannten Grundwasserverhältnissen auszugehen. Ebenso langsam und kontinuierlich vollzieht sich das Trockenfallen, wenn der Grundwasserstand wieder unter das Wasserstandsniveau in der Senke sinkt.

Die „Burglache“ dagegen ist mit einer am Boden und dem unteren Teil der Seitenwände mit Ton abgedichteten Wanne zu vergleichen. Bei Bodensondierungen kamen hier z.T. mehrere Meter Tonablagerungen zu Tage. Die Tonpakete verhindern ein Aufquellen von Druckwasser in der Tiefenlinie der Senke - selbst wenn das Grundwasserstandsniveau deutlich über dem Senkenboden liegt. Erst wenn der Grundwasserstand soweit angestiegen ist, dass er sich über die nicht mehr mit Ton verkleideten, steilen, z.T. stark kieshaltigen Seitenwände erhebt, erfolgt eine rasche Flutung der Burglache. Einmal eingedrungenes Wasser wird durch die Tonabdichtung am Versickern gehindert, weshalb noch weit in den September hinein faulige und übelriechende Reste des Wassers vom Hochwasser im Mai/Juni in der Burglache standen.

V.2.2. Auf der Au

(Beispiel II: „Echte“ Druckwasserfläche mit guter Rheinanbindung)

Zwischen Waldsee und Altrip erstreckt sich entlang des Rheinhauptdamms das vor allem von Parzellenpächtern aus Ludwigshafen und dem westlichen Rhein-Neckar-Kreis genutzte Zelt- und Freizeitgebiet „Auf der Au“. Die K-13 teilt mit ihrem Fahrdamm den Campingplatz in zwei Teilgebiete (siehe Abb. 76.). Während der Hochwasserereignisse im Jahr 1999 wurden große Teile der Campingplätze von aufquellendem Druckwasser überflutet. Aufgrund von Erfahrungen der Stechmückenbekämpfer war schon zu Beginn der Geländearbeiten bekannt, dass sich in den südwestlich die Campingplatzanlagen begrenzenden Waldstücken mehrere Druckwasserflächen befinden. Sie liegen alle innerhalb des gleichen verlandeten Rheinarmes wie die Flächen „Burglache“ und „Falkenhof“; teilweise handelt es sich um längliche Senken, die in ihrer Richtung den alten Rheinarm nachzeichnen und teilweise um anthropogen ausgetiefte Tongruben.

Im Campingplatzareal erstreckt sich ein Baggersee entlang des Rheinhauptdamms. Bei der Aufstellung der Messpegel war zunächst davon ausgegangen worden, dass Uferfiltrat im Falle eines großen Hochwasserereignisses innerhalb von ein bis zwei Tagen unter dem Damm hindurch in den Baggersee eindringen würde. Dies hätte dann ein rasches Ansteigen des Seewasserstandes zur Folge. Am wahrscheinlichsten erschien deshalb zunächst, dass eine Überschwemmung des Campingplatzes durch ein Ausuferen des Sees erfolgen würde (siehe Abb. 77.).

Interessanterweise zeigte sich während des Hochwassers im Juni 1999, dass in den Druckwasserflächen im Wald der Wasserspiegel rascher und stärker anstieg als im Baggersee. Bereits wenige Tage nach dem Maximum des Frühsommerhochwassers 1999 war der südlich der K-13 gelegene Teil des Campingplatzes nahezu vollständig überschwemmt.

Trotz der größeren Entfernung der Druckwasserstellen zum Rhein war der Campingplatz von aus den Druckwasserflächen stammendem Wasser und nicht wie erwartet vom ausufernden Baggersee überschwemmt. Über mehrere Tage hinweg strömte das Wasser aus der Fläche „Auf der Au Süd“ über den Campingplatz hinweg in den Baggersee hinein, bis dieser seinen Wasserstand dem Niveau der Druckwasserfläche „Auf der Au Süd“ angeglichen hatte (siehe Abb. 78.).

Ebenso wurden die nach Norden hin führenden länglichen Senken zu einem großen Teil von aus der Druckwasserfläche „Auf der Au Nord“ stammendem Wasser überschwemmt. Wie Abb. 79. zeigt, erreichte die Druckwasserfläche „Auf der Au Nord“ ihren maximalen Wasserstand erst zwei Wochen später als die rheinnahe Messstelle „Auf der Au Süd“ – allerdings bei einem insgesamt langsameren und ausgeglicheneren Wasserspiegelanstieg. Im Herbst 1999 und Sommer 2000 durchgeführte Bodensondierungen bis 4 m Tiefe ergaben im Bereich der Druckwasserflächen flächig vorliegende Tonschichten, – ein Befund, welcher der während des Hochwasserereignisses beobachteten Überschwemmungsflächendynamik widerspricht. Allerdings konnten in den Waldstücken auch mehrere größere, anthropogen ausgetiefte Senken ausgemacht werden, in denen die Tonpakete (vermutlich durch eine, erst nach 1875 erfolgte Nutzung als Tongrube) vollständig abgetragen und so bei Hochwasser durch Uferfiltrat gespeiste Druckwasserquellen geschaffen worden waren.

Da aber beim benachbarten Baggersee durch die Entkiesungsarbeiten bis in eine Tiefe von sogar über sieben Metern ebenfalls alle potentielle wasserhemmenden Sedimentschichten entfernt worden sind, bleibt noch zu klären, wieso das Druckwasser in den Druckwasserflächen im Wald über einen Zeitraum von mehreren

Wochen hinweg trotz einer größeren Entfernung zum Rhein erheblich stärker aus den Druckwasserquellen austrat als im Baggersee.

Wie bereits dargelegt, befinden sich die Druckwasserquellen innerhalb des Bettes eines verlandeten Rheinlaufs, der wenige Meter daneben gelegene Baggersee hingegen nicht. Das alte Flussbett wurde 1875 extensiv als Wiese oder Wald genutzt, was auf eine hohe Bodenfeuchte hinweist. Der Baggersee dagegen liegt in einem trockneren, 1875 als Ackerland genutzten Areal (siehe Abb. 80).

Das im Jahre 1999 beobachtete Inundationsverhalten ließe sich somit dadurch erklären, dass bei Hochwasser das Druckwasser im Untergrund in den wasserleitenden Kiesen des ehemaligen Rheinbettes rascher landeinwärts vordringen kann als in den benachbarten Flächen. Die in der Endphase des Verlandungsprozesses im Altarm abgelagerten Tone behindern jedoch ein Austreten dieses Druckwassers. Dort wo die Tonschicht - z.B. durch anthropogene Beschädigungen – Fenster aufweist, tritt das Wasser dann unter starkem Druck in Form von im Jahre 1999 beobachteten, stark schüttenden Druckwasserquellen aus.

Obwohl also Uferfiltrat beim Baggersee nur eine Strecke von etwas mehr als hundert Meter Sediment durchsickern muss, um frei an die Oberfläche treten zu können, zeigte sich, dass die in den verlandeten Altrheinarmen, z.T. in erheblich größerer Entfernung vom Rhein gelegenen Druckwasserflächen deutlich rascher und erheblich stärker auf Wasserstandsänderungen im Fluss reagieren.

V.2.3. Kollerinsel

(Beispiel III: Sickerwassersammelflächen und Druckwasserflächen)

Bereits wenige Tage nach dem Scheitelabfluss der Hochwasserwelle hatte sich auf der Insel ein Inundationsflächenmuster herausgebildet, wie es bereits auf den Luftbildern von 1983 und auch beim Hochwasser im April 2001 vorzufinden war: in länglichen, in etwa parallel zum Otterstädter Altrhein ausgerichteten Rinnen stand das Wasser über Wochen hinweg, der sinkenden Wasserstandstendenz des Rheins mit einer sehr starken Verzögerung nachfolgend. Die Abbildungen Abb. 81. und Abb. 82. zeigen die Inundationen der Kollerinsel am 25.5.1999 sowie am 25.6.1999.

Während des Pfingsthochwassers 1999 wurde die Entwicklung des Wasserstandes an 4 Messpegeln der Insel erfasst. Die Abb. 83. zeigt die Lage der Pegel Koller Süd und Koller Nord. Aufgrund der Vorbereitungen für die Bildflüge konnten sie nicht gleich bei Hochwasserbeginn abgelesen werden, weshalb die Werte für die ersten Tage fehlen.

Das Ausmaß der Inundationen im Außendeichbereich hat am 24.5.1999 seine maximale Ausdehnung bereits überschritten. Der Fluss zieht sich in sein altes Bett zurück und hinterlässt außendeichs in isolierten Geländesenken Restwasserflächen, die allmählich versickern. Innendeichs dagegen sind die Inundationsflächen teilweise noch im Wachstum begriffen, wie die Wasserstandsmessungen in Abb. 84. zeigen. Aus der Tatsache, dass der Straßendamm, der Senke Koller Süd von der Senke Koller Nord voneinander trennt, drei Tage lang eine Ausbreitung des Wasser ins Inselinnere verhinderte, lässt sich schließen, dass es sich bei den innendeichs gelegenen, dammnahen Inundationsflächen um oberflächennah ins Landesinnere eingedrungenes Dammsickerwasser handelte. Dies wird auch durch die Luftbilder in Abb. 85. und Abb. 86. unterstrichen: Das am Dammfuß bzw. in dammnahen Hochwasserquellen austretende Sickerwasser sammelt sich an den tiefsten Geländepunkten. Der Fahrdamm der Kollerstraße hindert dieses oberflächlich fließende Wasser an seiner weiteren Ausbreitung, weshalb es sich in den

Geländesenken zwischen Rheinhauptdamm und Fahrdamm zu kleinen „Inundationstümpeln“ aufstaut.

Die Ganglinien der Wasserstände in den beiden Messstellen zeigen, dass die näher am Damm gelegene Senke Koller Süd dem absinkenden Wasserstand des Rheins seit dem Beginn der Messreihe am 24.5. nachfolgt – wenn auch nur sehr allmählich. Bemerkenswert ist das rasche und starke Reagieren dieser Flächen auf die kleine „Nachwelle“ des Rheins am 10.6.1999. Eine Erklärung hierfür wäre eine seit der Ankunft der Hochwasserwelle im Untersuchungsgelände allmählich zunehmende Durchfeuchtung auch des bodennahen Substrats. Eine solche Wassersättigung des Untergrunds könnte zur Folge haben, dass Wasserstandserhöhungen im Rhein schneller als „Druckwelle“ ins Landesinnere weitergegeben werden als zu Beginn des Hochwasserereignisses. Dies deutet darauf hin, dass sich mit anhaltend hohen Wasserständen die zuerst durch oberflächlich bzw. oberflächennah ausbreitendes Sickerwasser entstandenen Inundationsflächen allmählich in „echte“ Druckwasserflächen verwandelt haben und in ihrer Wasserstandsentwicklung nun nicht mehr von oberflächlichen Zuflüssen, sondern von der Höhe des Grundwasserstandes in der Aue abhängen.

Die Ganglinie des Wasserstands in der Senke Koller Nord reagierte allerdings deutlich gedämpfter und mit einer noch größeren Verzögerung als Koller Süd auf die Wasserstandsentwicklung des Rheins: Obwohl der Rhein seit Beginn der Messreihe am 24.5. rasch sinkt, steigt das Wasser in Koller Nord noch bis zum 2.6. um etwa 6 cm weiter, was allerdings angesichts der größeren Entfernung vom Rhein und der auch bei anderen Flächen beobachteten Zeitverzögerung zu erwarten war. Ausschlaggebend für die Wasserstandsentwicklung der Senke Koller Nord ist offensichtlich in erster Linie der Wasserstand in der benachbarten Senke Koller Süd und nicht derjenige des Rheins selbst.

Insgesamt zeigten die Untersuchungen, dass es sich bei den Druckwasserflächen Koller Süd und Koller Nord um einen anderen Inundationsflächentyp handelte, als bei den Flächen „Falkenhof“, „Burglache“ oder „Auf der Au“. Die Nähe zum Rheinhauptdamm und die Wasserstandsmessungen lassen darauf schließen, dass die Überschwemmung dieser Flächen in erster Linie auf oberflächennahes, wahrscheinlich in der Nähe des Dammfußes austretendes Uferfiltrat zurückzuführen sind. Allerdings kann diese Aussage nicht auf die weiter im Inneren der Insel gelegenen Inundationsflächen übertragen werden. Es ist im Fall der Kollerinsel von einer Überlagerung zweier Effekte auszugehen – einerseits dem Einsickern und oberflächlichen Abfließen von am Dammfuß austretendem Wasser und andererseits bei anhaltenden Wasserständen dem Aufquellen von Druckwasser aus dem Untergrund infolge des Grundwasseranstiegs. Bei den dammnahen Senken ist von einer Dominanz des ersten, bei den im Inneren der Insel gelegenen Flächen ein Vorherrschen des zweiten Effekts auszugehen.

In Abb. 87. und Abb. 88. ist jeweils das Maximum der im Inneren der Kollerinsel aufgetretenen Inundationsflächen der Hochwasserereignisse von 1983 und 1999 dargestellt (blau). Die auf den Luftbildern von 1983 abgelichteten Ernteschäden zeugen von einem geringeren Überschwemmungsausmaß als 1999. Das räumliche Muster der Inundationen deckt sich aber dennoch mit dem der 1999er Überschwemmungen.

V.2.4. Schänzel

(Beispiel IV: Ausbreitung von Druckwasserwellen in ungespannten Verhältnissen)

Im Gegensatz zu den bisherigen Beispielen befinden sich die Druckwasserflächen des Flurstücks „Schänzel“ in der rezenten Aue. Bei höheren Wasserständen (etwa ab 350 cm ü.MW) werden sie direkt vom ausufernden Rhein überschwemmt. Bei niedrigeren Wasserständen handelt es sich aber um Druckwasserflächen. Das Relief ist in diesem Waldstück in drei (streckenweise auch mehr) parallel zum Rhein verlaufende Schluten und Uferdämme gegliedert. Druckwasseraustritte sind sowohl in diesen Schluten, als auch einer anthropogenen Senke (dem nahezu quadratischen Graben einer ehemaligen französischen Redoute aus dem 17. Jh.) bereits bei einem Anstieg des Rheinwasserstands von etwa 200 cm ü. MW. zu beobachten.

Am 2.8.1997 trat in der am weitesten vom Rhein entfernte Schlute Druckwasser aus, während die anderen Senken noch trocken lagen. Erst am Tag darauf begann auch in den näher am Rhein gelegenen Schluten Wasser aufzusteigen. Diese Beobachtung war insofern bemerkenswert, da bei späteren Geländebegehungen bei Hochwasser zuerst ein Wasserstandsanstieg in den rheinnahen und dann erst den rheinernen Senken festzustellen war.

Was ist die Ursache für dieses ungewöhnliche Inundationsverhalten? Während eines Geländepraktikums im Sommer 1999 wurden auch in diesem Bereich Geländevermessungen und Bodensondierungen vorgenommen. Das Ergebnis der Sondierungen ergab einen relativ homogenen, stark sandhaltigen Auenmergel im Untergrund, in dem sich vereinzelt Kiesablagerungen befinden. Ton konnte nur am Grund der rheinernen Schlute festgestellt werden. Aufgrund der homogenen Sedimentverteilung im Untergrund ist davon auszugehen, dass sich eine Hochwasserwelle im Untergrund des Flurstücks „Schänzel“ relativ gleichmäßig ausbreitet. Gespannte Grundwassersituationen wie im Beispiel „Falkenhof/Burglache“ kommen im Schänzel nicht als Ursache für die frühere Überschwemmung von rheinernen Flächen in Frage – zumal bei anderen Hochwasserereignissen ja auch zuerst die rheinnahen und dann erst die rheinernen Senken überschwemmt wurden. Der Grund für die gelegentliche Umkehr in der Reihenfolge des Inundationsbeginns ist vielmehr in der Art und Weise, wie sich die durch den Anstieg des Rheins induzierte Druckwasserwelle im Untergrund ausbreitet, zu suchen (s.u. bzw. Abb. 89. und Abb. 93.).

Eingehende Untersuchungen konnten zu diesem Themenkreis leider aus finanziellen Gründen nicht durchgeführt werden. Im folgenden soll aber versucht werden, aufgrund der im Gelände gemachten Beobachtungen und Messungen, aufbauend auf den bereits bestehenden Theorien, ein einfaches Modell zur Ausbreitung von Druckwasserwellen im Untergrund zu entwickeln bzw. auf die im Gelände beobachteten Inundationen anzuwenden.

V.3. Modell der Ausbreitung von Druckwasserwellen im Untergrund

Zunächst wird von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass es sich beim Untergrund der Rheinaue um einen homogenen, gut wasserdurchlässiger Sedimentkörper handelt. Eine grundsätzliche Klärung der Beeinflussung des Grundwassers in der Rheinniederung durch Hochwasser erfolgte bereits 1939 durch

HOFMANN³⁰ und wurde seither von zahlreiche Autoren übernommen (z.B. SCHÄFER 1978): Zunächst sei dargestellt, wie der Grundwasserspiegel auf einen starken, lang anhaltenden erhöhten Wasserstand des Rheins reagiert:

V.3.1. Modell für länger anhaltende Wasserstandserhöhungen (Abb. 89.)

Der Rhein ist der Vorfluter des hydrologischen Systems der Rheinniederung. Ein beständiger Grundwasserstrom fließt von den Randgebirgen zum Fluss. Auf den Wasserstand des Rheins (NW) stellt sich der Grundwasserspiegel etwa halbparabelförmig, von der Niederterrasse zum Rhein hin absinkend ein. Der niedrigste Stand des Grundwasserspiegels wird an der Einmündung in den Rhein erreicht. Steigt der Rheinwasserspiegel nun infolge eines Hochwassers sprunghaft an (HW), kehrt sich die Fließrichtung des Grundwassers in der Nähe des Flusses um. Aufgrund des nun höheren Wasserspiegels des Rheins dringt Flusswasser in das bisher noch nicht von Grundwasser erfüllte Erdreich ein. Währenddessen strömt weiterhin Grundwasser von der Niederterrasse in Richtung Fluss; der Grundwasserspiegel beginnt sich auf das neue, höhere Niveau des Flusses einzustellen. Dieser Ausgleichsprozess erstreckt sich über einen längeren Zeitraum (mehrere Tage). Der tiefste Punkt der Grundwasseroberfläche bewegt sich dabei immer weiter weg vom Fluss.

Dieses allgemeine Modell lässt sich für nun auf die verschiedenen, im Untersuchungsgelände beobachteten Druckwassertypen anwenden. Mit einfachen Modellmodifikationen ließen sich alle, auf den ersten Blick ungewöhnlich erscheinenden Beobachtungen erklären:

V.3.2. Modell für die Interaktion Fluss-Grundwasser bei einem „Jahrhundert“ Hochwasser (Abb. 90.)

Ausgangssituation ist der Fluss bei Mittelwasserstand (MW). Der Grundwasserkörper ist etwa parabelförmig zum Flusswasserstand hin geneigt. Ein beständiger Zustrom von Grundwasser aus den seitlichen Randgebirgen strömt dem Fluss zu. Steigt der Fluss nun zunächst auf das Niveau eines Hochwassers mit jährlicher Eintrittswahrscheinlichkeit (W1) dringt Uferfiltrat in die Flussnahe Aue ein. Da das Vorfluterniveau gestiegen ist, beginnt sich der Grundwasserstand zu heben. Steigt der Wasserstand im Fluss weiter auf das Niveau eines „Jahrhundert“-Hochwassers (W100), werden weite Teile der Aue direkt überschwemmt. Große Mengen Uferfiltrats dringen in den Untergrund ein. Das Uferfiltrat dominiert gegen über dem Grundwasserrückstau. Reicht der überschwemmte Rhein bis an den Rheinhauptdamm, dringt Uferfiltrat oftmals in großen Mengen in den hinter dem Damm gelegenen Senken aus.

V.3.3. Modell für vorübergehend erhöhten Wasserstand (Abb. 91. und 92.)

In den seltensten Fällen steigt der Rhein von einem über längere Zeit konstanten niedrigen Wasserstandsniveau auf ein höheres oder umgekehrt. Häufig verfügt eine Hochwasserwelle über mehrere Gipfel und zeichnet sich durch ein ebenso rasches Ansteigen wie Absinken aus. Dementsprechend komplex ist auch die Ausbreitung der Druckwasserwelle im Auensubstrat. Das folgende Modell beschreibt die Dynamik

³⁰ Siehe Hofmann, E.F. (1939): Grundwasserstandsänderungen im Oberrheintal. Dissertation, Karlsruhe.

des Grundwasserkörpers infolge einer eingipfligen, rasch ansteigenden aber auch wieder absinkenden Hochwasserwelle:

Bei einem nur kurzfristigen Anstieg des Rheinwasserstandes dringen zunächst Uferfiltrat und Grundwasser in den flussnahen Untergrund ein. Sinkt der Flusswasserstand wieder rasch ab, fallen auch die ufernahen Bereiche wieder trocken, während sich die Druckwasserwelle mit abnehmender Amplitude im Untergrund landeinwärts weiter ausbreitet. Bei derartigen Ereignissen sind in entfernt vom Fluss gelegenen Senken zu einem Zeitpunkt Druckwasseraustritte zu beobachten, an dem die rheinnahen Senken bereits wieder trocken gefallen sind.

V.3.4. Modell für den Druckwassertyp „Schänzel“ (Abb. 93.)

Im Auwald am Südöstlichen Rand der Rheinhäuser Weide fiel bei Beobachtungen im Gelände auf, das im Waldstück „Schänzel“ rheinferne Senken zu einem früheren Zeitpunkt Druckwasserauftritte aufwies als rheinnahe Senken. Eine Erklärung hierfür könnte folgendes Modell liefern:

Zwei zum Rhein parallele, etwa gleich tiefe Senken liegen bei Niedrigwasserständen des Rheins trocken. Aufgrund des zum Rhein hin abnehmenden Grundwasserspiegels liegt der Grund der weiter vom Fluss entfernten Senke näher am Grundwasserspiegel als derjenige der rheinnahen Senke. Bei einer raschen Wasserstandsänderung des Flusses durch eine Hochwasserwelle steigt der Grundwasserspiegel nach dem oben geschilderten Schema an und Grundwasser tritt zuerst in der rheinfernen Senke aus. Hält der erhöhte Wasserstand über einen längeren Zeitraum an, steigt der Grundwasserspiegel weiter und erreicht mit ein bis zwei Tagen Verzögerung auch die rheinnahe Senke

V.3.5. Modell für den Druckwassertyp „Burglache“ (Abb. 94. bis 97.)

Die „Burglache“ (auch „kleine Koller“ bezeichnet) östlich von Waldsee wies bei Hochwasserereignissen nur sehr verzögert Druckwasseraustritte auf. Einmal eingedrungenes Wasser verblieb dann allerdings über lange Zeit in der Senke. Mit folgender Modellmodifikation ließe sich diese Inundationsdynamik erklären. Eine natürliche Senke B (z.B. eine verlandete Schlute), ist durch mächtige Tonpakete im Untergrund gegen Wasseraustritte abgedichtet. Die benachbarte und gleich tiefe Senke A ist nicht mit wasserundurchlässigen Sedimenten versiegelt. Erst bei stark erhöhten Wasserständen, welche in den benachbarten Senken A bereits zu erheblichen Wasseraustritten geführt haben, tritt auch in Senke B Wasser aus. Da die Senke am Grunde gegen aufquellendes Wasser „versiegelt“ ist, beginnt sie sich erst mit Wasser zu füllen, wenn der Grundwasserstand so weit angestiegen ist, dass Druckwasser von den Seiten her einsickert. Einmal eingedrungenes Wasser verbleibt allerdings auch nach einem Absinken des Fluss- und Grundwasserstandes in B und verdunstet nur sehr allmählich. In Senke A hingegen versickert das Wasser bei sinkendem Rheinstand genauso schnell, wie es zuvor aufgequollen ist.

V.4. Typisierung von Inundationsflächen anhand der Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der Inundationsflächenkartierungen und Druckwasserflächenuntersuchungen haben gezeigt, dass Entstehen und Trockenfallen von Inundationsflächen verschiedene Ursachen und Erscheinungsformen haben kann. In bisherigen Arbeiten wurde lediglich unterschieden zwischen direkt durch den

ausufernden Rhein oberflächlich geflutete Inundationsflächen und binnendeichs, im vermeintlich hochwassersicheren Teil der Aue durch aus dem Untergrund aufquellendes Wasser gebildeten Druckwasserflächen. Die Arbeiten im Untersuchungsgebiet machten deutlich, dass eine genauere Unterscheidung der Inundationsflächen möglich und sinnvoll ist. Eine Übersicht zu den bisher betrachteten Inundationsprozessen ist in Abb. 98. bis Abb. 103. dargestellt. Im folgenden soll eine mögliche Typisierung von Inundationsflächen vorgestellt werden:

V.4.1. Unterscheidung von Überschwemmungsflächen nach der Herkunft des einströmenden Wassers

Nach der Ursache der Inundation bzw. dem Ursprung des einströmenden Wassers lassen sich drei Gruppen unterscheiden :

I. Direkte Inundationen durch den ausufernden Fluss:

Es handelt sich hierbei um diejenigen Flächen, die durch den - in Folge eines Wasserstandsanstiegs ausufernden - Rhein oberflächlich überschwemmt werden: Die „direkten“ Überschwemmungsflächen. Eine entlang des Hauptgerinnes stromabwärts fließende Hochwasserwelle breitet sich zumeist über die Altarme und verlandeten Schluten und Gießen rasch in die rezente Aue aus. Die hierbei entstehenden Inundationsflächen stehen mit dem Wasserstand des Rheins in engem Kontakt. Einem Anstieg oder Absinken des Flusswasserstandes folgen sie mit wenigen Stunden, in großer Entfernung vom Hauptgerinne maximal mit einem Tag Verzögerung. Wenn sich der Fluss wieder aus der Aue zurückzieht, bleiben in zahlreichen Geländesenken Restwasserflächen zurück. Besteht das Substrat in diesen Senken aus wasserdurchlässigen Sedimenten, versickert das Restwasser bei sinkenden Wasserständen rasch. Sind die Senken dagegen z.B. durch eine Tonschicht versiegelt, fallen sie erst durch Verdunstung bzw. sehr langsames Versickern nach Monaten wieder trocken.

II. Sickerwassersammelflächen

Ferner waren oftmals in Dammnähe Geländesenken zu beobachten, in denen sich das in der näheren Umgebung austretende und oberflächlich abfließende Wasser sammelte. Im Gegensatz zu den „echten“ Druckwasserflächen erfolgt der Wasseraustritt nicht in unmittelbarer Nähe der Senke. Stattdessen fließt das aufquellende Wasser nach seinem Austritt oberflächlich, der Morphologie des Geländes folgend ab und sammelt sich - sofern es nicht in Gräben oder Schluten abfließen kann, in den tiefsten Punkten. Ein Beispiel hierfür ist die Inundationsfläche „Koller I“, in der sich das am Dammfuß austretende Wasser sammelte. Auch im Bereich der „Goldgrube“ südlich von Speyer und nahe der Mülldeponie nördlich von Speyer konnten während des Pfingsthochwassers 1999 an zahlreichen Stellen Wasseraustritte aus dem Dammfuß beobachtet werden, die zu einer Entstehung solcher Sickerwassersammelflächen führten. Zu diesem Inundationsflächentyp sind auch diejenigen Flächen zu zählen, die durch das in Entwässerungsgräben gesammelte und abgeleitete Druckwasser gespeist werden.

III. „Echte“ Druckwasserflächen

Mit „echten“ Druckwasserflächen sind hier diejenigen Inundationsflächen bezeichnet, die durch in der Geländesenke selbst aufquellendes Wasser entstehen (wie z.B. „Falkenhof“ und „Auf der Au“ in den aufgelassenen Tongruben und verlandeten

Altarmen des Rheins). Die „echten“ Druckwasserflächen konnten auch (bzw. gerade) in deutlicher Entfernung vom Rhein bzw. vom Rheinhauptdamm nachgewiesen werden. Bei diesen Flächen war eindeutig auszuschließen, dass ihr Wasser aus oberflächlichem Abfluss stammte. Für die „echten“ Druckwasserflächen ist charakteristisch, dass sie erst mit deutlicher Verzögerung auf den Wasserstandsanstieg des Rheins reagieren. In einigen Fällen war ein Aufquellen von Wasser aus dem Untergrund erst einige Wochen nach dem Maximum des Rheinmaximums zu beobachten.

Die Dynamik der direkten Überschwemmungsflächen ist relativ gut dokumentierbar und prognostizierbar: Bei allen beobachteten Hochwasserereignissen war sowohl für ansteigende, als auch für sinkende Wasserstände eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Ausmaß der direkten Überschwemmungsflächen und dem Wasserstand am Pegel Speyer festzustellen. Bei gleich hohen Maximalwasserständen deckten sich die direkten Überschwemmungsflächen der verschiedenen beobachteten Hochwasserereignisse. Eine Prognose des Ausmaßes der Inundationen ist bei diesem Überschwemmungsflächentyp vergleichsweise einfach, da der Wasserstand des Rheins und die relative Höhenlage der entsprechenden Fläche zum Strom die dominanten Faktoren der Entstehung dieser Flächen sind und somit aufgrund von empirischen Hochwasseruntersuchungen eine eindeutige Zuordnung von Inundationsflächen zu einem definierten Wasserstand möglich ist.

Die Dynamik der durch aus dem Untergrund aufquellendes Wasser gespeisten Inundationsflächen ist dagegen wesentlich komplexer und schwerer zu prognostizieren.

V.4.2. Unterscheidung der Inundationsflächen nach dem Substrat

Das Beispiel von „Burglache“ und „Falkenhof“ zeigte, dass sowohl der Zeitpunkt des Aufquellens, als auch das Versickern von Druckwasser bei direkt benachbarten Flächen stark variieren kann. Wie die Bodensondierungen im Sommer 2000 ergaben, ist dies in erster Linie auf die kleinräumige Verteilung von Wasserleitern und -hemmern im Substrat zurückzuführen. Gerade die Frage, wie lange einmal ausgetretenes Wasser in einer Druckwasserfläche verbleibt, ist aber z.B. für die Stechmückenbekämpfung, für die Raumplanung und die Forschung (z.B. Renaturierungsmaßnahmen in der Aue) von besonderem Interesse. Inundationsflächen lassen sich deshalb sinnvollerweise in zwei weitere Gruppen unterteilen – in Inundationsflächen mit wasserleitenden und mit wasserhemmenden Sedimenten im Untergrund. Die Abgrenzung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit über die Bodenart. Bei Inundationsflächen mit wasserdurchlässigen Sedimenten dominieren die Sand- und Kiesanteile bzw. der sogenannte sandige Auenmergel. Wasserstandsänderungen im Rhein bzw. im Grundwasserspiegel breiten sich rasch in den Sedimentkörpern aus und führen, wenn die Oberfläche des Grundwasserspiegels den tiefsten Punkt einer Senke erreicht, zu oberflächlichen Wasseraustritten. Das Wasser tritt kurze Zeit nach dem Ansteigen des Rheinwasserstandes – je nach Entfernung zum Rhein erfahrungsgemäß innerhalb eines Zeitraums von 1/2 bis 3 Tagen – in den Senken aus, verschwindet aber auch ebenso rasch wieder. Die Entwicklung der Wasserstände entspricht in diesen Senken in etwa den Ganglinien, wie MATTHES sie 1958 für die Parkinsel beschrieben hat (siehe Abb. 18.).

Bei Inundationsflächen mit wasserhemmenden Sedimenten handelt es sich oftmals um verlandete Rheinarme bzw. Hochwasserrinnen, die am Grund der Senke mit

einer mehreren Meter mächtigen Tonschicht gegen aufquellendes Wasser abgedichtet sind. Infolgedessen sind Quellhorizonte in diesen Flächen in der Regel nicht in der Tiefenlinie, sondern vielmehr an den Seitenwänden der Senken zu beobachten. Das Wasser tritt in diesen Flächen erst mit erheblicher Verzögerung zum Rheinwasserstandsmaximum aus, zu einem Zeitpunkt also, in dem der Rhein manchmal bereits seinen Mittelwasserstand wieder erreicht hat. Aufgrund der Tonpakete können bei Hochwasser gespannte Grundwassersituationen mit artesischen Druckwasserquellen auftreten. Oftmals wurden die Tonvorkommen dieser Geländesenken bereits im Mittelalter zur Tongewinnung genutzt. Dabei wurden in einigen Fällen die Tonschichten soweit abgetragen, dass darunterliegende wasserleitende Sedimente angestochen und damit Quellfenster inmitten der Senken geschaffen wurden (wie z.B. bei der Druckwasserfläche „Auf der Au“ bei Waldsee). Die Tonpakete hemmen aber nicht nur ein rasches Aufquellen von Grundwasser, sondern verhindern auch ein Versickern von einmal eingedrungenem Wasser. Beispielsweise stand das Wasser, das während des Junihochwassers 1999 in die Druckwasserfläche „Burglache“ bei Waldsee eindrang, bis einschließlich September 1999 in der Senke.

V.4.3. Unterscheidung der Inundationsflächen in Abhängigkeit vom für eine Flutung abhängigen Wasserstand

Wann Inundationsflächen entstehen oder wie stark die Schüttung von Druckwasseraustritten ist, hängt in erster Linie vom Wasserstand des Rheins ab. Gerade für die Flutung von Druckwasserflächen mit wasserhemmenden Sedimenten im Untergrund ist es notwendig, dass der Fluss einen bestimmter Wasserstand über einen längeren Zeitraum hin nicht unterschreitet, da der Grundwasserstand sich erst mit einer gewissen Verzögerung auf das neue Niveau einstellt. Darüber, welcher Wasserstand über einen wie langen Zeitraum erreicht werden muss, damit ein Austritt von Wasser in den Senken erfolgt, können keine allgemeinen Aussagen getroffen werden, da gerade Druckwasserflächen eine sehr individuelle Inundationsdynamik aufweisen. In vielen Fällen verändert sich die Inundationsdynamik in ein und derselben Fläche ab einem bestimmten Wasserstand. Während z.B. bei lang anhaltenden Wasserständen von 1,5 m. ü. MW in einer Senke sich Quellhorizonte öffnen, es sich also nach der soeben vorgeschlagenen Einteilung um eine „echte“ Druckwasser handelt, können sich bei weiter steigenden Wasserständen ab 2m ü. MW stark schüttende Hochwasserquellen in der Umgebung der Senke öffnen und diese zusätzlich mit oberflächlich einfließendem Wasser füllen. In diesem Fall wäre diese Senke also bei Wasserständen bis 1,5m ü. MW als Druckwasserfläche und bei weiter steigenden Wasserständen ab 2m ü. MW als Sickerwassersammelfläche zu charakterisieren. Ebenso können in der rezenten Aue befindliche Druckwasserflächen sich ab einem bestimmten Wasserstand in direkt vom Fluss überschwemmte Flächen verwandeln.

V.4.4. Herkunft des Wassers in den Druckwasserflächen

Für ein besseres Verständnis der oberflächennahen Grundwasserströme und im Zusammenhang mit Baumaßnahmen in der Rheinniederung ist auch die Herkunft des in den Druckwasserflächen austretenden Wassers von Interesse. Während es sich bei den Druckwasserflächen oftmals um aufquellendes Grundwasser, das von den Randgebirgen Richtung Rhein strömt, handelt, werden die Sickerwassersammelflächen zumeist durch Uferfiltrat, welches in der überschwemmten Aue in den Untergrund eintritt und unter dem Rheinhauptdamm oberflächennah hindurchsickernd in den innendeichs gelegenen Senken wieder

austritt, gespeist. Im Gelände zu entscheiden, ob es sich bei dem in einer Senke aufquellendes Wasser um Uferfiltrat oder Grundwasser handelt, stellt ein methodisches Problem dar. Oft lässt sich die Herkunft des Wassers aus der Morphologie und der Lage der Druckwasserfläche zum Rhein vermuten. A. KIRSTEIN befasste sich im Rahmen des vorliegenden Promotionsprojektes in seiner Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Heidelberg mit der Frage, inwieweit sich die Wasserleitfähigkeit als Kriterium für die Unterscheidung von Uferfiltrat und rückgestautem Grundwasser nutzen lässt. Für weitere Informationen zur angewandten Methodik und den Untersuchungsergebnissen sei auf diese Arbeit verwiesen:

KIRSTEIN, A. (2002): Die zeitliche und räumliche Dynamik von Druckwasserflächen in den Rheinauen zwischen Mannheim und Altlußheim. Eine Modelluntersuchung zur Beurteilung von kleinräumigen Überschwemmungsflächen. unveröffentlichte Diplomarbeit. Heidelberg.

V.4.5. Vorschlag für eine Terminologie zur Charakterisierung von Inundationsflächen

Anhand der Kriterien in Abschnitt V.4.1. bis V.4.3. lassen sich die in im Untersuchungsgebiet beobachtbaren Haupttypen der Überschwemmungsflächen voneinander abgrenzen. Der folgende Vorschlag für eine Bezeichnung von Inundationsflächen soll dazu dienen, die wichtigsten Informationen auf einen Blick z.B. als Zusatzinformation in einer Inundationsflächenkarte verfügbar zu machen.

Die Grundtypen der Inundationsflächen werden folgendermaßen bezeichnet:

Direkte Inundationsfläche:	DI
Druckwasserflächen:	DWF
Sickerwassersammelflächen:	SWF

Diese Grundtypen erhalten die durch einen Schrägstrich abgetrennten Zusätze
wl für wasserleitende Sedimente oder
wh für wasserhemmende Sedimente im direkten Untergrund der Inundationsfläche.

Aus der Kombination dieser beiden Abgrenzungsmerkmale ergeben sich die sechs wichtigsten Inundationsflächentypen:

- DI/wh: Direkte Inundationsflächen mit wasserhemmenden Sedimenten im Untergrund. Diese Flächen zeichnen sich dadurch aus, dass nach einem Absinken des Rheinwasserstandes in diesen Flächen das Wasser noch lange stehen bleibt und nur allmählich verdunstet.
- DI/wl: Dagegen verschwindet in den Direkten Überschwemmungsflächen mit wasserleitenden Sedimenten im Untergrund das Wasser fast ebenso schnell, wie es während des Hochwassers einströmte.
- DWF/wh: Bei den Druckwasserflächen mit wasserhemmenden Sedimenten im Untergrund handelt es sich zumeist um langsam verlandete Hochwasserrinnen und Schluten mit mehreren m mächtigen tonigen Böden (oftmals mit Pseudogleyhorizonten). Wasser dringt bei Hochwasserereignissen in diese Senken erst mit erheblicher Verzögerung ein. Ebenso erreicht der Wasserstand sein Maximum in diesen Flächen erst Tage bis Wochen nach der Hochwasserspitze des Rheins. Einmal in diese Senken eingedrungenes Wasser versickert kaum mehr.

- DWF/wl: Senken, in denen mit geringer Verzögerung zu den Wasserstandsanstiegen im Fluss Wasser an den tiefsten Punkten austritt. Der Wasserstand in der Senke repräsentiert in etwa die Höhe des Grundwasserstandes – sinkt dieser wieder, beginnt auch in der Senke das Wasser wieder zu versickern.
- SWF/wh: Diese Senken liegen zumeist in unmittelbarer Nähe zum Rheinhauptdamm oder zu Bächen und Gräben, in einigen Fällen jedoch auch weit vom Fluss entfernt in der Nähe von artesischen Hochwasserquellhorizonten. Während des Hochwasserereignisses aus dem Dammfuß (oder aus Hochwasserquellen) ausdringendes Sickerwasser sammelt sich in diesen Flächen und verbleibt dort aufgrund des tonigen Boden über Wochen.
- SWF/Wl: wie SWF/Wh, nur dass der Wasserstand in diesen Senken rasch auf die Änderungen des Rheins reagiert.

Weiterhin werden diese sechs Haupttypen mit einem in Klammern gesetzten Zusatz versehen, aus dem hervorgeht, auf welche Wasserstände sich die Charakterisierung der Fläche bezieht. Die Wasserstandsangaben werden in cm in Bezug zum Mittelwasserstand gesetzt. Aus der Legende der Karte muß natürlich der genaue Wert des Mittelwasserstandes hervorgehen. Beispiel:

Bei dem in der Böllenwörth bei Otterstadt gelegenen „Ketscher Teich“ handelt es sich bei Wasserständen von etwa 1,2m bis 3m. ü. MW um eine Fläche des Typs DWF/Wl. Bei Wasserständen über 3m ü. MW wird diese Senke von oberflächlich einströmendes Wasser aus dem Otterstädter Altrhein geflutet. Nach der vorgeschlagenen Terminologie erhält sie deshalb die Bezeichnungen DWF/wl(120 – 300); DI/wl(300+).

Ein Beispiel für die Verwendung dieser Terminologie stellt die Karte in Abb. 151. dar.

VI. Ergebnisse der Auswertung historischer Karten

Eine GIS-gestützte Auswertung historischer Karten scheitert in den meisten Fällen an ihrer mangelnden geodätischen Genauigkeit. Doch für das Untersuchungsgebiet liegen mit den Rheingrenzkarten³¹ aus den Jahren 1856 bzw. 1875 für GIS-Analysen hervorragend geeignete Kartenwerke im Maßstab 1:20.000 vor: Die Karten besitzen eine vermessungstechnisch einwandfreie Grundlage und verfügen über eine hohe Detailtreue. Zur Entstehungsgeschichte und eingehenderen Beschreibung des Kartenwerkes sei auf die im Rahmen des vorliegenden Promotionsprojektes erstellte Diplomarbeit von CLEMENS JAKOBS verwiesen (JAKOBS 2002, S.6ff).

Das größte Hindernis bestand in der digitalen Aufbereitung der original Rheinstromatlanten. Glücklicherweise konnte auf einen Hinweis von Prof. Dr. H. Musall hin ein Exemplar der Rheingrenzkarten im Rehbock-Institut der Universität Karlsruhe ausfindig gemacht und eingescannt werden³². Der Erhaltungszustand der beiden Atlanten des Rehbock Laboratoriums war erfreulicherweise sogar deutlich besser als der im Generallandesarchiv archivierten. Gescannt wurden die Kartenblätter auf einem DIN A3 Flachbrettscanner bei einer Auflösung von 300 dpi. Eine höhere Auflösung hätte die Kartenscans für zur Verfügung stehenden Rechner nicht mehr bearbeitbar gemacht.

Ein zeitaufwendiger Arbeitsschritt war die Transformation der Karten von ihrem *Soldnerschen Koordinatensystem* in das *Gauss-Krüger System*. Der ursprüngliche Plan, die Transformation der Karten über Passpunkte im Gelände vorzunehmen, scheiterte daran, dass sich die Landschaft in der Rheinaue seit dem 19. Jh. zu stark gewandelt hat: Bis auf wenige Kirchtürme war es nicht möglich, seit Entstehung der Karten unveränderte räumliche Objekte wie z.B. einzelstehenden Häuser, Straßenkreuzungen oder Denkmälern zu identifizieren. Als imaginäre Passpunkte wurden deshalb die auf den Karten eingezeichneten Kreuzungspunkte des Soldnerschen Gitternetzes verwendet, die JACOBS mit einem Transformationsprogramms des Vermessungsamtes der Stadt Heidelberg für unser Untersuchungsgebiet in das Gauss-Krüger System umrechnete³³. Am CESAR Laboratory stand mir dann erfreulicherweise die technische Ausstattung zur Verfügung, um die Scans der historischen Karten auf Grundlage dieser Passpunkte zu georeferenzieren. Die Transformationsparameter sind in Tab. 7. angegeben.

Um die relevanten Inhalte (Landnutzung, Wasserflächen, usw.) der georeferenzierten Karten zu vektorisieren und in ArcView zu implementieren, kamen zwei Verfahren in Frage. Am arbeitsökonomischsten lässt sich dieser Prozess mit einer überwachten Klassifizierung und dem anschließendem Export der Klassifizierungsergebnisse als ArcInfo Coverages in IMAGINE 8.4. bewerkstelligen. Da diese Arbeiten aber aus Zeitgründen am CESAR Laboratory nicht mehr vorgenommen werden konnten und das Geographischen Institut über die IMAGINE 8.4. Lizenzen noch nicht verfügte,

³¹ Vollständiger Titel der Rheinstromatlanten: Carte über den Lauf des Rheins von Lauternburg bis unterhalb Sandhofens längs der badisch-bayerischen Grenze in 8 Blättern nach dem Maßstab von 1:20000 d.n.GR.. Darstellend des Zustand des Stromes in den Jahren 1856-58 [1875] wie solcher infolge der zwischen beiden Uferstaaten über die Regulierung des Stromes getroffene Vereinbarung, seit dem Jahre 1817 bis dahin herbeigeführt wurde. Unter benützung vorhandener Materialien größtenteils aber nach neuen Aufnahmen bearbeitet auf dem technischen Bureau der Großh. Oberdirection des Wasser- und Straßenbauamtes.

³² An dieser Stelle sei Herrn Dr. BERNHARDT vom Rehbock-Institut für die freundliche Hilfe und Bereitstellung der Atlanten herzlich gedankt.

³³ Zur Transformation der Gitterpunkte vom Soldner- in das Gauß-Krüger-System siehe JAKOBS 2002, S.14f.

wurden die transformierten Imagine-files per ftp-Verbindung zurück an das Geographische Institut in Heidelberg gesandt, und dort in ArcView am Bildschirm vektorisiert.

Im GIS konnten die verschiedenen Informationsebenen der historischen Karten nun mit den ebenfalls vektorisierten Ergebnissen der Inundationsflächenkartierungen im Gelände und den Auswertungsergebnissen der Luftbildinterpretation verglichen und analysiert werden.

VI.1. Quantifizierung der historischen Landnutzung und des Landschaftswandels in der Rheinniederung

Eine quantitative Bilanzierung des Landschaftszustandes bzw. des Landschaftswandels in der Rheinaue des 19. Jahrhunderts wurde erstmals im Rahmen des vorliegenden Promotionsprojekts von CLEMENS JAKOBS vorgenommen. Die Vorgehensweise bei der Kartenaufbereitung-, -auswertung und -analyse sowie die gewonnenen Ergebnisse sind ausführlich in seiner Diplomarbeit beschrieben (siehe JAKOBS 2002). Im folgenden Abschnitt werden deshalb lediglich die für die Entwicklung der Inundationsflächen relevanten Ergebnisse vorgestellt und um weitere, in der Diplomarbeit noch nicht behandelte Aspekte und Auswertungsergebnisse ergänzt:

VI.1.1. Zustand und Wandel der Landschaft im Untersuchungsgebiet von 1856 bis 1875

In Abb. 104. und Tab. 8. sind die Anteile der verschiedenen Formen der Landnutzung an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes im Jahre 1856 in Karte und Tabelle dargestellt³⁴. Das weite Gerinnebett des Rheins machte 13,37% der gesamten Rheinniederung aus (die offenen Wasserflächen lagen bei 9,14%, die offenen Sand- und Kiesbänke des weiteren Flussbettes bei 4,23%). Der Waldanteil lag bei 18,86%, Ackerflächen machten 28,32% und Grünland insgesamt 35,51% des Untersuchungsgebietes. Die Angaben basieren auf der Auswertung der Rheinstromatlanten von 1856 (JACOBS 2002).

Es wurde bereits auf die Intensivierung der Landnutzung und die Oberrheinkorrektion begleitende Meliorationsmaßnahmen im 19. Jahrhundert hingewiesen. Es ist davon auszugehen, dass die Flächen der Rheinaue der jeweils intensivsten Landnutzung zugeführt wurden. Deshalb wurde bei der Interpretation der historischen Karten die extensive Nutzung einer Fläche als Indikator für eine häufige Überschwemmung oder zumindest für eine starke Vernässung des Bodens gewertet. Diese These spielt bei den späteren Auswertungen eine große Rolle und wird deshalb an dieser Stelle kurz behandelt:

Neben hydrologischen Ursachen käme auch eine schlechte Bodengüte als Grund für eine extensive Landnutzung in Frage. Gegen die Bodengüte- und für die Bodenfeuchte-These sprechen jedoch die Nutzungsänderungen zwischen 1856 und 1875 (siehe Tab. 9.). Bis zum Jahre 1875 wurde bereits etwa 1/4 des Waldbestandes von 1856 gerodet und einer intensiveren Nutzung zugeführt. Von den insgesamt 606,96 ha gerodeten Wald wurden mehr als $\frac{3}{4}$ in Ackerfläche umgewandelt, weshalb eine schlechte Bodengüte hier als Ursache der vormalig extensiven Nutzung ausscheidet. Zu den extensiv genutzten Flächen zählen neben dem Wald auch die Grünlandflächen, auf denen hauptsächlich Futter für die Stallfütterung gewonnen

³⁴ Die nun folgenden Angaben basieren auf der Auswertung der Rheinstromatlanten von 1856 und 1875 durch JAKOBS 2002

wurde. Insgesamt wurden 391,45ha (9,5%) des Grünlandbestandes von 1856 bis 1875 einer höherwertigeren Nutzung zugeführt

Dass sich die Waldfläche im Untersuchungsgebiet insgesamt zwischen 1856 und 1875 kaum veränderte, liegt daran, dass die Rodungen durch die Bestockung großer Teile des ehemaligen Rheingerinnes nahezu wieder ausgeglichen wurden. Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet bis 1875 etwa 468 ha (d.h. 4% der Fläche von 1856) des ehemaligen Rheingerinnes in Wald umgewandelt. Der Wald verschob sich insgesamt zum Rhein hin – hinter den Dämmen nahm der Wald ab, in der verbliebenen, eingedeichten Aue nahm er zu.

Das Landschaftselement, das die größten Flächenverluste erfuhr, waren die offenen Sand- und Kiesbänke des Rheins mit minus 74,02%, womit sich belegen lässt, dass die korrektionsbedingte Unterbindung der natürlichen morphodynamischen Prozesse bereits 1875, also noch vor dem Bühnenbau unter Max Honsell eingetreten war. Der Anteil der Sand- und Kiesflächen an der Gesamtfläche lag 1856 zwar nur knapp über 1% , doch ihr Verlust hatte dramatische Folgen für die Artenvielfalt und bedeutete das Ende der einst so bedeutsamen Rheinfischerei. Auch die bereits im Niedergang befindliche Goldwäscherei fand damit ihr endgültiges Ende.

Es soll an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass über den Zustand des Untersuchungsgebietes vor Beginn der Oberrheinkorrektion kein im GIS auswertbares Kartenmaterial vorliegt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme der Rheingrenzkarte von 1856 hatten sich jedoch mit Sicherheit schon starke Veränderungen in der Landnutzung ergeben. Nur so ist es beispielsweise zu erklären, dass z.B. der Anteil der feuchten Wiesen bereits 1856 lediglich bei 0,06% der Gesamtfläche liegt. Die Entwässerung des Grünlandes scheint im Untersuchungsgebiet bereits vor der Erstellung der ersten Rheingrenzkarte weitestgehend abgeschlossen gewesen zu sein.

V.1.2. Wandel der Landschaft im Untersuchungsgebiet von 1856 bis 1999

Der Vergleich von aktuellen topographischen Karten und Luftbildern mit den historischen Karten im GIS ermöglicht eine Fortführung der Untersuchung des Landschaftswandels bis in die Gegenwart. Ein Vergleich gestaltet sich allerdings etwas schwieriger als der im letzten Abschnitt vorgestellte, da die Karten von 1856 und 1875 jeweils auf der gleichen Flächenklassifizierung beruhen, die Interpretation der heutigen Landnutzung hingegen direkt aus dem unklassifizierten Luftbild erfolgen muss. Die amtlichen topographischen Karten weisen gerade bei der Flächennutzung eine wesentlich undifferenziertere Klassifizierung als die Rheinstromatlanten auf und eignen sich für derartige Vergleiche schlechter als ein Luftbild. Der bereits im 19. Jahrhundert einsetzende dramatische Rückgang der offenen Sand- und Kiesflächen setzte sich weiter fort und resultiert in einer vollständigen Elimination dieses Flächentyps im Untersuchungsgebiet bis 1999. Die vereinzelt im Gelände beobachteten offenen Sandflächen sind im Maßstab 1:20000 der Rheinstromkarten nicht mehr darstellbar. Von den 1856 noch existierenden 522 ha Sand- und Kiesbänken wurden bis 1999 rund 185 ha vom heutigen Rhein und seinen ausgebagerten Seitenarmen aufgenommen, die verbliebenen 336 ha sind mit Wald bestanden.

VI.2. Genese der direkten Inundationsflächen

Die Methode der GIS-gestützten Interpretation historischer Karten lässt sich zur Klärung der Entstehungsgeschichte der bereits für das Untersuchungsgebiet identifizierten rezenten Überschwemmungsflächen nutzen. Zunächst soll der Frage der Genese der häufig, d.h. bei Wasserständen von 0,5 m bis 2,25 m ü. MW. überschwemmten Inundationsflächen nachgegangen werden. Auf die Rolle dieser Flächen als bevorzugte Stechmückenbrutplätze wurde ebenfalls hingewiesen. Anhand der folgenden Beispiele soll kurz die Entstehung dieses Inundationsflächentyps illustriert werden:

VI.2.1. Böllenwörth

Der Durchstich des Otterstädter Mäanderbogens, der die Koller in eine Insel verwandelte, erfolgte 1833. Im großherzoglich badischen Atlas von 1838 ist der Fluss noch immer in seinem alten Lauf abgebildet (siehe Abb. 105.). Im Jahre 1839 nahm der Rhein dann sein neues Bett an. Auf der Rheinstromkarte von 1856 ist die Ingestion des ehemaligen Mäanderbogens bereits vollständig verlandet und größtenteils bewaldet (siehe Abb. 106.). Dieser Verlandungsbereich trägt heute den Namen „Böllenwörth“. Die Geschwindigkeit, mit der der Verlandungsprozess voranschritt, mag zunächst erstaunen, ist aber auf die Maßnahmen der Neulandgewinnung im Rahmen der Oberrheinkorrektur zurückzuführen (siehe JAKOBS 2002, S.57):

In den Ingestionen der Altrheine wurden zur Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit und zur Förderung der Sedimentation von den Seiten her einengende Bauwerke und Sohlenschwellen aus Faschinenbündeln angelegt. Frische Verlandungen wurden mit Weiden als „Sedimentationsfallen“ bepflanzt (siehe Abb. 107.). Die Bepflanzung erfolgte mit einfachen Weideruten, die einzeln oder in Form von quer zum Altwasser gesteckten Flechtzäunen rasch im Schlamm wurzelten. Eine andere Methode waren die „Entennester“, bei denen kreuzförmig gegeneinander versetzte Löcher mit Erde gefüllt und mit Weideruten und –astholz umsteckt wurden. Bei all diesen Maßnahmen ließ man immer einen Durchlass offen, um eine weitere Sedimentzufuhr auch bei niedrigeren Wasserständen sicherzustellen. Die Methode der Landgewinnung durch Bepflanzung ist keine Neuerung des 19. Jahrhunderts, sondern wurde nachweislich bereits im Spätmittelalter gepflegt. Die sich im Strom neubildenden Kies- und Sandbänke, auf welche meist die Heidelberger Kurfürsten als „Herren des Rheins“ Anspruch erhoben, wurden zur Neulandgewinnung ebenfalls so bald wie möglich mit Weiden bepflanzt (MUSALL 1971, S.650).

Die 1856 im Bereich der Böllenwörth eingezeichnete Bewaldung hat man sich deshalb nicht als Hochwald, sondern als Weiden-Niederwald vorzustellen. Im äußersten Norden und Süden der Böllenwörth, entlang der ehemaligen Ufer des Flussbettes, befanden sich 1856 vegetationslose, bei höheren Wasserständen durchströmte Schluten. Die nördliche Schlute ist der heutige Böllenwörthgraben, die südliche Schlute war im Osten bereits 1856 bewaldet. Durch vier kleine Schluten standen die nördliche und die südliche Rinne miteinander in Verbindung, was der Anordnung der Rinnen ein leiterförmiges Aussehen gab (siehe Abb. 106.). Diese Senken sind auch heute im Gelände alle im Wald noch deutlich zu erkennen; die südliche Schlute lässt sich als längliche Wiese besonders deutlich ausmachen (siehe Abb. 108.b.). Bis 1875 waren auch die 1856 vegetationsfreien Schluten bewaldet und die Verlandung des Altrheins weiter vorangeschritten (siehe Abb. 108.). Bis 1925 war die Ingestion bis auf mehrere km Länge verschlossen und bewaldet, aus Teilen der

Schluten hatten sich längliche Tümpel entwickelt (siehe Abb. 109.). Die Zerstörung dieser einst so ausgedehnten Verlandungsflächen durch die Kiesgewinnung wurde bereits im letzten Abschnitt beschrieben.

In Abb. 110. sind die kartierten Inundationen von Wasserständen bis 225cm ü. MW. zusammen mit dem entsprechenden georeferenzierten Kartenblatt des Rheinstromatlasses und der heutigen Uferlinie des Rheins und der permanenten Gewässer dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die rezenten Inundationen fast ausschließlich in den 1856 noch offenen Wasserflächen des Rheins oder auf den damaligen vegetationsfreien Sand- und Kiesflächen befinden. Einzige Ausnahmen sind der Ketscher Teich und die Schlute der Kammerwörth. Beim Ketscher Teich ist zu vermuten, dass es sich um eine anthropogen ausgetiefte Fläche handelt. Die Entstehung der Kammerwörthschlute ist schwer zu fassen. Wahrscheinlich handelt es sich um die Überreste eines spätmittelalterlichen Gießens, oder sie entstand erst während eines Hochwassers nach der Oberrheinkorrektur. In den Rheinstromatlanten ist sie nicht verzeichnet. Erst in einer Topographischen Karte von 1925 ist sie, allerdings bereits in ihrer heutigen Erscheinungsform, verzeichnet. Da die direkte Verbindung im Osten der Böllenwörth zum Rhein heute völlig unterbunden ist, werden die Senken heute bei kleineren Wasserstandserhöhungen von Westen, vom Otterstädter Altrhein her geflutet. Dies erklärt auch, warum bei Inundationen von bis zu 225 cm in erster Linie die Schluten im Westen der Böllenwörth überschwemmt sind (siehe Abb. 110.). Bei höheren Wasserständen wird allerdings das Schlutensystem von 1856 wieder vollständig aktiviert.

VI.2.2 Auwald im Süden und Osten der Rheinhäuser Weide

Um 1600 floss der Rhein bereits wie heute im großem Bogen auf Speyer zu. Nach den ursprünglichen Plänen Tullas hätte ein Durchstich mitten durch die vom Mäander umflossene Rheinhäuser Weide erfolgen sollen. Das Vorhaben musste aber nach Protesten sowohl von den Speyerer Anwohnern, die ihre Weide nicht verlieren wollten, als auch seitens Preußens und der Niederlande, die wie erwähnt eine Verschlechterung der Hochwassersituation fürchteten, 1829 wieder aufgegeben werden. Der Durchstich hätte den Ostteil der Weide ähnlich der Koller in eine Insel verwandelt und den Großteil der Insel Horn im Rheinbett aufgenommen. Die Karte von 1856 (Abb. 111.) zeigt, dass der Rhein zu Anfang des 19. Jh. zwischen der Rheinhäuser Weide und Altlußheim in einem fast doppelt so breiten Bett floss wie heute. Der Gleithang an der Rheinhäuser Weide bestand aus einer breiten, vegetationslosen Sand- und Kiesbank. Die heutigen Auwaldbereiche „Schänzel“ und „Unterer Salmengrund“ sind durch parallel zum Gleithang des Rheins verlaufende Schluten und Uferdämme durchzogen, die der Strom bei der Verlagerung seines Bettes nach Osten zurückließ. Bis 1875 wurde der Fluss durch die Korrektionsarbeiten unter Tulla in sein heutiges, schmaleres Bett gebracht. Wie in der Böllenwörth wurde der Fluss durch von den Seiten einengenden Faschinaden in sein neues Bett gebracht. In den Bereichen hinter den Befestigungswerken setzte sich infolge der verminderten Strömungsgeschwindigkeit Sediment ab und wurde mit Weiden bestockt. Der 1856 noch vegetationsfreie Gleithang ist bis 1875 bereits bestockt. Der ehemalige westliche Teil des Rheinbetts ist bis auf einen schmalen Gießen bereits verlandet. Im Jahr 1925 ist dieser Gießen auch in seinem südlichen Abschnitt verlandet, wobei deutlich eine quer zum Gießen verlaufende Sperrfaschine zu erkennen ist. Im Flurstück „Salmengrund“ sind auf der Karte von 1856 deutlich zwei isolierte Wasserbecken (vermutlich zur Salmenzucht), die mit einem Stichgraben mit dem Rhein verbunden sind, zu erkennen. Der Graben diente wahrscheinlich der Wasserregulierung der Becken.

Abb. 112. zeigt, dass sich fast alle bei Wasserständen bis 225cm ü.MW entstehenden Inundationen im Bereich des vegetationsfreien Gleithanges von 1856 bzw. im ehemaligen Flußgerinne befinden. Auch die heute nur noch als Senken im Gelände zu erkennenden ehemaligen Fischbecken im Salmengrund wurden überschwemmt.

VI.2.3. Insel Horn

Im Südwesten der Rheinhausener Weide liegt die Insel Horn. Die Insel wurde auf der Südseite vom Hauptstrom und im Norden von einem Altarm, dem „Runkedebunk“, umflossen. In einer Handzeichnung von 1803 (siehe Abb. 113.)weist die Ingestion des Runkedebunk bereits starke Verlandungserscheinungen auf, ist aber noch mit dem Hauptstrom verbunden³⁵. Die Insel wurde durch einen schmalen Gießen, einen Eisbruch, wie aus der Karte hervorgeht, geteilt in das westliche „Kroepfel“ und das östliche „Horn“. Bis zum Oberhausener Durchstich von 1842 blieb der Runkedebunk mit dem Hauptstrom verbunden. Im Jahr 1856 ist dann die Ingestion bereits bis auf zwei kleine Lachen vollständig bewaldet, die Egestion verlandet, jedoch noch vegetationsfrei. Auf der Rheinstromkarte von 1875 ist dann schließlich auch die Egestion bewaldet und der Runkedebunk zu einen Sichelsee verwandelt.

Im Jahr 1925 war die Verbindung zum Berghausener Altrhein aber wieder sowohl an Ingestion, als auch Egestion wieder hergestellt, vermutlich durch künstliche Wasserbaumaßnahmen. Gegenwärtig ist der Runkedebunk weitgehend mit Schilf bedeckt und steht bei Wasserständen bis 225cm ü. MW lediglich über eine schmale Röhre in der Egestion mit dem Altrhein in Verbindung (siehe Abb. 114.).

Wie bei den bisherigen Beispielen auch befanden sich die Inundationen von 1997 im Bereich junger Verlandungsflächen (siehe Abb. 115. und Abb. 112.). Inundationen befanden sich im Bereich der beiden 1856 verzeichneten Lachen in der Ingestion, im Bereich des in der Handzeichnung von 1803 dargestellten Eisbruchs und der auf der Karte von 1925 und 1819 eingezeichneten länglichen Senken im „Horn“.

VI.2.4. Ergebnisse

Der Vergleich der Inundationsflächenkartierung mit den Rheinstromatlanten im GIS zeigte, dass die heute bei Wasserständen bis 225cm ü. MW entstehenden Überschwemmungsflächen eine recht einheitliche Entstehungsgeschichte aufweisen. Zu über 98% sind diese Inundationsflächen aus jungen, durch die Oberrheinkorrektur verursachten Verlandungsflächen hervorgegangen. Wenn dieses Ergebnis, nämlich dass es sich bei den am häufigsten überschwemmten Inundationsflächen um *junge* Verlandungsflächen handelt, auch noch so naheliegend und trivial erscheinen mag, so hat es doch für die Praxis große Bedeutung: Mit der Auswertung historischer Karten im GIS wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methode erfolgreich erprobt, diese jungen Verlandungsflächen räumlich exakt zu ermitteln. Somit ist für die Praxis eine einfache, aber wirkungsvolle Methode, zur Identifizierung von Inundationsflächen welche bei Wasserständen bis 2,25 cm ü.MW. geflutet werden.

Da es sich bei diesen Flächen zugleich um bevorzugte Brutplätze von *Aedes Vexans* handelt, ist es mit dieser Methode möglich, potentielle Stechmückenbrutplätze räumlich exakt zu identifizieren, noch bevor überhaupt eine Geländebegehung erfolgt ist. Da diese Flächen aber nicht nur *Aedes Vexans*, sondern einem weiten Spektrum von auenspezifischer Flora und Fauna als Lebensraum dient, ist diese Methode für

³⁵ siehe Kartennachweis im Anhang

alle Anwendungen nutzbar, bei denen eine räumliche Identifizierung von Weichholzauestandorten notwendig ist.

Aufgrund der zahlreichen jüngeren anthropogenen Überprägungen der Rheinaue ersetzt diese Methode jedoch den Gang ins Gelände bzw. das Heranziehen aktueller Karten und Luftbilder nicht. Eine aus der historischen Kartenanalyse identifizierte potentielle Inundationsfläche ist selbstverständlich auch nur dann eine rezente Inundationsfläche, wenn sie nicht seit dem 19. Jahrhundert anthropogen überformt worden ist.

VI.3. Die historische Landnutzung als Indikator für rezente Druckwasserflächen.

Das Ausmaß der während des Pfingsthochwassers 1999 aufgetretenen Überschwemmungen im Bereich der durch den Rheinhauptdamm vermeintlich vor Hochwasser geschützten Altaue war deutlich größer als die Inundationen aller Hochwasserereignisse der letzten Dekaden (s.o.). Bei der Errichtung bzw. Ausweisung der nun plötzlich von Wasseraustritten betroffenen Industrie-, Gewerbe- und Freizeitflächen hatte man offensichtlich mit derartig massiven Druckwasserproblemen nicht gerechnet. Die bisherigen Ausführungen über die Wasserstandsentwicklung des Rheins in den letzten hundert Jahren zeigten, dass die Bebauung dieser Flächen bzw. die Erstellung der Flächennutzungs- und Bebauungspläne in eine Zeit fällt, in der solche Wasseraustritte nicht bzw. nur selten erfolgten. Aufgrund mangelhafter Information über die Verbreitung der Druckwasserflächen wurden diese Flächen zur Bebauung freigegeben – was sich spätestens seit 1999 als eine Fehlentscheidung erwiesen hat.

Geländeuntersuchungen und Luftbildaufnahmen, wie sie im Untersuchungsgebiet vorgenommen wurden, sind sicherlich die beste und verlässlichste Methode zur Identifizierung von Inundationsflächen. Doch wie lassen sich Daten über die räumliche Verbreitung von Druckwasserdaten gewinnen, wo diese Wasseraustritte doch nur selten zu beobachten sind und es in der Vergangenheit versäumt wurde, ihre Verbreitung zu kartieren? Für die Belange der Raumplanung sind Methoden notwendig, die in der Lage sind, aus verfügbaren (und nicht etwa zukünftig noch zu erhebenden) Daten die stark druckwassergefährdeten Flächen der Flussniederung zu identifizieren und von hochwassergefährdeter Nutzung freizuhalten.

VI.3.1. Der Zusammenhang zwischen historischer Landnutzung und rezenter Druckwasserdynamik

Im folgenden soll als mögliche Methode der Ausweisung potentieller Druckwasserflächen die Auswertung der historischen Rheinstromatlanten im GIS vorgestellt und diskutiert werden. Die Tauglichkeit dieser Methode hängt in erster Linie von zwei Fragen ab:

- I. Ist die in den historischen Rheinstromatlanten abgebildete Landnutzung der Rheinaue als Indikator für die einstige Verbreitung von Druckwasserflächen brauchbar?
- II. Und wenn ja, ist diese historische Landnutzung dann auch ein Indikator für die *rezente* Verbreitung von Druckwasserflächen?

Zu Frage I: Zwar waren im Zuge der Oberrheinkorrektur große Teile der Rheinaue durch die neuen Dämme vor einer direkten Überflutung durch den Rhein geschützt; der Grundwasserspiegel aber lag in der Flussniederung Anfang des 19. Jh. noch immer beträchtlich höher als heute. Bereits geringe Anstiege des Rheinwasserstandes reichten aus, um den Grundwasserspiegel in der Niederung so weit ansteigen zu lassen, dass großflächig Druckwasser austrat. Es wurde oben bereits mehrfach darauf hingewiesen, dass die Rheinkorrektur ein Absinken des Grundwasserstandes in der Rheinaue nach sich zog. Wie weit die Tiefenerosion des Flusses bei der Erstellung des ersten Großherzoglichen Rheinstromatlanten im Jahre 1856 (der in diesem Projekt wichtigsten historischen Kartenquelle) nun genau vorangeschritten war, lässt sich heute kaum mehr rekonstruieren. Allerdings hatte der Strom im Untersuchungsgebiet zu diesem Zeitpunkt sein Bett erst seit rund einer Dekade in die künstlichen Durchstiche verlegt. Den Angelhofer Durchstich hatte der Rhein sogar trotz aller wasserbaulichen Anstrengungen noch immer nicht angenommen und der Strom floss nach wie vor im alten Bett. Die Tiefenerosion kann deshalb im Untersuchungsgebiet 1856 noch nicht weit fortgeschritten sein. Ferner ist davon auszugehen, dass sich die Landwirtschaft nicht sofort auf das Trockenfallen ehemals durchfeuchteter Auebereiche einstellte, sondern erst mit einigen Jahren Verzögerung diese Flächen einer intensiveren Nutzung zugeführt wurden. Der Rheinstromatlas von 1856 ist somit die ausführlichste historische Quelle, welche die Nutzung der Rheinniederung in ihrem Zustand zu Beginn der Oberrheinkorrektur überliefert – zu einem Zeitpunkt also, bei dem ein Grundwasserstandsniveau in der Aue vorherrschte, das seither nicht wieder erreicht wurde.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass jede Fläche in einem Abwägungsprozess zwischen a.) dem in die Aufbereitung einer Fläche zu investierendem Arbeits- bzw. Kapitalkaufwand, b.) dem je nach Nutzung zu erwartenden Ertrag bzw. Flächennutzungsgewinn und c.) den Risiken, welche den Ertrag der jeweils gewählten Flächennutzungsart wieder gefährden, der jeweils bestmöglichen Nutzungsart zugeführt wurde. Der enorme Arbeitsaufwand, einen Wald zu roden, ihn in eine Ackerfläche umzuwandeln und diese regelmäßig zu bestellen, wurde sicherlich nur dort betrieben, wo die Ernte nicht in Gefahr stand, durch Hochwasser oder Druckwasser vernichtet zu werden. Die Rheinstromatlanten entstanden nun in einer Zeit, in der ein wachsender Bedarf an Lebensmitteln vorherrschte. Die frühindustrielle Phase, in der sich Deutschland bzw. das Großherzogtum Baden damals befand, war noch geprägt durch eine Bevölkerungszunahme, der eine stagnierende bzw. nicht in gleichem Maße steigende Produktivität in der Landwirtschaft gegenüberstand. Noch konnte die Produktivität pro Fläche nicht durch chemischen Dünger gesteigert werden, so dass dem wachsenden Lebensmittelbedarf lediglich durch die Einführung neuer, effizienterer Anbaumethoden sowie einer Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche begegnet werden konnte. Die im Zuge der Rheinbegradigung trockengelegten und vor direkten Überschwemmungen des Rheins mit Dämmen geschützten Flächen wurden folglich der jeweils intensivsten, d.h. ertragsreichsten Nutzung zugeführt, welche die lokalen Grundwasser- und Bodenverhältnisse zuließen. Da Flächen, die häufig durch Druckwasser bedroht wurden, für Ackerbau oder Sonderkulturen nicht geeignet waren, wurden sie extensiv (z.B. als Wald oder Grünland) bewirtschaftet. Wald und Grünland, sowie völlig von der landwirtschaftlichen Nutzung ausgeschlossen Flächen wie die vegetationsfreien Sand- und Kiesbänke des Rheins oder Sümpfe werden deshalb in dieser Arbeit als Indikator für stark von der Hydrodynamik des Flusses

beeinflusste und deshalb für intensive Landnutzung unbrauchbare Flächen betrachtet.

Das räumliche Muster der Flächennutzung, wie es sich im ersten Rheinstromatlas darstellt, überliefert deshalb ein detailliertes Bild der in der Rheinniederung von Druckwasseraustritten hauptsächlich betroffenen Flächen.

In den folgenden Jahrzehnten wurden mit sinkenden Grundwasserständen trockengefallene extensiv genutzte Flächen zusehends intensiviert: Auwälder wurden gerodet, Grünland in Äcker umgebrochen. JAKOBS beschreibt diesen Prozess für das Untersuchungsgebiet in seiner Diplomarbeit detailliert in seinem Vergleich der beiden Rheinstromatlanten von 1856 und 1875 (JACOBS 2002, S. 58f.).

Zu Frage II: Wie soeben erläutert, sind die Grundwasserverhältnisse heute nicht mehr die gleichen wie Anfang des 19. Jh. zum Zeitpunkt der Erstellung der Rheinstromatlanten. Für das Untersuchungsgebiet schwanken die Angaben über die Tiefe der seit der Korrektur eingetretenen Sohlenerosion zwischen Werten von rund 80 bis 200 cm. Inwieweit ist dann die Druckwasserdynamik des 19. Jh. überhaupt noch relevant für die rezente Druckwassergefährdung? Das Absinken des Grundwasserspiegels dürfte vor allem einen Einfluss auf die Häufigkeit bzw. die Andauer der Druckwasseraustritte haben. Das räumliche Muster der von Druckwasser bedrohten Flächen wird durch die allgemeine Grundwasserabsenkung hingegen kaum berührt worden sein. Da sich die für Druckwasseraustritte relevanten Faktoren (Verteilung von wasserleitendem und –hemmenden Substrat sowie Morphologie der Aue) durch natürliche Prozesse in den letzten 150 Jahren sicherlich nicht geändert haben, ist davon auszugehen, dass es sich nach wie vor um die gleichen Flächen handelt. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass diese Flächen im 19. Jh. bereits bei einem geringen Wasseranstieg des Rheins überschwemmt wurden, wohingegen heute Hochwasserereignisse mit mehrere Meter über dem Mittelwasserstand liegenden Wasserständen vonnöten sind, bis die ersten Wasseraustritte im Gelände beobachtbar sind.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Druckwasserdynamik zu Anfang des 19. Jh. und der heutigen Situation besteht darin, dass Hochwasserereignisse und die von ihnen hervorgerufenen Druckwasseraustritte immer nur von relativ kurzer Dauer sind. Im Gegensatz zu einem generell hohen Wasserstand bewirkt ein Hochwasserereignis vor allem Druckwasseraustritte in den flussnahen Bereichen der Aue. Nur wenn das Hochwasser über einen längeren Zeitraum hin anhält, erreicht die sich im Untergrund ausbreitende „Druckwelle“ auch die entfernteren Flächen der Rheinniederung. Dadurch werden bei rezenten Hochwasserereignissen die flussnahen Druckwasserflächen wesentlich häufiger und länger aktiviert, als die flussfernen. Zu Beginn des 19. Jh. hingegen waren auch große Flächen nahe der Hochgestade stark druckwassergefährdet. Auch heute können Druckwasserflächen potenziell noch in der gesamten Rheinniederung auftreten. Allerdings sind sie in Hochgestadenähe nur noch bei lang anhaltenden, hohen Rheinwasserständen bzw. infolge des Rückstaus von Seitengewässern zu erwarten.

Dort wo allerdings die natürliche Hydrodynamik der Rheinniederung infolge anthropogener Eingriffe verändert wurde, ist die Flächennutzung des 19. Jh. bedingt als Indikator für die rezente Druckwassergefährdung brauchbar. Dass beispielsweise ein flächenhaftes Ausräumen der Aue durch den Kiesabbau das Inundationsverhalten der umgebenden Druckwasserflächen veränderte, ist naheliegend. Das Ausmaß und die genaue Art der Veränderung der Druckwasserdynamik lässt sich allerdings kaum abschätzen. Ebenso wurden im Untersuchungsgebiet oftmals einstige Druckwasserflächen durch Bebauung

versiegelt. Aufquellendes Wasser führt hier zu nassen Kellern oder gar Schäden im Fundament. In Einzelfällen sind hier auch Druckwasseraustritte in benachbarten Flächen verstärkt zu beobachten.

VI.3.2. Das räumliche Muster der Landnutzung im Jahre 1856

Bereits bei einer oberflächlichen Betrachtung der Rheinstromatlanten fällt die oftmals geschwungene Form der in der Rheinniederung gelegenen Grünlandflächen auf. In Abb. 116. sind die 1856 als Grünland genutzten Flächen des Untersuchungsgebietes zusammen mit dem damaligen Rheinlauf dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass die Grünlandnutzung oftmals den Verlauf bereits vor Beginn der Oberrheinkorrektur verlandeter Rheinarme nachzeichnet: Im Nordwesten sind am Hochgestade bei Waldsee und Otterstadt deutlich zwei isolierte Bögen erkennbar. Im Bereich des weit nach Osten ausgreifenden Hockenheimer Rheinbogens zeichnet die Grünlandnutzung drei ineinandergreifende verlandete Mäanderbögen nach. Die weit geschwungene Form und klare Abgrenzbarkeit gegenüber umgebendem Ackerland deuten auf durch regressive und progressive Sprünge entstandene bzw. wieder abgeschnittene und bereits bis zur Neuzeit wieder verlandete Mäanderbögen hin.

Etwas komplexere Strukturen zeichnet die Wiesennutzung am Hochgestaderand zwischen Otterstadt und Speyer, innerhalb der Rheinhäuser Weide und auf der Insel Flozgrün aus. Hier wird nicht der Verlauf des einstigen Hauptbettes nachgezeichnet, sondern es lassen sich schmale, oftmals parallel zueinander versetzte längliche Wiesenstreifen erkennen. Im Norden von Speyer handelt es sich teilweise um verlandete Läufe des in die Rheinniederung einmündeten Speyerbaches. Im Süden, auf der Rheinhäuser Weide sowie auf der Insel Flozgrün fällt auf, dass die Wiesenstreifen in etwa parallel zum Hauptbett des Rheins (vor seiner Begradigung) liegen. Ähnliche Muster dürften sich auch auf der Kollerinsel, den Schwetzingen Wiesen und dem ehemaligen Karl-Ludwig-See südlich von Ketsch finden lassen. Da sie aber vollständig der Grünlandnutzung unterlagen, sind hier keine differenzierten Strukturen auf dem Rheinstromatlas erkennbar.

Neben von Ackerflächen umschlossenen länglichen Grünlandstreifen sind auch von Wald umschlossene Wiesen auf den Rheinstromatlanten zu erkennen. In beiden Fällen dürfte es sich bei den Wiesenstreifen um diejenigen Flächen mit der höchsten Bodenfeuchte – den häufigsten Druckwasseraustritten - handeln.

VI.3.3. Quantitativer Vergleich zwischen den im Jahre 1856 extensiv bewirtschafteten Flächen und den während des Pfingsthochwassers 1999 kartierten Inundationsflächen

Ob die extensive Landnutzung im Jahre 1856 nun tatsächlich ein Indikator für rezente Inundationsflächen ist, konnte anhand der Kartierungen des Pfingsthochwassers 1999 überprüft werden. Hierzu wurden die Informationsebenen „Landnutzung 1856“ und „Inundationen 1999“ im GIS analysiert und die relevanten Informationsebenen miteinander verschnitten. Dadurch konnten die Flächeninhalte der verschiedenen Informationsebenen miteinander verglichen und etwaige Korrelationen quantitativ bestimmt werden:

Die Gesamtfläche aller im Untersuchungsgebiet im Jahre 1856 extensiv genutzten Flächen (d.h. Wald, Heide, Grünland mit und ohne Bäumen, feuchte Wiesen), aller direkt zum Gerinnebett des Rheins gehörenden (d.h. Rheinlauf samt Sand- und Kiesbänken), sowie aller sonstigen durchfeuchteten Flächen (Sumpf,

Torfabbauflächen, Tümpel) betrug im Untersuchungsgebiet 6371 ha. Von den 4523 ha Überschwemmungsflächen, die während des Pfingsthochwassers 1999 kartiert wurden, lagen 3822 ha (84,5%) innerhalb der oben genannten, im Jahre 1856 extensiv bewirtschafteten bzw. durchfeuchteten Standorte; lediglich 701 ha (15,5%) lagen auf 1856 anderwertig genutzten Flächen (fast ausschließlich Ackerflächen). Diese Werte sprechen deutlich für eine Korrelation zwischen extensiver, historischer Landnutzung und rezenter Inundation (siehe als Beispiel Abb. 117.).

Diese Betrachtung bezieht sich allerdings auf die Gesamtheit aller 1999 aufgetretenen Inundationsflächen, direkten Überschwemmungsflächen und Druckwasserflächen zusammengenommen.

Fokussieren wir deshalb nun die (außendeichs gelegenen) Druckwasser- und Sickerwassersammelflächen, also die durch den Rheinhauptdamm von der rezenten Aue abgetrennten Inundationsflächen:

Insgesamt waren außendeichs rund 757 ha überschwemmt. Obwohl dies lediglich 16,7% der 1999 kartierten Inundationen sind, handelt es sich hierbei um die für die Raumplanung wichtigsten Flächen: In diesen, vermeintlich durch den Rheinhauptdamm geschützten und oftmals intensiv genutzten Flächen entstanden 1999 zahlreiche „Onsideschäden“ (z.B. Hochwasserschäden in Campingplätzen, Industrie- und Wohngebieten). Von den Überschwemmungen lagen 61,2% innerhalb (38,8% außerhalb) der 1856 extensiv bewirtschafteten Flächen. Zum einen belegen die Prozentangaben, dass rezente Druckwasserflächen tatsächlich in erster Linie in den bereits im 19. Jh. von Druckwasser betroffenen Flächen entstehen. Zum anderen belegt das Verhältnis von 61,2% zu 38,8% aber nur eine relativ geringe Korrelation. Zwei weitere Faktoren sind hierbei jedoch zu berücksichtigen:

a.) Zum einen ist zu bedenken, dass dort, wo die ehemals extensiv genutzten Flächen mittlerweile mit Siedlungen und Straßen überbaut oder durch Kiesgewinnung abgetragen wurden, heute auch keine Inundationsflächen mehr kartiert werden können. Immerhin sind im Untersuchungsgebiet 27,5% der 1856 extensiv genutzten Flächen mittlerweile überbaut oder abgetragen worden. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch, dass die intensivsten anthropogenen Eingriffe und Umgestaltungen in den 1856 von Druckwasser am meisten betroffenen Flächen vorgenommen wurden: 71,4% der Flächen, die von derartigen Umgestaltungen betroffen sind, liegen in den 1856 extensiv bewirtschafteten Flächen. Dieser Umstand hat seine Ursache hauptsächlich im Kiesabbau, der vor allem in den Auebereichen erfolgte, in denen auch Druckwasserflächen vermehrt auftraten. Doch sogar die Errichtung von Neubaugebieten, Gewerbeflächen, Mülldeponien oder Fernverkehrsstrassen erfolgte im Untersuchungsgebiet (erstaunlicherweise) zu einem großen Teil (zu 39,8%) auf 1856 noch durchfeuchteten Standorten. Es wäre ein Trugschluss zu glauben, dass die oberflächliche Versiegelung dieser Flächen durch Bebauung ein Ende der Druckwasserprozesse im Untergrund zur Folge hätte. Wie das weiter unten noch ausführlich diskutierte Beispiel der Rheinhäuser Weide zeigt, trat 1999 selbst in den überbauten Bereichen noch Druckwasser oberflächlich aus. Ferner sind oftmals vermehrt am Rande der bebauten Areale Wasseraustritte (dann auch auf Flächen, die 1856 als Äcker genutzt wurden) festzustellen, so dass die Vermutung nahe liegt, dass eine Versiegelung ehemaliger Druckwasserflächen lediglich zu einer Verlagerung der Austrittsstelle, nicht aber zur Unterbrechung des Druckwasserflusses führt. Wie häufig in heute bebauten, ehemaligen Druckwassergebieten Probleme wie Kellerdurchfeuchtung oder Gebäudeschäden durch Feinsubstratausspülung auftreten, konnte im Rahmen dieser Arbeit im Untersuchungsgebiet nicht systematisch erfasst werden.

Es sind aber durch die Geländebegehungen und Gespräche mit Anwohnern in den entsprechenden Wohngebieten zahlreiche Einzelfälle bekannt, in denen eindeutig bestätigt wurde, dass bei Hochwasserereignissen Druckwasser austritt. In einigen Fällen sind deswegen auch Gerichtsverfahren anhängig.

- b.) Ferner ist bei zu unterscheiden zwischen Sickerwassersammelflächen und Druckwasserflächen. Im Gelände war es 1999 nicht immer einfach zu unterscheiden, ob Wasser einer dammnahen Inundationsfläche nur aus dem Dammfuß austrat und sich durch oberflächlichen Abfluss in den Senken sammelte oder ob es sich um eine „echte“ Druckwasserfläche handelt. Die Entstehung von Sickerwassersammelflächen hängt in erster Linie von der Durchlässigkeit des Rheinhauptdammes bzw. dem oberflächennah infiltrierten Flusswasserstrom ab und betrifft alle dammnahen Flächen gleichermaßen – unabhängig, ob es sich dabei nun um 1856 intensiv oder extensiv genutzte Flächen handelt. Über eine einfache Faustregel lassen sich Sickerwasserflächen über ihre räumliche Nähe zum Damm von den „echten“ Druckwasserflächen abgrenzen: Je weiter eine Inundationsfläche vom Rheinhauptdamm entfernt ist, desto eher handelt es sich um eine „echte“ Druckwasserfläche. Betrachtet man nun deshalb nur die Flächen, die sich in einer gewissen Entfernung vom Damm befinden, lässt sich eine eindeutige Korrelation zwischen rezenten Druckwasserflächen und der extensiven Landnutzung von 1856 feststellen: Bei den mehr als 600m vom Rheinhauptdamm entfernten Inundationsflächen mit einem Gesamtflächeninhalt von 250 ha. (das sind immerhin noch rund 1/3 der Außendeichs gelegenen Inundationsflächen) lagen 89,3% innerhalb der 1856 intensiv genutzten Flächen.

VI.3.4. Kritische Diskussion der Ergebnisse anhand von Beispielen

Grundsätzlich sind verschiedene Vorgehensweisen für einen GIS gestützten Vergleich historischer und rezenter Inundationsflächendaten denkbar. Betrachtet man beispielsweise lediglich diejenigen rezenten Inundationen, die 1999 vollständig innerhalb von 1856 als Grünland oder Acker genutzten Fläche lagen, so scheint nur eine geringe Korrelation zwischen rezenter und historischer Hydrodynamik zu bestehen: Von den außerhalb der rezenten Aue gelegenen 1999er Inundationsflächen decken sich lediglich 13,5% vollständig mit historischen Grünlandflächen und 9,34% vollständig mit historischen Ackerflächen (JAKOBS 2002 86.ff).

Bei einem derartigen Vorgehen ist aber zu beachten, dass die Flächeninhalte derjenigen Inundationsflächen, die 1999 z.B. so stark geflutet wurden, dass sie in Areale mit anderer historischer Flächennutzung „hinüberüberschwapten“ (also sowohl in historischem Grünland, als auch in historischem Ackerland lagen) nicht berücksichtigt werden; - deshalb macht der Anteil der „sonstigen“ Flächen bei diesem Verfahren auch 77% aus.

Ferner ist bei einer Auswertung zwischen „echten“ Druckwasserflächen und Sickerwassersammelflächen zu unterscheiden.

Auch sind nicht alle Bereiche des Untersuchungsgebietes gleichermaßen für derartige Untersuchungen geeignet. Die Gründe hierfür sollen im Folgenden anhand einiger Beispiele erläutert werden.

VI.3.4.1. Insel Flozgrün

Während des Pfingsthochwassers 1999 diente die Insel Flozgrün nach Aussagen von Herrn König (Speyer) bereits als „Polderfläche“. Die Insel wurde durch eine

künstlichen Dammöffnung gezielt geflutet (siehe Abb. 128.). Die Inundationen des Pflingsthochwassers von 1999 resultierten deshalb eindeutig von oberflächlich einströmendem Flusswasser und sind folglich für einen Vergleich zur Ermittlung der Korrelation zwischen rezenten Überschwemmungen und historischer Landnutzung nicht geeignet. Zudem ist davon auszugehen, dass bei Wasserständen, wie sie 1999 auftraten, die Inundationen auf der Insel Flozgrün vor allem durch sich in den Senken sammelndes Uferfiltrat und weniger durch Druckwasser hervorgerufen wird.

VI.3.4.2. Rheinhäuser Weide/ Speyerer Rheinbogen

Ebenso ist die Rheinhäuser Weide für den Vergleich von historischen und rezenten hydrologischen Daten kein sonderlich gut geeignetes Areal, da sich hier Hydrodynamik und Morphologie aufgrund der seit etwa den 60er Jahren des 20. Jh. anhaltenden Errichtung von Industrie- und Gewerbebetrieben geradezu dramatisch verändert haben. Die auf dem Rheinstromatlas von 1856 verzeichneten Grünlandstreifen sind heute zum Großteil überbaut (siehe Abb. 118.). Dort wo sie allerdings nicht überformt wurden, weisen die ehemals extensiv genutzten Flächen noch immer intensive Druckwassertätigkeiten auf (z.B. Goldgrube und Lausgrube; siehe Abb. 119.). Allerdings traten rings um die Industrieanlagen während des Pflingsthochwassers 1999 auch auf den anderen, 1856 nicht als Grünland, sondern zumeist als Acker genutzten Flächen intensive Überschwemmungen auf. Bei den nahe am Damm gelegenen ehemaligen Ackerflächen handelt es sich aber wiederum größtenteils um Sickerwassersammelflächen.

VI.3.4.3. Hockenheimer Rheinbogen

Für den Hockenheimer Rheinbogen ist dagegen eine räumliche Überlagerung von rezenten Druckwasserflächen und historischer Landnutzung eindeutig und zweifelsfrei nachweisbar. Die Druckwasserflächen liegen oftmals vollständig im Bereich von Grünlandflächen und ihre Begrenzungen lehnen sich häufig an die Grenzen zwischen Grünland und Ackerland an (siehe Abb. 117.). Auch JAKOBS kommt für dieses Gebiet zu dem Ergebnis, dass die räumliche Verteilung von historischem Grünland und Ackerland zur Ausweisung von Flächen mit erhöhter bzw. verminderter Druckwassergefahr geeignet ist.

Die Korrelation tritt hier deutlicher hervor, weil beim Hockenheimer Rheinbogen die störenden Einflüsse sehr gering sind: Dieser Auenbereich ist fast völlig frei von Kiestagebau oder Bautätigkeiten. Ferner greift der Rheinbogen so weit nach Osten, dass ein großer Teil der Altaue so weit vom Rheinhauptdamm entfernt ist, dass die meisten der 1999 beobachteten Inundationen zweifelsfrei als „echte“ Druckwasserflächen anzusprechen sind.

VI.3.4.4. Schmale Behl

Im Jahre 1856 wurde der verlandete Otterstädter Rheinbogen am Hochgestaderand zwischen Waldsee und Otterstadt als Grünland genutzt (siehe Abb. 120.). Ein Teil dieser Flächen, die „Schmal Behl“ wurde erstaunlicherweise Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre als Bauland ausgewiesen und mit Wohnhäusern bebaut. Dies ist insofern erstaunlich, als auf dem Luftbild von 1983 Druckwasseraustritte auf später bebauten Flächen zu erkennen sind. An diesem Beispiel wird die Problematik der Ausweisung von Baugebieten in der Rheinniederung besonders deutlich. Flächen, auf denen 1983 noch Druckwasser austrat, wurden wenige Jahre später überbaut. Beim Hochwasserereignis von 1999 sind aufgrund der Bebauung keine oberflächlichen Druckwasseraustritte mehr erkennbar, aber es traten – wie

Gespräche mit den Anwohnern ergaben - an mehreren Häusern in der „Schmal Behl“ Schäden durch Druckwasser auf.

VI.3.4.5. Angelwald und Binsfeld

Die Abb. 121. zeigt den Angelwald und das Binsfeld im Jahre 1856. Der Durchstich am Angelhof ist bereits aktiviert, der Hauptstrom des Rheins ist aber noch im alten Bett verblieben. Der Angelwald ist zu einer Insel geworden. Die verlandeten Gießen der Oberen und der Unteren Angelwörth sind noch in der Karte zu erkennen, wobei letztere durch den neuen Kanal zerschnitten wird. Westlich vom Angelhof, am jenseitigen Rheinufer, befinden sich ausgedehnte Grünlandflächen. Bereits die Gemarkungsnamen zeigen an, dass es sich um feuchte, minderwertige Nutzungsflächen handelt („Im Wühl“, „Fuchswühl“, „Elend Herberg Wühl“, „Kirchen Grün“). Nördlich vom Angelwald, am gegenüberliegenden Rheinufer, erstreckt sich eine weitere große, extensiv genutzte Fläche: das Refenthal. Westlich vom Refenthal liegt das Binsfeld, der Bogen eines längst verlandeten Rheinmäanders. Der einstige Verlauf des Hauptbettes wird deutlich von einem sichelförmigen Grünlandstreifen nachgezeichnet. Diese Weiden sowie die auf den trockeneren Standorten im Inneren des einstigen Mäanders befindlichen Ackerflächen wurden vom Binshof aus bewirtschaftet. Östlich des Binshofes zum Rhein hin lag der Binswald, dessen Böden offensichtlich keine intensivere landwirtschaftliche Nutzung zuließen.

Betrachtet man nun den gleichen Landschaftsausschnitt im Luftbildmosaik in Abb. 122., so werden anthropogene Eingriffe in den Landschaftshaushalt seit dem 19. Jh. deutlich: Große Flächen wurden entkiest und in tiefe Baggerseen verwandelt. Anstelle des Binswaldes befinden sich Seen. Lediglich die einstigen Waldwege existieren als längliche Dämme im See weiter fort. Um den Binshof herum, entlang der Baggerseen wurden dicht gedrängt Freizeit- und Wohnhäuser errichtet. Auch das „Elend Herberg Wühl“ und „Fuchswühl“ fielen größtenteils der Kiesgewinnung zum Opfer. Der Rhein fließt heute in seinem geplanten Bett. Der Angelhofer Altrhein wurde aber, nachdem er bis Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts fast vollständig verlandet war, ebenfalls entkiest und in einen Baggersee mit Rheinanschluss umgeformt. Refenthal sowie Obere und Untere Angelwörth wurden dabei ebenfalls zu großen Teilen abgebagert. Ebenso existiert an Stelle des einstigen Angelhofes heute ein Baggersee.

Es liegt auf der Hand, dass bei derartig gravierenden Veränderungen anhand dieser Flächen keine Korrelation zwischen einstiger Landnutzung und rezenter Druckwasserdynamik untersucht werden kann. Dennoch zeigt Abb. 123., dass auf den nicht überformten, im 19. Jh. extensiv genutzten Flächen 1999 verstärkt Druckwasseraustritte erfolgten: Im Binsfelder Mäanderboden und in den Restflächen von „Elend Herberg Wühl“ und „Fuchswühl“ trat 1999 Druckwasser aus.

VI.3.4.6. Speyer Nord

Ein anderes Beispiel für einen seit dem 19. Jahrhundert stark überformten Auebereich ist der Norden Speyers. Im Jahre 1856 wurde die durch den Rheinhauptdamm vor direkten Überschwemmungen geschützte Aue überwiegend als Weide- und Grünland genutzt (siehe Abb. 124.; „Alte Speyerer Weide“, „Schlangen Wyhl“, „Nonnenwyhl“, „Hasenpfuler Weide“, „Schelmen Giefs“). Die auf der gegenüberliegenden Rheinseite liegende Oder war damals noch nicht verlandet. Das zwischen ihr und dem Rhein gelegene „Speierer Grün“ war vollständig bewaldet. Auf den ehemaligen Weideflächen im Norden Speyers sind ausgedehnte Gewerbe- und Wohngebiete entstanden. Im Nonnenwyhl wurde eine Mülldeponie

errichtet. Der Wald im Speierer Grün wurde gerodet und in Ackerflächen umgewandelt.

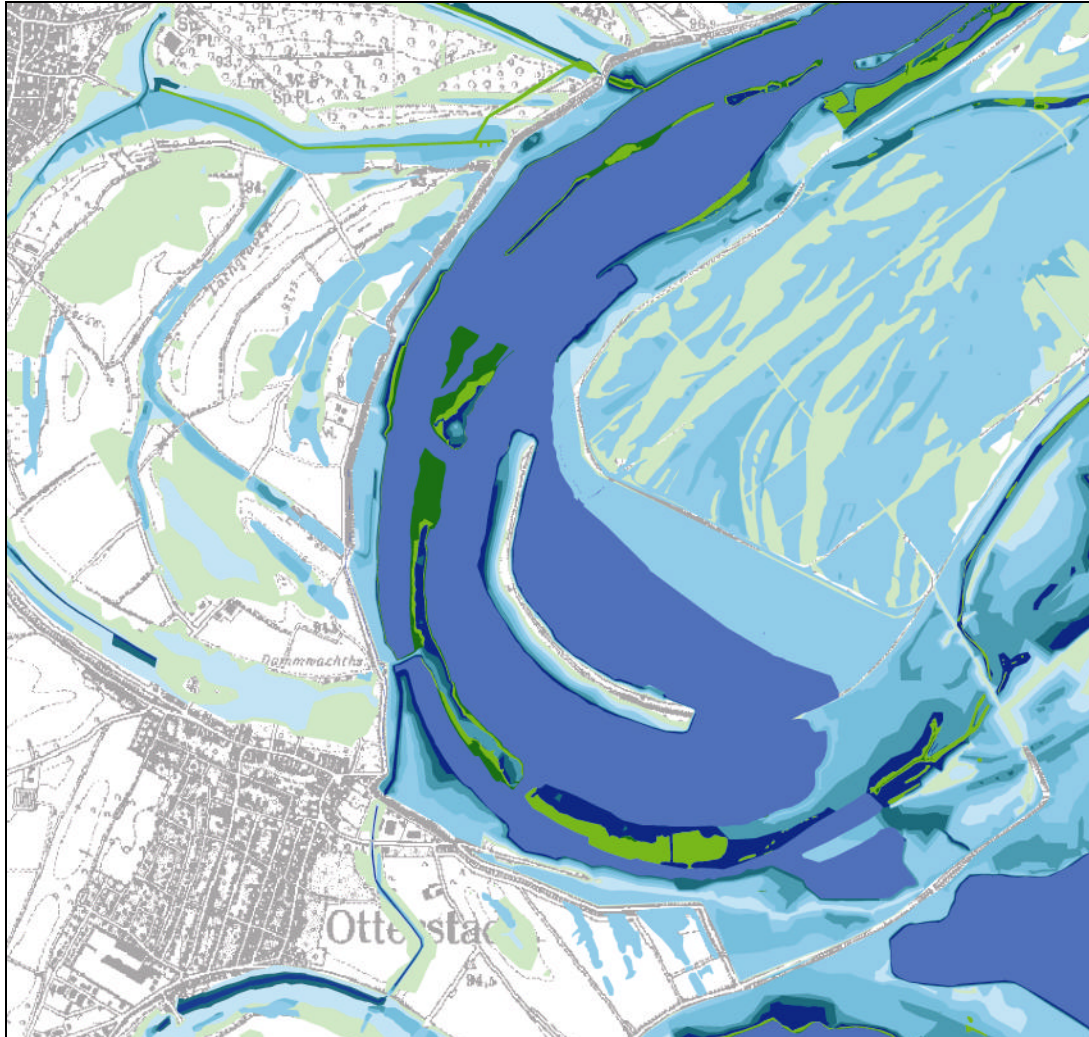
Aus den Luftbildern in Abb. 125. geht hervor, dass ein Großteil der 1856 extensiv genutzten Flächen heute bebaut oder anderen höherwertigeren Nutzungen zugeführt wurden: Auf den ehemaligen Weideflächen im Norden Speyers sind ausgedehnte Gewerbe- und Wohngebiete entstanden. Im „Nonnenwhyl“ wurde eine Mülldeponie errichtet. Der Wald im Speierer Grün wurde gerodet und in Ackerflächen umgewandelt.

Ob diese Nutzung der Inundationsdynamik angemessen ist, erscheint mehr als fraglich. Aus Abb. 126. geht hervor, dass Druckwasseraustritte während des Pfingsthochwassers 1999 verstärkt in den im 19. Jh. noch extensiv genutzten Flächen erfolgten. Dort, wo diese Flächen bereits versiegelt wurden, können im Luftbild keine Inundationen mehr nachgewiesen werden – was aber nicht heißt, dass es auf diesen Flächen keine Probleme mit Druckwasseraustritten gäbe. Das Schrägluftbild in Abb. 127. zeigt die ehemalige „Hasenpfuhler Weide“ im Norden von Speyer im Februar 1999. Neben den erst vor wenigen Jahren errichteten Gewerbeflächen (z.B. links im Bild Großlager der Firma „Lidl“) sind deutlich großflächige Druckwasseraustritte zu sehen. Die Bebauung dieses Auebereichs in direkter Nähe zum Rheinhauptdamm erfolgte in den letzten Jahren und hält noch immer an.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für das Untersuchungsgebiet eindeutig eine starke Korrelation zwischen der extensiven landwirtschaftlichen Nutzung im 19. Jahrhundert und dem rezenten Austritt von Druckwasser bei großen Hochwasserereignissen nachgewiesen werden konnte. Die Korrelation ist selbstverständlich nur dann gegeben, wenn die entsprechende Fläche seit dem 19. Jahrhundert nicht massiv überformt bzw. im Zuge der Kiesgewinnung vollständig abgetragen wurde. In direkter Nähe zum Rheinhauptdamm treten allerdings bei großen Hochwasserereignissen erfahrungsgemäß zahlreiche Sickerwassersammelflächen. Dieser Effekt überlagert die Druckwasseraustritte. Inundationen entstehen hier praktisch in jeder Senke und nicht nur in den im 19. Jh. extensiv genutzten Flächen aus. Mit zunehmender Entfernung zum Rhein tritt der Zusammenhang zwischen historischer Landnutzung und rezenten Druckwasseraustritten aber immer deutlicher zu Tage.

Die Methode der Auswertung historischer Karten hat sich im Untersuchungsgebiet als sehr hilfreich für die Abschätzung des Inundationsrisikos einzelner Flächen erwiesen.

VII. GIS-basiertes Modell zur Prognose der räumlichen Ausbreitung von Hochwasserereignissen



Ausschnitt aus einer Ergebniskarte des Inundationsflächenmodells

Die Entwicklung eines einfachen, räumlich hoch aufgelösten Modells zur Prognose der bei einem definierten Wasserstand überschwemmten Flächen ist das eigentliche Ziel dieses Promotionsprojektes. Die Ergebnisse der empirischen Inundationsflächenkartierungen im Untersuchungsgebiet haben gezeigt, dass direkte Überschwemmungsflächen tatsächlich in einfach beschreibbarer Korrelation zum Flusswasserstand stehen. Eine Berechnung dieser Inundationsflächen ist deshalb bereits auf der Grundlage von digitalen Geländehöhenmodellen und Strömungsmodellen vergleichsweise problemlos zu bewerkstelligen. Die empirischen Geländearbeiten haben aber auch gezeigt, dass es sich bei den tatsächlich in der Rheinniederung auftretenden Inundationsflächen oftmals eben nicht um direkte Überschwemmungsflächen sondern um Druckwasser- oder Sickerwassersammelflächen handelt. Die bisherigen Ausführungen unterstrichen, dass es sich bei den ökologisch interessanten, regelmäßig in der rezenten Aue auftretenden Inundationen (W bis 225 cm ü. MW) in der Mehrzahl um Druckwasserflächen handelt. Bei „Jahrhundert“-Ereignissen wie dem Pfingsthochwasser 1999 waren zwar Anzahl und Ausmaß der Druckwasserflächen im Vergleich zu den enormen direkten Inundationsflächen vergleichsweise gering. Da die Druckwasserflächen aber in vermeintlich vom Rheinhauptdamm geschützten, intensiv z.B. als Gewerbegebiet genutzten Flächen auftraten, ist das Wissen um ihre Verbreitung von besonderem Interesse. Letztlich ist ein Inundationsflächenmodell nur dann brauchbar, wenn es in der Lage ist, die räumliche Inundationsdynamik auch dieser Flächen zu beschreiben. Für viele Aufgaben der Raumplanung, der biologischen Stechmückenbekämpfung oder der Auenrenaturierung ist es in erster Linie die Prognose der Druckwasserflächen und nicht so sehr die der direkten Inundationsflächen, welche die Tauglichkeit eines Inundationsflächenmodells ausmachen.

Weiter haben die Bodensondierungen und Wasserstandsmessungen in verschiedenen Druckwasserflächen gezeigt, dass eine Berechnung der Druckwasserflächen mittels eines deduktiven Modells kaum möglich ist:

Ein deduktiver Ansatz, welcher z.B. versucht, die strömungsdynamischen Prozesse während eines Hochwasserereignisses als Zusammenspiel von mehreren, sich wechselseitig beeinflussenden *Faktoren* - wie die Menge des in das System strömenden Wassers, Form und Gefälle des überströmten Geländes, die räumliche Verteilung von Fließwiderständen (z.B. durch Auwald oder Gebüschreihen) oder den Grundwasserstand zu Beginn des Hochwasserereignisses - zu berechnen, ist nur dann sinnvoll, wenn eben diese beeinflussenden Faktoren auch hinreichend genau quantifizierbar sind. Die wichtigsten Faktoren sind aber bisher nicht quantifiziert. Bisher liegen beispielsweise weder hinreichend genaue Kartierungen des Holozäns oder ein räumlich hochaufgelöstes Grundwassermessnetz für die Rheinniederung vor.

Eine Vereinfachung der Einflussfaktoren, z.B. durch die Annahme eines homogenen Sedimentkörpers mit einheitlichen Transmissionskoeffizienten oder das völlige Außer Acht lassen von Wasserströmen im Untergrund (die Flussaue als Badewanne, die nur durch oberflächliches Einströmen von Wasser gefüllt wird) mögen zulässig sein, wenn es darum geht, sich in kleinmaßstäbigen Betrachtungen einen groben Überblick über das Gefahrenpotential von Inundationen zu verschaffen. Für räumlich hoch aufgelöste Betrachtungen, wie sie im Rahmen dieser Promotionsarbeit

vorgenommen werden, sind sie schlichtweg unzulässig und führen zu nicht mehr tolerierbaren Fehlern.

Somit bleibt für einen deduktiven Ansatz nur die Möglichkeit, die fehlenden Daten unter erheblichem Aufwand selbst zu erheben. Als Beispiel für ein hochaufgelöstes Grundwassermodell in einer Flussaue sei auf die Arbeit von MONTENEGRO et al hingewiesen (T. HOLFELDER, H. MONTENEGRO, B. WARWRA, 1999). Im Rahmen von Untersuchungen zu einer geplanten Deichrückverlegung an der Elbe wurde bei Wittenberge ein Grundwassermodell mit dem Ziel, die Druckwasserentwicklung nach der Deichrückverlegung zu prognostizieren, erstellt. Aufgrund einer Förderung durch das BfG Koblenz standen Mittel für die Errichtung eines feinmaschigen Netzes von Bodenbohrungen und Pumpversuchen zur Verfügung. Doch selbst dieses aufwendige Modell war nicht in der Lage, eine genaue Prognose der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Druckwasserflächen zu liefern. Eine Vorhersage, wann und wo Druckwasserflächen entstehen und wieder versickern, können rein deduktive Modelle höchstens für sehr kleine Untersuchungsgebiete leisten.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb ein induktiver Modellschwerpunkt gewählt. Der induktive Ansatz basiert auf dem simplen Gedanken, dass die Überschwemmungen, die ein bestimmter Abfluss des Rheins in der Vergangenheit erzeugte, auch in Zukunft wieder eintreten werden, wenn der Fluss unter ähnlichen Rahmenbedingungen erneut ähnliche Abflüsse erreicht. Das Untersuchungsgebiet wird als „Black Box“ betrachtet, als eine räumliche Einheit, in die ein Inputwert (z.B. das Rheinwasser) eingegeben wird und die Prozesse, die sich im Inneren des Systems abspielen, zunächst außer Acht gelassen werden. Entscheidend ist nur, dass der Input (z.B. Rheinabfluss, Grundwasserstand im Gelände bei Beginn der Hochwasserwelle) und der gemessene Output (die entstandenen Inundationsflächen) hinreichend genau quantifiziert und in Korrelation zueinander gebracht werden können.

Im folgenden Abschnitt werden die Ziele und die Vorgehensweise bei der Modellerstellung näher vorgestellt.

VII.1. Aufgaben und Ziele des Inundationsflächenmodells

Die eingangs formulierten Ziele seien hier nochmals kurz wiederholt und präzisiert. Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Inundationsflächenmodell hatte im wesentlichen drei Aufgaben zu erfüllen:

1. Identifizierung von Hochwassereinwirkung potenziell betroffenen Flächen für Belange der Raumplanung:

Unabhängig von der aktuellen Wasserstandsentwicklung des Rheins ist eine vorausschauende Raumplanung auf Informationen zur grundsätzlichen Hochwassergefährdung einer Fläche angewiesen. Gerade als im Untersuchungsgebiet während des Pfingsthochwassers 1999 Wasseraustritte inmitten von Gewerbe- und Wohngebieten und in Bauerwartungsland festzustellen waren, zeigte sich, dass die Gefahr durch Druckwasser in der Vergangenheit nicht realistisch eingeschätzt wurde.

2. Prognose der bei einem definierten Wasserstand in der rezenten Aue entstehenden Inundationen:

Das Modell soll in der Lage sein, das Ausmaß der Inundationen für definierte Wasserstände am Pegel Speyer in Kartenform auszugeben. Diese Inundationsflächenkarten sollen über eine Wasserstandsgenauigkeit von 50cm (d.h.

Inundationsflächenkarten für z.B. 450 cm, 500cm, 550cm,... am Pegel Speyer) und eine räumlich Auflösung von 1m bis 2m verfügen. Diese Inundationsflächenprognosen sollen für Aufgaben wie z.B. die biologische Stechmückenbekämpfung oder ökologische Untersuchungen in der rezenten Aue nutzbar sein.

3. Prognose von Inundationsflächen in den vom Rheinhauptdamm geschützten Bereichen der Rheinniederung in Abhängigkeit vom Flusswasserstand:

In den vom Rheinhauptdamm geschützten Bereichen ist die Prognose der Inundationsflächen besonders schwierig, aber aufgrund der intensiven Nutzung dieser Bereiche auch besonders wichtig. Das Modell soll in der Lage sein, die Druckwasserflächen und Sickerwassersammelflächen, die bei definierten Wasserständen entstehen, zu prognostizieren. Auch hier wird eine Wasserstandsgenauigkeit von 50 cm und eine räumliche Auflösung von 1m bis 2m angestrebt. Sowohl für die Stechmückenbekämpfung, als auch zum Schutz der Anwohner und Nutzer dieser Flächen soll eine solche Prognose nutzbar sein.

Die einzelnen Arbeitsschritte bei der Erstellung des Inundationsflächenmodells waren:

VII.2. Sammlung und GIS-Implementierung aller empirischen Inundationsflächendaten

Die verfügbaren empirischen Inundationsflächenkartierungen aus Geländearbeit und Luftbildauswertung wurden in ArcView implementiert und in 50 cm-Schritten nach den jeweils während des kartierten Hochwassers am Pegel Speyer angezeigten Wasserständen sortiert. Die Karten in Abb. 129. und Abb. 130. zeigen verschiedene Möglichkeiten, die Inundationsflächendaten in ArcView zu visualisieren. In Abb. 129. sind diejenigen Inundationen rot dargestellt, die bei einem Wasserstand von 150cm ü. MW. im dargestellten Ausschnitt des Untersuchungsgebiet bisher kartiert wurden. In Abb. 130. sind für den gleichen Untersuchungsausschnitt empirisch gewonnenen Inundationsflächendaten in verschiedenen Farben nach Wasserständen geordnet dargestellt. Eine solche Zusammenstellung von wasserstandsabhängigen Inundationsflächendaten ist für zahlreiche Anwendungsbereiche bereits vollkommen ausreichend.

Interpolation von unbekanntem (nicht kartierten) Inundationssituationen

Die Inundationsflächen von nicht im Gelände beobachteten Wasserständen können nun relativ einfach über verschiedene mathematische Interpolationsverfahren in guter Annäherung an die wirkliche Situation berechnet werden. Über Inundationen von Wasserständen, die über dem Niveau des höchsten beobachteten Wasserstandes liegen, können allerdings keine sinnvollen Aussagen gemacht werden. Diese lassen sich nur mittels eines deduktiven Modells ermitteln:

VII.3. Erstellung eines digitale Geländehöhenmodells

Für eine ausführliche Dokumentation der Erstellung des digitalen Geländehöhenmodells (DGHM) sei auf HILPISCH 2001 verwiesen. Es sollen hier deshalb nur die wesentlichen Probleme und Arbeitsschritte der DGHM-Erstellung besprochen werden:

Digitale Geländemodelle, welche für hydrogeographische Fragestellungen eingesetzt werden, müssen über eine außerordentliche Höhengenaugigkeit verfügen. Während

bei großmaßstäbigen Betrachtungen Höhenfehler von etwa 1m nur eine geringe Bedeutung haben, ist im Auebereich eine Genauigkeit von besser als 50cm anzustreben (Vgl. NICKEL 1996, S.130). Als mögliche Quellen für Höhendaten kamen Digitale Laserscanbefliegungsdaten, Digitale Höhenmodelle der Landesvermessungsämter, Höhenflurkarten und die DGK5 in Frage. Noch vor der Vergabe der Diplomarbeit war nach Gesprächen mit Herrn König, dem Amtsleiter der Wasserbaugruppe Speyer, eine Bereitstellung von im Rahmen der Polderplanungen der Kollerinsel erstellten Laserscandaten mündlich zugesagt worden. Leider konnten uns die Daten nach sich über mehreren Monaten hinziehenden Gesprächen schließlich doch nicht zur Verfügung gestellt werden. Nach den Aussagen von Herrn König hätte man allerdings auf die teuren und aufwendigen Laserscanbefliegungen auch verzichten können: Aus Plausibilitätsgründen war vom mit der Auswertung der Laserscandaten beauftragten Planungsbüro ein Datenvergleich mit der DGK 5 vorgenommen worden, um Fehlmessungen durch Bäume oder andere über dem eigentlichen Grund befindlichen Objekte abschätzen zu können. Man kam zu dem Ergebnis, dass eine Nutzung der Höhenwerte der DGK keine schlechteren Ergebnisse geliefert hätte und entschloss sich, keine weiteren Laserscanbefliegungen im Zuständigkeitsbereich der Wasserbaugruppe mehr in Auftrag zu geben. Nach ausführlicher Prüfung von Preis, Qualität und Verfügbarkeit der verschiedenen Datenquellen und nicht zuletzt aufgrund der positiven Beurteilung der Grundkarten im Untersuchungsgebiet durch die Wasserbaugruppe Speyer fiel die Entscheidung zugunsten einer Nutzung der DGK5 Daten als Grundlage für das DGHM ³⁶.

Der Isohypsenabstand liegt in der DGK5 bei 0,5 Meter, wird aber im flachen Gelände mancherorts noch durch eine 0,25 Meter Isohypse ergänzt. Der mittlere Höhenfehler bewegt sich im flachen Gelände zwischen $\pm 0,3$ Meter (HILPISCH 2001, S. 28). Bei wachsender Geländeneigung a ergibt sich nach der Koppeschen Formel ein Höhenfehler von $m_h = \pm (0,4 + 3 \tan a)$ (vgl. FÖCKELER & KUHN 1999, S. 23). Mit dieser Höhengenaugkeit sind auch kleinere Mulden und Gräben von nur wenigen Quadratmetern Fläche im Geländemodell noch darstellbar, die für die Identifizierung mikroskaliger Druckwasserflächen und ihrer Bedeutung für die Stechmückenbekämpfung am Oberrhein von Nutzen sein können. Ein Problem stellte die geringe Aktualität der Grundkarte dar. Zahlreiche Blätter waren zum letzten Mal 1974 berichtigt und ergänzt worden. Durch einen Vergleich mit Luftbildmaterial von 1999 konnten aber die schwerwiegendsten Veränderungen – vor allem die großen Flächenabtragungen durch die Kiesgewinnung in der Aue - korrigiert werden. Das Geländemodell wurde als Triangulated Network (TIN) realisiert. Ein digitales Geländehöhenmodell für das gesamte Untersuchungsgebiet zu erstellen, war eine Aufgabe, die ein Diplomand alleine nicht bewältigen konnte. Das von HILPISCH angefertigte Geländehöhenmodell konzentrierte sich deshalb auf den von seiner Inundationsdynamik her interessanteren nördlichen Abschnitt des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 131.). Zwei Formen der Visualisierung des Modells im ArcView Analyst sind in Abb. 132. und Abb. 133. dargestellt.

VI.4. Simulation von Inundationen auf DGHM-Grundlage im GIS

Auf der Grundlage des DGHM wurde nun – unter stark vereinfachenden Annahmen – das Ausmaß von Überschwemmungen in der Rheinniederung simuliert. Es wurden diejenigen Flächen berechnet, welche aufgrund ihrer relativen Höhenlage zum Rhein

³⁶ Eine ausführliche Diskussion zur Wahl der Höhendaten und der Problematik des Austauschs digitaler Geodaten findet sich bei HILPISCH 2001 (Kapitel 4)

bei einem bestimmten Wasserstand als potentielle Inundationsflächen in Frage kommen. Für die verschiedenen definierten Wasserstände wurde ein „worst case“ Szenario, das größte überhaupt denkbare Ausmaß der Inundationen berechnet: Der 3-D Analyst von ArcView ermöglicht Volumen- und Flächenberechnungen zwischen zwei Oberflächen („Cut-Fill“ Analyse). Parallel zum Gefälle des Mittelwasserstandes des Rheins wurden in 25 cm Schritten fiktive Wasserstandebenen erstellt und mit dem Geländemodell verschnitten. Als Ergebnis dieser Verschnidungen wurden sowohl Umriss, Flächeninhalt als auch Wasservolumen der unterhalb des postulierten Wasserspiegels liegenden, überschwemmten Flächen berechnet. Das Ergebnis einer „Cut-Fill“ Analyse ist im 3-D Analyst nicht als Vektor File verfügbar, sondern wird in einer 2D-Ansicht als Grid wiedergegeben. In Abb. 134. ist ein solches Grid dargestellt: Die Flächen, die unterhalb der schiefen Ebene liegen (also die potentiellen Inundationsflächen) werden rot, diejenigen, die oberhalb der Ebene liegen (trockenen Flächen) blau darstellt. Die zugehörigen Volumenangaben werden in der VAT aufgelistet. Die räumliche Auflösung, die Grid Cell size lag bei 2 m, d.h. ein Pixel repräsentiert eine Fläche von 4 m². Bei den Inundationsflächenberechnungen wurde unterschieden zwischen Bruttoinundationsflächen (Gesamtheit aller von Wasser bedeckter Flächen) und Nettoinundationsflächen (Bruttoinundationsflächen abzüglich der permanenten Wasserflächen wie z.B. Baggerseen, Rhein bei Mittelwasser).

Als Ausgangshochwasser für die Erstellung der schiefen Ebene wurde ein Wasserstand von 800 cm am Pegel Speyer definiert. Von dieser Ebene aus wurden in 25-cm Schritten insgesamt 17 schiefe Ebenen bis hinunter zu einem Wasserstand von 400 cm am Pegel Speyer konstruiert und die zugehörigen „Überschwemmungsflächen“ errechnet. Die Ergebnisse der Umriss-, Flächen und Volumenberechnungen finden sich in Tabellenform nach Wasserständen aufgeschlüsselt in Abb. Tab. 10.. Die aus den „Cut-Fill“ Analysen gewonnenen Grids der Netto-Inundationsflächen (Definition Netto-Inundationsflächen siehe Abb. 135.) wurden in ArcView Shapes transformiert und in Karten dargestellt. Die Abb. 136. zeigt eine solche Karte als Screenshot in ArcView: Zur besseren Orientierung wurden Luftbilder des Untersuchungsgebietes in den Hintergrund des Views gelegt. Darüber wurden die für die verschiedenen Wasserstände berechneten Netto-Inundationsflächendaten gelegt. In der Abbildung sind beispielsweise die für einen - über mehrere Tage hinweg auf diesem Niveau verharrenden – Wasserstand von 450cm am Pegel Speyer berechneten Bruttoinundationsflächen dunkelblau, die für einen Wasserstand von 650cm berechneten Flächen hellgrün dargestellt.

VII.5. Vergleich der im GIS simulierten mit den tatsächlich beobachteten Inundationen

Der Vergleich zwischen den simulierten und den empirisch erhobenen Daten ergab, dass anhand des Modells oftmals Umriss und Fläche der Inundationsflächen erfreulich genau berechnet werden können. Allerdings stimmt der Wasserstand, bei welchem diese Inundationen im Untersuchungsgebiet tatsächlich auftreten, nicht mit dem der Berechnung zugrundeliegenden Wasserstand überein: Das Ausmaß der simulierten Inundationen ist dramatischer als die im Gelände beobachteten Überschwemmungen. Beispielsweise treten die für einen Wasserstand von 600 cm am Pegel Speyer berechneten Direkten Inundationsflächen erst bei Wasserständen von 750 cm auf. Lage und Umriss der simulierten Flächen stimmen dann allerdings mit den mit den bei höheren Wasserständen kartierten Inundationen überein. Bei

Druckwasserflächen treten zwischen simuliertem und tatsächlich beobachtetem Überschwemmungsflächen die größten Unterschiede auf.

Da die Simulationen auf stark vereinfachten Annahmen beruhen (z.B. Annahme von hydrostatischen Wasserständen, Annahme eines wasserdurchlässigen, homogenen Untergrundes) war dieser Fehler (insbesondere bei Druckwasserflächen) zu erwarten. Bei Hochwasserereignissen schwanken die Wasserstände sehr rasch und gerade bei eingipfligen Hochwasserwellen sinken die Wasserstände nach Erreichen des Maximums rasch wieder ab.

VII.6. Erarbeitung der Inundationsflächenprognosen

Entsprechend ihres unterschiedlichen Inundationsverhaltens wurden bei der Erstellung der Inundationsflächenprognosen jeweils verschiedene Modellierungsverfahren für *direkte Inundationsflächen*, *Sickerwassersammelflächen* und *Druckwasserflächen* angewendet:

VII.6.1. Direkte Inundationsflächen

Ob eine Fläche in der rezenten Aue bei einem bestimmten Rheinwasserstand überschwemmt wird oder nicht, hängt in erster Linie von ihrer Höhenlage gegenüber dem Rheinwasserstand ab. Die Untersuchungen im Gelände (s.o.) hatten ergeben, dass sich Hochwasserwellen in der rezenten Aue rasch ausbreiten und die Inundationsflächen sich mit nur geringer zeitlicher Verzögerung auf den aktuellen Rheinwasserstand einstellen. Wenn es nun (wie in dieser Arbeit), lediglich um die Frage geht, bei welchem Rheinwasserstand eine bestimmte Auflage überschwemmt wird, ist ein einfaches, auf dem DGHM von HILPISCH basierendes und mit empirischen Inundationsflächenkartierungen geeichtes deduktives Modell vollkommen ausreichend.

Der Vergleich zwischen den anhand des DGHM im GIS simulierten und den empirisch gewonnenen Inundationsflächendaten zeigte, dass Umriss und Fläche der tatsächlichen Inundationen hinreichend genau berechnet werden konnten und lediglich bezüglich des zugehörigen Wasserstandes angepasst werden musste. Nur in den wenigen Fällen, in denen das DGHM aufgrund mangelnder Aktualität der DGK5 das Relief falsch wiedergab, mussten Ausmaß und räumliche Lage der simulierten Inundationsflächen auf Grundlage der Hochwasserkartierungen abgeändert werden.

In Abb. 137. sind für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes die direkten Inundationsflächen nach Wasserständen in 50cm Schritten gegliedert dargestellt.

Zu den prognostizierten Inundationen im Bereich der Schwetzingen Wiesen ist anzumerken, dass sie unter der Annahme erstellt wurden, der während des Hochwassers 1999 beschädigte Sommerdamm würde abgetragen werden. Sie spiegeln also nicht die reale Situation wieder.

Zu den folgenden Beschreibungen und Karten ist anzumerken, dass es sich bei den der Berechnung zugrundeliegenden Wasserständen um Tageswasserstände handelt. Ferner werden sich die auf den Karten dargestellten Inundationen erst dann einstellen, wenn der Rhein den jeweiligen Wasserstand über mehrere Tage beibehält.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 450cm am Pegel Speyer (Abb. 138.):

Bereits bei einem Anstieg des Rheins von etwa 80cm über seinen Mittelwasserstand treten in den Uferbereichen der Altrheinarme erste Inundationsflächen auf:

Die wegen seiner Reiherkolonien unter Schutz gestellten Uferbereiche der Gemarkung „Im Grün“ (nördliche Kollerinsel). Dem Ufer der Kollerinsel sind mehrere

längliche, schilfbestandene, kleine Inseln vorgelagert, die ebenfalls bei geringem Wasseranstieg überschwemmt werden.

Die Uferbereiche der östlich bzw. nordöstlich von Otterstadt gelegenen länglichen Halbinsel, aufgrund ihrer Form von den Stechmückenbekämpfern „Banane“ genannt. Mehrere kleine Senken (zumeist historische, aufgelassene Tongruben) auf der Halbinsel im Ketscher Altrhein³⁷.

Die Schilfgebiete im Bereich des Angelwaldes, nahe einer Dauercampersiedlung. Eine Verlandungsfläche im Bereich der ehemaligen Ingestion des Angelhofer Altrheins.

Bei all diesen Inundationsflächen handelt es sich um Schilfgebiete. Zugleich dienen sie *Aedes Vexans* als produktiver Brutplatz.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 500cm am Pegel Speyer (Abb. 139.):
Bei Wasserständen um die 500cm sind nach wie vor die soeben beschriebenen Inundationsflächen betroffen. Zudem beginnen sich die Schlutensysteme der Böllenwörth sowie die vorgelagerten Fischergewanne mit vom Otterstädter Altrhein her einströmendem Wasser zu füllen. Je nach Höhe des Grundwasserstandes können sich bei derartigen Wasserständen bereits vereinzelt Druckwasserflächen am Grunde der Schluten und Senken in der Böllenwörth bilden. Ferner sind am Nordrand des Angelhofer Altrheins, im Reffenthal, im Pfalzwörth sowie in dem schmalen Auwaldstreifen zwischen Rhein und Hockenheimer Rheinbogen erste Druckwasserflächen zu erwarten

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 550cm und 600cm am Pegel Speyer (Abb. 140. und Abb. 141.):
Im wesentlichen sind die bereits beschriebenen Flächen von Überschwemmungen betroffen. Ferner werden tiefliegende Uferpartien, wie sie vor allem im Bereich des Otterstädter Altrheins zu finden sind, flächig überschwemmt. Besonders in der Böllenwörth und der im Ketscher Altrhein gelegenen Halbinsel entstehen zahlreiche flussnahe Druckwasserflächen.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 650cm am Pegel Speyer (Abb. 142.):
Bei 650 cm am Pegel Speyer sind flächig überschwemmt:
Das Nordufer der Kollerinsel („Im Grün“), die zahlreichen kleineren Inseln im Otterstädter Altrhein, die „Banane“ östlich von Otterstadt, sowie die östlich anschließenden „Fischergewanne“. Ferner die Uferpartien des Ketscher Altrheins und die Uferpartien des Angelhofer Altrheins im Bereich des Reffenthals. Zudem sind in der Böllenwörth zahlreiche Schluten und Senken mit vom Otterstädter Altrhein einströmendem und aus dem Untergrund aufquellenden Wasser geflutet. Im Angelwald sind bei hohen Grundwasserständen vereinzelt in den Schluten erste Druckwasseraustritte zu beobachten. Südlich der Autobahnbrücke treten zwischen Rhein und Rheinhauptdamm beidseitig flächige Überschwemmungen auf.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 700 cm am Pegel Speyer (Abb. 143.)
Ab etwa 700cm am Pegel Speyer treten auch innerhalb der höchstgelegenen Bereiche der rezenten Aue - im Angelwald und auf der Ketscher Insel - größere Druckwasserflächen auf. Die Böllenwörth ist bei derartigen Wasserständen bereits

³⁷ Die ehemaligen Tongruben dienten Dr. Becker bei seinen Untersuchungen zu Ökologie der Stechmücken als Untersuchungsflächen

großflächig überschwemmt. Im Bereich der Speyerer Autobahnbrücke reichen die Inundationen bereits bis an den Fuß des östlichen Rheinhauptdeiches heran.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von 750 cm am Pegel Speyer (Abb. 144.):
Im nördlichen und östlichen Bereich des Otterstädter Altrheins reichen die Inundationen fast überall bis an den Rheinhauptdamm heran. In der Böllenwörth beginnt sich die Strömungsrichtung umzukehren: während bei Wasserständen bis knapp über 700cm die Schluten der Böllenwörth von Westen (vom Otterstädter Altrhein) her geflutet wurden, strömt nun ab etwa 750cm das Wasser vom Hauptstrom des Rheins über die Böllenwörth in den Otterstädter Altrhein und „reaktiviert“ so den einstigen Lauf des Rheins. Auch der Ketscher Altrhein wird bei diesem Wasserstand wieder auf voller Breite durchströmt.

Prognostizierte Inundationsflächen bei Wasserständen von über 800 cm am Pegel Speyer (Abb. 145.):

Die rezente Aue ist ab 800cm nun fast vollständig überschwemmt. Das Wasser reicht im gesamten Innendeichgebiet bis an den Rheinhauptdamm heran. Lediglich im Bereich des Angelwaldes und der Ketscher Insel ragen noch größere zusammenhängende Höhenrücken aus dem Wasser. Steigt der Wasserstand weiter bis 850cm an, verschwinden auch diese Erhöhungen bis auf kleinste, wenige m²-große Reste in den Fluten des Rheins.

VII.6.2. Sickerwassersammelflächen

Eine genaue Prognose dieses Inundationsflächentyps ist kaum möglich, da größere Wasseraustritte durch Sickerwasser in Nähe des Rheinhauptdamms eine Bedrohung der Dammsstabilität darstellen und in der Regel eine sofortige Ausbesserung des entsprechenden Dammsabschnittes zur Folge haben. Diese notwendigen Dammerneuerung verhindern natürlich eine genaue Prognose von Sickerwasser. Dennoch lassen sich die Rahmenbedingungen bzw. die räumliche Lage von potentiellen Sickerwassersammelflächen genau bestimmen:

Sickerwassersammelflächen entstehen erst bei Wasserständen, bei denen die Überflutungen in der rezenten Aue bis an den Damm heranreichen.

Die Inundationen müssen zudem über mehrere Tage persistieren. Aus den Geländekartierungen ergab sich als Erfahrungswert, dass es eines Wasserstandes am Pegel Speyer von 700 oder mehr über einen Zeitraum von mindestens 2 bis 3 Tagen bedarf, bevor überhaupt mit der Entstehung von Sickerwassersammelflächen im Untersuchungsgebiet zu rechnen ist.

Ferner treten sie ausschließlich in Geländesenken in unmittelbarer Dammnähe auf. Eine genaue Abgrenzung zwischen Sickerwasserflächen und dammnahen Druckwasserflächen ist allerdings kaum möglich. Letztlich resultieren die dammnahen Inundationen aus einer Überlagerung der beiden Effekte. Da aber Sickerwasser oberflächlich in die nächstgelegene Senke strömt und sich dort sammelt, nimmt der Anteil von Sickerwasser an der binnenseitigen Inundation mit der Entfernung vom Damm rasch ab. Aus dem Vergleich der historischen Karten mit den Inundationen von 1999 ergab sich ein dammparalleler Bereich von etwa 600m Breite, in welchem verstärkt mit Sickerwassersammelflächen gerechnet werden muss. Anhand der empirischen Hochwasserkartierungen von Pfingsten 1999 und des DGHM-basierten Inundationsflächenmodells wurden Karten der potentiell als

Sickerwassersammelflächen in Frage kommenden Flächen in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand erstellt.

Potentielle Sickerwassersammelflächen bei Wasserständen bis 650cm am Pegel Speyer (Abb. 146.)

Im Untersuchungsgebiet ist frühestens bei Wasserständen von über 650cm mit der Entstehung von Sickerwasserflächen zu rechnen. Hierzu muss die 650cm Marke aber mindestens 3 bis 4 Tage erreicht werden. Kleine Sickerwassersammelflächen können dann im rechtsrheinischen Bereich am Herrenteich und dem Pfalzwörth auftreten. Im linksrheinischen Bereich sind Sickerwasserflächen im eigentlichen Sinne nicht zu erwarten. Lediglich die größeren Entwässerungsgräben bei Waldsee, Otterstadt und Speyer beginnen sich rasch mit Wasser zu füllen.

Potentielle Sickerwassersammelflächen bei Wasserständen bei 700cm am Pegel Speyer (Abb. 147.)

Werden dagegen über mehrere Tage Wasserstände von um die 700cm erreicht, sind erstmals auch größere Sickerwassersammelflächen beobachtet worden. Besonders gefährdet ist hier der Hockenheimer Rheinbogen im Bereich des Herrenteiches. Auch auf der Kollerinsel sind in der südlich des Saumagen gelegenen Pferdekoppel größere Inundationen zu erwarten. Allerdings ist durch die gegenwärtige Umgestaltung der Kollerinsel in einen Hochwasserpolder mit einer Veränderung der Inundationsflächenentstehung zu rechnen (wie diese Änderungen aussehen werden, lässt sich allerdings kaum vorhersagen).

Potentielle Sickerwassersammelflächen bei Wasserständen bei 750cm am Pegel Speyer (Abb. 148.)

Größer Sickerwassersammelflächen sind auch bei 750cm vor allem im Bereich des Hockenheimer Rheinbogens zu erwarten. Auch auf der Kollerinsel und innerhalb des Otterstädter Rheinbogens sind zahlreiche dammnahe Flächen gefährdet. Es ist noch anzumerken, dass die innerhalb des Otterstädter Neubaugebietes „Schmale Behl“ verzeichneten Sickerwassersammelflächen seit der Bebauung nicht mehr auftreten; die Karte in Abb.VII.22. also nicht mehr die aktuelle Situation widerspiegelt. Allerdings hat die Aufschüttung und Versiegelung der „Schmalen Behl“ die Druckwasserdynamik im Untergrund des Baugebietes nicht unterbunden.

Potentielle Sickerwassersammelflächen bei Wasserständen über 800cm am Pegel Speyer (Abb. 149.)

Bei länger anhaltenden Hochwasserereignissen mit über 800cm am Pegel Speyer ist eine Entstehung von Sickerwasserflächen in nahezu allen dammnahen Senken zu erwarten. Bei derartigen Wasserständen reichen die Fluten des Rheins im Untersuchungsgebiet fast überall an den Rheinhauptdamm heran und beginnen Druck auf ihn auszuüben. Im Bereich des Dammfußes sind vermehrt Wasseraustritte von in den Untergrund infiltriertem und oberflächennah landeinwärts gesickertem Rheinwasser zu erwarten. Ab 800cm erfolgen allerdings in den gleichen Senken intensive Druckwasseraustritte, weshalb eine zweifelsfreie Identifizierung des Entstehungsprozesses der binnenseitigen Inundationen zumindest bei diesen Wasserständen in Dammnähe nicht mehr möglich ist.

VII.6.3. Druckwasserflächen

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich die Inundationsdynamik von Druckwasserflächen über deduktive Ansätze nicht sinnvoll berechnen lässt. Die Erstellung der im folgenden dargestellten Druckwasserkarten basiert deshalb auf einem induktiven Modellansatz. Es wurden alle verfügbaren, durch die Geländearbeiten und Luftbildinterpretation empirisch gewonnenen Druckwasserinformationen zusammengetragen. Die anhand dieser Informationen identifizierten Druckwasserflächen wurden nach der in Abschnitt V.4.5. vorgestellten Typologie eingeteilt.

Neben dem Problem, die Dynamik der einzelnen Druckwasserfläche zu erfassen und ihr Verhalten bei künftigen Hochwasserereignissen abzuschätzen, gestaltet sich auch die Darstellung der Ergebnisse nicht ganz unproblematisch. Die vielfältigen Erscheinungsformen von Druckwasserflächen und ihre „individuelle“ Reaktion auf sich ändernden Rheinwasserstände ist nur schwer in Kartenform darstellbar. Die Ergebnisse der GIS Auswertungen wurden deshalb auf drei Arten dargestellt:

Für einen ersten Überblick oder Fragen der Raumplanung ist es ausreichend, für definierte Rahmenbedingungen ein „Worst Case“ Szenario darzustellen. In Abb. 150. ist für verschiedene Wasserstände das maximal zu erwartende Ausmaß der Überschwemmungen in Form einer klassischen Inundationsflächenkarte dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die jeweiligen Wasserstände mindestens 3 und höchstens 7 Tage andauern müssen, damit sich die dargestellten Inundationsflächen auch wirklich in der Rheinniederung ausbilden.

Eine weitere Möglichkeit, die Ergebnisse darzustellen, findet sich in Abb. 151. Für jeden Wasserstand wird das maximale Ausmaß der einzelnen Überschwemmungsflächen dargestellt. Zudem wird jede Inundationsfläche einem der in Abschnitt V.4.5. vorgestellten Inundationstypen zugeordnet und über die dort ebenfalls vorgeschlagenen Kurzzeichen gekennzeichnet und charakterisiert.

Die eleganteste Methode, die Eigenheiten jeder Inundationsfläche darzustellen, besteht in einer dynamischen GIS Abfrage und Ergebnisvisualisierung. Die individuellen Eigenschaften der Druckwasserflächen wurden in der GIS Datenbank als Attribute abgelegt und können entsprechend über eine Datenbankabfrage visualisiert werden. Im Gegensatz zu einer klassischen Karte bzw. einem Plott ist es bei dynamisch generierten Karten möglich, durch das Ausblenden von je nach Fragestellung überflüssigen Karteninhalten auf die wesentliche Information zu fokussieren. Ein naheliegender Gedanke ist die Verbreitung von GIS-generierten Inundationsflächenprognosen in Form einer kartenbasierten Visualisierung über ein Internet-interface. Die Erarbeitung einer möglichst effizienten und benutzerfreundlichen Aufbereitung der gewonnenen Inundationsflächendaten würde allerdings den Rahmen des Promotionsvorhabens sprengen und muss Gegenstand eines eigenen, geoinformatischen Forschungsprojektes sein (siehe auch Ausblick).

VII.6.3.1 Textteil zu den Übersichtskarten zur Druckwasserflächenprognose im Untersuchungsgebiet

Potentielle Druckwasserflächen bei Wasserständen bei 500cm am Pegel Speyer (Abb. 152.)

Druckwasserflächen sind bei Wasserständen von 500cm im Saumagen im Norden der Kollerinsel, in den Entwässerungsgräben östlich von Waldsee und in geringem Ausmaß auch in den Tongruben nahe des Wasserwerks Waldsee zu erwarten. Auf der rechtsrheinischen Seite können Druckwasserflächen im Herrenteich und nahe des Pfalzwörth am Ketschergraben entstehen.

Potentielle Druckwasserflächen bei Wasserständen bis 600cm am Pegel Speyer (Abb. 152.)

Das Ausmaß der soeben beschriebenen Druckwasserflächen nimmt bei Wasserständen von 550cm weiter zu – insbesondere im Saumagen im Norden der Kollerinsel. Ferner sind nun auch in der Verlängerung des Waldseegrabens nach Süden in Richtung Otterstadt, im Graben am südlichen Hochgestaderand von Otterstadt sowie im Naturschutzgebiet zwischen den Breitwiesen und der Ketschau kleinere Wasseraustritte zu erwarten.

Potentielle Druckwasserflächen bei Wasserständen bei 650cm am Pegel Speyer (Abb. 152.)

Im Bereich des Lachgrabens östlich von Waldsee sowie im benachbarten Großmaar sind größere Inundationen zu beobachten, wobei bei diesen Wasserständen allerdings bereits der oberflächliche Zufluss durch die Entwässerungskanäle gegenüber der Druckwasserbildung dominiert. Persistiert der Wasserstand länger als eine Woche auf 650 am Pegel Speyer, ist bereits mit erheblichen Druckwasser- bzw. Sickerwassersammelflächen im Bereich des Herrenteichs zu rechnen. Ebenso entstehen dann in den Breitwiesen sowie in den Naturschutzgebieten südlich des Siegelhain Druckwasserflächen. Im Norden der Speyerer Gemarkung füllen sich die Entwässerungsgräben.

Potentielle Druckwasserflächen bei Wasserständen bis 750cm am Pegel Speyer (Abb. 150.)

Während des Pfingsthochwassers 1999 stieg der Wasserstand am Pegel Speyer bis fast auf 900 cm, sank dann aber rasch wieder ab und verharrte in den folgenden Wochen auf einem Niveau zwischen 700 und 750cm. Die Inundationen stiegen im Vergleich zu den Inundationen der bisher beschriebenen Wasserstände sprunghaft an und betrafen auch weit vom Rhein entfernte Flächen der Rheinniederung:

Im Norden des Untersuchungsgebietes werden durch Druckwasseraustritte weite Flächen der Campinganlage „Auf der Au“ überflutet. Überschwemmt werden zahlreiche Flächen am Falkenhof, auf den Burgwiesen, im Bereich des Wasserwerks und das Großmaar. Im Otterständter Rheinbogen werden der Lachgraben sowie zahlreiche Äcker mitsamt Feldwegen flächig überschwemmt. Die Druckwasser- und Sickerwasseraustritte auf der Kollerinsel führen trotz Hochwasserdamm zu einer nahezu vollständigen Überschwemmung der Insel. Bei den Häusern in Otterstadt, die in der Rheinniederung errichtet wurden, sind bei derartigen Wasserständen Wasseraustritte im Keller bzw. druckwasserbedingte Bauschäden wahrscheinlich. Zwischen Otterstadt und dem Reffenthal entstehen auf den Äckern größere Inundationen. Am südlichen Ortsrand von Otterstadt entstehen am Hochgestaderand und nördlich des Binsfeld, auf Speyerer Gemarkung entstehen am Deutschhof, an der Mülldeponie, in den Gewerbegebieten am Schlangenwhyhl und Rübsamenwhyhl ebenfalls größere Überschwemmungen. Auf der rechtsrheinischen Seite stehen große Teile des Hockenheimer Rheinbogens unter Wasser. Insbesondere der Flugplatz Herrenteich verwandelt sich bei derartigen Wasserständen in einen temporären See.

Potentielle Druckwasserflächen bei Wasserständen bis 850cm am Pegel Speyer (Abb. 150.)

Halten derartig hohe Wasserstände länger an, besteht die erhöhte Gefahr eines Dammbrochs. Sickerwassersammelflächen entstehen nun sehr zahlreich in Dammnähe und sind von den nun in jeder Geländesenke auftretenden Druckwasserflächen kaum noch zu unterscheiden. Viele der bisher beschriebenen

Druckwasserflächen weiten ihre Fläche stark aus und verschmelzen mit benachbarten Flächen. Mehrere größere, seeartige Wasserflächen entstehen: Der Herrenteich, die Breitwiesen, der ehemalige Karl-Ludwig-See bei Ketsch sowie der Bereich zwischen Oder und Rheinhauptdamm. Auch die Kollerinsel hätte sich bei derartigen Wasserständen in einen, mit einer Damm umgebenen See verwandelt. Künftig wird im Zuge des Polderbaus ein Fluten der Koller gezielt erfolgen.

Infolge der Druckwasseraustritte werden ebenfalls die bereits längst verlandeten Mäanderbögen (z.B. die Mäanderbögen am Ortsrand von Waldsee und Otterstadt) in weiten Teilen wieder mit Wasser gefüllt, so dass beim Betrachten der Luftbilder der Eindruck entsteht, der Fluss würde wieder in seine alten Läufe strömen.

Auf Speyerer Gemarkung werden bei derartigen Wasserständen die in den letzten Jahren im Bereich der Rheinhausener Weide und im Schlangenwyhl errichteten Gewerbebetriebe über starke Druckwasseraustritte auf ihren Grundstücken und Schäden an Gebäuden und Infrastruktur klagen.

IV.6.3.2. Detailkarten zur Druckwasserflächenprognose im Untersuchungsgebiet

Bei einigen Anwendungen in Forschung und Praxis steht nun nicht so sehr die Frage, welche Inundationen bei einem definierten Wasserstand zu erwarten sind, sondern vielmehr das Inundationsverhalten der einzelnen Überschwemmungsflächen im Mittelpunkt des Interesses. In diesem Fall ist eine Ergebnisdarstellung wie in Abb. 151. vorzuziehen:

Im Kartenausschnitt sind die Rheinniederung östlich von Waldsee und der westliche Teil der Kollerinsel abgebildet. Die Inundationsflächen sind in einem Ausmaß, wie es bei etwa 650 cm am Pegel Speyer zu erwarten ist, dargestellt. Ferner ist das Inundationsverhalten jeder einzelnen Inundationsfläche sowie die Beschaffenheit ihres direkten Untergrundes über eine in Abschnitt V.4.5. vorgeschlagene Beschriftung angegeben. Zur Erläuterung der Beschriftung sollen folgende Beispiele dienen:

Großmaar: DWF(-1,3);SWF(1,3-)/wh

Aus dieser Beschriftung lässt sich ablesen, dass bei niedrigen Wasserständen von 1,3m über dem Mittelwasserstand innerhalb dieser Fläche mit der Ausbildung von Druckwasserflächen zu rechnen ist. Steigt der Rhein weiter an, strömt oberflächlich Wasser in die Senke und die Fläche verliert ihren ursprünglichen Charakter als Druckwasserfläche und ist nun dem Typ der Sickerwassersammelfläche zuzuordnen. Ferner besteht der Untergrund aus wasserhemmenden Sedimenten. Dies bedeutet wiederum, dass auch nur dann mit Druckwasseraustritten zu rechnen ist, wenn der Rhein sehr lange den entsprechenden Wasserstand hält. Umgekehrt versickert einmal in der Inundationsfläche befindliches Wasser nur sehr langsam.

Weitere Informationen: Beim Großmaar handelt es sich um eine klassische Sickerwassersammelfläche, welche Anschluss an drei Entwässerungskanäle hat. Sie fungiert als eine Art Zwischenspeicher für das in den Entwässerungskanälen gesammelte Wasser. Sinkt der Rheinwasserstand, wird nordöstlich von Waldsee eine Schleuse geöffnet und in den Rhein entwässert.

Im Grün: DI(0,8-)/wl

Es handelt sich um eine klassische *Direkte Inundationsfläche*: Ab Wasserständen von 0,8 m über dem Mittelwasserstand beginnt der Rhein diese Fläche direkt zu überschwemmen. Da der Untergrund aus wasserleitenden Sedimenten besteht, ist auch nicht mit dem Verbleiben von größeren Restwasserflächen zu rechnen, wenn sich der Rhein wieder in sein Mittelwasserbett zurückzieht.

Auf der Au: DWF(2,3-)/wh

Bei dieser Fläche handelt es sich um eine klassische *Druckwasserfläche*. Hier beginnt erst ab Wasserständen von 2,3 m über dem Mittelwasserstand Druckwasser auszutreten. Die Ursache hierfür ist in den wasserhemmenden Sedimenten im unmittelbaren Untergrund zu sehen. Ebenso versickert einmal ausgetretenes Wasser in diesen Flächen nur sehr langsam wieder. Es ist z.B. anzunehmen, dass hier bei einem Hochwasser im Juni ausgetretenes Wasser noch bis September nicht vollständig versickert und verdunstet ist.

VII.7. Resumé

Im Rahmen der Diplomarbeit von HILPISCH wurde für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes ein räumlich hoch aufgelöstes digitales Geländehöhenmodell (DGHM) auf Basis der DGK5 und aktueller Luftbilder erstellt. Das Geländemodell wurde unter stark vereinfachenden Annahmen für die Simulation der bei verschiedenen Wasserständen (die Intervallschritte lagen bei 25cm) zu erwartenden Überschwemmungen herangezogen (einfaches deduktives Inundationsflächenmodell). Die so im GIS simulierten Inundationen wurden mit den im Gelände tatsächlich aufgetretenen Überschwemmungsflächen verglichen. Dieser Vergleich ergab eine gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und beobachtetem Umriss und Flächeninhalt der Inundationsflächen. Allerdings lagen die Wasserstände, bei denen die berechneten Überschwemmungsflächen tatsächlich auftreten, deutlich über den der jeweiligen Berechnung zugrundeliegenden Wasserständen. Beispielsweise entstehen die für einen Wasserstand von 600cm (Pegel Speyer) berechneten Inundationen tatsächlich erst beim Eintritt eines Wasserstandes von 750cm. Bei Druckwasserflächen war der Fehler noch ausgeprägter.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für die Erstellung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Inundationsflächenmodells drei verschiedene Teilmodelle erarbeitet:

Für jeden der oben definierten Grundinundationsflächentypen (Direkte Inundationsflächen, Sickerwassersammelflächen, Druckwasserflächen) wurde ein eigenes Inundationsflächenmodell unter Verwendung von z.T. unterschiedlichen Modellansätzen erstellt.

Für die Simulation der Direkten Inundationsflächen erwies sich das vereinfachende, auf dem DGHM von HILPISCH basierende und mit den empirischen Inundationsflächenkartierungen kalibrierte deduktive Modell als vollkommen ausreichend. Die auf der Grundlage dieses Teilmodells für Wasserstände von 500cm bis 800cm am Pegel Speyer prognostizierten Direkten Inundationsflächen wurden in Karten dargestellt (siehe Abb. 139 bis Abb. 145).

Für Sickerwassersammelflächen wurde angenommen, dass sie überhaupt erst bei Wasserständen von 650cm am Pegel Speyer und auch nur in Geländesenken in unmittelbarer Dammnähe (bis maximal etwa 600m Entfernung vom Damm) entstehen. Da eine Entstehung dieser Flächen stark von der (vor einem Hochwasser nicht bestimmbar) Durchlässigkeit des Dammes bzw. der oberflächennahen Flusswasserinfiltration abhängt, ist eine Prognose dieser Flächen nicht möglich. Es lassen sich aber diejenigen Flächen bestimmen, in denen sich bei einem definierten Wasserstand das hinter dem Damm austretende Wasser potenziell sammelt. Die Bestimmung dieser Inundationsflächen in Abhängigkeit vom jeweiligen Wasserstand basierte wiederum auf dem deduktiven Inundationsflächenmodell, welches bereits zur Prognose der Direkten Inundationen herangezogen worden war. Die auf der

Grundlage dieses Teilmodells für Wasserstände von 650cm bis 800cm am Pegel Speyer potenziellen Sickerwassersammelflächen wurden in Karten dargestellt (siehe Abb. 139 bis Abb. 145).

Für die Prognose der Druckwasserflächen konnte das deduktive Inundationsflächenmodell aufgrund erheblicher Unterschiede zwischen berechneten und beobachteten Inundationen nicht mehr verwendet werden. Anhand der für die meisten Wasserstände bereits vorliegenden empirischen Inundationsflächendaten wurden ein induktives Druckwasserflächenmodell erstellt. Die Inundationsdynamik dieser Flächen wurde zum einen in Karten dargestellt, welche das maximal zu erwartende Ausmaß der Druckwasserflächen in Abhängigkeit vom Wasserstand darstellenden Karten (siehe Abb. 152. und Abb.150.) anzeigen. Zum anderen wurden Karten, aus denen die Inundationsdynamik der einzelnen Flächen bei verschiedenen Wasserständen hervorgeht, angefertigt (siehe Abb.151.).

VIII. Offene Aufgaben und Forschungsfragen

VIII.1. Nutzung des erarbeiteten Inundationsflächenmodells zur Hochwasserwarnung und –vorhersage

VIII.1.1. Die Notwendigkeit von Wasserstands- und Inundationsflächenvorhersagen

In der Einleitung zu dieser Arbeit wurde bereits darauf hingewiesen, dass die gegenwärtig in der Rheinaue vorgenommene Nutzung (z.B. als Wohn- und Gewerbeflächen) oftmals in erheblichem Widerspruch zu der nach wie vor bestehenden Bedrohung durch Hochwasser und Druckwasseraustritte steht. Je intensiver die Altaue genutzt wird und je wertvoller das in ihr befindliche schützenswerte Gut ist, desto höher sind die Anforderungen an den technischen Hochwasserschutz und umso dramatischer ist sein Versagen. Es muss aber betont werden, dass trotz hoher Investitionen in die Errichtung und Unterhaltung von Dämmen und Retentionsflächen der technische Hochwasserschutz nur bedingt Schutz bieten kann. Denn zum einen besteht am Oberrhein nach wie vor die Möglichkeit eines Dammbrochs. Würden die gleichen Niederschlagsmengen, welche das Elbhochwasser 2002 auslösten, im Einzugsgebiet des Rheins niedergehen, ist flussabwärts ab Iffezheim mit Dammbrochen zu rechnen. Zum zweiten wurde in der vorliegenden Arbeit eindringlich auf die (auch bei intakten Dämmen bestehende) Problematik der Druckwasserflächen hingewiesen.

So notwendig und wichtig Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes im Einzelfall auch sein mögen, sie verlieren ihren Sinn, wenn sich die betroffenen Bürger und Unternehmen in falscher Sicherheit wiegen und die eingedeichten Flächen in einer nicht an die natürlichen Gegebenheiten und die reale Hochwassergefahr angepassten Weise nutzen. Die Vorstellung für die reale Hochwasserbedrohung in der Aue ist, wie die Beispiele aus dem Untersuchungsgebiet zeigten, in der Vergangenheit oftmals verlorenen gegangen oder bewusst missachtet worden. Nur so ist es zu erklären, das Druckwasserflächen bebaut wurden, die aufgrund ihrer naturräumlichen Ausstattung besser als Feuchtbiotop oder Naherholungsgebiet genutzt worden wären.

Hier ist es nun einerseits unvermeidlich, dass von Seiten der Planung und Politik eine weitere Bebauung bzw. unangepasste Nutzung von Auflächen und insbesondere von Druckwasserflächen verhindert wird. In der Vergangenheit eilte die Planung in einigen Fällen der bereits wild gewachsenen Flächennutzung hinterher und konnte nur versuchen, Schlimmeres zu vermeiden, anstatt selbst eine planvolle, angemessene Nutzung vorzugeben (siehe z.B. MODROW (1981)). Allerdings haben die Beispiele in der vorliegenden Arbeit auch gezeigt, das noch in jüngster Vergangenheit im Rahmen regulärer Planungsverfahren Wohn- und Gewerbeflächen inmitten von druck- und hochwassergefährdeten Bereichen ausgewiesen wurden.

Andererseits ist es wenig hilfreich, sich darauf zu versteifen, die Problemlösung ausschließlich in den Bereich von Planung und Politik zu legen. Denn schließlich ist für die Entscheidung, ein Gebäude im hochwassergefährdeten Bereich zu errichten, der jeweilige Bauherr selbst verantwortlich. Der Aufklärung der betroffenen Bevölkerungs- und Interessensgruppen über die realen Bedrohung durch Hoch- bzw. Druckwasser kommt deshalb große Bedeutung zu. Die Bürger und Unternehmen, welche in Standorte in der Altaue investieren, dürfen sich nicht in falscher Sicherheit wiegen oder müssen sich der Gefährdung zumindest in voller Tragweite bewusst

sein, um entsprechende Vorsorgemaßnahmen ergreifen zu können. Ein gutes Beispiel für das Potenzial der Schadensverminderung durch Aufklärung und Frühwarnung der betroffenen Bürgerschaft gibt die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) in ihren „Leitlinien für einen Zukunftsweisenden Hochwasserschutz“ (LAWA, (1995)): Die Sicherung der Kölner Altstadt bis zu einem 15-jährlichen Hochwasser (durch eine Hochwasserschutzmauer) hatte das Bewusstsein, auch weiterhin im Überschwemmungsgebiet des Rheins zu leben, entgegen der realen Hochwassergefährdung in der Bevölkerung soweit in den Hintergrund treten lassen, das bei dem Dezemberhochwasser 1993 ein Schaden von 110 Mio. DM eintrat. Durch dieses Ereignis wurde das Bewusstsein für die reale Hochwassergefahr wieder geschärft, so dass das Hochwasser im Januar 1995 (sogar bei einem höheren Wasserstand) lediglich einen Schaden von 65 Mio. DM anrichtete. Eine Halbierung des Schadens von einem Jahr auf das andere durch Schärfung des Gefahrenbewusstseins in der Bevölkerung zeigt das Potenzial an, welches in einer effektiven Informationsvermittlung an die verschiedenen Zielgruppen liegt. Die Hochwassermeldezentralen der Bundesländer leisten hierzu bereits seit Jahren einen wichtigen Beitrag. Doch Hochwasservorhersagen verlieren an Wirkung, wenn ihre Prognosen und Warnungen in ihrer Bedeutung nicht richtig verstanden werden. Beispielsweise ist die Information des in 24 Stunden an einem amtlichen Flusspegel zu erwartenden Wasserstandes für den Normalbürger wertlos, wenn sie nicht mit einer räumlichen Information verbunden wird. Denn eigentlich möchte der Bürger nicht wissen, wie hoch das Wasser an den Pegeln steht, sondern ob sein Haus im Überschwemmungsbereich stehen wird oder nicht. Inundationsflächenkarten, welche das Ausmaß der aktuellen bzw. der in 24 Stunden zu erwartenden Überschwemmungen darstellen, können hier Abhilfe schaffen.

VIII.1.2. Verbreitung von Inundationsflächendaten in einem internetbasierten Hochwasserinformationssystem

Es gilt deshalb die Wasserstandsvorhersagen der Hochwasservorhersagezentralen mit Inundationsflächenmodellen zu koppeln. Für das Untersuchungsgebiet wurde in der vorliegenden Arbeit ein solches Modell erstellt. Die zu erwartenden Überschwemmungen lassen sich in Abhängigkeit vom jeweils vorhergesagten Wasserstand am Pegel Speyer in digitalen Karten darstellen. Eine Verbreitung derartiger Inundationsflächenvorhersagen über das Internet bietet sich geradezu an. Ebenso wie heute die Wasserstandsvorhersagen der HVZ in Diagrammform abrufbar sind, ließen sich künftig auch dynamisch generierte Überschwemmungsflächenvorhersagen sowie weitere wertvolle Informationen zur aktuellen Hochwassersituation in Sekundenschnelle verbreiten. Im folgenden seien Aufgaben und Grundkonzeption eines solchen internetbasierten Hochwasserinformationssystems kurz skizziert.

IX.1.2.1. Aufgabe und Nutzen eines internetbasierten Hochwasserinformationssystems (IHI)

Angestrebt ist die Entwicklung eines dynamischen (auch mobil verfügbaren) internetbasierten Hochwasserinformationssystems (im folgenden abgekürzt als IHI), welches einerseits die zahlreichen, bereits existierenden Vorhersagemodelle (Direkte Inundationsflächen, Dambruchmodelle, Druckwasserflächenmodelle) und relevanten Umweltdaten sammelt, integriert und analysiert, und andererseits die gewonnenen Hochwasservorhersagen und -informationen den betroffenen und interessierten Bürgern ohne Zeitverzögerung in angemessener, leicht verständlicher Weise zukommen lässt. Um möglichst viele Bevölkerungsgruppen zu erreichen, muß

der Zugriff auf das Hochwasserinformationssystem über verschiedene Medien z.B. über das Internet, als mobiler Dienst (z.B. iPaq, UMTS Mobile Phone), als SMS, e-mail, Fax oder telefonisch als voice mail möglich sein.

Die zu verbreitenden Informationen umfassen I. *Prävention* (z.B. Gefahrenpotenzialskarten: Welche Kommunen, Gebäude, usw. sind potenziell wie stark von Hochwasser gefährdet), II. *aktuelle Vorhersagen* (z.B. Überschwemmungsflächenvorhersage, Vorhersage von Wasserstandstiefen) und *individuelle Warnungen* (z.B. Senden einer europaweit empfangbaren SMS an den Besitzer eines akut hochwassergefährdeten Hauses) sowie III. *Krisenmanagement* (z.B. Übermittlung von aktueller Informationen und Aufrufen der Krisenstäbe).

I. Prävention: Aufklärung der Bevölkerung über die Hochwasserrisiken

Durch die Verbreitung von Hochwasserinformationen (z.B. Überflutungs-, Druckwasser- und Gefahrenpotentialkarten) über ein IHI soll die Aufklärung der Bürger über die Überschwemmungsrisiken und –häufigkeiten der verschiedenen Fluss- und Gewässersysteme Deutschlands verbessert werden. Die Hochwasserrisiken werden so für jeden interessierten Bürger klar erkennbar. Auf dieser Grundlage kann auf eine Minderung des Schadenspotenzials hingearbeitet werden. Ein Bürger soll sich so beispielsweise bereits vor dem Kauf eines Hauses in Flussnähe mittels des IHI jederzeit, einfach, schnell und kostenlos über die Hochwassergefährdung des Gebäudes informieren können. Dadurch können frühzeitig Maßnahmen zur Schadensminimierung ergriffen werden wie z.B. den Stromverteilerkasten nicht im Keller, sondern in oberen Stockwerken zu installieren. Wichtig ist dabei, dass die digitalen Gefahrenpotenzialkarten leicht verständlich (keine komplizierte Legende) sind, und räumlich hoch aufgelöst vorliegen (Maßstab 1:5000 und genauer) und der vom Benutzer gewünschte Kartenausschnitt einfach aufgerufen werden kann.

II. Vorhersage: Warnung der Bevölkerung bei akuter Hochwassergefahr

Das IHI sammelt die aktuellen, für eine Hochwasservorhersage relevanten Umweltdaten (z.B. Wasserstände der amtlichen Gewässerpegel, Wettervorhersagedaten, Niederschlagswerte in den Flusseinzugsgebieten, Schneeschmelze, usw.). Die bereits bestehenden und bewährten Vorhersagemodelle (z.B. Wasserstandsvorhersagemodelle der HvZ; Howis der Stadt Heidelberg) werden in das IHI integriert und um weitere Vorhersagemodelle (z.B. für Direkte Inundationsflächen und Druckwasserflächen) erweitert. Die berechneten Vorhersagen werden ohne Zeitverzögerung in Form der bewährten Wasserstandsvorhersage-Diagramme, aber auch digital in Form von Überschwemmungsflächenkarten und Wasserstandstiefenkarten dynamisch generiert und über verschiedene Medien verbreitet. Das IHI sendet ferner im Hochwasserfall automatisch Warnungen an die jeweils von Überschwemmung bedrohte Bevölkerung, sofern diese zuvor ihre Telefonnummern oder e-mail Adresse und den Standort des hochwassergefährdeten Objekts (z.B. die eigene Wohnung) zu diesem Zweck über das Internet in das Warnsystem eingetragen haben.

III. Krisenmanagement: Kommunikationsplattform für Krisenstäbe, Behörden und Bürger

Im Falle einer Hochwasserkatastrophe können die Krisenstäbe über das IHI Aufrufe und Hinweise an die Bevölkerung übermitteln. Über eine Hochwasserdatenbank erhalten Bürger Ratschläge für einen besonnenen Umgang mit der Gefahr (Keller auspumpen oder nicht?, wie sichere ich einen Öltank gegen Hochwasser, Gefahren

durch Trinkwasserverunreinigung, usw.); über eine online-Redaktion der Krisenstäbe die wichtigsten aktuellen Informationen (wo wurden Sandsackdepots, Notunterkünfte, Behelfskrankenhäuser eingerichtet? Usw.). Mittels mobiler Empfangsgeräte (LBS) können von autorisierten Personen Informationen vor Ort nicht nur empfangen, sondern auch eingegeben werden (z.B. aktuelle Lagebericht von gefährdeten Deichen, Aktivierung von Krisenplänen,...). Aufgrund von Überschwemmungen gesperrte Straßen und Wege werden im IHI gemeinsam mit alternativen Routen angezeigt. Um die Selbsthilfe der Bürger zu erleichtern und zu organisieren, können über ein digitales, nach Regionen und Ortschaften, Stadtteilen gegliedertes „Schwarzes Brett“ Hilfsgesuche und Angebote eingetragen werden. Alle dynamischen Informationsdienste können vom Bürger entweder abgerufen oder bei akuter Gefahr auch ohne vorherige Anfrage vom System direkt übermittelt werden.

IX.1.2.2. Exkurs: Technische Herausforderungen bei der Entwicklung eines internetbasierten Hochwasserinformationssystems

Im folgenden seien kurz verschiedene informationstechnische Arbeits- und Forschungsbereiche skizziert, welche sich bei der Entwicklung eines IHI stellen:

Die Integration heterogener Datenbestände (z.B. Fachinformationen der Behörden, dynamisch aktualisierte Umweltdaten, Wasserstandsvorhersagen der HVZ) stellt eine besondere Herausforderung dar, für die es bis heute keine Standardlösungen gibt. Die Systemarchitektur muss offen sein für verschiedenste Schnittstellen zur Dateneingabe (z.B. Niederschlagsdaten, Datenbanken der Fachbehörden), aber auch zur Datenausgabe auf die Endgeräte (z.B. PC, Telefon, SMS, Telefax). Ebenso muss das System skalierbar sein, um auch für heute noch nicht absehbare, künftig aber gewünschte Zusatzkomponenten erweiterbar zu bleiben (z.B. Schnittstelle zu künftigen Hochwassersystemen benachbarter Staaten (Schweiz) oder für ein Druckwasserflächenmodell). Es gilt deshalb, eine verteilte Systemarchitektur zu entwickeln, welche die Integration heterogener Endgeräte (insbesondere für Local Based Services (LBS)) erlaubt. Zu den Servicediensten für Umweltdaten müssen Schnittstellen entwickelt bzw. implementiert und mit den Vorhersagemodellen gekoppelt werden. Für räumliche Analysen muss ein leistungsstarkes Web-GIS realisiert werden, welches dynamisch Vorhersagekarten auf Grundlage des Umweltdateninputs generiert. Das GIS übernimmt dabei auch die Verwaltung räumlicher Daten und ihrer zeitlichen Veränderungsentwicklung (3D/4D GIS). Ebenso hat das GIS die Aufgabe individuelle Routenplanungen unter Berücksichtigung der aktuellen und vorhergesagten Hochwassersituation zu erstellen.

Die erfassten und analysierten Daten müssen im IHI so aufbereitet werden, dass sie für den Benutzer leicht verständlich sind (benutzerangepasstes System). Hierzu sind optisch ansprechende, leicht bedienbare Benutzerschnittstellen für PC und mobile Systeme zu entwickeln. Ferner sind die Benutzerschnittstellen auf die Bedürfnisse der jeweiligen Benutzergruppen anzupassen (z.B. unterschiedliche Graphical User Interfaces (GUI) für Behörden und Bürger).

VIII.2. Offene Forschungsfragen

VIII.2.1. Interpretation von hochwasserbedingten Vegetationsveränderungen im Luftbild

Die Nutzung von Vegetationsveränderungen als Indikoator für die Verbreitung von Inundationsflächen erwies sich als eine der wichtigsten Methoden zur Bestimmung des räumlichen Ausmaßes von Hochwasserereignissen. Der entscheidende Vorteil dieser Methode besteht darin, dass Vegetationsänderungen oftmals auch Monate nach einem Hochwasserereignis sichtbar bleiben und in Luftbildern erfasst werden können. Da in der Vergangenheit nur selten gezielt Befliegungen von Hochwasserereignissen durchgeführt wurden, ist es sehr unwahrscheinlich, bei der Recherche auf Fernerkundungsdaten zu stoßen, die tatsächlich während einer Überschwemmung erstellt wurden. Luftbilder, welche (zumeist zufällig und nicht etwa gezielt) Vegetationsveränderungen infolge von Hochwassereinwirkung erfassen, dürften hingegen für die letzten Jahrzehnte für jedes größere Hochwasserereignis eines Flussgebietes auffindbar sein. Es gilt nun diese wertvollen Informationen richtig zu interpretieren. In zwei Bereichen besteht hierzu noch dringender Forschungsbedarf:

Zum einen ist es für eine spätere Interpretation notwendig, die Reaktion der verschiedenen Pflanzenarten und –formationen bei Hochwassereinwirkung zu kennen. Eine zusammenfassende Arbeit, welche für jede relevante Pflanzenart in Text und Bild das optische Erscheinungsbild vor und nach der Überschwemmung dokumentiert, wäre für die Praxis der Luftbildinterpretation von großem Wert. Neben den einzelnen Pflanzenarten und der Länge der Überschwemmung ist hierbei auch die Jahreszeit, zu der sich das Hochwasser ereignet, mit zu berücksichtigen. Ebenso konnte während der Geländearbeiten nach dem Rückzug des Wassers und dem Absterben der Primärpflanzen eine Neubesiedlung dieser Flächen durch andere Pflanzen (in einer regelrechte Sukzessionsfolge) beobachtet werden.

Zum anderen wäre eine vergleichende Arbeit hilfreich, welche die Abbildung dieser Vegetationsänderungen in den verschiedenen Fernerkundungssensoren systematisch erfasst und beispielhaft beschreibt. Das Ergebnis dieser Betrachtung könnten beispielsweise Schautafeln sein, in denen ein und dieselbe Fläche (z.B. eine durch Hochwasser geschädigte Ackerfläche) in einem panchromatischen SW Luftbild, in einem Infrarotluftbild, usw. dargestellt ist. Während sich Geschwemmselflinien und partiell abgestorbene Getreideflächen noch sehr einfach im Luftbild erkennen lassen, setzt die richtige Interpretation anderer Pflanzenflächen entweder zeitgleiche Bodenuntersuchungen (wie im Rahmen dieser Arbeit geschehen) oder aber systematische Voruntersuchungen und „Schulungsmaterialien“ (wie soeben skizziert) voraus.

Für eine derartige Untersuchung ist die Fachkenntnis von Hydrogeographen, Luftbildinterpreten und Botanikern gleichermaßen notwendig.

VIII.2.2. Erfassung der druckwasserbedingten Schäden in der Aue

In der vorliegenden Arbeit wurde mehrfach beispielhaft auf Schäden durch Druckwasser an in der Altaue befindlichen Gebäuden hingewiesen. Eine systematische Erfassung und Bezifferung derartiger Schäden liegt bis heute nicht vor. Eine Untersuchung, welche zum einen die von Druckwasseraustritten betroffenen Flächen, die durch sie hervorgerufenen Schäden sowie die Reaktionen und Handlungsmaßnahmen der betroffenen Akteure näher beleuchtet, wäre für die Entwicklung nachhaltiger planerischer und politischer Konzepte bezüglich der künftigen Raumnutzung in der Altaue von großem Wert.

VIII.2.3. Inundationsflächenmodellierung und Erhebung empirischer Inundationsflächendaten für andere Flussgebiete

Anhand der empirischen Geländearbeiten konnte für das Untersuchungsgebiet eine komplexe und nicht trivial beschreibbare Inundationsdynamik nachgewiesen werden. Die beobachteten Überschwemmungsflächen ließen sich nur bedingt in einem DGHM basierten Modellansatz simulieren. Dies wirft grundsätzlich die Frage auf, in wie weit die bisher und gegenwärtig entwickelten Inundationsflächenmodelle überhaupt realitätsnahe Ergebnisse liefern. Aufgrund des bis heute bestehenden Mangels an verlässlichen Inundationsflächendaten ist davon auszugehen, dass oftmals höchstens partiell empirische Inundationsdaten zur Modellkalibrierung vorlagen. Ein bis zwei Hochwasserkartierungen oder gar nur punktuell vorliegende Hochwassermarken reichen nach den im Untersuchungsgebiet gewonnenen Erfahrungen nicht aus, um ein Inundationsflächenmodell für ein größeres Auengebiet zu kalibrieren. Durch die Medienpräsenz des Elbhochwassers im Sommer 2002 ist gegenwärtig ein verstärktes Interesse für Hochwasserforschung zu verzeichnen. Beispielsweise ist nach eigener Beobachtung im Internet die Zahl der Homepages mit Vorschlägen für neue Forschungsprojekte, Hochwassermodelle und Krisenmanagementsysteme seit September 2002 erheblich angestiegen. Der hohen Anzahl an heute bereits bestehenden (bzw. geplanten) Hochwassermodellen steht eine erstaunlich geringe Anzahl von durch Feldforschung und empirische Datengewinnung gekennzeichneten Hochwasserprojekten gegenüber.

Die vorliegende Arbeit hat jedoch deutlich gezeigt, dass durch die Auswertung historischer Karten und Luftbilder eine Vielzahl von inundationsrelevanten Informationen bis hin zu empirischen Überschwemmungsflächenkarten gewonnen werden können. Eine systematische Auswertung dieser Daten würde auch für andere Flussgebiete die meisten Fragen, zu deren Lösung die Modelle entwickelt wurden, empirisch fundiert beantworten. In den Fällen, in denen sich die Inundationsflächendynamik eines Flussgebietes auch durch die Recherche und Auswertung empirischer Daten erfassen lässt, ist dieser Weg der Informationsgewinnung einer Modellentwicklung vorzuziehen.

VIII.3. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete

Aufgrund der spezifischen hydrogeographischen und geologischen Ausstattung des Untersuchungsgebietes sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nur eingeschränkt auf andere Flussgebiete übertragbar. Dies gilt insbesondere für die Druckwasserflächen. Sie spielen nur in Flussabschnitten mit geringem Gefälle (im Untersuchungsgebiet liegt dieses bei etwa 0,03%) und einer weiten Flussniederung eine wesentliche Rolle. Ferner muss das Flusswasser mit dem Grundwasserkörper interagieren, was einen wasserdurchlässigen Untergrund voraussetzt (z.B. die pleistozänen Schotter und den holozänen Auenmergel am Oberrhein). Ähnliche naturräumliche Bedingungen wie im Untersuchungsgebiet liegen aber beispielsweise in einem Großteil der deutschen Elbaue vor.

Die am nördlichen Oberrhein erprobten Methoden zur Erfassung der Inundationsdynamik lassen sich ohne weiteres auf andere Untersuchungsgebiete übertragen. Die Rheinstromatlanten des Großherzogtums Baden liegen für ein Gebiet von Basel bis Mannheim vor und sind nach dem in dieser Arbeit durchgeführten Verfahren im GIS auswertbar. Hinsichtlich vermessungstechnischer Qualität und Detailgenauigkeit sind die Rheinstromatlanten zwar als ein frühes

Meisterwerk zu bezeichnen, doch spätestens für das späte neunzehnte Jahrhundert liegen auch für alle anderen Flussgebiete Deutschlands im GIS auswertbare historische Kartenwerke vor. Auswertbare Luftbilder liegen spätestens seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts für alle Gewässer vor; in Einzelfällen reichen die ältesten Aufnahmen sogar in die Zeit vor dem zweiten Weltkrieg zurück. Mittlerweile sind auch die von den Alliierten für Aufklärungszwecke geschossenen Luftbilder verfügbar. Da es sich bei den Zielen der Bombardierungen oftmals um an großen Flüssen gelegene Städte und Ballungszentren handelte, ist eine Auswertung dieses Luftbildmaterials vielversprechend. Beispielsweise müssten Aufklärungsluftbilder existieren, welche Aufschluss über die Überschwemmungen des Rheinhochwassers im November/Dezember 1944 geben. Methoden zur Auswertung von farbinfrarot und panchromatischen SW Luftbildern hinsichtlich des Ausmaßes von Inundationsflächen wurden aufgezeigt und erprobt und lassen sich ohne weiteres auf andere Flussgebiete anwenden. Dies gilt insbesondere für die Methode der Interpretation von Vegetationsveränderungen und Ernteschäden.

Die Vorgehensweise bei der Erstellung eines wasserstandsabhängigen Inundationsflächenmodells ist ebenfalls auf jegliche Art von Untersuchungsgebiet übertragbar. Die Entwicklung je eines deduktiven, DGHM basierten Modells für die Berechnung von direkten Inundationsflächen und eines induktiven Modells zur Prognose der Druckwasserflächen hat sich dabei bewährt.

IX. Zusammenfassung

Es besteht in zahlreichen, von der Hydrodynamik in Flussauen tangierten Forschungs- und Anwendungsbereichen (z.B. Raumplanung, Stechmückenbekämpfung, Renaturierungsprojekte, Hochwasserwarnung/ Katastrophenschutz) ein dringender Bedarf an empirisch fundierten Vorhersagen und Prognosen von Inundationsflächen. Bisher existieren in Deutschland lediglich für kleinere Untersuchungsgebiete in Flussauen empirisch erhobene Inundationsflächendaten³⁸. Die Ursache hierfür liegt nicht etwa in mangelndem Interesse an derartigen Daten, sondern in den Schwierigkeiten, welche sich bei der Erfassung der hochdynamischen Hochwasserprozesse ergeben.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es

- praxistaugliche Methoden zur empirischen Erfassung von Überschwemmungsflächen zu entwickeln und in einem Untersuchungsgebiet zu erproben.
- die Inundationsdynamik eines Untersuchungsgebietes sowie die Genese der rezenten Inundationsflächen beispielhaft quantitativ zu erfassen und zu beschreiben. Hierzu wurden die im Gelände erhobenen und recherchierten Daten in einem GIS gesammelt und aufbereitet.
- anhand der gewonnenen Inundationsflächendaten für das Untersuchungsgebiet ein realistisches und praxistaugliches GIS-basiertes Modell zu entwickeln. Dieses sollte zum einen in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand das Ausmaß der zu erwartenden Inundationen bestimmen und zum anderen alle potenziell von Überschwemmungen betroffene Flächen (insbesondere Druckwasserflächen) identifizieren.

Als Untersuchungsgebiet wurde ein 20 km langer Abschnitt des Oberrheins zwischen Mannheim und Speyer gewählt. Das Gebiet schließt die Auebereiche entlang des Flusses bis hin zum Hochgestade ein und hat eine Gesamtfläche von rund 100km². Der Rhein weist hier ein geringes Gefälle auf (0,03%). Im Naturzustand besaß der Strom deshalb ein weit mäandrierendes, sich beständig durch Seitenerosion und hochwasserbedingte progressive Sprünge veränderndes Hauptgerinne. Dieses wurde von allmählich verlandeten Altarmen und Sichelseen flankiert. Seit dem 19. Jahrhundert ist das Untersuchungsgebiet stark anthropogen überformt worden. Die Tulla'sche Oberrheinkorrektion erreichte das Gebiet im Jahre 1826; und Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts erfolgte der Ausbau einer Niedrigwasserfahrinne. Durch die Eingriffe veränderte sich die Hydrodynamik des Untersuchungsgebietes schwerwiegend und zerstörte die mittelalterliche Kulturlandschaft. Weite Teile der Aue wurden durch den Rheinhauptdamm vom Hauptstrom getrennt. Die nach der Begradigung einsetzende Tiefenerosion des Hauptgerinnes hatte ein Absinken des Grundwasserspiegels zur Folge. Auwald und extensive Weideflächen wurden intensiviert und oftmals als Ackerland genutzt. Die Intensivierung der Landnutzung in den Auen des Untersuchungsgebietes seit dem neunzehnten Jahrhundert vollzog sich grob in zwei Phasen und ließ sich durch den Vergleich historischer Karten mit aktuellen Luftbildern im GIS quantifizieren: Etwa ¼ des 1856 noch vorhandenen Auwaldes wurde bis 1875 gerodet. Der größte Teil dieser Rodungsflächen (3/4) wurde in Ackerflächen umgewandelt. Ebenso wurden 10% der 1856 noch extensiv als Grünland genutzten Flächen bis 1875 in Ackerland überführt. Bereits von 1856 bis 1875 nahm der Anteil der offenen Sand- und Kiesbänke des Rheingerinnes um 74% (!) ab, was als ein deutlicher Hinweis auf das Ende der natürlichen Erosions- und Sedimentationsprozesse im Gerinnebett zu interpretieren ist. Bis 1999 waren

³⁸ Diese Daten wurden zumeist im Rahmen der Voruntersuchung potenzieller Rückhalteräume erhoben

offene Kiesbänke faktisch gänzlich verschwunden. Vor allem seit der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts entstanden dann als zweite Phase der Nutzungsintensivierung Gewerbeflächen, Militäranlagen, Freizeitanlagen und sogar Wohngebiete in den ehemaligen Rheinauen. Dabei ist bemerkenswert, dass die bis 1999 am stärksten anthropogen überformten Flächen zu 70% im Jahre 1856 noch zu den am stärksten durchfeuchteten und extensiv genutzten Flächen gehörten. Dies liegt vor allem am Kiesabbau, der große Teile dieser Flächen vollständig ausgeräumt hat. Bemerkenswert ist, dass sich 40% aller durch Bebauung versiegelten Flächen des Untersuchungsgebietes auf 1856 noch durchfeuchteten Standorten und nicht etwa auf den höher gelegenen Ackerflächen befinden. Diese Entwicklung ist aus heutiger Sicht eine eindeutige Fehlentwicklung gewesen, da diese Standorte zum einen derzeit starke Druckwasserprobleme aufweisen und zum anderen zu den am stärksten von einem Dambruch bedrohten Flächen zählen. Anfang der 1970er Jahre wurde bereits von der IRK nachgewiesen, dass durch den Staustufenbau die Hochwassergefahr wieder dramatisch angestiegen war. Während noch an der Staustufe Iffezheim gebaut wurde, begann die Fachdiskussion, wie dieser Schutz wieder herzustellen sei. Auf internationaler Ebene wurden Verträge zum Bau von Retentionsflächen beschlossen. Die Umsetzung dieses Programms dauert bis heute an. In den 1980er Jahren gewannen Naturschutz bzw. Renaturierung an politischem Gewicht, weshalb das Land Baden-Württemberg 1988 im Integrierten Rheinprogramm die Auenrenaturierung als gleichwertiges Ziel neben die Wiederherstellung des Hochwasserschutzes stellte. Im Untersuchungsgebiet werden derzeit die Kollerinsel, die Schwetzingen Wiesen und die Insel Flozgrün zu Retentionsflächen umgebaut und renaturiert.

Von 1997 bis 2001 wurden die Überschwemmungen der in diesem Zeitraum im Untersuchungsgebiet abgelaufenen Hochwasserereignisse erfasst und kartiert. Hinsichtlich Anzahl und Ausmaß der Hochwasserereignisse erwies sich dieser Beobachtungszeitraum als günstig. Bereits seit Ende der 1970er Jahre hat die Anzahl der Hochwassertage pro Jahr im Untersuchungsgebiet ganz erheblich zugenommen (Abb. 21.) und sich bis 2001 fortgesetzt. Insofern waren die zahlreichen kleineren Hochwasserereignisse und das Jahrhunderthochwasser an Pfingsten 1999 lediglich der bisherige Höhepunkt einer seit Jahrzehnten anhaltenden Hochwasserphase. Mit einem Abfluss von $4540\text{m}^3/\text{s}$ wurde am Pegel Maxau der höchste Abflusswert seit Beginn der Messreihe im Jahr 1889 erreicht. Das Ausmaß der Überschwemmungen wurde durch Kartierungen im Gelände und durch Fernerkundungsmethoden bestimmt. Neben über das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg bezogenen aktuellen Luftbildern wurden in insgesamt elf Befliegungen selbst Luftbilder zur Erfassung des räumlichen und zeitlichen Wandels der Überschwemmungsflächen erhoben. Die Auswertung des Luftbildmaterials konnte dank eines DAAD Stipendiums im CESAR Lab der San Diego State University (USA) durchgeführt werden. Neben aktuellen Luftbildern aus den Jahren 1997 bis 1999 wurden auch Luftbilder aus den 1970er und 1980er Jahren, welche während oder kurz nach einem Hochwasserereignis entstanden, ausgewertet. Da die Befliegungen im Hochwasserjahr 1999 von intensiven Vergleichsuntersuchungen am Boden flankiert wurden, war es möglich, die Korrelation zwischen Überschwemmungen und den auch Monate nach dem Rückzug des Wassers noch sichtbaren Vegetationsveränderungen sowie die Wiedergabe dieser Vegetationsveränderungen im Luftbild zu untersuchen. Mittels dieser erstmals erprobte Methode konnte das maximale Ausmaß von Inundationsflächen auch in erst mehrere Monate nach einem Hochwasser erstellten panchromatischen SW Bildern identifiziert werden.

Die quantitativen Ergebnisse der Geländekartierungen und Luftbildauswertungen wurden in Form von Inundationsflächenkarten ins GIS implementiert (siehe auch Abb. 49. bis Abb. 55.; Maximum der Inundationen des Pfingsthochwassers 1999 siehe Abb. 61.). Die Kartierungen zeigten, dass die am häufigsten, d.h. bereits bei Wasserständen von unter 2m ü. MW. überschwemmten Flächen nur einen verschwindend geringen Flächenanteil von 0,03% an der Gesamtfläche der rezenten Aue besitzen. Diese im langjährigen statistischen Mittel jährlich bzw. mehrmals jährlich gefluteten Flächen zählen zu den in auenökologischer Hinsicht besonders wertvollen Standorten von Schilf und Weichholzaue. Während des Maximums des Pfingsthochwassers war die gesamte rezenten Aue zwischen dem linksrheinischen und rechtsrheinischen Damm vollständig überflutet. Aufgrund der außerordentlich lang anhaltenden hohen Wasserstände (siehe Abb. 21.) traten in der Altaue auch hinter den Dämmen großflächige Überschwemmungen durch aus dem Untergrund aufquellendes Wasser auf (siehe Abb. 61.). Hierdurch wurden vor allem in Speyer Industrie- und Gewerbeflächen überschwemmt. Aber auch im nördlichen Untersuchungsgebiet waren Klagen über Gebäudeschäden zu hören; in verschiedenen Dauercampinganlagen kam es zu erheblichen Schäden. Die Kollerinsel wurde trotz Damm durch aufquellendes Wasser zu 58% überschwemmt und die dortige Ernte fast vollständig vernichtet.

Die im Untersuchungsgebiet beobachteten Inundationsflächen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- In *Direkte Überschwemmungsflächen*, welche durch das Ausuferndes Rheins entstehen und flächenmäßig den größten Anteil der Inundationen in der Rezenten Aue ausmachen.
- In *Sickerwassersammelflächen*, welche durch in den Untergrund infiltriertes und hinter dem Damm an die Oberfläche austretendes Flusswasser entstehen. Dieses oberflächennah unter dem Damm hindurchgesickerte Wasser tritt flächig aus und sammelt sich, oberflächlich abfließend, in der morphologisch nächst gelegenen Senke oder wird durch Entwässerungsgräben abgeführt.
- In *Druckwasserflächen*, in welchen infolge eines hochwasserbedingten Grundwasserrückstaus auch in weit vom Rheinhauptdamm entfernten Senken Wasser aus dem Untergrund aufquillt.

Eine genaue Unterscheidung zwischen *Sickerwassersammelflächen* und *Druckwasserflächen* ist in Dammnähe oftmals nicht möglich, da sich auch beide Effekte überlagern können. In bisherigen Untersuchungen wurden sie auch nicht voneinander unterschieden sondern grundsätzlich als „Druckwasser“ oder „Qualmwasser“ bezeichnet. Aufgrund unterschiedlicher Entstehungsursachen und unterschiedlicher Inundationsdynamik ist eine solche Unterscheidung aber sinnvoll.

Eine differenzierte Betrachtung der Unterschiede der Inundationsflächentypen erfolgte von 1999 bis 2001. Im Untersuchungsgebiet wurden in verschiedenen Druckwasserflächen Wasserstandsmessungen, Bodensondierungen und Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt. Von entscheidendem Einfluss auf die Inundationsdynamik erwies sich die Beschaffenheit des unmittelbaren Untergrunds der Senken. Während in den rheinnahen Druckwasserflächen das Wasserstandsmaximum in der Regel drei Tage nach dem Gipfel des Rheinhochwassers erreicht wurde, drang Wasser in Flächen mit einem durch wasserundurchlässige Sedimente abgedichteten Untergrund erst mit starker Verzögerung ein. Ebenso erreichte der Wasserstand sein Maximum in diesen Flächen erst Tage bis Wochen nach der Hochwasserspitze des Rheins. Einmal eingedrungenes Wasser versickerte allerdings kaum mehr, sondern verblieb dort bis September 1999. Bei diesen Senken handelte es sich zumeist um allmählich verlandete Hochwasserrinnen und Schluten

mit tonigen, oftmals pseudogleyhorizonte aufweisenden Böden. Die drei Grundtypen der Inundationsflächen wurden deshalb wiederum in Flächen mit und ohne wasserhemmende Sedimente im Untergrund unterteilt, so dass sich insgesamt sechs Haupttypen von Überschwemmungsflächen ergeben. Jeder dieser Typen weist ein charakteristisches Inundationsverhalten auf. Die Inundationsflächen des Untersuchungsgebietes wurden aufgrund der Untersuchungsergebnisse diesen Typen zugeordnet. Da sich mit ändernden Wasserständen auch die Inundationsdynamik einer Fläche ändern kann, musste auch der jeweilige Flusswasserstand mit berücksichtigt werden. Eine Fläche, welche bei niedrigen Rheinwasserständen ein typisches *Druckwasserverhalten* an den Tag legt, kann beispielsweise bei einem weiteren Ansteigen des Rheins direkt überschwemmt und damit zur *Direkten Inundationsfläche* werden. Deshalb wurden auch die Rheinwasserstände für welche sich eine Inundationsfläche einem bestimmten Haupttyp zuordnen lässt erfasst und in Kartenform (bzw. im GIS) dargestellt (Inundationsflächentypenkarte; siehe Abb. 151.).

Auf Grundlage der Druckwasserflächenuntersuchungen im Gelände wurden schematische Modelle erstellt, welche grundsätzlich die Interaktion zwischen Flusswasser und Grundwasser sowie die Folgen für die Inundationsflächenentstehung beschreiben (siehe Abb. 89. bis Abb. 103).

Durch die empirischen Datenerhebungen war es bereits gelungen, die meisten Fragen bezüglich der Inundationsdynamik des Untersuchungsgebietes qualitativ und quantitativ zu beantworten. Offen blieb lediglich noch die Frage welche Flächen in der morphologischen Aue potenziell druckwassergefährdet sind. Antwort darauf gab die GIS gestützte Auswertung historischer Karten des Untersuchungsgebietes. Die Arbeitshypothese zu dieser Auswertung lautete, dass zur Zeit der Entstehung der Rheinstromatlanten im Jahre 1856 eine Fläche in der Rheinniederung lediglich bei zu starker Bodenvernässung extensiv genutzt wurde. Das aus den historischen Karten ablesbare räumliche Muster der Flächennutzung spiegelt demnach den Grad der Bodenvernässung bzw. die Gefahr von Druckwasseraustritten wider. Ein Vergleich zwischen den 1856 extensiv genutzten Flächen und den 1999 kartierten Inundationsflächen im GIS ergab, dass 85% aller rezenten Inundationen innerhalb der einstmals extensiv genutzten Flächen liegen. Diese Zahl bezieht sich allerdings auf die Gesamtheit aller beobachteten Inundationsflächen. Betrachtet man lediglich die in der Altaue, also hinter dem Damm aufgetretenen Inundationen, liegen nur noch 61% der rezenten Überschwemmungen in den extensiv genutzten Flächen von 1856. Hierbei sind allerdings zwei Faktoren zu beachten. Zum einen wurde 28% der ehemals extensiv genutzten Flächen überbaut oder im Zuge der Kiesgewinnung vollständig abgetragen. Inundationsflächen können hier folglich heute auch nicht mehr beobachtet werden. Zum anderen wird das Ergebnis durch die 1999 in Dammnähe sehr zahlreich und großflächig aufgetretenen Sickerwassersammelflächen verfälscht. Betrachtet man lediglich diejenigen Inundationsflächen, welche im Jahr 1999 weiter als 600m vom Damm entfernt lagen (mit Sicherheit also keine Sickerwassersammelflächen waren), dann ergibt sich eine Übereinstimmung von 89% zwischen den 1856 extensiv genutzten Flächen und den rezenten Druckwasseraustritten. Dieses Ergebnis zeigt eine deutliche Bestätigung der zu prüfenden Arbeitshypothese und legt den Schluss nahe, künftig diese Flächen von Bebauung frei zu halten.

Durch die Auswertung der Rheinstromatlanten konnte ferner die Genese der heutigen Inundationsflächen in der rezenten Aue geklärt werden. So zeigte der Vergleich rezenter Inundationsflächenkarten mit den historischen Karten im GIS beispielsweise, dass die heute am häufigsten gefluteten Aueflächen (Überflutung bei

Wasserständen bis 2,25cm ü.MW.) zu über 98% erst rund 150 Jahre alt sind und im Zuge der Oberrheinkorrektur in den verlassenen Teilen des Gerinnebettes des Stromes entstanden. Eine räumliche Identifizierung dieser Flächen ist für die biologische Stechmückenbekämpfung relevant, da sich hier die bevorzugten Eiablagehorizonte von *Aedes Vexans* befinden. Mit der Analyse historischer Karten ist somit eine Methode gefunden, einen Großteil dieser bevorzugten Stechmückenbrutplätze (im Untersuchungsgebiet 98%) lediglich auf der Basis einer GIS gestützten Karteninterpretation zu identifizieren.

Die Ergebnisse aus den Geländeuntersuchungen und der Auswertung historischer Karten wurden nun dazu verwendet, ein realistisches, GIS-gestütztes Modell der Inundationsflächenentstehung in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand zu erstellen. Für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes wurde ein räumlich hoch aufgelöstes digitales Geländehöhenmodell (DGHM) auf Basis der DGK5 und aktueller Luftbilder erstellt. Das Geländemodell wurde unter stark vereinfachenden Annahmen für die Simulation der bei verschiedenen Wasserständen zu erwartenden Überschwemmungen herangezogen (einfaches deduktives Inundationsflächenmodell). Die so im GIS simulierten Inundationen wurden mit den im Gelände tatsächlich aufgetretenen Überschwemmungsflächen verglichen. Dieser Abgleich ergab eine gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und beobachtetem Umriss und Flächeninhalt der Inundationsflächen. Allerdings lagen die Wasserstände, bei welchen die berechneten Überschwemmungsflächen tatsächlich auftreten, deutlich über den der jeweiligen Berechnung zugrundeliegenden Wasserständen. Bei Druckwasserflächen war der Fehler am ausgeprägtesten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für die Erstellung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Inundationsflächenmodells drei verschiedene Teilmodelle erarbeitet: Für jeden der Grundinundationsflächentypen (Direkte Inundationsflächen, Sickerwassersammelflächen, Druckwasserflächen) wurde ein eigenes Inundationsflächenmodell mit z.T. unterschiedlichem Modellansatz erstellt.

Die anhand der Modelle für das Untersuchungsgebiet berechneten Überschwemmungen sind in Abhängigkeit vom jeweils zugrunde liegenden Wasserstand in Abb. 139. bis Abb. 145. sowie Abb. 150. bis Abb. 152. dargestellt.

X. Anhang

X.1. Begriffsklärung

Hochwasser

Der Begriff „Hochwasser“ assoziiert allgemein die Vorstellung von bedrohlichen, katastrophalen Extremabflüssen, bei denen ein Fluss weit über seine Ufer tritt. Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Wasserstände des Rheins und die ihnen entsprechenden Inundationsflächen sind dagegen häufige Erscheinungen, die z.T. mehrmals im Jahr auftreten. Gemäß der Definition in DIN 4049, der deutschen hydrologischen Begriffsnorm, ist Hochwasser der „Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss einen bestimmten Wert (Schwellenwert) erreicht oder überschritten hat“³⁹. Für mikroskalige Überschwemmungsflächenkartierungen im Rahmen der biologischen Stechmückenbekämpfung sind bereits Überschwemmungen, die bei Wasserständen von wenigen Dezimetern über dem Mittelwasserstand (MW) auftreten, von Bedeutung. Folglich werden in dieser Arbeit alle Rheinwasserstände, die über dem langjährigen (30 jährigen) MW des Rheins liegen, als Hochwasser bezeichnet.

Auen

„Als Au (Aue, Auen) bezeichnet man räumlich jene Talzonen, die innerhalb des Einflussbereichs von Hochwassern liegen“, definiert GEPP (1985)⁴⁰. Durch anthropogene Verbauungen, in erster Linie durch Ausdeichungen, sind am Oberrhein weite Flächen aus der rezenten Überschwemmungsdynamik ausgeschieden. Zur Unterscheidung von den noch überflutbaren Flächen, der „Jungaue“ oder „rezenten Aue“, werden sie als „Altaue“ oder „morphologische Aue“ bezeichnet⁴¹. MÜHLINGHAUS (1991) schlägt darüber hinaus den Begriff der „heutigen potentiellen natürlichen Aue (hpnA)“ für die Teile der Gewässerniederung vor, „die nach (zunächst theoretischer) Beseitigung künstlicher Hindernisse im Einflussbereich des Hochwassers lägen, also das Gebiet, das aufgrund der morphologischen Gegebenheiten und gemessen an den gegenwärtigen Abflussverhältnissen vom Gewässer beeinflusst würde, wenn alle Regulierungs- und Schutzmaßnahmen entfielen“⁴².

Mikroskalige Inundationsflächenkartierungen

Unter „mikroskalige Inundationsflächenkartierungen“ wird in dieser Arbeit eine räumlich hochauflösende Kartierung von Überschwemmungsflächen verstanden. Derartige Karten enthalten auch Wasserflächen mit einer Ausdehnung von lediglich 1 bis 2m².

Direkte Überschwemmungsflächen, Druckwasser und Sickerwassersammelflächen

Während eines Hochwassers treten in der morphologischen Aue des Rheins verschiedene Überschwemmungstypen auf. Wenn Abfluss und Wasserstand des Flusses zunehmen, beginnt er, über die Ufer zu treten und die flussnahen Auebereiche zu überschwemmen. Diese Inundationsflächen werden in dieser Arbeit

³⁹ Normenausschuß Wasserwesen (NWA) (1994), Hydrologie Teil 3: DIN 4049-3

⁴⁰ Gepp in: Hentschel; Roth (1997), S.39

⁴¹ Hentschel; Roth (1997), S.39

⁴² Mühlinghaus in: Hentschel; Roth (1997), S.39

als *direkte Überschwemmungsflächen* bezeichnet. Direkte Überschwemmungsflächen treten (außer bei einem Dambruch) nur in der durch den Rheinhauptdamm begrenzten rezenten Aue auf. Da ein Hochwasserereignis in Flussnähe aber immer mit einem Anstieg des Grundwasserspiegels einhergeht, können vor allem bei lang anhaltenden erhöhten Wasserständen nicht nur in der rezenten Aue, sondern auch in der Altaue Überschwemmungsflächen entstehen. Das Wasser strömt in diesem Fall nicht oberflächlich in eine Geländesenke. Die Überschwemmungen entstehen vielmehr durch an die Oberfläche tretendes Grundwasser (bzw. Uferfiltrat). Am Rhein spricht man bei dieser Erscheinung von *Druckwasser*, an der Elbe von *Qualmwasser*. Als dritte Gruppe sind die *Sickerwassersammelflächen* zu nennen. Zumeist entstehen sie durch Uferfiltrat, das bei starken Hochwasserereignissen nur eine kurze Strecke im Untergrund zurück legt, bevor es am Dammfuß wieder austritt. Das Wasser tritt meist flächig aus und fließt oberflächlich in die nächstgelegene Geländesenke. Weitere Ausführungen und Beispiele zu dieser Thematik sind zentraler Gegenstand der vorliegenden Arbeit, weshalb an dieser Stelle keine weiteren Ausführungen erfolgen.

Rheinspezifische Begriffe aus dem morphologischen Formenkreis

In den Rheinbefahrungsprotokollen und historischen Karten werden teilweise heute nicht mehr gebräuchliche Bezeichnungen für den geomorphologischen bzw. fluvialen Formenschatz der Rheinauen verwendet. Diese überkommenen Bezeichnungen finden sich auf den aktuellen topographischen Karten häufig noch in Flurnamen und erlauben in einigen Fällen Rückschlüsse auf Veränderungen in der Hydrologie der Rheinauen⁴³. Im folgenden seien die gebräuchlichsten Begriffe kurz erläutert:

- Gießen:** Ein schmaler tiefer Rheinarm mit hohen Ufern und ohne Sand- oder Kiesbänke.
- Altrhein:** Eine seit dem 12. Jh. belegte Bezeichnung für die Reste alter, abgeschnittener oder verlandeter Flussschlingen.
- Eisbruch:** Ein flacher, leicht zufrierender Seitenarm, in dessen Eis Löcher gebrochen und die Fische in Netze getrieben wurden.
- Kehle:** Ein breiter Rheinarm mit Sandbänken.
- Hoher oder Voller Rhein:** Im Übergangsbereich zwischen Furkations- und Mäanderzone bestanden neben dem Hauptgerinne noch zahlreiche kleinere Wasserläufe und Gerinne. Zur Abgrenzung von diesen vor allem bei Hochwasser gefüllten Gerinnen wurde der Hauptstrom als "Voller Rhein" bezeichnet.
- Schlute:** Schlammige Altrheine, die nur bei Hochwasser Wasser führen.
- Seen:** Sind hier meist vom fließenden Wasser gänzlich abgeschnittene Reste früherer Altrheine.
- Lachen:** Kleine Wasserlöcher. Meist handelte es sich um Senken, die bei Hochwasser vom Rhein überflutet wurden und nach dem Rückgang der Überschwemmung leicht zu befischen waren.
- Wasser:** Diese Bezeichnung wird sowohl für stehendes wie für kleineres fließendes Wasser gebraucht.

⁴³ Musall (1969), S.52f

X.2. Ökologie, Brutplätze und Bekämpfung der Culicinaen am Oberrhein

X.2.1. Stechmückenarten am Oberrhein

Von den 46 in Deutschland nachgewiesenen Stechmückenarten (*Culicinae*) treten mindestens 33 Arten in den Oberrheingebieten auf. Die *Culicinae* werden in 6 Gattungen unterteilt: *Aedes*, *Culex*, *Culiseta*, *Anopheles*, *Mansonia* und *Uranotaenia*. Die einzelnen Arten unterscheiden sich z.T. erheblich in ihrer Ökologie und Biologie. Eine sinnvolle Bekämpfung der *Culiciden* muss auf ihre Brutstätten - den Inundationsflächen in der Flussaue - abzielen, da sie dort konzentriert vorliegen (BECKER 1984, S.62). Während die Identifizierung und Charakterisierung der Stechmückenbrutplätze unter biologischen Gesichtspunkten (nicht zuletzt aufgrund der langjährigen, die Stechmückenbekämpfung am Oberrhein flankierenden wissenschaftlichen Untersuchungen der KABS) weit vorangeschritten ist, hat die vorliegende Dissertation gezeigt, dass der Erfassung und Prognose der räumlich-zeitlichen Dynamik dieser Brutareale bisher von wissenschaftlicher Seite kaum Beachtung geschenkt wurde. Der Wert eines räumlich hoch aufgelösten Inundationsflächenmodells für die Praxis der Stechmückenbekämpfung ergibt sich bereits aus dem Studium des Reproduktionsverhalten der *Culiciden*. In folgenden soll deshalb abschließend kurz die Ökologie, die Brutstätten und die Bekämpfung der Stechmücken am Oberrhein vorgestellt werden (Siehe auch BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S.26/40):

X.2.1.1. Aedes- Arten oder Überschwemmungsmücken

Mit 25 Arten macht diese Gattung mehr als die Hälfte der einheimischen Stechmückenarten aus. Hinsichtlich ihres Brutgeländes und ihrer Entwicklungsbiologie lassen sich die *Aedes*-Arten unterteilen in:

X.2.1.1.1. Waldmücken

(z.B. *Aedes cantans*, *Ae. punctor*, *Ae. communis* und *Ae. rusticus*)

Als Brutareale dienen sumpfige Waldgebiete (z.B. Erlenbruchwälder), in denen nach der Schneeschmelze und nach starken Regenfällen im Frühjahr wassergefüllte Waldgräben und Waldtümpel als Brutplätze entstehen, wie z.B. im Bienwald, Bellheimer- und Haßlocher Wald sowie den rechtsrheinischen Hardtwäldern. Die Waldmücken verlieren mit ansteigender Temperatur ihre Schlüpfähigkeit und sind bereits bei den Hochwassern im Mai schon nicht mehr als Larven nachzuweisen (BECKER 1984; S.75).

X.2.1.1.2. Wiesen- und Auwaldmücken

(z.B. *Aedes vexans* (*Rheinschnaken*), *Ae. sticticus*)

Die häufigsten Arten in den Rheinauen sind *Aedes sticticus* und *Aedes vexans*. *Aedes vexans* zeichnet sich besonders bei Sommerhochwassern durch eine außerordentliche Massenentwicklung aus. Sie macht meist mehr als 80% der sommerlichen Stechmückenfauna aus. Im Oberrheingebiet werden die *Aedes vexans*-Mücken deshalb auch „Rheinschnaken“ genannt. Die Brutareale von *Aedes vexans* sind in der Regel temporäre Gewässer im Überschwemmungsbereich des Rheins, wie z.B. Flächen, die bei einem Hochwasser, direkt oder

durch Grundwasserrückstau, überschwemmt werden und nach zwei bis drei Wochen wieder trocken fallen. Ihre Fähigkeit zur Massenvermehrung sowie ein starker Wanderungstrieb - Wanderungen von mehreren Kilometern am Tag sind möglich - machen sie im Oberrheingebiet zum mit Abstand größten Plageerreger (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S. 41). Ursache der Wanderungen ist der große Populationsdruck, der aus der Neigung zu Massenentwicklung und dem Mangel an Wirten für eine Blutmalzeit in der Nähe der Brutstätten resultiert.

X.2.1.2. Culex- Arten

Die bekannteste *Culex*-Art, *Culex pipiens* oder auch "Hausmücke" genannt, lebt meist im Bereich menschlicher Siedlungen. Hausmücken wandern nur wenig und sind ausgesprochene Dämmerungs- und Nachttiere. Im Gegensatz zu den *Aedes*-Arten überwintern die begatteten Weibchen und beginnen erst im Frühjahr mit der Ablage der Eier auf die Wasseroberfläche. Als Brutstätte kommen alle stehenden oder langsam fließenden Wasseransammlungen in Frage, die länger als zwei Wochen bestehen (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S. 48f).

X.2.1.3. Weitere Gattungen

Den anderen vier Gattungen *Culiseta*, *Anopheles*, *Mansonia* und *Uranotaenia* kommt als Plageerreger keine besondere Bedeutung zu, teils aufgrund ihrer geringen Population, teils weil sie Menschen eher selten als Wirte aufsuchen.

Die *Anopheles*-Mücken sind der alleinige Überträger der menschlichen Malaria, weshalb sie auch Fieber- oder Malaria-Mücken heißen. Obwohl es in Deutschland sechs *Anopheles*-Arten gibt, sind autochthone Malariafälle seit Jahrzehnten in Deutschland nicht mehr bekannt. In der Vergangenheit sind in Deutschland besonders nach Kriegswirren immer wieder Malariaepidemien aufgetreten, z.B. dann, wenn zahlreiche infizierte Menschen aus Malariagebieten zurückgekehrt sind (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S. 27). Zur Gattung der *Uranotaenia* ist anzumerken, dass sie erstmals 1994 für Deutschland nachgewiesen wurde. Ihren Verbreitungsschwerpunkt haben diese Mücken im indo-afrikanischen bis mediterranen Raum. Offensichtlich haben die relativ milden Winter und heißen Sommermonate Anfang der neunziger Jahre die Ausbreitung dieser wärmeliebenden Arten begünstigt (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S. 27f).

X.2.2. Ökologie und Brutplätze der *Aedes vexans*

Wie bereits aus den obigen Ausführungen ersichtlich, ist der eigentliche Plageerreger am Oberrhein *Aedes vexans*. Das Hauptziel der Arbeiten der KABS besteht folglich in einer Reduzierung der *Aedes vexans* Population auf ein Maß, dass ein Auswandern der Stechmücken aus den Rheinauen verhindert. Aufgrund dieses Arbeitsschwerpunktes der KABS werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich die potentiellen Brutplätze der "Rheinschnaken" näher betrachtet. Durch ähnliche Habitatsansprüche und biologische Eigenheiten fallen die Brutplätze der Arten *Aedes sticticus* und *Aedes Rossicus* unwillkürlich mit in diese Untersuchung. Um Aussagen über die Eigenschaften von *Aedes vexans* Brutstätten treffen zu können, ist eine fundierte Kenntnis der Ökologie und insbesondere des

Reproduktionsverhaltens dieser Art notwendig. Die umfassendste Untersuchung der Stechmücken am Oberrhein gibt BECKER⁴⁴:

X.2.2.1. Die Eiablage

Die Weibchen der Auwaldmücken legen ihre Eier etwa 5 Tage nach der Blutmahlzeit, wobei ein einzelnes Weibchen über 100 Eier ablegen kann. Nach weiteren Blutmahlzeiten sind weitere Eiablagen möglich, ohne dass eine erneute Begattung vollzogen werden muss.

Im Gegensatz zu den "Hauschnaken", die als Eiablageorte offene Wasserflächen (z.B. Regentonnen) verwenden, legen die Aedini ihre Eier einzeln auf die feuchte Erde. In Uferbereichen wurden nicht selten mehr als 50.000 Aedes-Eier pro Quadratmeter nachgewiesen. Einerseits müssen die Brutstätten genügend Feuchtigkeit besitzen, um die Eier während der Embryonalentwicklung vor dem Austrocknen zu schützen. Andererseits muss bei einer späteren Überschwemmung eine ausreichend lange Wasserführung für eine Entwicklung bis zum Imago gewährleistet sein. Geeignete Stellen sind alle Plätze mit erhöhter Feuchtigkeit, z.B. in den Uferpartien von Gewässern oder in feuchten Senken.

X.2.2.2. Das Schlüpfen der Larven

Nach dem Durchlaufen des Embryonalstadiums innerhalb von etwa 8 Tagen ist die junge Larve theoretisch schlüpfähig. Allerdings ist eine Vielzahl von Umwelteinflüssen notwendig, um einen Schlüpfreiz auszulösen (Für eine eingehende Betrachtung siehe auch WEISER / GLOWITZ 1990; S.5 und BECKER 1984; S.196):

?? *Überschwemmung der Brutstätte*

Wichtigster Schlüpfimpuls, ohne den es kein Schlüpfen gibt, ist die Überflutung der Eier mit Wasser und der plötzliche Wechsel des Mediums von Luft zu Wasser. Die Brutstätten der *Aedes vexans* (sowie diejenigen von *Aedes sticticus* und *Aedes rossicus*) sind deshalb mit der Dynamik des sommerlichen Abflussregimes des Rheins eng verbunden. In Abhängigkeit von den Wasserstandsschwankungen des Flusssystemes treten Stechmückenplagen besonders in den Jahren auf, in denen durch mehrere sommerliche Hochwasserwellen starke Wasserstandsschwankungen in Verbindung mit hohen Temperaturen auftreten. Unter solchen Bedingungen entstehen in einem Sommer mehrere Stechmückengenerationen. In Jahren mit durchgehend niedrigen Wasserständen des Rheins (z.B. im Jahr 1976) ist die Vermehrung von *Aedes vexans* verschwindend gering. Die Horizonte mit der größten Eiablagedichte befinden sich zwischen 1.70 m und 1.80 m über Mittelwasserstand (im folgenden: „ü. MW“).

?? *Wassertemperatur*

Großen Einfluss auf das Schlüpfen hat die Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Flutung. Beispielsweise können bei einer Wassertemperatur von 10 Grad Celsius bereits größere Mengen von *Aedes vexans*-Embryonen aus ihren Eiern schlüpfen. Wie die Versuche von BECKER zeigten, ist der Einfluss der Temperatur auf das Schlüpfverhalten keineswegs trivial und muss in hohem Maße differenziert betrachtet werden (BECKER 1984; S. 225-230).

⁴⁴ Becker, N. (1984): Ökologie und Biologie der Culicinae in Südwest-Deutschland.

?? Jahreszeit/Lichtphase

Während Arten wie *Aedes cantans* bereits früh im Jahr mit ihrer Entwicklung beginnen, ist mit einem Schlüpfen von *Aedes vexans* erst mit den Hochwassern im Monat Mai zu rechnen. Die Rheinschnaken sind polyzyklisch, können als innerhalb eines Jahres mehrere Generationen erzeugen. Eine Brut ist von April bis September möglich. Die Länge der Tage beeinflusst die Schlüpftrate.

?? Sauerstoffgehalt

Ein zurückgehender Sauerstoffgehalt des Überflutungswassers signalisiert den Larven, dass das Wasser zum Stillstand gekommen ist und die Gefahr des Verdriftens nicht mehr gegeben ist. Außerdem treten Fische als gefährlichste Fressfeinde der Stechmückenlarven meist nicht mehr in den seichten Restgewässern auf.

?? Alter der Eier

Das Alter und der physiologische Zustand der Embryonen in den Eiern, der durch verschiedene Umwelteinflüsse, wie z.B. lange Trockenheit modifiziert wird, beeinflussen ebenfalls die Schlüpfquote.

?? Biotopcharakter der Brutstätte

Der Einfluss des Biotopcharakters der Brutstätte ist bei *Aedes vexans* gering. Diese Spezies ist sowohl in beschatteten Auwaldtümpeln und -gräben als auch in Wiesen und gelegentlich in Ackergelände in Massen vertreten (BECKER 1984; S.78). Typische Brutplätze von *Aedes vexans* sind deshalb so verschiedene Biotope wie feuchte Wiesen, Schilfgebiete, feuchte Ränder von Tümpeln oder häufig überschwemmte Pappelkulturen. Dagegen besitzt *Aedes sticticus* eine eindeutige Präferenz für beschattete Gewässer, ohne jedoch in offenem besonntem Gelände im Artenspektrum ganz zu fehlen. Der bevorzugte Eiablagehorizont wird also in erster Linie von der Bodenfeuchte und dem Deckungsgrad der jeweiligen Krautschicht bestimmt und nicht von einer Affinität zu bestimmten Pflanzenarten. Dennoch können die bevorzugten Ablagehorizonte den Röhrichten (*Phragmites* und *Phalaris*), den Großseggenriedern und den feuchten Hochstaudenbereichen (*Senecio*, *Urtica*) in der Weichholzaue zugeordnet werde. Ebenso beliebte Horizonte liegen in nassen bis feuchten Wiesen in Höhen bis ca. 180 m ü MW (WEISER / GLOWITZ 1990, S.5).

?? abiotische Bedingungen

In Gewässern mit hohem Verschmutzungsgrad kommen keine *Aedes*-Arten vor. Die von ihnen besiedelten Gewässer besitzen niedrige Ammonium- und Chloridwerte, sowie eine Leitfähigkeit von unter 1000 nS. Diese Voraussetzungen sind in den Inundationsgebieten des Rheins gegeben. Über den Einfluss der anthropogen erhöhten Chloridwerte infolge der Kaliproduktion am Oberrhein liegen keine Untersuchungen vor.

?? weitere Umwelteinflüsse

Umwelteinflüsse wie z.B. abwechselndes Trockenfallen und Überfluten, wechselnde Luftfeuchtigkeit und Temperaturschwankungen (Mikroklima) im Eiablagegebiet erhöhen bei *Aedes vexans* die Schlüpfbereitschaft.

?? Schlüpfen in Raten (istallment hatching)

Die von BECKER 1984 durchgeführten Versuche zeigen, dass selbst bei mehrmaligem Eintreffen der notwendigen Schlüpfvoraussetzungen nicht alle *Aedes*-Eier gleich reagieren (BECKER 1984; S.195). Nach jeder Überflutung schlüpft nur ein Teil der Larven, während ein anderer Teil trotz guter Bedingungen im Ei verbleibt. Dieses Schlüpfen in "Raten" resultiert aus der Heterogenität der abgelegten Eier. Jedes Ei hat seine eigene "Geschichte" in Bezug auf Alter und mikroklimatische Lagerungsbedingungen. Die *Aedes*-Arten sind dadurch an die Unsicherheiten der Wasserführung temporärer Gewässer bestens angepasst. Wenn die beim ersten Hochwasser geschlüpften Larven wegen einer zu raschen Austrocknung der Brutstätte nicht mehr das Imago-Stadium erreichen, verbleiben genügend Eier für spätere Hochwasser schlüpfähig. Es ist aber von Hochwasser zu Hochwasser mit abnehmenden Larvenmengen zu rechnen, sofern nicht eine neue Generation im fortgeschrittenen Sommer einen zweiten Vermehrungszyklus begonnen hat.

X.2.2.3. Von der Larve bis zum Fluginsekt

Die Entwicklung vom Ei bis zum Fluginsekt verläuft - ebenso wie bei allen anderen Stechmückenarten - über vier Larvenstadien und ein Puppenstadium. Die Entwicklung vom Schlüpfen aus dem Ei bis zum Fluginsekt ist temperaturabhängig und dauert bei hochsommerlichen Temperaturen in der Regel nur etwas mehr als eine Woche. Diese kurze Entwicklungszeit begünstigt die Entwicklung in den temporären, nur zeitweise wasserführenden Überschwemmungsgewässern (BBECKER / GLASER / MAGIN 1996; S.44).

X.2.3. Biologische Stechmückenbekämpfung am Oberrhein

X.2.3.1. Anfänge der Stechmückenbekämpfung

Einen anschaulichen Eindruck von der Situation in den Rheinauen während der Rheinbegradigung und vor dem Beginn der systematischen Stechmückenbekämpfung gibt J.W. Goethe in „Dichtung und Wahrheit“ (GOETHE 1833, S.117)⁴⁵:
"...und (wir) hätten uns hier, in den traulichen Fischerhütten, vielleicht mehr als billig angesiedelt, hätten uns nicht die entsetzlichen Rheinschnaken nach einigen Stunden wieder weggetrieben. Über diese unerträgliche Störung einer der schönsten Lustpartien(...) brach ich wirklich,(...), in Gegenwart des guten geistlichen Vaters, in gotteslästerlichen Reden aus und versicherte, dass diese Schnaken allein mich von dem Gedanken abbringen könnten, als habe ein guter und weiser Gott die Welt erschaffen."

(Siehe hierzu auch Abb.A.1.). Vor dem Ende des 19. Jh. waren aufgrund des geringen Wissens über die Ökologie der Stechmücken Maßnahmen zur Eindämmung der sommerlichen Massenvermehrung von *Aedes vexans* nicht möglich. Seit Anfang dieses Jahrhunderts und vor allem seit den 30er Jahren sind Aktivitäten einer „Vereinigung zur Bekämpfung der Stechmücken- und Schnakenplage“ für den Oberrhein bekannt. Bis in die 50er Jahre bestanden Polizeiverordnungen, mit denen den Bürgern die Durchführung von Bekämpfungsmaßnahmen gegen die Stechmücken unter Androhung von Strafen auferlegt waren (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S.14f).

⁴⁵ Goethe, J.W. (1833): Aus meinem Leben. Dichtung und Wahrheit. S.117

Die heutige Stechmückenbekämpfung geht auf das Jahr 1976 zurück. 20 Körperschaften - Städte, Gemeinden, Landkreise - längs des Rheins zwischen Karlsruhe und Ludwigshafen gründeten die „Kommunale Aktionsgemeinschaft zur Bekämpfung der Schnakenplage“ (KABS). Bis zum Jahr 1984 erhöhte sich die Mitgliederzahl auf 45; bis 1996 stieg die Zahl der Vollmitglieder auf 92. Das heutige Arbeitsgebiet der KABS erstreckt sich mit einigen Lücken vom Ortenaukreis bis in den Landkreis Mainz-Bingen.

X.2.3.2. Methoden der Stechmückenbekämpfung

Anfang dieses Jahrhunderts bestanden die Bekämpfungsmethoden in der Pflege der natürlichen Fressfeinde der Stechmücken und dem Ausbringen von „Schnakensaprol“, einem Erdöldestillat, das auf die Wasseroberfläche aufgebracht wurde (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S.13). In den ersten Jahren der KABS wurde aus Mangel an Alternativen Liparol eingesetzt. Liparol war ein an der Universität Heidelberg von Prof. Dr. SCHNETTER und Dr. ENGELER-FRITZ entwickeltes Gemisch aus Sojalezithin und dünnflüssigem Parafinöl. Bei einer Aufwandmenge von 4-8 l/ha erzeugte es einen dünnen Oberflächenfilm auf den Brutgewässern, die in weniger als einer Stunde die Stechmückenpuppen und einen Teil der Stechmückenlarven zum Ersticken brachte. Es starben jedoch als unerwünschter Nebeneffekt auch diejenigen Wasserinsekten, die an der Wasseroberfläche atmen oder leben. Weitere Nachteile der Liparol-Methode waren ein hoher Arbeitsaufwand unter starkem Zeitdruck - Stechmücken durchlaufen das Puppenstadium in etwa zwei bis vier Tagen - und relativ hohe Bekämpfungskosten. In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Universität Heidelberg wurden Anstrengungen unternommen, effektive biologische Bekämpfungsverfahren zu entwickeln. Mit der Entdeckung der entomopathogenen Bakterien, wie *Bacillus thuringensis israelensis* (*B.t.i.*) und *Bacillus sphaericus* (*B. sphaericus*), die für Stechmücken hochtoxische Endotoxine produzieren, wurde der Grundstein für die biologische Stechmückenbekämpfung in Deutschland gelegt (BECKER / GLASER / MAGIN 1996; S. 62f. Ihr Vorteil liegt in der selektiven Wirkung: Nur bei vielfacher Überdosierung können andere Mückenarten getroffen werden (z.B. die Zuckmücke). Die seit den 80er Jahren bis heute gültigen Methoden der Stechmückenbekämpfung der KABS sind:

1. Mikrobiologische und biologische Methoden:

- ?? Einsatz von *B.t.i.* und *B. sphaericus*
- ?? Schutz und Förderung der Fressfeinde

2. Wasserbauliche Maßnahmen:

- ?? Schaffung von ökologisch wertvollen Fließgewässern als Lebensraum für Fressfeinde;
- ?? Optimierung des Grabensystems, um den wichtigsten Fressfeinden - den Fischen - das Ein- und Auswandern zu ermöglichen.

Für eine Erläuterung des spezifischen Wirkungsmechanismus von *B.t.i.* und *B. sphaericus* sei auf GOLDBERG / MARGALIT 1977; S.355ff und SCHNETTER / ENGELER / MORAWCISK / BECKER 1981; S. 195ff verwiesen. Da die Präparate aber nur während des Larvenstadiums der Stechmücken ihre Wirkung entfalten, muss bei sommerlichen Hochwassern eine Behandlung sämtlicher *Aedes vexans*-Brutstätten der Mitgliedskommunen der KABS am Oberrhein innerhalb von (je nach Wassertemperatur) 6 bis 10 Tagen erfolgen. Das Applizieren der *B.t.i.* Präparate ist in den Abbildungen A.2. bis A.4. dargestellt. Der erfolgreiche Einsatz der

mikrobiologischen Methoden ist angesichts dieses Zeitdrucks davon abhängig, ob die Inundationsdynamik der Überschwemmungsflächen auf der Gemarkung der Mitgliedskommunen in hinreichendem Maße bekannt ist. Je genauer das Ausmaß der zu erwartenden Überschwemmungsflächen abgeschätzt werden kann, desto gezielter kann der Einsatz von B.t.i. Präparaten geplant werden und umso geringer sind die Bekämpfungskosten und das Risiko, dass andere Mückenarten von der Bekämpfung in Mitleidenschaft gezogen werden.

XI. Literatur

X.1. Nachweis der zitierten Monographien und Zeitschriften

- ANONYMUS (o.J.): Bestehende Kartierungen am Hoch- und Oberrhein. IRP. Biotopkartierung. Kartierung nach § 24a. NatSchG. Waldbiotopkartierung. – unveröffentlicht.
- ANONYMUS (o.J.): Karten mit eingezeichneten Beschreibungen von Wäldern und Vegetation. – unveröffentlicht.
- ANDRÉ, F. (1828): Bemerkungen über die Rektifikation des Oberrheins und Schilderung der furchtbaren Folgen, welche dieses Unternehmen für die Bewohner des Mittel- und Unterrheins nach sich ziehen wird. Hanau.
- ARBEITSGRUPPE „INTEGRIERTES RHEINPROGRAMM“ (1990): Integriertes Rheinprogramm: Aufgaben und Umsetzung. Arbeitsgruppe bei den Regierungspräsidien Karlsruhe und Freiburg, Land Baden-Württemberg.
- ARMBRUSTER, J. / STEIDLE, H. (1989): Hochwasserschutz am Oberrhein am Beispiel Kulturwehr Kehl/Straßburg und Polder Altenheim. In: Wasserwirtschaft 79, H.6, S.281-288.
- BACH, E.; GEBHARDT, A. (1997): Über den Wolken - Hochwasserbeobachtung via Satellit. In: IMMENDORF, R. [Hrsg.]: Hochwasser: Natur im Überfluß? S. 191-210. Heidelberg.
- BACKES, M. (1984): Die Vegetation ehemaliger Tongruben und die Wiederbesiedelung neu geschaffener Wasserbausenken in den Rheinauen zwischen Mannheim und Philippsburg. Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 96 S. und Karten.
- BANGERT, V. (1958): Über Rheinarme und Grundwasserverhältnisse südlich des Kaiserstuhls. Ber. Naturf. Ges. Freiburg, 48.
- BANGERT, V. (1975): Über die Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit im Oberrheingraben zwischen Speyer und Worms. In: Wasser und Boden, No. 27, S.199-204.
- BÁRDOSSY, A.; CASPARY, H.J. (1990): Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. Theoretical and Applied Climatology, Bd. 42. Heidelberg.
- BÁRDOSSY, A.; CASPARY, H.J. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? In: Wasser und Boden 47, H. 3. S.18-24.
- BAUER, F.W. (1951): Die Überführung der badischen Auewaldungen in Hochwald. Im Verlag der Landesforstverwaltung Freiburg i. Br.

- BECK,W. (o.J.): Erläuterungen zum Topographischen Atlas 1:50 000 von Baden. Stuttgart
- BECKER, N. (1984): Ökologie und Biologie der Culicinae in Südwest-Deutschland. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- BECKER, N. / GLASER, P. / MAGIN, H. (1990): Biologische Stechmückenbekämpfung am Oberrhein. Waldsee.
- BECKER, N. / MARGALIT, J. (1993): Use of *Bacillus thuringensis israelensis* against Mosquitoes and Blackflies. In: ENTWISTLE, P.F. / CORY, J.S. / BAILEY, M.J. / HIGGS, S. (Hrsg.): *Bacillus Thuringensis, an environmental Biopesticide: Theory and Practice*. S. 147-168.
- BECKER-MARX, K. & FRICKE, W. (Hrsg.) (1981): Stand der grenzüberschreitenden Raumordnung am Oberrhein. Bericht zum Kolloquium am 24.6.1980. In: Heidelberg Geographische Arbeiten Nr.71.
- BERNHARDT, C. (1998): Zeitgenössische Kontroversen über die Umweltfolgen der Oberrheinkorrektur im 19. Jahrhundert, in: Zeitschrift für die Geschichte des Oberrheines, 146. Bd.
- BERNHARDT, C. (2000): Die Rheinkorrektur. Die Umgestaltung einer Naturlandschaft im Übergang zum Industriezeitalter. in: Der Rhein. Der Bürger im Staat. 50. Jahrgang, Heft 2. Hrsg: Landeszentrale für politische Bildung Baden- Württemberg. Stuttgart.
- BFANL BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSÖKOLOGIE (1988): Wasserpflanzenkartierung. Stand vom 07.09, 15.09 und 16.09.1987. – unveröffentlicht.
- BFG BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE KOBLENZ (1997): Struktur und Biotopkartierung am rechten Rheinufer zwischen Karlsruhe und Mannheim (Rhein-km 352,07 bis 437,00). Erläuterungsbericht. Bestandserhebung der Biotoptypen 1996/1997 km 532,07 – km 353,9. Vegetationskundlicher Einschätzungsplan 1996/1997 km 351,9 – km 437. – unveröffentlicht.
- BFG BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE KOBLENZ (2000): GIS-gestützte hydrologische Kartenwerke in Mitteleuropa, Mitteilungen Nr. 21, Koblenz 2000.
- BOEGNER, G. (1985): Der alte Rhein – Im Badisch-Pfälzischen Stromverlauf. Speyer.
- BÜRO BOLENDER (1999): Bestandsuntersuchungen von *Trpa natans* in der baden-württembergischen Oberrheinebene und chemische Untersuchungen an ihren ehemaligen und ihren rezenten Siedlungsgewässern. – Im Auftrag von: Landesanstalt für Umweltschutz Baden- Württemberg, unveröffentlicht.

- BÜRO BOLENDER (1999b): Projektbeschreibung zur Ansiedlung der Wassernuß in den Gewässern der Oberrheinebene. Vorläufige Endfassung. – Im Auftrag von: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, unveröffentlicht.
- BRIEM, E. (1993): Haupt-Fließgewässerlandschaften und geologische Grundtypen in Baden-Württemberg. In: FORSCHUNGSGRUPPE FLIEßGEWÄSSER (Hrsg.): Fließgewässertypologie. S.47-56. Landsberg.
- BRONSTERT, A. [Hrsg.](1996): Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen. PIK Report, 17.
- BRONSTERT, A. (Hrsg.) (1996): Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen. In: PIK Report Nr.17.
- BRONSTERT, A. (1997): Klimaänderungen und Hochwasser - Zusammenhänge und Auswirkungen. In: IMMENDORF, R. [Hrsg.]: Hochwasser: Natur im Überfluß? S.163-182. Heidelberg.
- CARBIENER, R.; SCHNITZLER, A. (1990): Evolution of major pattern models and processes of alluvial forest of the Rhine in the rift valley (France/ Germany). Vegetatio 88.
- CASPARY, H. & BARDOSSY, J. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? In: Wasser und Boden No. 47/3, S.18-24.
- CENTRALBUREAU FÜR METEOROLOGIE UND HYDROGRAPHIE IM GROßHERZOGTUM BADEN (1892): Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse von den Quellen bis zum Austritt des Stromes aus dem deutschen Reich. Berlin.
- DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.](1997): Monatlicher Witterungsbericht. Februar 1997. 45.Jg., Nr.2; Juni 1997. 45Jg., Nr.6; Juli 1997. 45.Jg. Nr.7; August 1997. 45.Jg., Nr.8.
- DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.](1997): Monatlicher Witterungsbericht. Juni 1997. 45, Nr.6.
- DEUTSCHER WETTERDIENST [Hrsg.](1997): Monatlicher Witterungsbericht. Juli 1997.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2000) & (2001): Witterungs Report - express. Offenbach.
- DIERSCHKE, H. (1981): Schutz der letzten Reste europäischer Auenwälder. In: Natur und Landschaft 56, Heft 9, S.303-304.
- DILGER, R. & SPÄTH, V. (1984): Konzeption natur- und landschaftsschutzwürdiger Gebiete der Rheinniederung des Reg.-Bez. Karlsruhe. Im Auftrag der BNL Karlsruhe. 182 S. Karlsruhe.

- DILGER, R. & SPÄTH, V. (1985): Kartierung und Bilanzierung schutzwürdiger Bereiche der Rheinniederung im Regierungsbezirk Karlsruhe. In: Natur und Landschaft Nr. 11. S.435-440.
- DILGER, R. (1984): Feuchtgebiete und Wiesenlandschaften im „Hockenheimer Rheinbogen“. Gutachten der Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Karlsruhe. Unveröffentlicht. 48 S. Karlsruhe.
- DILGER, R. et. al. (1978): Zur Rekultivierungsproblematik künstlicher Wasserflächen am Oberrhein. Materialien aus dem Studium der Regionalwissenschaft, Nr.6, 278 S.
- DIETZ, J.W. / PULINA, B. (1975): Tosbecken und Sohlensicherung am Rheinwehr Iffezheim. In: Wasserwirtschaft 65, H.9, S.226-233.
- DIESTER, E. (1983): Zur Hochwassertoleranz von Auebäumen an lehmigen Standorten. – Verh. GfÖ 10.
- DISTER, E. (1985): Auenlebensräume und Retentionsfunktion. In: Laufener Seminar Beiträge 3, S. 74-90. DISTER, E. (1986): Hochwasserschutzmaßnahmen am Oberrhein. In: Geowissenschaften in unserer Zeit 4, H.6, S.194-203.
- DISTER, E. (1991): Folgen des Oberrheinausbaus und Möglichkeiten der Auen-Renaturierung. In: Laufener Seminarbeiträge 4, S. 115-123.
- DISTER, E. (1996): Flußauen: Ökologie, Gefahren und Schutzmöglichkeiten. In: LOZÁN, J.L.; KAUSCH, H. [Hrsg.]: Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren, S. 292-301. Berlin.
- DEHNERT, J. (1998): Radon-222 als natürlicher Tracer bei der Grundwasserprobenahme und bei der Uferfiltration. Dissertation an der TU Bergakademie Freiberg.
- DÖRRER, I. (1984): Kulturgeographische und landschaftsökologische Auswirkungen der Rheinkorrektion am mittleren und südlichen Oberrhein. In: Der Rhein-Neckar-Raum an der Schwelle des Industrie-Zeitalters (Südwestdeutsche Schriften 1).
- DVWK ARBEITSKREIS „SCHWEB- UND SCHADSTOFFE IN FLIESSGEWÄSSERN“ (1999): Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Bewertung von Sedimentablagerungen und Schwebstoffen in Gewässern. – In: Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Heft 128.
- ECKOLDT, M. (1971): 200 Jahre Wasserstandsbeobachtungen am Rhein. In: Beiträge zur Rheinkunde, H.23/2, S.15-24.
- ENGEL, H. (1997): Die Ursachen der Hochwasser am Rhein - natürlich oder selbstgemacht ? In: IMMENDORF, R. (Hrsg.): Hochwasser: Natur im Überfluß?. S.39-56. Heidelberg.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE [ESRI] (1996): Using Arc View GIS. (Benutzerhandbuch zum Softwarepaket).

- ERNST, E. (1972): Der Rhein. Eine europäische Stromlandschaft im Luftbild. Bühl/Baden.
- FABER, O. (1936): Wasserbewirtschaftung in den badischen Auewäldungen. In: Forst- und Jagd-Zeitung, No. 112, S.1-13.
- FELKEL, K. (1980): Die Geschiebeabgabe als flußbauliche Lösung des Erosionsproblems des Oberrheins. In: Mitt.-Bl.d.BAW. 47. S.1-54.
- FISCHER, W. (1970): Die Änderung der Hochwasserverhältnisse beim Ausbau des Oberrheins. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 14, H.2, S. 29-34.
- FUHRMANN, S.; EINSPIANIER, U.; STREIT, U. (1997): Multimediale Visualisierung von Hochwasserereignissen mit Flood View. In: IMMENDORF, R. [Hrsg.]: Hochwasser: Natur im Überfluß? S.245-256. Heidelberg.
- FUCHS, A. (178): Sukzessionsstufen in prägnierenden Rheinauegewässern. Eine Bestandsaufnahme in zwei Feuchtbiotopen. – Im Auftrag von: Zoologisches Institut I der Universität Heidelberg, unveröffentlicht.
- FRICKE, W. (1976): Bevölkerung und Raum eines Ballungsgebietes seit der Industrialisierung – Eine geographische Analyse des Modellgebietes Rhein-Neckar. Die Ansprüche der modernen Industriegesellschaft an den Raum, 7. Teil. In: Forsch.- u. Sitz-, Ber. Akad. Raumforschung und Landesplanung 11, S.1-68. Hannover.
- FRICKE, W. et. al. (1974): Schrifttum zur Regionalplanung und Raumstruktur des Oberrheingebietes. In: Heidelberger Geogr. Arbeiten 42.
- FRORIEP, H. (1953): Rechtsprobleme der Oberrheinkorrektion im Großherzogtum Baden. Diss. Jur. Mainz.
- GALLUSER, W.A. / SCHENKER, A. [Hrsg.](1992): Die Auen am Oberrhein. Les zones alluviales du Rhin supérieur. Basel, Boston, Berlin.
- GEBHARDT, H. (1980): Sukzessionsstufen in prägnierenden Rheinauegewässern. Datenerfassung im 2. und 3. Jahr. – Im Auftrag von: Zoologisches Institut I der Universität Heidelberg, unveröffentlicht.
- GEPP, J. [Hrsg.](1986): Auegewässer als Ökozellen - Fluß-Altarme, Altwässer und sonstige Auen-Stillgewässer. Österreichische Grüne Reihe. Wien.
- GEWÄSSERDIREKTION SÜDLICHER OBERRHEIN/HOCHRHEIN (1997): Das integrierte Rheinprogramm, Hochwasserschutz und Auenaturierung am Oberrhein.
- GOETHE, J.W. (1833): Aus meinem Leben. Dichtung und Wahrheit.
- GÖLZ, E. / TIPPNER, M. (1985): Korngröße, Abrieb und Erosion am Oberrhein. In: DGM, 29.JG, S.115-122.

- GÖPPERT, S. & KRAUTER, G. E. (1997): Vermessung der Abflußverhältnisse im Rheinvorland im Bereich der Schwetzinger Wiesen / Riedwiesen und des Ketscher Rheinwaldes. Erläuterungsbericht und Anlagen A. Gutachten der Oberrheinagentur / Gewässerdirektion Nördlicher Oberrhein. Karlsruhe.
- GRAEWE, H. (1975): Die Notwendigkeit einer Rheinstaustufe bei Neuburgweier. In: Wasserwirtschaft 65, H. 9, S.233-238.
- GRIESSHAMMER, M. (1979): Untersuchung zur ökologischen Bewertung des Feuchtgebiets Siegelhainer Tongruben bei Ketsch. Zulassungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien. 87 S. Heidelberg.
- HABERSACK, H. & SCHNEIDER, J. (2000): Ableitung und Analyse flussmorphologisch relevanter Parameter von historischen Karten. In: Wasser und Boden 52/6, S.55-59.
- HASSLER, D. et. al. (1995): Wässerwiesen. Geschichte, Technik und Ökologie der bewässerten Wiesen, Bäche und Gräben in Kraichgau, Hardt und Bruhrain. In: Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden
- HEIDENREICH, U. & RAUSCH, H. & WOLF, A. (1987): Pflegeplan für das geplante Natur, Landschafts- und Wildschutzgebiet „Hockenheimer Rheinbogen“ – Teil A: Pflegeplangrundlagen und Flächenvorschläge zur Extensivierung. Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Karlsruhe. Unveröffentlicht. 218 S. Karlsruhe.
- HEIDENREICH, U. & RAUSCH, H. & WOLF, A. (1992): Pflegeplan für das geplante Natur, Landschafts- und Wildschutzgebiet „Hockenheimer Rheinbogen“ – Teil B: Bestand, Ziele und Maßnahmen. Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Karlsruhe. Unveröffentlicht. 168 S. Karlsruhe.
- HENTSCHEL, P.; ROTH, J. (1997): Hochwasser - natürliches „Lebenselixir“ der Auen. In: IMMENDORF, R. [Hrsg.](1997): Hochwasser: Natur im Überfluß? S.39-56. Heidelberg.
- HILPISCH, G. (2001): Hochwassersimulation am nördlichen Oberrhein mit Hilfe eines GIS. Diplomarbeit. Heidelberg.
- HIRSCH, L. (1951): Die Grundwasservorräte der nordbadischen Rheinebene. In: Wasser und Boden, 8; S.171-173.
- HERRMANN, S.; TINZ, M. (2002): Operationelle Überschwemmungsvorhersage mittels GIS-Modellkopplung Einsatzmöglichkeiten für Hochwasserrisiko-Management, Versicherungswirtschaft und Landnutzungsplanung. In GeoBIT/GIS – 06/2002.
- HSK - HOCHWASSERSTUDIENKOMMISSION FÜR DEN RHEIN (1978): Schlußbericht. Bonn.

- HSK - HOCHWASSERSTUDIENKOMMISSION FÜR DEN RHEIN (Hrsg.) (1980):
Schlußbericht. 1978 (Teilel-III), 82 S. Bonn.
- HOFMANN, E. F. (1939): Grundwasserstandänderungen im Oberrheintal.
Dissertation. Karlsruhe.
- HOMAGK, P. (1995): Simulation des Hochwassergeschehens am Oberrhein. In:
Wasserbau-Mitteilungen der Technischen Hochschule Darmstadt, Nr. 40.
S.1–9.
- HOMAGK, P., LUDWIG, K. (1998): Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen
bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. In:
Wasserwirtschaft 88 (1998), 4; S.160-167.
- HONSELL, M. (1878): Der natürliche Strombau des deutschen Oberrheins. In:
Verhandlungen des deutschen Geographentages: 7. Geographentag zu
Kalsruhe. S.33-52.
- HONSELL, M. (1885): Die Korrektion des Oberrheines von der Schweizer Grenze
unterhalb Basel bis zur Großh. Hessischen Grenze unterhalb Mannheim,
Insbesondere der badische Anteil an dem Unternehmen. Karlsruhe.
- HORN, H. (1977): Die Änderung der Abflussverhältnisse und der Höhenlage der
Rheinsohle zwischen Karlsruhe-Maxau und Andernach. IN: Binnenschifffahrt
und Wasserstraßen, H.4, S.209-215.
- HÜGIN, G. (1962): Wesen und Wandlungen der Landschaft am Oberrhein. – Beitr. z.
Landespflege 1; S. 185-250. Stuttgart.
- HÜGIN, G. (1980): Die Auewälder des südlichen Oberrheintales und ihre
Veränderung durch den Rheinausbau. Colloques phytosociologiques IX, S.
678-706.
- HÜGIN, G. (1981): Die Auewälder des südlichen Oberrheintals - ihre Veränderung
und Gefährdung durch den Rheinausbau. Landschaft und STADT S. 78-91.
- HUMBERG, B. (1988): Die Wasserpflanzen der nordbadischen Oberrheinniederung.
Bestandsanalyse. – unveröffentlicht.
- HOCHWASSERSTUDIENKOMMISSION FÜR DEN RHEIN (1978): Schlußbericht.
Bonn.
- HOFMANN, E.F. (1939): Grundwasserstandsänderungen im Oberrheintal.
Dissertation. Karlsruhe.
- HOLFELDER, T., MONTENEGRO, H., WAWRA, B. (1999): Interaktion zwischen
Fluss und Grundwasser in einer Flussaue an der Elbe bei Lenzen.
http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/aktuell/holfelder/elbe09_99.html
- HOMAGK, P. (1992): Zielkonflikt zwischen Hochwasserschutz und Ökologie? In:
Wasserwirtschaft 82, H.7+8, S.276-380.

- HOMAGK, P. (1995): Simulation des Hochwassergeschehens am Oberrhein. In: Wasserbau-Mitteilungen der Technischen Hochschule Darmstadt, Nr. 40, S.1-9.
- HOMAGK, P.; LUDWIG, K. (1998): Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. In: Wasserwirtschaft 88, H.4, S. 160-167.
- HONSELL, M. (1883): Die Hochwasserkatastrophe am Rhein 1882. In: Centralblatt der Bauverwaltung, Nr. 5f.
- HONSELL, M. (1885): Die Korrektio n des Oberrheins von der Schweizer Grenze unterhalb Basel bis zur Großherzoglich Hessischen Grenze unterhalb Mannheim. In: Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden, Heft 3.
- HONSELL, M. (1887): Der natürliche Strombau des Deutschen Oberrheins. In: Verh, d. dt. Geographentages: 7. Geographentag zu Karlsruhe, S. 33-52.
- HONSELL, M. (1888): Bildung des Rheinlaufs durch die oberrheinische Tiefebene. In: Verhandlungen d. nat. Ver. Karlsruhe, 10, S. 67-71.
- HONSELL, M. / TEIN, M. v. (1891): Auftreten und Verlauf der Hochwasser von 1824, 1845, 1852, 1876 und 1882/83. (Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserverhältnisse im dt. Rheingebiet, Heft 2.).
- HORN, H. (1977): Die Änderung der Abflussverhältnisse und der Höhenlage der Rheinsohle zwischen Karlsruhe-Maxau und Andernach. In: Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, H.4, S.209-215.
- IHRINGER, J. (1990): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Anwenderhandbuch Bd. 1: Hochwasseranalyse. - Universität Karlsruhe, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft.
- ILLIES, J.H. (1971): Ein Grabenbruch im Herzen Europas. In: GR 19, H.8, S. 281-293.
- ILLIES, J.H. (1982): Lebendige Tektonik am Oberrhein. In: HAILER, N. (Hrsg.): Natur und Landschaft am Oberrhein. S. 9 -18. Speyer.
- IKSR - INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS [IKSR] (1995): Grundlagen und Strategie zum Aktionsplan Hochwasser. Koblenz.
- IKSR - INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (Hrsg.) (1998): Rheinatlas. Ökologie und Hochwasserschutz. Koblenz
- INULA INSTITUT FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHFTSANALYSE (1999/2000): Projekt „ Sanierung von Gießen und anderen Quellgewässer im IRP“. – Im Auftrag von: Landesanstalt für Umweltschutz Baden- Württemberg, unveröffentlicht.

- JACOBS, C. (2002): Landschaftswandel im 19. Jahrhundert und rezente Druckwassergefährdung in den Auen des mittleren Oberrheins zwischen Phillipsburg und Mannheim – Eine Auswertung im GIS. unveröffentlichte Diplomarbeit. Heidelberg.
- KARRASCH, H. (1988): Umweltprobleme des Oberrheingebietes: Ausgewählte Fallstudien. In: Geograficky Casopis 40, H.3, S. 137-173.
- KIRSTEIN, A. (2002): Die zeitliche und räumliche Dynamik von Druckwasserflächen in den Rheinauen zwischen Mannheim und Altlußheim. Eine Modelluntersuchung zur Beurteilung von kleinräumigen Überschwemmungsflächen. unveröffentlichte Diplomarbeit. Heidelberg.
- KOEHLER, G. (1993): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet. In: Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Mainz.
- KHR - KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet. KHR-Bericht Nr. I-7. Leystad.
- KHR - KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen. KHR-Bericht Nr. I-9. Leystadt.
- KRAHE, P.; LIEBSCHER; H.J.; WITTE, W. (1988): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 nach Christus bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. Koblenz.
- KRAHE, P. (1997): Hochwasser und Klimafluktuation am Rhein seit dem Mittelalter. In: IMMENDORF, R. [Hrsg.]: Hochwasser: Natur im Überfluß? S.57-82. Heidelberg.
- KRAMER, W. (1971): Kiesnutzung in der nordbadischen Rheinaue. In: Natur und Landschaft 49, Heft 11, S.302-304.
- LAHMEYER (1976): Verbrauchsprognosen und Möglichkeiten der Konzentration des Kiesabbaus im Regierungsbezirk Karlsruhe. Frankfurt.
- LANDESSTELLE FÜR GEWÄSSERKUNDE KARLSRUHE (1950): Der Abfluß des Rheins am Pegel Maxau von 1851–1949. Gutachten.
- LANDESVERMESSUNGSAMT RHEINLAND-PFALZ UND LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTEMBERG (1994): Deutsche Grundkarte 1:5000.
Verwendete Kartenblätter:
Blatt 6516.10 Altripp Süd, Blatt 6616.2 Kollerhof, Blatt 6616.3 Otterstadt, Blatt 6616.4 Böllenwörth, Blatt 6616.5 Ketsch Pfalzwörth, Blatt 6616.6 Deutschhof, Blatt 6616.7 Herrenteich, Blatt 6616.a Speyer Rheinbrücke, Blatt 34605462 Speyer Neuer Hafen, Blatt 6616.11 Altlußheim, Blatt 6716.1 Insel Horn, Blatt 6716.2 Rheinhausen Ost.

- LANDESVERMESSUNGSAMT RHEINLAND-PFALZ (1994): Deutsche Grundkarte 1:5000, Blatt 34605468 Binshof, Blatt 34605472 Waldsee Ost.
- LEINER, R. (1998): Mikroskalige Inundationsflächenkartierung am nördlichen Oberrhein – ein geographischer Beitrag zur Identifizierung von Stechmückenbrutplätzen. Diplomarbeit. Heidelberg.
- LFU LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1990): Erfassung von Abflußhindernissen in der Rheinaue zwischen Karlsruhe und der Landesgrenze bei Mannheim. In: Berichte der LfU Baden-Württemberg. Materialien zum Integrierten Rheinprogramm. Unveröffentlicht. 19 S. Karlsruhe.
- LFU LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1991): Flutungen der Polder Altenheim I und II. Materialien zu integrierten Rheinprogramm 3, H. 1.
- LFU LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1999): Auswirkung der ökologischen Flutungen der Polder Altenheim. Ergebnisse des Untersuchungsprogramms 1993-1996. Materialien zum Integrierten Rheinprogramm. Band 9.
- LFU LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2000): Zustand der Baggerseen in der Oberrheinebene.
- LFW LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT RHEINLAND-PFALZ (1999): Entwicklung der Rhein-Auegewässer. Teil 1: Grundlagen. Teil 2: Entwicklungsplan.
- LAWA LÄDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1995): Leitlinien für einen Zukunftsweisenden Hochwasserschutz; Herausgegeben von der LAWa, 1995.
- LUDWIG, K. (1996): Statistische Untersuchungen zu den Charakteristiken von Wasserstandsschwankungen in Auegebieten. – Im Auftrag von: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, unveröffentlicht.
- MATTHESS, G. (1958): Das Grundwasser in der östlichen Vorderpfalz zwischen Worms und Speyer. Ein Beitrag zur Hydrogeologischen Untersuchung der Vorderpfalz. In: Mitteilungen der Pollichia, III. Reihe, 5. Band, S.7-23.
- MENDEL, H.G.; FISCHER, P.; HERRMANN, A. (1996): Hochwasser, Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. BfG-Nr. 1022. Koblenz.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1988a.): Konzeption natur- und landschaftsschutzwürdiger Gebiete der Rheinniederung des Reg.-Bez. Karlsruhe („Rheinauenschutzgebietenkonzeption“). Materialien zum Integrierten Rheinprogramm, Band 1. Karlsruhe. 178 S.

- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1988b.):
Biotopsystem – Nördliche Oberrheinniederung. Materialien zum Integrierten Rheinprogramm, Band 2. Karlsruhe. 137 S.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1990): Hochwasserschutz und Ökologie. Ein „integriertes Rahmenprogramm“ schützt vor Hochwasser und erhält naturnahe Flussauen. Karlsruhe.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1993): Veränderung der Auelandschaft am Oberrhein. In: Der Oberrhein im Wandel Heft 9. Karlsruhe.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND PFALZ (Hrsg.) (1993): Schadstoffbelastung in Böden von Hochwasserüberflutungsflächen des Rheins, Kurzfassung. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND PFALZ (Hrsg.) (1997): Der Rhein gestern, heute, morgen. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND PFALZ (Hrsg.) (1999): Hochwasserschutz am rheinland-pfälzischen Oberrhein, Ziele-Maßnahmen-Standorte. Mainz.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG / DER HESSISCHE MINISTER FÜR UMWELT UND REAKTORSICHERHEIT / MINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT RHEINLAND-PFALZ (1987): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. Alsfeld.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG & HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN & MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ (1999): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. Fortschreibung 1983-1998. Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1996): Rahmenkonzept des Landes Baden Württemberg zur Umsetzung des Integrierten Rheinprogramms. Lahr.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (1997): Studie „Ausweisung von Überschwemmungsgebieten“ zum Workshop am 20.11.1997 im Lindenmuseum Stuttgart (Unveröffentlicht).
- MODROW, B. (1981): Naherholung in den Rheinauen - Probleme durch Dauercamper - . In: Umweltprobleme im Rhein-Neckar-Raum. Mannheimer Geogr. Arbeiten H. 14, S.173-180.
- MONTENEGRO, H. (1995): Parameterbestimmung und Modellierung der Wasserbewegung in heterogenen Böden. Dissertation. Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe (TH). Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Nr.134. VDI-Verlag, Düsseldorf.

- MONTENEGRO, H. Holfelder, T. (1999): Untersuchung der Auswirkungen Wasserbaulicher Eingriffe auf die Grundwasserdynamik in Flußauen; Sachstandbericht für 1998 zum Verbundvorhaben „Auenregeneration durch Deichrückverlegung“.
- MOSER, H. (1968): Hydrologische Untersuchungen im Oberrheintal (Ballungsraum Rhein-Neckar). In: Festschrift zu Kongress und Ausstellung Wasser Berlin, S.48-68.
- MÜHLINGHAUS, R. (1991): Konzepte der Raumplanung zur Erhaltung und Entwicklung von Flußauen. In: Laufener Seminarbeiträge 4, S.143-149.
- MÜNCH, W. (1983): 100 Jahre Kiesabbau in der nordbadischen Rheinebene (Regierungsbezirk Karlsruhe). – in: carolinea, 41.
- MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (1997): Überschwemmung und Versicherung. 79 S. München.
- MUSALL, H. (1969): Die Entwicklung der Kulturlandschaft der Rheinniederung zwischen Karlsruhe und Speyer vom Ende des 16. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts. Geographisches Institut, Universität Heidelberg. Heidelberger geographische Arbeiten 22.
- MUSALL, H. (1971a.): Die Rheinniederung zwischen Karlsruhe und Speyer. In: ALTER, W. [Hrsg.]: Textband zum Pfalzatlas. S.338-392.
- MUSALL, H. (1971b.): Die Rheinniederung zwischen Speyer und Worms. In: ALTER, W. [Hrsg.]: Textband zum Pfalzatlas. S.650-660.
- MUSALL, H. (1982): Die Veränderungen des Oberrheinlaufs zwischen Seltz im Elsaß und Oppenheim vom 16. Jh. bis zum Beginn der Tullaschen Korrektur. In: HAILER, N. [Hrsg.]: Natur und Landschaft am Oberrhein. S.21-33. Speyer.
- NAJOKS, C.; SACHER, H.(1998): Berechnung von Überschwemmungsgebietsgrenzen mittels modernster Modelltechnik. –Wasser & Boden, 50 Jahrg. 01/1998, S.5-10.
- NORMENAUSSCHUß WASSERWESEN [NAW] im DIN (1994): DIN 4049-3, Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - Berlin.
- OBERDORFER, E. (1934): Zur Geschichte der Sümpfe und Wälder zwischen Mannheim und Karlsruhe. In: Verein für Naturkunde Mannheim, 100. Und 101. Jahresbericht. S.99-124.
- OBERLE, P.; THEOBALD, S.; NESTMANN, F., (2000): GIS-gestützte Hochwassermodellierung am Beispiel des Neckars, Wasserwirtschaft Heft 7-8, Seite 368 – 373, 2000.

- OBERLE, P.; THEOBALD, S.; EVDAKOV, O.; NESTMANN, F., (2000): " GIS-supported flood modelling by the example of the river Neckar" , Kassel Reports of Hydraulic Engineering No. 9/2000, S.145 -155
- OBERRHEINAGENTUR (1996): Verbesserung der Abflussverhältnisse im Rheinvorland. Entwurf. – unveröffentlicht.
- ODENWALD, B. (1994): Parameteridentifizierung bei numerische Grundwasserströmungsmodellen. Dissertation. Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe (TH). Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15, Nr. 125. VDI-Verlag Düsseldorf
- PHILIPPI, G. (1978) Veränderungen der Wasser- und Uferflora im badischen Oberrheingebiet. – In: Beih. veröff. Naturschutz Landschaftspflege Baden-Württemberg.
- PICHL, K. (1958): Die Erosion der Rheinsohle zwischen Karlsruhe und Oppenheim. In: Die Wasserwirtschaft 48, H.11, S.283-286 und S.321-326.
- PLATE, E. (1992): Möglichkeiten und Grenzen einer Hochwasservorhersage. In: Hochwasservorhersage: ein Schlüssel zu effektivem Hochwassermanagement. Tagungsband zum Symposium am 6. November 1992, LfU Baden Württemberg. Karlsruhe.
- POST, R. (1971): Die ausgebeuteten Kiesgruben im Grünen Süden von Ludwigshafen als Naherholungsgebiet unter besonderer Berücksichtigung der „Blauen Adria“. Mannheim.
- REG. PRÄS. NORDBADEN. (1968): Der Abbau von Sand und Kies in der nordbadischen Rheinebene. Karlsruhe.
- REG KA REGIERUNGSPRÄSIDIUM KARLSRUHE (1991): Integriertes Rheinprogramm des Landes Baden-Württemberg. Dammrückverlegung zwischen Iffezheim und Mannheim-Sandhofen – Untersuchte Dammrückverlegungsbereiche – unveröffentlicht.
- REINECK, H.E.; SINGH, T.B. (1975): Depositional Sedimentary Environments. Berlin, Heidelberg.
- REINHARD, E. (1977): Die Veränderung der Kulturlandschaft durch die Rheinkorrektion seit 1817. In: Historischer Atlas von Baden-Württemberg. Erläuterungen zu den Karten IV, 18-19.
- RIEHL, W.H. (1857): Die Pfälzer. Stuttgart, Augsburg.
- SALABA, M. (1997): Kulturlandschaft am Oberrhein in alten und neuen Karten. Karlsruhe.
- SCHÄFER, W. (1973a): Der Oberrhein, sterbende Landschaft?. In: Natur und Museum 103, H.2, S.1-29 / H.3.S.73-81 / H.4.S.110-123 / H.5, S.137-153 / H.6 S.177-192 / H.9, S.312-319.

- SCHÄFER, W. (1973b): Altrhein-Verbund am nördlichen Oberrhein. Courier Forschungsinstitut Senckenberg Nr. 7. Frankfurt.
- SCHÄFER, W. (1974): Der Oberrhein, sterbende Landschaft? In: Natur und Museum Nr.104, S.248-252, S.297-305, S.331-343, S.358-363.
- SCHÄFER, W. (1976): Der Oberrhein als ökologisches Gefüge und seine ökotechnische Behandlung. In: Pfälzer Heimat 1, S.11-15.
- SCHÄFER, W. (1978): Der Oberrhein, Ökotechnisch gesehen. Courier Forschungsinstitut Senckenberg Nr. 31. Frankfurt.
- SCHÖNHALS, E. (1974): Die Böden des Rhein-Neckar-Gebietes, ihre Veränderung durch Eingriffe des Menschen und ihre Erhaltung und Verbesserung. In: Forschungs- und Sitzungsberichte der Akademie für Raumforschung und Landesplanung 81, S.127-185.
- SCHÖNWIESE, C.D.; SÁNCHEZ PENZO, S.; RAPP, J. (1997): Statistische Untersuchung langfristiger Veränderungen des Niederschlags in Baden-Württemberg. Handbuch Wasser 2, H. 42. LfU Baden-Württemberg.
- SCHULTE-MÄTER, F. (1938): Beiträge über die geographischen Auswirkungen der Korrektur des Oberrheins. 84 S. Dissertation an der Universität Freiburg.
- SOLMSDORF, H. (1977): Die Nutzung in der Talau des mittleren Oberrheins und ihre landschaftsökologische Bewertung. In: Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, Nr. 13. S.49-70.
- SPANG, W.(1994): Die Eignung von Regenwürmern (Lumbricidae), Schnecken (Gastropoda) und Laufkäfern (Carabidae) als Indikatoren für autotypische Standortbedingungen. Eine Untersuchung im Oberrheintal. Heidelberg, Univ., Diss., 1994.
- SPÄTH, V. (1981): Feuchtgebietskartierung im Bereich der Oberrheinebene des Landkreises Rastatt. Rastatt.
- TITTIZER, T. & KREBS, F. (Hrsg.) (1996): Ökosystemforschung: der Rhein und seine Auen: eine Bilanz. Heidelberg.
- TUBEUF, C. VON (1912): Hochwasserschäden in den Auwäldungen des Rheins nach der Überschwemmung im Sommer 1910. In: Naturw. Z. Forst- und Landwirtschaft. 10 (1), S.1-21.
- TULLA, J.G. (1825): Über die Rektifikation des Rheins, von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in das Großherzogtum Hessen. Karlsruhe.
- UHLIG, K. (2000): Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche unter Anwendung Geographischer Informationssysteme. In: Wasser und Boden 52/4, S.31-36.

- VIESER, H.J. (1973): Folgen der Ausbaumaßnahmen am Oberrhein auf den Hochwasserschutz, DGM, Sonderheft 1973, S. 42-50.
- VIESER, H.J. (1985): Hochwasserverschärfung durch den Ausbau des Oberrheins. In: Wasserbaumitteilungen der Technischen Hochschule Darmstadt, Nr. 24, S. 31-45.
- WILKE, K. (1884): Kurzfristige Wasserstands- und Abflußvorhersage am Rhein unter Anwendung ausgewählter mathematischer Verfahren. Schriftenreihe DVWK, 65.
- WILKE, K. (1997): Hochwasservorhersage am Rhein - Wunsch oder Wirklichkeit? In: IMMENDORF, R. [Hrsg.](1997): Hochwasser: Natur im Überfluß? S. 83-102. Heidelberg.
- WEBER, H. (1977): Hochwasser im Rheingebiet. In: Beiträge zur Rheinkunde 29, S.50-62. Koblenz.
- WEGNER, M.(1997): Transient groundwater and surface-water interactions at Fort Wainwright, Alaska. Master Thesis, University of Alaska Fairbanks.
- WEIGL, E. (1996): Trenduntersuchungen langer Zeitreihen des Gebietsniederschlags vor dem Hintergrund der letzten beiden Winterhochwasser im Dezember 1993 und Januar 1995. DGM 40, H.1. S.2-5.
- WEISER, C. / GLOWITZ, B. (1990): Stechmückenproblematik in Polderräumen. Prognose des Belästigungspotentials und Maßnahmen zur Reduktion am Beispiel des „NSG Rußheimer Altrhein/Elisabethenwörth“(Unveröffentlicht).
- WILDENHAHN, E. (1986): Der Einfluss langfristiger Änderungen im Niederschlagsgeschehen auf die Abflussverhältnisse des Rheins. In: Mitteilungen 1 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, S.119-129. Koblenz.
- WIMMER, G. (1981): Hochwasserschutz am Rhein. In: GEIGER, M.; PREUß, G.; RATHERBERGER, K.H. [Hrsg.]: Pfälzische Landeskunde. S.211-216.
- WHITING, P.J., POMERANETS, M. (1997): A numerical study of bank storage and its contribution to streamflow. Journal of Hydrology 202.
- WOLF-SCHUMANN, U.; VAILLANT, S. (1996): Time View: A Time Series Management System for GIS and Hydrological Systems. - In: KOVAR, K.; NACHTNEBEL, H.P. [Hrsg.]: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. - IASH Publ. No. 235. S. 79-87. Wien.
- WWF-AUEN-INSTITUT & BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSÖKOLOGIE & FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (1989): Umweltverträglichkeitsprüfung von Hochwasserschutzmaßnahmen im Raum Breisach. 235 S. Rastatt.

WWF-AUEN-INSTITUT (1992): Untersuchungen über ökologische Entwicklungsmöglichkeiten der Rheinniederung im Bereich der Murgmündung durch Erweiterung der Überflutungsflächen (gesteuerte oder ungesteuerte Retention). – Im Auftrag von: Ministerium für Umwelt des Landes Baden-Württemberg, unveröffentlicht, 186 S.

ZAHN, F. W. (1914): Kultur und Arrondierungswesen des Kraicher Niederungsgebietes und der markgräfllich badischen Domäne Insultheim unter besonderer Berücksichtigung ihrer Entstehung und ihrer Entwicklung im 19. Jahrhundert. In: Volkswirtschaftliche Abhandlungen der badischen Hochschulen, N. F. Nr. 24. 229 S.

X.2. Nachweis der zitierten Literatur und Pressemitteilungen aus dem Internet

DWD-Pressemitteilung (1999): Herausragende Wetterereignisse 1999.
www.dwd.de/general/200001xx.html

HOLFELDER, T., MONTENEGRO, H., WAWRA, B. (1999): Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser in einer Flussaue an der Elbe bei Lenzen.
http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/aktuell/holfelder/elbe09_99.html

JÄGER, S. (2002): Rhine Flood Hazard Mitigated With the Help of GIS. In: ArcNews Online.
<http://www.esri.com/news/arcnews/fall02/articles/rhine-flood-hazard.html>

LFU-Pressemitteilung (12.12.2001): Das nächste Hochwasser kommt bestimmt.
www.lfu.baden-wuerttemberg.de/p...u/pressemitteilungen/2001_027.lfu.html

MÜLLER, M. (o.J.): Geodaten im Risikomanagement - Zonierungssysteme bei der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV);
<http://138.232.151.1/ifg/download/Mueller.pdf>

STOLZENBURG, H. (1996); Als der Oberrhein noch 2000 Inseln hatte.
<http://www.mcfish.de/Text-Rheinhistorie.htm>

WALKER, A. (o.J.): Folgen des „Jahrhundertwinters“ 1999, Lawinen und Hochwasser. www.ch-forschung.ch/pd/9906/art_1.htm

WUNDERLE, S.; OESCH, D. (2001): Fernerkundung und Naturgefahren. Web Research – State of the Art, June 2001.
http://saturn.unibe.ch/rsbern/publication/fulltext/deza_bericht/bericht_DEZA_WWW/DEZA_bericht.html

X.3. Nachweis des verwendeten historischen Kartenmaterials

Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden. Bearb. V. d. Centralbureau für Meteorologie und Hydrographie im Großherzogtum Baden(1885) Karlsruhe, Heft III. Vergleich des Laufs des Rheins von 1819 und 1885. Maßstab 1:25 000.

Signatur im GLA: Abteilung H-C/ 62

Carte über den Lauf des Rheins von Lauterburg bis unterhalb Sandhofen längs der badisch- bayrischen Genze in 8 Blättern nach dem Maßstab 1:20 000. Darstellend den Zustand des Stromes im Jahre 1856/58. Bearb. V. d. Großherzogl. Oberdirektion des Wasser- und Straßenbaus. Karlsruhe o.J.

Signatur im GLA: Abteilung H/ Rheinstrom/81: Blätter 5 (Speyer) /6 (Ketsch)

Carte über den Lauf des Rheins von Lauterburg bis unterhalb Sandhofen längs der badisch- bayrischen Genze in 8 Blättern nach dem Maßstab 1:20 000. Darstellend den Zustand des Stromes im Jahre 1875. Bearb. V. d. Großherzogl. Oberdirektion des Wasser- und Straßenbaus. Karlsruhe o.J.

Signatur im GLA: Abteilung H/ Rheinstrom/92: Blätter 5 (Speyer) /6 (Ketsch)

Handzeichnung: Darstellung der Rheinniederung bei Rheinhausen von 1790. Maßstab: unbekannt; Autor o. Herausgeber unbekannt (1803): ohne Titel.

Signatur im GLA: Abteilung H - Rheinhausen / 4

Lauf des Rheins 1925. Autor o. Herausgeber unbekannt (o.J.): Maßstab 1:25 000;

Signatur im GLA: Abteilung H-C/25: Blatt III (Speyer)

Topographischer Atlas über das Großherzogthum Baden nach der allgemeinen Landesvermessung des Großherzoglichen militairisch topographischen Bureaus. (1838). Maßstab 1:50 000, Blatt 6.

Reproduktion nach einem Original der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe. Herausgegeben vom Landesvermessungsamt Baden - Württemberg. Stuttgart 1984.

Topographischer Atlas über das Großherzogthum Baden nach der allgemeinen Landesvermessung des Großherzoglichen militairisch topographischen Bureaus. (1838). Maßstab 1:50 000, Blatt 11.

Reproduktion nach einem Original der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe. Herausgegeben vom Landesvermessungsamt Baden - Württemberg. Stuttgart 1984.

Topographischer Atlas über das Großherzogthum Baden nach der allgemeinen Landesvermessung des Großherzoglichen militairisch topographischen Bureaus. (1844). Maßstab 1:50 000, Blatt 33.

Reproduktion nach einem Original der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe. Herausgegeben vom Landesvermessungsamt Baden - Württemberg. Stuttgart 1984.

Topographischer Atlas über das Großherzogthum Baden nach der allgemeinen Landesvermessung des Großherzoglichen militairisch topographischen Bureaus. (1845). Maßstab 1:50 000, Blatt 40.

Reproduktion nach einem Original der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe. Herausgegeben vom Landesvermessungsamt Baden - Württemberg. Stuttgart 1984.