

**Analyse des dezentralen Hochwasserrückhaltepotenzials
im Einzugsgebiet der Natzsung / Načetínský Potok
(Mittleres Erzgebirge)
unter Verwendung des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM**

Inauguraldissertation

Im Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften

(Dr. rer. nat.)

Vorgelegt von

Dipl.-Geograph Jens Bölscher
aus Meppen im Emsland

2015

Tag der Disputation: 13. November 2015

Erstgutachter:

Prof. Dr. rer. nat. Achim Schulte
Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Geographische Wissenschaften
Fachrichtung Angewandte Geographie, Umwelthydrologie und
Ressourcenmanagement

Zweitgutachter:

Prof. Dr. rer. nat. Tilman Rost
Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Geographische Wissenschaften
Fachrichtung Physische Geographie

Widmung & Danksagung

Ich widme diese Arbeit all denen, die mich auf diesem langen und manchmal holprigen Weg begleitet, unterstützt und immer wieder ermutigt haben.

Vor allem aber widme ich diese Arbeit meiner Frau Judith. Ohne Ihre vielen guten Worte, Ihre fortwährende Unterstützung, Ermutigung und Geduld wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ein Dankeschön reicht für all das bei Weitem nicht aus...

Damit geht auch ein ganz besonderer Dank an unsere Kinder Brit Marie und Jan Ole. Und natürlich an meine Eltern, Geschwister und Schwiegereltern. Sie alle haben mich bei der Erstellung dieser Arbeit immer getragen und auch ertragen ☺

Prof. Dr. Achim Schulte möchte ich besonders dafür danken, dass er mir die Bearbeitung dieses spannenden Themas erst ermöglicht hat und mir dafür immer mit Rat und Tat sehr freundschaftlich zur Seite stand. Der Dank gilt Ihm aber auch für all die (geistigen) Freiheiten, die Er mir eingeräumt hat zur Umsetzung der vielen anderen Ideen und Vorhaben. Ich weiß dies sehr zu schätzen.

Ebenso gilt Prof. Dr. Tilman Rost ein herzliches & großes Dankeschön für die Übernahme des Zweitgutachtens und Durchsicht dieses umfangreichen Werkes.

Darüber hinaus möchte ich diese Arbeit meiner Großmutter Elisabeth Brückner widmen. Sie hat einige sehr wichtige Grundsteine für das Studium und damit auch für dieses Vorhaben gelegt. Dann sollte Micha nicht vergessen werden, der mich zu diesem Schritt ermutigt hat. Und natürlich unser gemeinsamer Freund Jojo, der das Ende dieser Arbeit leider nicht erleben konnte. Vor allem aber möchte ich an dieser Stelle Peter Obenauf nennen, da er mir auf meinem wissenschaftlichen Weg immer ein guter Begleiter und ein Lehrer der ganz besonderen Art war.

Ich möchte auch allen danken, mit denen ich das große Vergnügen hatte, das Erzgebirge zu erkunden. Sei es in Rübenau, Lesna oder beim Inka. Das war eine gute Zeit. Vielen Dank an meine Kollegen, Mitstreiter und Mitstreiterinnen: Robert, Anja, Mike, Jens L., Timo, Christian, Achim, Moritz, Jens H., Jan, Joachim, Anna, Michal und all den Studis aus den unzähligen Geländeaufenthalten. Ein herzliches Dankeschön geht auch an Merry Crowson für die spontane und schnelle Durchsicht der englischen Zusammenfassung und an all meine Kollegen und Kolleginnen für ihre Unterstützung und die tolle Arbeitsatmosphäre. Ganz besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Renate Illers und Walter Lange für Klönschnack, Kaffee, Keks und Karten.

Zu guter Letzt sei natürlich all den anderen helfenden Menschen, Einrichtungen und Institutionen gedankt, die mich in vielfältigster Form bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere sind hier die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Landestalsperrenverwaltung, des Staatsbetriebes Sachsenforst, des tschechischen Staatsforstes und der Povodí Ohře, der Stadt Olbernhau, des Erzgebirgskreises und des Bundesarchives in Berlin zu nennen. Ich hoffe nun, niemanden vergessen zu haben.

Vielen, herzlichen Dank all den helfenden Händen und Köpfen !

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Formelverzeichnis	XVII
Abkürzungen und Einheiten	XIX
1 Einleitung	23
1.1 Problemstellung und Auswahl des Untersuchungsgebietes	23
1.2 Fragestellung und Zielsetzung	27
1.3 Aufbau der Untersuchungen	27
2 Hochwasser und Hochwasserschutz	29
2.1 Hochwasser	29
2.1.1 Sturzfluten	32
2.2 Die Entwicklung vom Hochwasserschutz zum Hochwasserrisikomanagement	34
2.3 Das Hochwasserrisikomanagement auf regionaler Ebene in Sachsen	42
2.4 Charakterisierung des dezentralen Hochwasserschutzes	45
2.4.1 Begriffsbestimmung und Definition von (dezentralen) Hochwasserrückhaltebecken	47
2.5 Untersuchungen zum dezentralen Hochwasserschutz	52
2.5.1 Untersuchungen von Wegner am Eschbach im südlichen Taunus	52
2.5.2 Untersuchungen von Tönsmann & Röttcher an der Bauna im Hessischen Bergland	53
2.5.3 Untersuchungen von Assmann an der Elsenz im Kraichgau	53
2.5.4 Untersuchungen von Marenbach & Koehler an der Nahe zwischen Hunsrück und Pfälzer Wald	56

2.5.5	Untersuchungen von Lang & Tönsmann an der Lahn im Rothaargebirge	58
2.5.6	Untersuchungen von Röttcher an der Erpe im Hessischen Bergland	60
2.5.7	Untersuchungen von Matschullat et al. zum Hochwasser- und Naturschutz an der Weißeritz im Osterzgebirge	61
2.5.8	Untersuchungen von Sieker et al. an der Mulde im Erzgebirge und Erzgebirgsvorland	62
2.5.9	Untersuchungen von Ley & Kreiter an Blies, Prims und Thalfanger Bach zwischen Saar-Nahe-Bergland und Pfälzer Wald	64
2.5.10	Untersuchungen von Jeníček an der Chomutovka im Mittleren Erzgebirge	67
2.5.11	Untersuchungen von Reinhardt an der Oberen Flöha im Mittleren Erzgebirge	68
2.5.12	Untersuchungen von Rieger an der Windach im Bayerischen Alpenvorland	73
3	Das Einzugsgebiet der Natzschung	81
3.1	Geologische Einordnung	82
3.2	Lage, Topographie und Geomorphologie	86
3.3	Böden	90
3.4	Landnutzungsformen	94
3.5	Potenzielle Vegetation	97
3.6	Klima	101
3.7	Hydrologie	107
4	Methodik	115
4.1	Hydrologische Modelltypen	115
4.2	Modellstruktur NASIM	116
4.2.1	Einleitung	116
4.2.2	Speicher- und Transportvorgänge im Modell	117
4.2.3	Modelleingangsvariablen für Speicher- und Transportvorgänge	119
4.2.4	Räumliche und zeitliche Diskretisierung der Modelleingangsvariablen	119
4.2.5	Belastungsbildung und -verteilung	121
4.2.6	Belastungsaufteilung	123

4.2.7	Abflusskonzentration	127
4.2.8	Translation der Welle	128
4.2.9	Retention durch Speicherbauwerke	130
4.2.10	Eichfaktoren	132
4.2.11	Modelleignung	134
4.3	Modellerstellung für das Untersuchungsgebiet	135
4.3.1	Geländemodell und Gebietsabgrenzungen	135
4.3.2	Isochronen und Elementarflächen	139
4.3.3	Landnutzung	140
4.3.4	Boden	141
4.3.5	Retentionskonstanten	142
4.3.6	Gerinnequerschnitte	144
4.3.7	Meteorologische und hydrologische Eingangsdaten	144
4.3.8	Abgrenzung des Simulationszeitraums	145
4.3.9	Prüfung der Modellqualität	146
4.4	Simulationsszenarien	148
4.4.1	Bemessungshochwasser	148
4.4.2	Hochwasserrückhaltebecken	149
4.4.3	Maßnahmenszenarien, räumliche Betrachtungsebenen, hydrologische Bezugspunkte und Schutzziele der Simulation	153
5	Modellierung des Untersuchungszeitraums 2002-2008	157
5.1	Einleitung	157
5.2	Charakterisierung der Einzugsgebietshydrologie	157
5.3	Modellqualität	167
6	Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet	181
7	Die hydrologische Wirksamkeit der Hochwasserrückhaltebecken	187
7.1	Hydrologische Wirksamkeit auf lokaler Ebene (LE)	189

7.1.1	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Načetin (LE 1)	189
7.1.2	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Kalek (LE 2)	192
7.1.3	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3)	195
7.1.4	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Rübenau (LE 4)	199
7.1.5	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Gr. Steinbach (LE5)	203
7.1.6	Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Telčský Potok (LE 6)	206
7.1.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	209
7.2	Hydrologische Wirksamkeit auf Einzugsgebietsebene (EE 1-3)	213
7.3	Variantenkombination von Speicherkaskaden	219
8	Diskussion	221
8.1	Einleitung	221
8.2	Betrachtung der Modellqualität	221
8.3	Möglichkeiten des dezentralen Hochwasserschutzes	225
8.4	Die Ergebnisse im Kontext bisheriger Forschungsarbeiten	228
9	Schlussfolgerungen und Ausblick	233
10	Zusammenfassung	235
11	Summary	237
	Literaturverzeichnis	239
	Kartenwerke und Geodaten	251
	Anhang	253

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht über die flach nach Nordwesten abfallende Pultscholle des Erzgebirges und der südöstlichen Begrenzung durch den Ohře-Graben (deutsch-tschechische Staatsgrenze <i>rot</i> , Einzugsgebiet der oberen Flöha <i>grau</i> , Einzugsgebiet der Natzschung <i>blau</i> umrahmt) (Datenquelle: SRTM-DGM USGS; © GeoBasis-DE / BKG <2015>, Daten verändert))	24
Abb. 2: Übersicht über das Einzugsgebiet der Natzschung (Načetiňský Potok)	25
Abb. 3: Hochwasser in Rothenthal (l.o.) und in Olbernhau (r.o.) im August 2002 und in Olbernhau im März 2006 (l.u., r.u.)	30
Abb. 4: Idealtypischer Zyklus im Hochwasserrisikomanagement (verändert nach LAWA (2010))	38
Abb. 5: Märzhochwasser 2006 am Rübenauer Bach im Oberlauf der Natzschung	44
Abb. 6: Schematische Darstellung der Hochwasserretention in der fließenden Welle	48
Abb. 7: Klassifizierung kleiner Stauanlagen bzw. kleiner Hochwasserrückhaltebecken nach DWA (2013b)	49
Abb. 8: Standorte potenzieller dezentraler Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet der Natzschung (Gewässer; Speichernummer): a.) Bily Potok (N13); b.) Natzschung (N15); c.) Rübenauer Bach (N8); d.) Großer Steinbach (N6); e.) Telčský Potok (N3); f.) Telčský Potok (N5); g.) Telčský Potok (N2), h.) Telčský Potok (N1). Quelle: A, B, D, E, F Bölscher (2011); C Pfaff & Sendlewski (2005); G, H Schatten (2005)	51
Abb. 9: Geländeformen und Landnutzung im mittleren und oberen Einzugsgebiet der Natzschung	81
Abb. 10: Geologische Übersicht (Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 1995 (LFUG, 1995))	83
Abb. 11: Topographie und Morphologie des Einzugsgebietes der Natzschung	87
Abb. 12: Hangneigungen im Einzugsgebiet der Natzschung	88
Abb. 13: Braunerden auf Wald- (l.) und Weidestandorten (r.) mit unterschiedlich starken Skelettanteilen in schluffiger Matrix (Fotos: Mike Ramelow 2004)	91
Abb. 14: Bodentypenverteilung im Einzugsgebiet der Natzschung (modifiziert, nach Ramelow 2006)	92
Abb. 15: Land- und forstwirtschaftliche Nutzungsformen (l. Blick Süd; r. Blick Nord)	95
Abb. 16: Verteilung der Landnutzungsformen im Einzugsgebiet der Natzschung	96
Abb. 17: Mittlere langjährige Monatssummen der Niederschläge an den Klimastationen Olbernhau und Kühnhaide für den Zeitraum 1961-1990 (Datenquelle DWD)	103
Abb. 18: Klimadiagramm Station Zinnwald-Georgenfeld	104

Abb. 19: Einzugsgebietaufteilung mit Hauptgewässern _____	107
Abb. 20: Pegel Rothenthal am Unterlauf der Natzschung _____	109
Abb. 21: Jahresgang des mittleren Abflusses und des mittleren Hochwasserabflusses am Pegel Rothenthal (langjährige Monatsmittel MQ und MHQ für den Zeitraum 1929-2009) _____	111
Abb. 22: Mittelwasserführung am Oberlauf der Natzschung (l.o.), am Telčský Potok (l.m.o.), am Zusammenfluss von Telčský Potok u. Natzschung (l.m.u.), an der Flöha in Olbernhau (l.u.); Hochwasserführung während der Schneeschmelze (03.2006) am Bily Potok (r.o.), am Zusammenfluss von Bily Potok u. Natzschung (r.m.o), am Zusammenfluss von Natzschung u. Telčský Potok (r.m.u.), am Zusammenfluss von Natzschung u. Flöha (r.u.) _____	112
Abb. 23: Jahresgang des Hochwasserabflusses am Pegel Rothenthal (langjährige monatliche Höchstwerte HQ für den Zeitraum 1929-2009) _____	113
Abb. 24: Speicher- und Transportvorgänge in NASIM (Hydrotec (2009)) _____	118
Abb. 25: Simulationseinheit untergliedert in Elementarflächen bestehend aus Einzugsgebietsgrenze, Boden- und Landnutzungsinformationen (HRU) (Hydrotec, 2009) _____	120
Abb. 26: Ablauf der Modellerstellung _____	135
Abb. 27: Struktur der Fließgewässer, Teileinzugsgebiete bzw. Modellsystemelemente und deren Auslasspunkte (rot) _____	137
Abb. 28: Modell-Systemplan mit Systemelementen und Abflusswegen (ohne Rückhalteräume) _____	138
Abb. 29: Verteilung der Elementarflächen (HRU) innerhalb der Teilgebiete (rot) _____	139
Abb. 30: Modellinterner Aufbau eines Gerinnequerprofils mit zugehörigen Strickler- Beiwerten am Beispiel des Teilgebietes Nr. 430 _____	144
Abb. 31: Lage der potenziellen Schutzziele und Bezugspunkte für die Modellierung und Wirkungsabschätzung (Ortschaften und Bebauungen) _____	154
Abb. 32: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss (Messung) für die Klimastation Olbernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 05/2002 – 10/2005) _____	158
Abb. 33: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss (Messung) für die Klimastation Olbernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 11/2005 – 10/2008) _____	159
Abb. 34: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Wassergehalt Schnee und Abfluss (Modell und Messung) für die Klimastation Olbernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 05/2002 – 10/2005) _____	169

Abb. 35: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Wassergehalt Schnee und Abfluss (Modell und Messung) für die Klimastation Olbernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 11/2005 – 10/2008)	170
Abb. 36: Gewässerkundliche Hauptwerte (MNQ, MQ, MHQ; hydrologisches Jahr und Halbjahr) am Pegel Rothenthal für die Gesamtzeiträume 2002-2009 und 1929-2009 im Vergleich zu Modellergebnissen	174
Abb. 37: Gewässerkundliche Hauptwerte (MNQ, MQ, MHQ) am Pegel Rothenthal für unterschiedliche Beobachtungszeiträume im Vergleich zu Modellergebnissen	175
Abb. 38: Augusthochwasser 2002: Abflussganglinie am Pegel Rothenthal (Modell und Messung) und Änderung der Bodenfeuchte und Infiltration auf einem Waldstandort (Braunerde)	178
Abb. 39: Die Lage potenzieller Hochwasserspeicher (Teiche und trockene Rückhaltebecken) im Einzugsgebiet der Natzschung	182
Abb. 40: Die Lage der Bezugspunkte in den Teileinzugsgebieten (mit einzelnen Systemelementen, SE-Nummern in schwarz) hinsichtlich der Wirksamkeitsbetrachtung der Hochwasserrückhalteräume auf lokaler Ebene (LE) und auf Einzugsgebietsebene (EE)	188
Abb. 41: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Načetin (LE 1)	189
Abb. 42: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Kalek (LE 2)	192
Abb. 43: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3)	195
Abb. 44: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Rübenau (LE 4)	199
Abb. 45: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Großer Steinbach (Mündung, LE 5)	203
Abb. 46: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Telčský Potok (Mündung, LE 6)	206
Abb. 47: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Pegel Rothenthal (EE 1)	215
Abb. 48: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Gemeinde Rothenthal (EE 2)	216
Abb. 49: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Natzschung Mündung (EE 3)	216

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Überblick über simulierte Maßnahmentypen, Einzugsgebiete und verwendete Modelle; verändert nach Kreiter (2007)	65
Tab. 2: Örtliche Scheitelreduktion und -verzögerung für HRBs im Einzugsgebiet der Oberen Flöha; verändert nach (Reinhardt, 2010)	70
Tab. 3: Umsetzbare dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet der Windach nach Rieger (2012)	74
Tab. 4: Untersuchte Hochwasserereignisse an der Windach zur Wirksamkeitsanalyse dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, verändert nach Rieger (2012)	75
Tab. 5: Randbedingungen für die Untersuchung der Wirksamkeit dezentraler Kleinrückhalte an der Windach nach Rieger (2012)	76
Tab. 6: Scheitelverzögerung der Hochwasserwelle am Pegel Greifenberg bei Umsetzung des dezentralen Maßnahmenkonzeptes an der Windach (verändert nach Rieger 2012)	79
Tab. 7: Potenzielle Vegetationseinheiten im Einzugsgebiet der Natzschung	97
Tab. 8: Jahresmitteltemperaturen und Jahresmittelniederschlag im Erzgebirge nach Kaulfuß & Kramer (2000)	101
Tab. 9: Mittlere jährliche Klimawerte für ausgesuchte Räume des Erzgebirges im West-Ost-Verlauf; zusammengestellt und verändert nach Mannsfeld & Syrbe (2008); Daten für Dresden und Chemnitz nach DWD-Zeitreihen 1961-1990 (DWD, 2011)	102
Tab. 10: Klimadaten der Level-II Station Olbernhau für den Zeitraum 1997-2003	105
Tab. 11: Statistische Starkniederschlagshöhen für das Untersuchungsgebiet (DWD, 2006)	106
Tab. 12: Gewässerkundliche Hauptwerte am Pegel Rothenthal (LFULG, 2011c)	110
Tab. 13: Hochwasserscheitelabflüsse (HQ) bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (T); $HQ_T [m^3/s]$	113
Tab. 14: Die zehn größten Hochwasserereignisse an der Natzschung	114
Tab. 15: Belastungsformen, Abflusskonzentration und Wellentranslation im Modell	117
Tab. 16: Einfluss von Eichfaktoren auf Modellsystemänderungen	133
Tab. 17: Parametrisierung der Landnutzungsformen	140
Tab. 18: Retentionskonstanten	143
Tab. 19: Einstufung für das Nash-Sutcliffe Gütemaß nach Moriasi et al. (2007)	148
Tab. 20: Statistische Hochwasserabflüsse für den Pegel Rothenthal $HQ(T)$	149
Tab. 21: Charakterisierung des Wirkungsgrades von dezentralen, kleinen Hochwasserrückhalteräumen in Bezug zum Bemessungshochwasser	152

Tab. 22: Variantenrechnungen und Betrachtungsebenen für dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen _____	153
Tab. 23: Schutzziele im Einzugsgebiet der Natzschung _____	155
Tab. 24: Unregelmäßigkeiten in der Abflussganglinie am Pegel Rothenthal _____	162
Tab. 25: Vergleich von gewässerkundlichen Hauptwerten auf Basis von Messungen zwischen 1929-2009 und 2002-2009 – Pegel Rothenthal _____	163
Tab. 26: Hochwasserscheitelabflüsse oberhalb des MHQ (15 m ³ /s) im Untersuchungszeitraum 2002-2008 und deren Eintrittswahrscheinlichkeit _____	164
Tab. 27: Klimatische Wasserbilanz (KWB) im Vergleich zum gemessenen Abfluss am Pegel Rothenthal _____	166
Tab. 28: Hydrologische Kennwerte potenzieller Standorte für HRB _____	183
Tab. 29: Wirksamkeit der potenziellen HRB für ausgewählte Schutzziele / Ortschaften im Einzugsgebiet der Natzschung _____	184
Tab. 30: Räumliche Bezugsebenen zur Wirksamkeitsbetrachtung der Hochwasserrückhaltemaßnahmen _____	187
Tab. 31: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Načetin LE 1 _____	190
Tab. 32: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Kalek LE 2 _____	193
Tab. 33: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer LE 3 _____	196
Tab. 34: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Rübenau LE 4 _____	200
Tab. 35: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Großer Steinbach LE 5 _____	204
Tab. 36: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Telčský Potok LE 6 _____	207
Tab. 37: Übersicht über die hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ an den Bezugspunkten LE 1 - LE 6 _____	210
Tab. 38: Übersicht über den Wirkungsgrad und die hydrologischen Eigenschaften der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ an den Bezugspunkten LE 1- LE 6 _____	211
Tab. 39: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ auf Einzugsgebietsebene (EE1-EE3) _____	218
Tab. 40: Wirksamkeitsbetrachtung von Hochwasserrückhaltebecken für ein HQ ₁₀₀ bei Kombination verschiedener Einzugsgebiete _____	220
Tab. 41: Effektiver Stauraum (HQ ₁₀₀) und effektiver spezifischer Stauraum _____	227
Tab. 42: Durchmesser der Rohrdrosseln am Speicherauslass _____	253

Formelverzeichnis

Formel 1:	Potenzielle Evapotranspiration _____	124
Formel 2:	Aktuelles Sättigungsdefizit der Luft _____	124
Formel 3:	Sättigungsdampfdruck der Luft für $T > 0^{\circ}\text{C}$ über Wasser _____	124
Formel 4:	Aktuelle Infiltrationsrate _____	126
Formel 5:	Potenzielle Infiltration (linear) _____	126
Formel 6:	Exfiltration (linear) _____	126
Formel 7:	Abfluss im offenen Gerinne _____	129
Formel 8:	Fließgeschwindigkeit nach Gaukler-Manning-Strickler für offene Gerinne _____	129
Formel 9:	Kontinuitätsgleichung _____	131
Formel 10:	Drosselabflussgleichung _____	131
Formel 11:	Retentionskonstante _____	142
Formel 12:	Gütemaß nach Nash-Sutcliffe _____	147
Formel 13:	Spezifisches Speichervolumen / spezifischer Stauraum _____	151

Abkürzungen und Einheiten

a	Jahr
AE	Einzugsgebietsfläche
AG	Arbeitsgemeinschaft
AKNZ	Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz
ATKIS	Amtl. topogr. Karteninformationssystem der Bundesrepublik Deutschland
Basisabfluss	Grundwasserabfluss
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGBI	deutsches Bundesgesetzblatt
BK50	Bodenkarte des Freistaates Sachsen 1:50.000
BK _{Konz}	Bodenkonzeptkarte des Freistaates Sachsen 1:25.000
BP	Before Present (Present = Jahr 1950)
CLC	Corine Land Cover Daten
CORINE	Coordination of Information on the Environment
D	Dauer / Dauerstufen für statistische Niederschlagshöhen
dam ³	Kubikdekameter oder 10 ³ Kubikmeter
DIBAVOD	Digitale wasserwirtschaftliche Basisdaten der Tschechischen Republik
DINGHO	Interreg IIIA-Projekt: Dezentraler Integrierter Grenzübergreifender Hochwasserschutz in den deutsch-tschechischen Einzugsgebieten der Kammlagen des Mittleren Erzgebirges
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DGM	Digitales Geländemodell
D _N	Niederschlagsdauer
DN	Durchmesser Nennweite
DGPS	Differenzielles globales Positionierungssystem
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V
DWD	Deutscher Wetterdienst
EE	Einzugsgebietsebene (räumlicher Bezugspunkt für Simulationsergebnisse)
ETO	Evapotranspiration
ET _p	Potenzielle Evapotranspiration

EU-HWRM-RL	EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
EZG	Einzugsgebiet eines Gewässers
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FFH	Fauna und Flora Habitat (vgl. FFH-Richtlinie bzw. Richtlinie 92/43/EWG)
FUB	Freie Universität Berlin
GK	Geologische Karte
GIS	Geographisches Informationssystem
h/a	Stunde pro Jahr
ha	Hektar, 1 ha = 10.000 m ²
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
hm ³	Kubikhektometer 1hm ³ = 1 Million oder 10 ⁶ Kubikmeter
HHQ	Höchster jemals gemessener Hochwasserscheitelabfluss
HQ	Hochwasserscheitelabfluss
HQ _(T)	Hochwasserscheitelabfluss HQ bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit (T)
HRB	Hochwasserrückhaltebecken
HRU	Hydrological Response Units (Elementarflächen in NASIM)
HWSK	Hochwasserschutzkonzept
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
Interflow	Zwischenabfluss
K	Retentionskonstante
kf	substratspezifische hydraulische Leitfähigkeit
KS	landnutzungsspezifische Oberflächenrauheit in NASIM
k _{ST}	Strickler-Beiwert zur Beschreibung der Rauheit (Vorland und Gerinne)
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung - Auswertung des DWD
KWB	klimatische Wasserbilanz
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LE	lokale Ebene (räumlicher Bezugspunkt für Simulationsergebnisse)
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
XX	

LGM	Last Glacial Maximum (Zeit der maximalen Vereisung innerhalb der Weichsel- bzw. Würm-Kaltzeit)
LTV	Landestalsperrenverwaltung Sachsen
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MQ	Mittelwasserabfluss
Mio.	Million(en)
Mrd.	Milliarde(n)
m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde
m/s	Meter pro Sekunde
m. ü. HN	Meter über Höhennull, Pegel Kronstadt
m ü. NN	Meter über Normalnull, Pegel Amsterdam
N, N _T	Niederschlag, Niederschlag mit einem Wiederkehrintervall von T Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von T ⁻¹
N01-15	Nummerierungen simulierter Hochwasserrückhaltebecken
N-A-Modell	Niederschlag-Abfluss-Modell
NASIM	Niederschlag-Abfluss-Modell der Firma Hydrotec©
NATURA 2000	Netz von Schutzgebieten innerhalb der Europäischen Union nach den Maßgaben der Richtlinie 92/43/EWG (FFH-Richtlinie)
NQ	Niedrigwasserabfluss
NSE	Nash-Sutcliffe Effizienzgrad (Modell-Gütemaß)
PNV	Potenzielle natürliche Vegetation
Q	Abfluss [m ³ /s; l/s]
q	Abflusssspende l/(s*km ²)
QR	Abflussregelabgabe in m ³ /s
RetBas	Retentionskonstante Grundwasser bzw. Basisabfluss (NASIM)
RetInt	Retentionskonstante Zwischen bzw. Interflowabfluss (NASIM)
RetOb	Retentionskonstante Oberflächenabfluss (NASIM)

SächsWg	Sächsisches Wassergesetz
SH	Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober), zweite Hälfte des hydrologischen Jahres
SMUL	Sächsisches Ministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STRASA	Starkniederschläge für Sachsen (i.w.S. spezifische KOSTRA-Daten des DWD)
sV	spezifisches Volumen / spezifischer Stauraum
t	Zeit
T	Temperatur mit K (Kelvin) oder °C (Celsius)
(T)	Eintrittswahrscheinlichkeit / Wiederkehrintervall eines (Hochwasser)ereignisses
TIN	Triangulated Irregular Network
TK	Topographische Karte
TU	Technische Universität
USGS	United States Geological Survey
VEB	Volkseigener Betrieb; ehemals Industrie- und Dienstleistungsbetriebe in der DDR
Vol.	Volumen
WASIM-ETH	Water Balance Simulation Model ETH
WBS FLAB	Wissensbasiertes System - Flächen gleicher Abflussbildung
WH	Winterhalbjahr (November bis April), erste und namensgebende Hälfte des hydrologischen Jahres
ZFL	Zeitflächenfunktion in NASIM

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Auswahl des Untersuchungsgebietes

Hochwasserereignisse sind ein natürliches Phänomen hydrologischer Systeme, um kurzfristig überschüssiges Wasser abzuführen. Dauer und Intensität sind eine Funktion der meteorologischen Situation, der Topographie, der räumlichen Ausstattung und Nutzungsweise eines Flusseinzugsgebietes. Ein Hochwasserrisiko besteht, wenn Menschen, Wohngebiete, Infrastruktureinrichtungen oder Industrieansiedlungen u.a.m. betroffen sein können. Um diesem Risiko zu begegnen, greift man auf Schutzmaßnahmen und Vorsorgekonzepte zurück (Patt & Jüpner, 2013). Allen Schutzmaßnahmen ist dabei zu eigen, dass sie einen Schutz bis zu einem definierten Schutzziel bieten. Dies beinhaltet aber auch die Gefahr des Versagens der Schutzmaßnahmen. Solche Fälle sind in den letzten 20 Jahren an Rhein, Elbe, Donau und Oder immer wieder aufgetreten (Kundzewicz et al., 2012; LAWA, 1995; Patt & Jüpner, 2013).

In weiten Teilen des Einzugsgebietes der Elbe traten zwischen dem 10.-13. August 2002 im Zuge einer Vb-Wetterlage extreme Regenfälle auf. Dem war eine intensive Vorregenphase Anfang des Monats vorausgegangen und führte zu einer starken Aufsättigung der Böden. Die Starkniederschläge verursachten sowohl an den großen Flussläufen wie Moldau, Elbe und Mulde als auch in den obersten Einzugsgebieten wie an der Flöha und Müglitz im Erzgebirge schwere Überschwemmungen und Schäden. Das Gebiet um Zinnwald-Georgenfeld im Osterzgebirge erhielt in der Zeit zwischen dem 12.08., 4:00 MEZ und dem 13.08., 4:00 MEZ über 350 mm Niederschlag (LFULG, 2009). Ähnlich war die Situation in Olbernhau im Mittleren Erzgebirge (LFULG, 2009).

Flöha, Natzschung und Schweinitz traten über die Ufer und führten zu schweren Schäden im deutschen und tschechischen Teil des Mittleren Erzgebirges (Schulte et al., 2007). Die Talsperre Rauschenbach oberhalb von Olbernhau war aufgrund von Wartungsarbeiten bis auf 3 Millionen Kubikmeter entleert. Der Freiraum von 12 Millionen Kubikmeter konnte die Zuflüsse der obersten Flöha vollständig aufnehmen und verringerte sich innerhalb von 48 Stunden auf 6 Millionen Kubikmeter (LFULG, 2009). Schweinitz und Natzschung erreichten hingegen mit der vollen Abflussspitze die Konfluenzen mit der Flöha oberhalb von Olbernhau.

Annähernd 3 Stunden nach dem ersten Niederschlagsmaximum an der Waldklimastation Olbernhau wurde am Pegel Rothenthal (Natzschung; vgl. Abb. 2: unten) der Maximalabfluss mit einem Hochwasserscheitel von $89 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert. Dieser Abfluss war 63 mal höher als der mittlere Abfluss über das Jahr, 7 mal höher als ein durchschnittliches Hochwasser und doppelt so hoch wie das bisherige HHQ vom 24. Juni 1975 (LFULG, 2011c). Die Natzschung trug an der Mündung zur Flöha mit fast $100 \text{ m}^3/\text{s}$ zum Gesamtabfluss von $315 \text{ m}^3/\text{s}$ in Olbernhau bei und stellte sich somit als einer der kritischen Hochwasserlieferanten zur oberen Flöha dar.

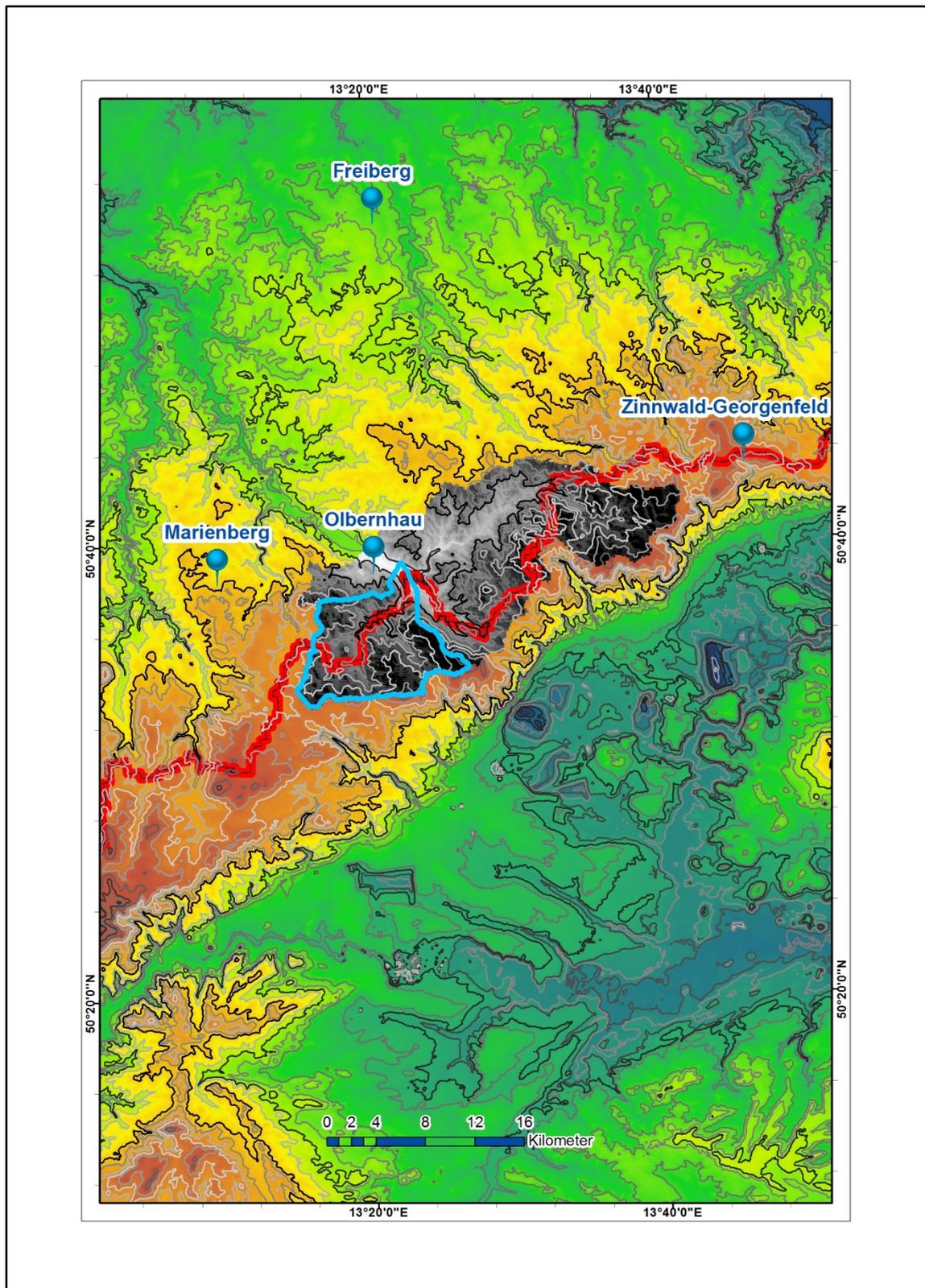


Abb. 1: Übersicht über die flach nach Nordwesten abfallende Pultscholle des Erzgebirges und der südöstlichen Begrenzung durch den Ohre-Graben (deutsch-tschechische Staatsgrenze *rot*, Einzugsgebiet der oberen Flöha *grau*, Einzugsgebiet der Natzschung *blau* umrahmt) (Datenquelle: SRTM-DGM USGS; © GeoBasis-DE / BKG <2015>, Daten verändert)

Während die obere Flöha im Zuge der Forschungsarbeiten von Reinhardt (2010) bearbeitet wurde, konzentriert sich vorliegende Untersuchung auf die Hochwasserretentionspotenziale im Einzugsgebiet der Natzschung. Das Untersuchungsgebiet der Natzschung (tschechisch: Načetínský Potok) befindet sich im Mittleren Erzgebirge, südwestlich der Stadt Olbernhau und umfasst bis zur Mündung in die obere Flöha eine Fläche von 85 km², davon entfallen 61 km² auf die Tschechische Republik und 24 km² auf die Bundesrepublik Deutschland (Bundesland Sachsen). Die Größe und geographische Ausstattung des Untersuchungsgebietes ist typisch für den Erzgebirgsraum.

Für die Stadt Olbernhau (vgl. Abb. 2: unten), die sich direkt unterhalb des Einzugsgebietes der Natzschung und Schweinitz an der oberen Flöha befindet, kann ein Hochwasser bis zu einem HQ₂₀ schadensfrei abgeführt werden. Größere Hochwasserereignisse sind nur mit Hilfe der Anlage von Schutzmaßnahmen in und oberhalb der Stadt Olbernhau zu bewältigen (LTV, 2004; Schulte et al., 2007).

Die Gewässerkundlichen Jahrbücher wie auch andere Quellen zeigen, dass es immer wieder in Folge von Schneeschmelzen oder sommerlichen Starkniederschlägen zu schweren Hochwässern im Einzugsgebiet der oberen Flöha gekommen ist (LFULG, 2009; LTV, 2004). Historische Quellen nennen bspw. das Hochwasser von 1892, das im gesamten Stadtgebiet schwere Schäden anrichtete. Die Pegelaufzeichnungen seit dem Jahre 1921 zeigen für die Natzschung auf, dass es zuletzt 1975 zu einem großen Hochwasser kam (LFULG, 2011c).

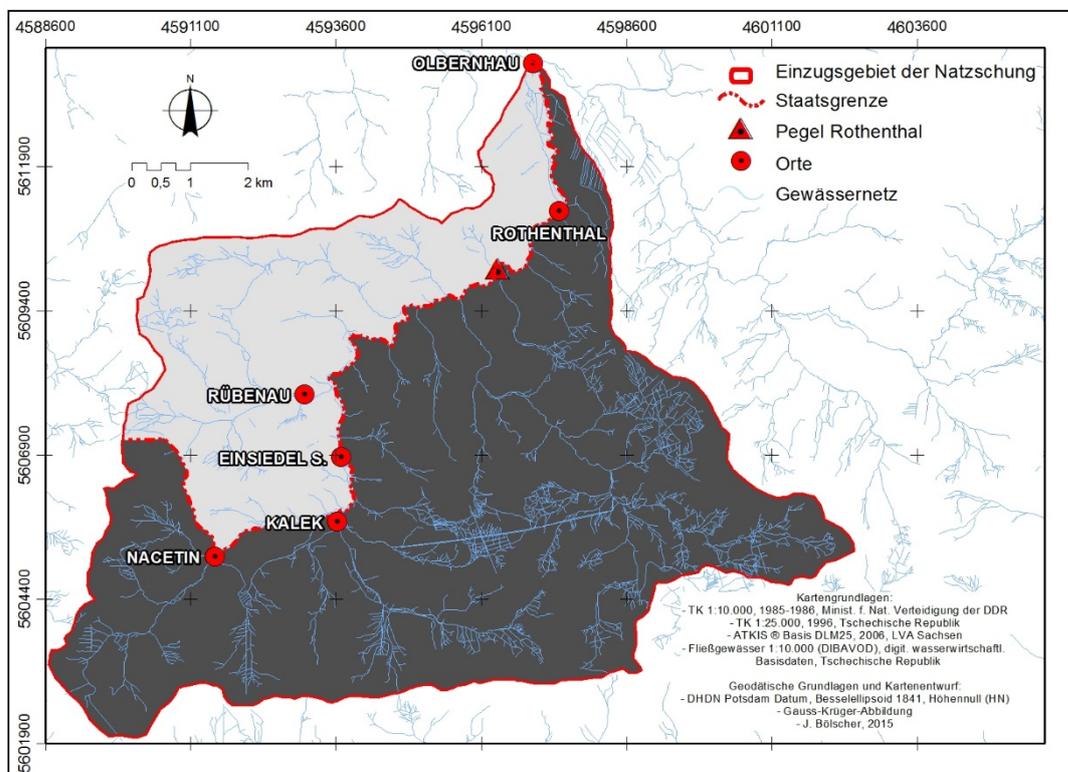


Abb. 2: Übersicht über das Einzugsgebiet der Natzschung (Načetínský Potok)

Ein grundsätzliches Problem für die Einzugsgebiete im Erzgebirge ist deren morphologische und topographische Situation. Sie ist oftmals dadurch gekennzeichnet, dass die obersten Einzugsgebietsbereiche entlang und unterhalb der Kammlagen über ein Relief verfügen, das als mäßig geneigte, hügelige Hochfläche beschrieben werden kann. Die Auslässe solcher Gebiete sind durch Kerbtäler geprägt, die sowohl starke Hangneigungen als auch ein starkes Sohlgefälle aufweisen. Dies führt dazu, dass sich die zum Abfluss kommenden Niederschläge zügig konzentrieren können und spätestens ab Beginn der Kerbtalbereiche aufsummieren und von dort schnell abfließen. Diese Situation birgt in Kombination mit Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen die Gefahr hoher Abflüsse und dem schnellen Anstieg von Hochwasserwellen. In den steilen Abflussbahnen der Kerbtäler können sich zudem so hohe Sohlschubspannungen ausbilden, dass es zu einer Mobilisierung der Sohlsedimente kommt, die unterhalb eine große Schädigung zeigen und zur Verringerung des Fließquerschnittes führen können (Borga et al., 2011; LFUG, 2004a; RMD, 2005).

Damit steigt insbesondere in den engen und steilen Kerbtälern das Hochwasser- und Schadensrisiko. Am Unterlauf der Natzschung konnte dies im August 2002 für die Ortslagen Rothenthal und Grünthal dokumentiert werden. Gleichzeitig ist bedingt durch die Topographie dieser Täler kein ausreichendes Stauvolumen vorhanden, um Hochwasserschutz zu betreiben. Ortschaften wie Olbernhau liegen unterhalb der Mündung solcher Kerbtalbereiche und sind daher einem besonderen Hochwasserrisiko ausgesetzt.

Im oberen Einzugsgebiet der Flöha lagen im August 2002 die Schäden alleine um die Stadt Olbernhau bei 80 Mio. € (Schulte et al., 2007). Es hatten sich sowohl in der Stadt Olbernhau als auch im gesamten Einzugsgebiet der oberen Flöha gravierende Hochwasserschäden eingestellt.

Sowohl die enge Tallage von Olbernhau als auch die Schäden im Einzugsgebiet machen deutlich, dass ein Hochwasserschutz oberhalb von Olbernhau an den Zubringern zur Flöha und im Oberlauf der Flöha selbst ansetzen sollte (Reinhardt, 2010; Reinhardt et al., 2011; Schulte et al., 2009).

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund sollte untersucht werden, ob es geeignete Möglichkeiten zur dezentralen Hochwasserretention im Einzugsgebiet der Natzschung gibt und welche Wirkung implementierte Maßnahmen in Bezug auf das Bemessungshochwasser eines HQ_{100} am Pegel Rothenthal (Natzschung) haben. Mögliche Maßnahmen sollten im Sinne von Assmann (1999) dezentraler Natur sein, einen lokalen Retentionseffekt für Orte in den obersten Einzugsgebieten aufweisen und darüber hinaus auch eine überörtliche Wirkung auf Einzugsgebietsebene zeigen. Aus den Überlegungen resultierten drei zentrale Fragestellungen für die Untersuchungen:

1. Können die hydrologischen Verhältnisse für das Einzugsgebiet der Natzschung unter Berücksichtigung von Hochwasserereignissen unterschiedlicher Dauer und Höhe mit Hilfe des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM hinreichend genau abgebildet werden?
2. Ist im Einzugsgebiet der Natzschung durch Ausnutzung kleinskaliger, natürlich oder anthropogen bedingter Strukturen in Form von kleinen Rückhaltebecken eine Hochwasserretention für ein HQ_{100} möglich?
3. Welche Wirkungen zeigen potenziellen Maßnahmen in Bezug auf das Bemessungshochwasser eines HQ_{100} für unterschiedliche räumliche Skalen?

Aufbauend auf der skizzierten Problemstellung und den daraus entwickelten Fragen verfolgt die vorliegende Untersuchung damit drei Ziele:

- I. Die Abbildung der hydrologischen Verhältnisse für das Einzugsgebiet der Natzschung mit Hilfe des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM unter Berücksichtigung von Hochwasserereignissen unterschiedlicher Dauer und Höhe.
- II. Die Verortung und Bemessung von kleinskaligen, natürlich vorhandenen oder anthropogen geschaffenen Potenzialen in Form von kleinen Rückhaltebecken für den Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Natzschung.
- III. Die Quantifizierung des Einflusses kleinskaliger Hochwasserrückhaltepotenziale auf Hochwasserereignisse definierter Dauer und Intensität für unterschiedliche räumliche Skalen.

1.3 Aufbau der Untersuchungen

Als Vorarbeit zum Forschungsprojekt DINGHO an der Freien Universität Berlin (Dezentraler Integrierter Grenzübergreifender Hochwasserschutz (Schulte et al., 2007)), wurde in einer Pilotphase mit den Modellierungsarbeiten an der Natzschung begonnen, die sich zu Beginn bis zum Pegel Rothenthal erstreckten und später bis zur Mündung erweitert wurden (vgl. Abb. 2: S.25). Gemeinsames Anliegen des Forschungsprojektes war es, die dezentralen Schutzmöglichkeiten für die Stadt Olbernhau zu lokalisieren und zu quantifizieren. Aufbauend auf den an der Natzschung gesammelten Erfahrungen wurde im Zuge des DINGHO-Projektes das

Modellierungsgebiet auf die obere Flöha und Schweinitz erweitert (vgl. Abb. 1: S.24) und durch Reinhardt und Ramelow bearbeitet (Reinhardt, 2010). Der Pegel Rothenthal wurde vor diesem Hintergrund als Schnittstelle und Datenübergabepunkt der verschiedenen Modelle gewählt. Weiterhin wurde jedoch für das Einzugsgebiet der Natzsung modellintern bis zur Mündung der Natzsung in die Flöha gerechnet, um auch den Einfluss der Maßnahmen auf die weit gestreckte Ortslage Rothenthal berücksichtigen zu können.

Aufbauend auf der Problemstellung, Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchungen wird zunächst die Entwicklung des Hochwasserschutzgedankens in der Bundesrepublik Deutschland im Zuge der letzten zwei Jahrzehnte skizziert und der Stand der Forschung zum dezentralen Hochwasserschutz aufbereitet. Der Fokus liegt bedingt durch die Fragestellung der Arbeit und durch die Lage des Untersuchungsgebietes auf vergleichbaren Arbeiten aus deutschen Mittelgebirgsräumen. Im Vordergrund stehen daher Untersuchungen, welche sich mit der Wirksamkeitsbetrachtung kleiner dezentral angeordneter Hochwasserrückhaltebecken beschäftigen haben. Darüber hinaus existiert eine Fülle weiterer Arbeiten, welche den dezentralen flächenhaften Hochwasserrückhalt zum Thema haben. Im folgenden Kapitel schließt sich eine Beschreibung des Untersuchungsgebietes an, um die Randbedingungen der Modellierung aufzuzeigen. Im Kapitel Methodik werden Prinzipien und Strukturen des verwendeten Niederschlag-Abfluss-Modells behandelt und es wird erläutert, welche Datengrundlagen in welcher Form im Modell Verwendung gefunden haben. Die Ergebnisse der Untersuchung werden unter drei Aspekten betrachtet. Ersterer beschäftigt sich mit der Qualität des hydrologischen Modells für die Natzsung. Weiterhin wird dargestellt, welche dezentralen Potenziale in Form von kleinen Hochwasserrückhalteräumen existieren und drittens wird die Wirksamkeit der Maßnahmen in Bezug auf ein Bemessungshochwasserereignis auf unterschiedlichen räumlichen Skalen betrachtet. Abschließend werden die Ergebnisse in den Kontext der vorliegenden Untersuchungen gestellt, bewertet und es wird ein kurzer Ausblick gegeben, welche weiteren Aspekte sich aus der Diskussion ergeben.

2 Hochwasser und Hochwasserschutz

2.1 Hochwasser

Unter Hochwasser wird im wissenschaftlichen Sinne ein zeitlich begrenztes Anschwellen eines Wasserkörpers verstanden, bei dem der Abfluss einen definierten Grenzwert überschreitet (Baumgartner & Liebscher, 1996). Ein solcher Grenzwert errechnet sich über langjährige Beobachtungsreihen und liegt damit nicht für jedes Gewässer vor. Alternativ können als Hochwasser solche Ereignisse eingestuft werden, die eine Überschreitung des bordvollen Abflusses bewirken. Unter „bordvoll“ wird der Zustand verstanden, in dem ein Gewässer sein natürliches Gerinnebett vollständig ausfüllt und bei weiterem Anstieg in die Aue ausuferet.

Das Wasserhaushaltsgesetz der Bundesrepublik Deutschland definiert Hochwasser als die zeitlich begrenzte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land durch oberirdische Gewässer oder durch in Küstengebiete eindringendes Meerwasser (Deutscher Bundestag, 2009).

Es können mindestens fünf Typen von Überschwemmungen unterschieden werden: Sturmfluten, Flussüberschwemmungen als Ergebnis ausgiebiger, langanhaltender Niederschläge, Sturzfluten als Ergebnis intensiver, zumeist nur kurzzeitiger Niederschläge, Muren als Abflussereignisse mit einem Feststoffanteil von min. 30% und Tsunamis als bspw. durch Erdbeben induzierte Schwerewellen (Kron, 2005; Patt & Jüpner, 2013).

Die Gemeinsamkeit der aufgezeigten Hochwassertypen kann anhand mindestens zweier Merkmale festgemacht werden. Sie sind allesamt natürliche hydrologische Phänomene. Weiterhin haben sie aufgrund potenzieller gesellschaftlicher Risiken eine hohe gesellschaftspolitische, ökonomische und wissenschaftliche Bedeutung und erzeugen einen politischen Handlungsbedarf. Sie erfordern jedoch je nach geographischen Verhältnissen unterschiedliche Vorsorge- und Abwehrmaßnahmen.

Dazu schreibt Kron (2005, S.123), dass "Überschwemmungen [...] neben Stürmen die häufigste Ursache für Schäden aus Naturereignissen [sind]. Rund ein Drittel aller Schadensereignisse und ein Drittel der volkswirtschaftlichen Schäden sind weltweit auf die Folgen von Hochwasser zurückzuführen; fast die Hälfte aller Menschen, die in den vergangenen Jahrzehnten bei Naturkatastrophen getötet wurden, waren Hochwasseropfer." Hochwasser führten alleine in den letzten zwei Jahrzehnten immer wieder zu schwersten Überschwemmungen, den damit verbundenen Schäden und dem Verlust von Menschenleben. Der bezifferte Gesamtschaden belief sich zwischen 1995 und 2004 weltweit auf 154 Mrd. US\$, betrachtet man alleine die Dekade der neunziger Jahre, so lag der volkswirtschaftliche Schaden mit 245 Mrd. US\$ noch weitaus höher (Kron, 2005).

Das Dartmouth Flood Observatory in Colorado führt ein Archiv über weltweit aufgetretene Hochwasserereignisse, welches bis 1985 zurückreicht (Brakenridge, 2013). Alleine bis Ende November 2013 wurden für das Jahr 2013 über 90 Hochwasserereignisse erfasst. Davon erreichten 43

Ereignisse die höchste Magnitude von über 6. Die Magnitude stellt ein Maß dar, welches die Dauer des Hochwassers, die betroffene Fläche und die Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Die Daten des Archivs unterstreichen die Zahlen der Münchener Rückversicherung und zeigen die Notwendigkeit von Forschung und Umsetzung im Bereich des Hochwasserschutzes.

Kundzewicz et al. (2012) führen dazu aus, dass zwar die extremsten Hochwasserereignisse mit einer hohen Anzahl von Todesopfern und immensen volkswirtschaftlichen Schäden speziell in Südasien auftraten, jedoch alleine schon in Europa eine Vielzahl von Ereignissen zu verzeichnen waren, die jeweils Schäden von über eine Milliarde Euro verursachten. Stellvertretend sei hier die hochwasserreiche Dekade der 90er Jahre genannt, in welcher 1993 und 1995 das Rheineinzugsgebiet, 1994 insbesondere Italien und 1997 das Einzugsgebiet der Oder betroffen waren (Kundzewicz et al., 2012; Patt & Jüpner, 2013). So kam es im Januar 1995 an Rhein und Mosel innerhalb von 13 Monaten zum zweiten Mal zu Überflutungen. In den Niederlanden drohten Deiche zu brechen, es wurden mehrere hunderttausend Menschen evakuiert. Der Schaden hier und in weiteren europäischen Einzugsgebieten wurde auf mehrere Milliarden DM geschätzt (LAWA, 1995). Zur Jahrhundertwende waren Großbritannien, Italien, Frankreich und die Schweiz betroffen. 2002 trat im Einzugsgebiet der Elbe eines der bis dato schlimmsten Hochwasser in Europa auf, welches Gesamtschäden von 27 Milliarden Euro verursachte und sich auf weite Teile Mittel- und Osteuropas erstreckte. Über 200 Menschen kamen ums Leben (Choryński & Kundzewicz, 2012; Kundzewicz et al., 2012).



Abb. 3: Hochwasser in Rothenthal (l.o.) und in Olbernhau (r.o.) im August 2002 und in Olbernhau im März 2006 (l.u., r.u.)

Im März 2006 verursachte eine weitreichende Schneeschmelze Pegelanstiege an der Elbe, die das Hochwasser 2002 zum Teil noch übertrafen (LFUG, 2006). Am 07.-08. August 2010 wurde insbesondere das obere Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße auf tschechischem und polnischem Gebiet von Starkniederschlägen erfasst. Die ausgelösten Sturzfluten hatten katastrophalen Auswirkungen im Einzugsgebiet. Die gemessenen Wasserstände übertrafen alle Aufzeichnungen und Beobachtungen der letzten 100 Jahre. Es wurden seit Beginn der Klimabeobachtungen die höchsten zweitägigen Niederschlagssummen (vom 6. bis 7. August) an den Stationen Olivetská hora mit 310,3 mm, an der Talsperre Fojtka mit 288,5 mm, in Henice mit 252,4 mm und in Mlýnice mit 250,2 mm gemessen (Jelonek et al., 2010). An der Lausitzer Neiße, im Oberlauf der Spree und an der Kiritzsch wurden Scheitelabflüsse und Abflussfüllen gemessen, die statistisch in der Größenordnung eines 100-500 jährlichen Hochwasserereignisses liegen (LfULG, 2011a). Im selben Jahr führten im August und September mehrere regional verteilte Hochwasserereignisse als Folge von Starkniederschlägen im Raum Görlitz, Bautzen, Meißen, Chemnitz und in der Sächsischen Schweiz sowie im Osterzgebirge zu großen Hochwasserschäden und forderten 4 Todesopfer. Im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde, Chemnitz und Würschnitz wurden Anfang August Abflussscheitel erreicht, die die Messungen vom August 2002 zum Teil übertrafen. Im Januar 2011 folgte im Großraum Leipzig ein Hochwasser, welches ebenfalls massive Schäden verursachte und nach dem historischen Hochwasser von 1954 an der Weißen Elster als zweithöchstes Ereignis eingestuft wurde. Eine Kombination aus Schneeschmelze, einsetzendem Regen und hohen Grundwasserständen waren die Ursachen für dieses Ereignis (LfULG, 2011a). Flächenhafte und langanhaltende Niederschläge sorgten im Juni 2013 in weiten Teilen Deutschlands, aber auch bspw. in Tschechien und Österreich für großflächige und langanhaltende Überschwemmungen. Das Einzugsgebiet der Elbe und das der Donau wurden erneut von einer "Jahrhundertflut" erfasst, die nach Angaben des Bundesfinanzministeriums alleine in der Bundesrepublik Deutschland annähernd 8 Mrd. Euro an Schäden verursachte und die Menschen wochenlang in Atem hielt (BMF, 2013). Nach Daten von Choryński und Kundzewicz (Choryński & Kundzewicz, 2012; Kundzewicz et al., 2012) liegt die Elbeflut 2013 - gemessen an den verursachten Schäden bzw. Kosten - auf Platz 6 der Hochwasserereignisse in Europa. Platz 1 nimmt mit Abstand die Elbeflut 2002 ein. Weitere extreme Hochwasserereignisse folgten alleine in Europa im Herbst 2013 in Italien, Frankreich und Griechenland. Anfang 2014 kam es sowohl in Großbritannien und später auch in Serbien zu langanhaltenden und schweren Überschwemmungen.

Paul Samuels schreibt hierzu auf Seite 3 im Editorial des im Juni 2013 erschienen Themenheftes "Flooding" der Europäischen Kommission: "Flooding can bring profound and lasting effects on citizens, businesses and agriculture. According to the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters' (CRED) global statistics on natural hazards, the 416 flood events in Europe from 1980 and 2009 which are classified as 'significant' affected 8.9 million people, caused 2,546 fatalities and incurred economic damages of over €75 billion" (Samuels, 2013). Die aktuellsten Hochwasserdaten waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht eingearbeitet. Er fasste jedoch in diesem Artikel die gesellschaftliche Relevanz der oben aufgeführten Ereignisse zusammen und machte damit auch den politischen Handlungsbedarf im Bereich des Hochwasserschutzes deutlich.

Mendel und Liebscher führen diesbezüglich an, dass es im Bereich des dezentralen Hochwasserschutzes sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene Umsetzungsdefizite gibt. Ihre Beseitigung ist umso dringlicher, da dezentrale Hochwasserschäden in ihrer Summe höher einzustufen sind, als die durch große Hochwasser verursachten Schäden (Mendel & Liebscher, 2010). Die Autoren verweisen hierbei auf Zahlen der Münchener Rückversicherung von 2001 und geben an, dass dezentrale Hochwasserschäden 50 % aller Hochwasserschäden ausmachen. Ähnliche Aussagen in Bezug auf die Schadenssumme von Sturzfluten machen die Autoren des DWA Merkblattes "Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung" (DWA, 2013a). Das unterstreicht die Notwendigkeit, dass Hochwasserschutz auf der gesamten Flussgebietsebene und damit schon in den obersten Einzugsgebieten stattfinden muss. Dies ist weniger vor dem Hintergrund zu betrachten, die Hochwasserscheitel in den großen Flussläufen zu senken oder zu verzögern. Hier zeigt sich aufgrund bisheriger Modellierungsergebnisse zumeist eine Wirkungsabnahme dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen mit Zunahme von Ereignisintensität, -dauer und Gebietsgröße. Vielmehr sind lokale Risiken, Schadenspotenziale und Schutzziele, welche sich an lokalen Bedürfnissen orientieren, von Wichtigkeit. Es sind an dieser Stelle vor allem Starkniederschläge und die damit einhergehenden Abflussprozesse, welche durch dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen in ihrer Wirkung beeinflusst werden können (Mendel & Liebscher, 2010).

2.1.1 Sturzfluten

Das Auftreten von "Sturzfluten" (engl. Flash Floods) bildet in Europa eine der bedrohlichsten Formen von Naturkatastrophen (Rozalis et al., 2010). Gaume et al. haben für Europa Datenbestände hinsichtlich des Auftretens von Sturzfluten analysiert und kommen zu dem Schluss, dass diese in Bezug auf das Ausmaß verursachter ökonomische Schäden und Todesfälle eine der signifikantesten und ernsthaftesten Gefahren darstellen (Barredo, 2007; Gaume et al., 2009). So hat 1999 ein einzelnes Hochwasser an der Aude in Südfrankreich ökonomische Schäden in einer Höhe von 3,3 Milliarden € verursacht. (Gaume et al., 2009; Gaume et al., 2004). Vor diesem Hintergrund publizierte Barredo eine Auflistung der wichtigsten Hochwasserereignisse für Europa für den Zeitraum zwischen 1950 und 2005. Darin zeigt sich, dass 23 Ereignisse als Flash Floods eingestuft wurden und davon die meisten im mediterranen Raum aufgetreten sind. Die Autoren konnten diesen Hochwassertypus auch für Großbritannien, Deutschland und Belgien nachweisen (Barredo, 2007). Barredo et al. beziffern die absoluten Kosten der verursachten Schäden mit mehr als 22 Milliarden US\$ (nicht inflationsbereinigt) (Barredo, 2007).

Für die Vereinigten Staaten dokumentierten Ashley & Ashley (2008), dass Hochwasserereignisse die zweithäufigste Todesursache bei wetterbedingten Naturkatastrophen darstellen. Zwischen 1959 und 2005 wurden in den Vereinigten Staaten 4.586 hochwasserbedingte Todesopfer gezählt – welche zumeist durch tropischen Wirbelstürme oder Sturzfluten ausgelöst wurden (Ashley & Ashley, 2008). Knebl und andere Autoren führen als ein Beispiel das San Antonio Hochwasser in 2002 in Zentral-Texas an. Dieses sommerliche Extremereignis verursachte im San Antonio-

Einzugsgebiet Schäden von annähernd einer Milliarde US Dollar und forderte 12 Todesopfer (Knebl et al., 2005). Der Colorado Front Range – ein östlicher Vorgebirgszug der Rocky Mountains- steht exemplarisch für eine Region, die immer wieder von katastrophalen Sturzfluten betroffen war. So zuletzt 2013 durch das Boulder Hochwasser, welches in Verbindung mit Hangrutschungen und Muren alleine im County Boulder mehrere hundert Million Dollar an Schäden verursachte (Morss et al., 2015).

Ashley & Ashley (2008) beziehen sich bei Ihrer Verwendung des Begriffs Sturzfluten auf eine Definition im Glossar des U.S. National Weather Service: “A flood caused by heavy or excessive rainfall in a short period of time, generally less than 6 hours. Flash floods are usually characterized by raging torrents after heavy rains that rip through riverbeds, urban streets, or mountain canyons sweeping everything before them. They can occur within minutes or a few hours of excessive rainfall. They can also occur even if no rain has fallen, for instance after a levee or dam has failed, or after a sudden release of water by a debris or ice jam” (NWS, 2010). Ähnliche Definitionen von Kron, Junkmann oder dem USGS werden durch Barredo (2007) zitiert. Im Rahmen des BMBF-Projektes URBAS "Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten" werden verschiedene, jedoch sehr ähnliche Begriffsdefinitionen von Doswell, Mück, Maniak, Bronstert und Hlatky für Sturzfluten ausgeführt, die sich alle im Kern an die oben aufgeführte Definition des U.S. National Weather Service anlehnen (Castro et al., 2008).

Das hohe Risikopotenzial von Sturzfluten begründet sich durch deren spezifische Charakteristika, wie dem kurzen zeitlichen Abstand zwischen dem auslösendem Niederschlagsereignis und dem auftretenden Abflussmaximum, dem steilen Anstieg der Abflussganglinie bei außergewöhnlich hohen Wasserständen bzw. Abflüssen, aber auch durch ausgedehntes Hangversagen in Kombination mit einer Überschreitung eines kritischen Schwellwertes für den Sedimenttransport (Borga et al., 2011). Das Auftreten von exzessivem Oberflächenabfluss und Gerinneabfluss ermöglicht sowohl den Sedimenteintrag in die Vorfluter als auch die Mobilisierung der Gerinnesohle selbst. Je nach Zusammensetzung des Sediments entsteht für die Unterlieger neben der Überschwemmung ein zusätzliches Risiko, bedingt durch temporäre Sohlerhöhungen und durch ein hohes Zerstörungspotenzial der herangeführten Bettfracht.

Das Verständnis als auch die Simulierung von sturzflutauslösenden Prozessen ist äußerst komplex und bedarf einer Betrachtung verschiedener Skalen und einer Differenzierung hinsichtlich unterschiedlicher klimatischer und geographischer Regionen. Im Rahmen des EU-Projektes HYDRATE werden solche Forschungsarbeiten in ihrem regionalen und globalen Kontext untersucht (Sixth Framework Programme, Contract No. 037024) (Borga et al., 2011). Borga zeigt die Fortschritte hinsichtlich des Verständnis von sturzflutauslösenden Prozessen auf und beschreibt die Abhängigkeiten zu Faktoren wie Ausgangsbodenfeuchte, Niederschlagsintensität in Beziehung zu orographischen und topographischen Effekten (Borga et al., 2011). Marchi et al. (2010) untersucht Daten von 60 europäischen Einzugsgebieten unterschiedlichster Größe hinsichtlich der hydro-meteorologischen Zusammenhänge bei Sturzfluten. Anhand der Kriterien Datenverfügbarkeit, Niederschlagsintensität und Hochwasserreaktion konnten - wie schon oben genannt- 25 Sturzfluten genauer betrachten werden. Sie erstrecken sich in einem Gürtel zwischen Nordostspanien über Norditalien, Österreich bis nach Rumänien, konnten aber auch im

Erzgebirge lokalisiert werden (Wilde Weißeritz, Augusthochwasser 2002). Weitere Gebiete lagen im Vereinigten Königreich und in Griechenland (Marchi et al., 2010). Die Ergebnisse der Studie zeigen einen deutlichen saisonalen Effekt mit Schwerpunkt Herbst für den mediterranen und alpin-mediterranen Raum. Hingegen treten Sturzfluten in den eher kontinental geprägten Gebieten in den Sommermonaten auf. Die Intensität, Dauer und die räumliche Ausdehnung in den kontinental geprägten Gebieten ist stärker begrenzt. Marchi (2010) zeigt, dass die Vorbodenfeuchte die Entwicklung von Sturzfluten deutlich positiv beeinflusst. Die Hochwasserreaktion der untersuchten Ereignisse lag in der Regel bei unter 6 Stunden und für Einzugsgebiete kleiner 350 km². Es wurde für die Vorfluter bzgl. der Vorwarnzeiten eine charakteristische Durchschnittsgeschwindigkeit von 3 m/s berechnet. Hingegen wurden die daraus resultierenden Folgen für den Sedimenttransport nicht betrachtet.

Im Rahmen von URBAS wurde für den deutschsprachigen Raum eine systematische Erfassung und Analyse von Sturzflutereignissen durchgeführt. Darin zeigt sich, dass solche Ereignisse für diese Breitengrade eine erhebliche Bedeutung haben. Insbesondere dann, wenn städtische Ballungsräume betroffen sind (Castro et al., 2008; Schmitt, 2015). So wurde in Dortmund im Juli 2008 in 2 Stunden eine Niederschlagsmenge von 200 mm und im Juli 2014 in Münster fast 300 mm in 7 Stunden gemessen (Schmitt, 2015). Ursachen und Auswirkungen solcher Starkniederschläge konnten darüber hinaus wiederholt vor allem für die Mittelgebirgsräume in Sachsen und in den angrenzenden Bereichen in Polen und der Tschechischen Republik dokumentiert werden (Jelonek et al., 2010; LfULG, 2011a).

Unterstrichen wird die Bedeutung von Sturzfluten von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). Im Gelbdruck des Merkblattes DWA -M 550 über dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung wird darauf verwiesen, dass sich die dargestellten Projekte auf den deutschen Mittelgebirgsraum konzentrieren, da Sturzfluten hier eine besondere Rolle spielen und sich dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen häufig als alternativlos darstellen (DWA, 2013a). Die Bedeutung dieser Aussage bekommt durch die Starkregenereignisse und Sturzfluten in Sachsen vom August 2002 und 2010 bzw. September 2010 ein besonderes Gewicht (LfULG, 2011a).

2.2 Die Entwicklung vom Hochwasserschutz zum Hochwasserrisikomanagement

Die Zahlen zeigen, dass auch nach den großen Hochwasserereignissen der letzten Jahrzehnte trotz politischer, technischer und planerischer Anstrengungen ein Risiko bestehen bleibt und somit auch weiterhin nach Verbesserungen im Hochwasserschutz gesucht werden muss. Die im Folgenden aufgezeigte Entwicklung vom klassischen Hochwasserschutzkonzept hin zum Hochwasserrisikomanagement macht deutlich, dass es unterschiedliche Betrachtungsmaßstäbe in der räumlichen Skala geben muss, um geeignete integrierte Lösungen zu finden. Der dezentrale Hochwasserschutzgedanke spielt hierbei eine zentrale Rolle.

Als eine Reaktion auf die Hochwasserereignisse und Schäden zwischen 1994 und 1995 an Rhein und Mosel publizierte die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser ihre "Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz" (LAWA, 1995). Ziel war es, potenzielle Hochwasserrisiken und Hochwasserschäden zu minimieren. Der Leitgedanke ist, dass jedes Hochwasser für die betroffenen Menschen eine persönliche Katastrophe bedeutet, welche vor allem mit einem Vertrauensverlust in die Sicherheit der eigenen Lebensumstände verbunden ist. Und das weiterhin eine potenzielle Bedrohung der Sicherheit - unabhängig von einer tatsächlichen Gefährdung - die Lebensqualität mehr noch einschränkt als der eigentliche Schaden.

Die Leitlinien zeigen die Ursachen und Konsequenzen von Hochwasserereignissen auf, umreißen den Hochwasserschutz in Deutschland, die Schadensursachen und skizzieren Strategien und Handlungsvorgaben. Die daraus resultierenden zehn Leitsätze zur Schadensbegrenzung bei Hochwasser umfassen:

- ❖ den Wasserrückhalt,
- ❖ die Hochwasserabwehr,
- ❖ die Unterhaltung von Schutzanlagen,
- ❖ das Erkennen der technischen Grenzen des Hochwasserschutzes,
- ❖ die Verminderung des Schadenspotenzials,
- ❖ die Bewusstmachung von Hochwassergefahren,
- ❖ die Stärkung der Eigenvorsorge,
- ❖ den Solidaritätsgedanken und
- ❖ die integrierte Anwendung aller zuvor genannten Maßnahmen.

Die ausgesprochenen Empfehlungen richten sich u.a. an Politik, Wirtschaft, Verwaltung und Wissenschaft aber auch an jeden einzelnen Bürger und einzelne Bürgerin und zeigen die auszufüllenden Handlungsspielräume für den Hochwasserschutz auf (LAWA, 1995).

Nach der verheerenden Oderflut 1997 und Elbeflut 2002 wurden diese Leitlinien nochmals im Auftrag der 59. Umweltministerkonferenz geprüft und bestätigt (LAWA, 2004). Es zeigte sich jedoch vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus dem Elbehochwasser der Bedarf einer praktischen Handlungsanleitung. Es folgten durch die LAWA 2003 die "Instrumente und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz" (LAWA, 2004). In dem Papier werden die wesentlichen Bausteine einer Hochwasserschutzstrategie dargestellt, welche dem Management von Hochwasserrisiken dienen sollen. Damit verbunden ist auch ein Paradigmenwechsel, der von der Beherrschbarkeit von Naturrisiken hin zum Umgang mit Hochwasserrisiken geht. Es wird nicht von einer Hochwasserschutzstrategie sondern von einer Hochwassermanagementstrategie gesprochen, welche die drei Aspekte Hochwasser-Flächenmanagement bzw. Stärkung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Fläche, den technischen Hochwasserschutz und die Hochwasservorsorge beinhaltet, gleichwertig betrachtet und sowohl dem Gedanken der Vorsorge, als auch der Abwehr und Planung Rechnung trägt (LAWA, 2004).

Noch im September 2002 beschloss die Deutsche Bundesregierung das 5-Punkte Programm: Arbeitsschritte zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes (Deutsche Bundesregierung, 2002). Darin waren folgende Eckpunkte enthalten:

- ❖ Aufbau eines gemeinsamen Hochwasserschutzprogrammes von Bund und Ländern mit den Schwerpunkten: den Flüssen mehr Raum geben, Hochwasser dezentral zurückhalten, Siedlungsentwicklung steuern - Schadenspotenziale mindern,
- ❖ Schaffung von länderübergreifenden Aktionsplänen – internationale Fachkonferenzen,
- ❖ Stärkung der europäischen Zusammenarbeit,
- ❖ Die Überprüfung des Flussausbau – Entwicklung einer umweltfreundlichen Schifffahrt,
- ❖ Erstellung von Sofortmaßnahmen zum Hochwasserschutz; darin sind u.a. die Regelung finanzieller Soforthilfen für die Flutopfer enthalten, der beschleunigte Ausbau der Koordinierungsstelle für großflächige Gefährdungslagen und der Ausbau der Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz (AKNZ) aber auch die verbesserte Warnung und Information der Bevölkerung.

2005 schloss sich darauf aufbauend das Gesetz "zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes" an. Damit wurden u.a. das Wasserhaushaltsgesetz, das Baugesetzbuch, das Raumordnungsgesetz und das Bundeswasserstraßengesetz geändert und an die Erfordernisse einer wirksamen Hochwasservorsorge angepasst. Die Bundesregierung gab damit erstmals bundesweit einheitliche, stringente und verbindliche Vorgaben heraus zur Vorbeugung gegen Hochwasserschäden (Deutscher Bundestag, 2005).

Parallel zur Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden Impulse im Bereich der Forschung gesetzt. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) förderte in den Jahren 2005 bis 2010 38 Projekte zum Thema "Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse". Durch eine Integration unterschiedlicher Fachdisziplinen und verschiedener Akteure sollten verbesserte Instrumente des Hochwasserrisikomanagements entwickelt und implementiert werden. Man ging vier zentralen Fragen nach (Bittner et al., 2010):

- ❖ Wie sehen integrative Konzepte im Hochwassermanagement aus, die auf das jeweilige Risiko zugeschnitten, einen nachhaltigen Schutz bieten?
- ❖ Wie müssen die traditionellen Vorsorgestrategien vor dem Hintergrund des globalen Wandels weiterentwickelt werden?
- ❖ Welche innovativen Verfahren erhöhen die Sicherheit technischer Schutzanlagen?
- ❖ In welcher Form können die Projektergebnisse den Betroffenen vermittelt werden?

Man reagierte 2007 auch auf europäischer Ebene auf die wiederkehrende und vor allem grenzüberschreitende Hochwasserproblematik innerhalb der Gemeinschaft. Die Richtlinie 2007/60/EG des EUROPÄISCHEN PARLAMENTS und des RATES verfolgt das Ziel, einen Rahmen für die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken zur Verringerung der hochwasserbedingten nachteiligen Folgen [...] zu schaffen (Europäische Union, 2007).

Das übergeordnete Ziel der HWRM-RL ist die "Verringerung des Risikos hochwasserbedingter nachteiliger Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftlichen Tätigkeiten" (LAWA, 2010). Die zu ergreifenden Maßnahmen und deren Umsetzung sollen dazu dienen, den Hochwasserschutz insgesamt zu verbessern. Die Bewertung des Hochwasserrisikos, also die Bestimmung von Gebieten bzw. Gewässern mit einem potenziellen Risiko, hatte bis Ende 2011 zu erfolgen. Daran schloss sich die Erstellung von Hochwassergefahren- und Risikokarten für gefährdete Gebiete bis Ende 2013 an, welche vom Hochwasser betroffene Flächen und das Ausmaß von Gefahren und Risiken darstellen. Für Gewässer, die potenziell signifikante Hochwasserrisiken aufweisen, werden bis Ende 2015 Hochwasserrisikomanagementpläne auf der Ebene der Flussgebietseinheiten erstellt, welche Ziele und Maßnahmen zur Reduzierung der Risiken beinhalten (LAWA, 2010). Die Pläne haben damit auch grenzüberschreitenden Charakter. Sie beinhalten eine Erläuterung der Schlussfolgerung aus den vorläufigen Bewertungen des Hochwasserrisikos und beinhalten Hochwassergefahren- und Risikokarten und deren Auswertung.

Aufbauend auf diesen Informationen werden die festgelegten Ziele, Maßnahmen und deren Rangfolge als Teil des Hochwasserrisikomanagements beschrieben. Die Richtlinien sehen im Anschluss nach Erstellung der Pläne eine Aktualisierung und Überprüfung der Umsetzung in einem Turnus von 6 Jahren vor. Damit ist gewährleistet, dass ein sich verändernder Kenntnisstand und die Beteiligung Betroffener auch in Zukunft Berücksichtigung finden und es zu einer fortwährenden Weiterentwicklung und Anpassung von Maßnahmen kommt (LAWA, 2010).

Die Anforderungen an solche Pläne sollen alle Aspekte des Hochwasserrisikomanagements im Sinne des gesamten Vorsorge-, Gefahrenabwehr- und Nachsorgezyklus berücksichtigen, d.h. alle zeitlichen Phasen eines Hochwassers (vgl. Abb. 4: S.38). Der Schwerpunkt liegt auf den Aspekten Vermeidung, Schutz und Vorsorge und es sollen die besonderen Merkmale der betroffenen Einzugsgebiete berücksichtigt werden.

Nach Jüpner ist damit der Kernpunkt dieses gesetzlichen Rahmens das Hochwasserrisikomanagement (Patt & Jüpner, 2013). 2008 folgte in Deutschland mit der "Strategie zur Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie" die Grundlage zur Übertragung europäischen in nationales Recht. In Deutschland fand die Richtlinie im Rahmen des Umweltgesetzbuchs im Jahr 2009 Eingang in nationales Recht. Bei der Umsetzung kamen vor allem drei fachliche Aufgaben zum Tragen (LAWA, 2008):

- ❖ die vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos,
- ❖ die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten und -risikokarten und
- ❖ die Erstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen.

Hierbei basiert die Umsetzung der Richtlinien auf Erfahrungen und Vorarbeiten einzelner Bundesländer wie bspw. Sachsen und stellt nach Ansicht der LAWA eine konsequente Weiterführung der deutschen Hochwasserschutzpolitik dar (LAWA, 2008).

Der Begriff des Hochwasserrisikomanagements wird von Müller in Patt & Jüpner (2013) näher erläutert. Er schreibt dazu, dass es im Sinne einer Risikokultur gilt, Risiken zu erkennen, zu kommunizieren, abzuschätzen und durch geeignete Maßnahmen mit einem angemessenen Aufwand zu vermindern. Jedoch ist eine vollständige Vermeidung nicht möglich. Das Hochwasserrisikomanagement kann nach Müller in Patt & Jüpner (2013) als eine sich positiv verstärkende Spirale in einer wiederkehrende Abfolge von "Hochwasserbewältigung", "Regeneration" und "Vorbeugung" aufgefasst werden (vgl. Abb. 4: S.38), welche jeweils mit einem Hochwasserereignis startet. Die Anwendung einer Strategie im Hochwasserrisikomanagement erfordert zunächst die Identifizierung, Analyse und Bewertung von Risiken, um Aktivitäten zur Risikosteuerung ableiten zu können. Die Risikosteuerung umfasst fünf grundsätzliche Aspekte, welche integriert betrachtet werden sollten:

- ❖ Vermeidung,
- ❖ Verminderung,
- ❖ Begrenzung,
- ❖ Übertragung und Akzeptanz.

Geeignete Strategien erfordern zudem umfassende Kenntnisse über die verursachenden Prozesse (Patt & Jüpner, 2013).

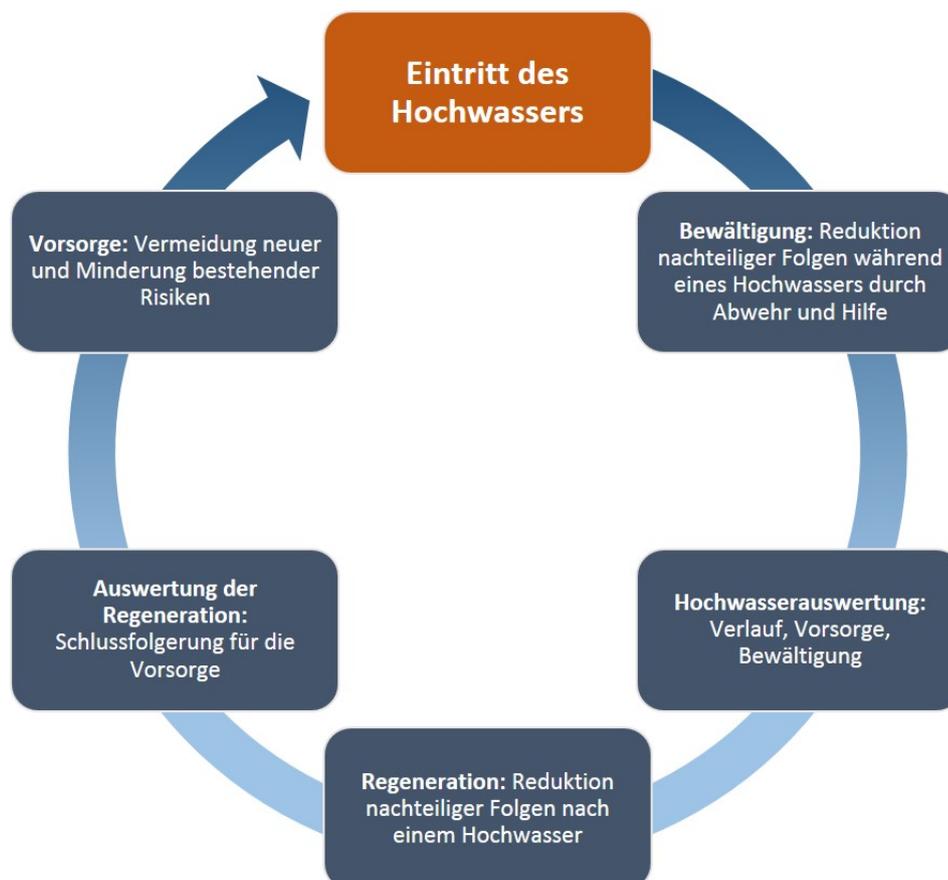


Abb. 4: Idealtypischer Zyklus im Hochwasserrisikomanagement (verändert nach LAWA (2010))

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) strukturiert 2010 die grundsätzliche Herangehensweise im Umgang mit Hochwasserrisiken in vier wesentliche Handlungsfelder bzw. Zielbereiche für das Hochwasserrisikomanagement. Die im folgenden erläuterten Bereiche leiten sich aus dem HWRM-Zyklus ab (vgl. Abb. 4: oben) und sind inhaltlich weitgehend mit dem bisherigen „Drei-Säulen-Modell“ (LAWA 2003) identisch, welches die Bereiche „Hochwasserflächenmanagement“, „Technischer Hochwasserschutz“ und „Hochwasservorsorge“ umfasste (Patt & Jüpner, 2013). Dabei handelt es sich im Vorfeld eines Hochwassers um die Vermeidung neuer Risiken und die Reduktion bestehende Risiken im Hochwasserrisikogebiet. Weiterhin werden als Ziele definiert, die nachteiligen Folgen während und nach einem Hochwasser zu reduzieren (vgl. Abb. 4:Seite 38) (LAWA, 2010):

- ❖ Die Vermeidung neuer Risiken im Hochwasserrisikogebiet beinhaltet als Handlungsbe-
reiche die Flächenvorsorge (Maßnahmen der Regionalplanung, Bauleitplanung, wasser-
rechtliche Festsetzung von Überschwemmungsgebieten, Nutzungsanpassung in Risiko-
gebieten, erforderliche Rechtsetzung) und insbesondere den natürlichen Wasserrückhalt
auf der Fläche. Hierunter fallen der natürliche Wasserrückhalt auf land- und forstwirt-
schaftlichen Flächen und die Wiedergewinnung von Überschwemmungsgebieten.
- ❖ Bestehende Risiken sollen vermindert werden durch ein Bündel an Maßnahmen. Der
technische Hochwasserschutz umfasst den Bau bzw. die verbesserte Nutzung von
Stauanlagen, die bauliche Anpassung hydraulischer Engstellen bzw. Vergrößerung des
Abflussprofils, die Errichtung und Verbesserung wasserbaulicher Schutzanlagen wie
Deiche und Dämme, aber auch Unterhaltungsmaßnahmen zur Freihaltung von Gewässern
und Überschwemmungsflächen. Die Bauvorsorge beinhaltet Maßnahmen zum
hochwasserangepassten Planen, Bauen und Lagern. Die Risikovorsorge umfasst den
Bereich der finanziellen Vorsorge und Absicherung. Hingegen dient die Vorhaltung und
Vorbereitung der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes a.) der Erstellung und
Bereithaltung von Alarm- und Einsatzplänen, b.) deren Übung und der Ausbildung und
Schulung von Personal sowie c.) der Organisation und Logistik.
- ❖ Die Verhaltens- und Informationsvorsorge dient zur Aufklärung der Bevölkerung über
Risiken und notwendige Vorbereitungsmaßnahmen und zur Kommunikation von Vor-
hersagen, Lageberichten und Warnmeldungen für den Hochwasserfall. Solche Vorsorge-
maßnahmen können Risiken vermindern, minimieren und auch beseitigen. Sie sind ein
Mittel, um die zeitliche Frist vor Eintreten eines möglichen Hochwassers zu erweitern
und die Zeit optimaler zu nutzen, um das Schadensrisiko zu minimieren.
- ❖ Der sich hier anschließende Handlungsbereich umfasst die Reduktion nachteiliger Folgen
während eines Hochwassers und nach einem Hochwasser. Nach Eintritt eines
Hochwasserereignisses rücken zunächst konkret die Gefahrenabwehr durch technische
Maßnahmen und die Hilfe betroffener Personen zur Bewältigung des Hochwassers in den
Vordergrund. Die erfolgreiche Umsetzung solcher Maßnahmen ist abhängig von der

Qualität der Vorsorgemaßnahmen. Nach Ende des Hochwassers bekommt hingegen der Aspekt der Schadensbewältigung in Form der Aufbauhilfe und des Wiederaufbaus Priorität. Von Bedeutung ist jedoch auch die Ermittlung und fachliche Auswertung von Informationen, welche relevant sind für die Verbesserung der Hochwasservorsorge. Dies kann bspw. in einer hydrologischen Analyse des Hochwassers aber auch in einer Bestandsaufnahme der Wirksamkeit von Hochwasservorsorge und Hochwasserabwehrmaßnahmen und in einer Inventarisierung aufgetretener Schäden bestehen. Die Übernahme etwaiger Schlussfolgerungen in den bestehenden HWRM-Plan leitet über in die Hochwasservorsorge und schließt somit den Zyklus aus Vorsorge, Bewältigung und Regeneration (vgl. Abb. 4: S.38) (LAWA, 2010).

Auf internationaler Ebene hat dieses Umdenken inzwischen auch eingesetzt. So stand die fünfte internationale Konferenz zum Hochwassermanagement 2011 (ICFM5) in Tokio unter dem Leitthema "Floods: From Risk to Opportunity". Die abschließende Deklaration der Tagungsteilnehmer umreißt dieses Umdenken. : "The total elimination of the flood risk is impossible and new risk-based tools and techniques are necessary to advance flood management policy, engineering design and operations, along with the disaster management process" (Statement of the 5th International Conference on Flood Management; 27-29 September 2011, Tokyo, Japan). Die Herausgeber der entsprechenden IAHS Publikation 357 schreiben dazu im Vorwort: "The umbrella title of ICFM5 was Floods: From Risk to Opportunity. In order to implement this concept, a paradigm shift is necessary from focusing on emergency response and recovery to flood risk management. This process should be supported by vulnerability monitoring and development of tools such as standards to measure risk and preparedness level in an integrated approach in order to build capacity for better response to floods by taking advantage of their benefits while at the same time minimizing their social, economic and environmental risks" (Chavoshian & Takeuchi, 2013).

Eine Pressemeldung des Deutschen Bundestages vom 14. Januar 2014 bzgl. der Hochwasserereignisse in Deutschland in 2013 deutet an, dass dieses Umdenken und die ergriffenen Maßnahmen auch auf nationaler Ebene Wirkung gezeigt haben: "Das Hochwasser im Mai und Juni 2013 hat in seiner Ausdehnung und Gesamtstärke das Auguthochwasser von 2002 übertroffen. Dies geht aus dem als Unterrichtung durch die Bundesregierung vorliegenden „Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2013“ (18/208) hervor. Danach erreichten die beim Hochwasser 2013 eingetretenen direkten Schäden jedoch „trotz der teilweise hohen Scheitelwerte nicht das Ausmaß vom Auguthochwasser 2002“. Dies liege zum einen an Fortschritten im Hochwasserschutz und zum anderen an der „überwiegenden Betroffenheit von Gebieten, in denen sowohl die Bevölkerung als auch der Katastrophenschutz und das Krisenmanagement bereits Erfahrung mit Hochwassersituationen hatten“. Dies bestärke den in den vergangenen Jahren im Hochwasserschutz eingeschlagenen Weg zu einem Hochwasserrisikomanagement „und dem dort geforderten bewussten Umgang mit dem Risiko Hochwasser“, heißt es weiter in dem Bericht (Deutscher Bundestag, 2014).

Jedoch wird in der Unterrichtung des Deutschen Bundestages zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz auch folgendes zitiert: " Das Hochwasser 2013 hat erneut die Herausforderungen und Belastungen für die direkt betroffene Bevölkerung, die Städte und Kommunen, die Wirtschaft, den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur sowie für Krisenmanagement und Bevölkerungsschutz (einschließlich der Hilfeleistung der Bundeswehr) aufgezeigt. Die Bewältigung der mit den Überflutungen direkt und indirekt verbundenen Folgen ist teilweise auch nach Monaten noch nicht abgeschlossen" (Deutscher Bundestag, 2013).

Im September 2013 wurde die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) durch die in Berlin tagende Sonderumweltministerkonferenz beauftragt, zusammen mit weiteren Arbeitsgruppen Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes zu erarbeiten. Als Ergebnis wurde auf der Umweltministerkonferenz am 24. Oktober 2014 in Heidelberg das nationale Hochwasserschutzprogramm beschlossen. Es sieht als Maßnahmen 29 Projekte zur Deichrückverlegung, 57 Projekte zur gesteuerten Hochwasserrückhaltung und 16 Projekte zur Beseitigung von Hochwasserschutzschwachstellen vor. Die Maßnahmen betreffen alle großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland und führen zum Teil schon vorhandene Planungen und Projekte wie bspw. das Integrierte Rheinprogramm fort. Im Bereich der Deichrückverlegung sollen insgesamt rund 20.000 ha Überflutungsfläche wieder einer natürlichen Überschwemmungsdynamik zugeführt werden. Im Bereich der Hochwasserrückhaltung ist die Schaffung von 1,2 Mrd. m³ Retentionsvolumen vorgesehen. Der gesamte Maßnahmenkatalog umfasst ein Gesamtvolumen von über 5 Mrd. Euro, welches sich über das Jahr 2027 hinaus erstrecken wird (LAWA, 2014). Diese Zahlen zeigen nochmals die Dringlichkeit der Thematik auf, müssen jedoch auch im Kontext anderer Untersuchungen wie bspw. dem Auenzustandsbericht des Bundesamtes für Naturschutz gesehen werden. Dieser wurde 2009 veröffentlicht und zeigt für 79 Flüsse im Einzugsgebiet von Elbe, Rhein, Weser, Ems, Donau und Oder auf, dass von den untersuchten 15.000 km² Auenflächen noch 4.800 km² als rezente Aue vorhanden sind. Von den dort noch vorkommenden 61.000 ha Waldfläche besitzt ein Großteil keinen Auenwaldcharakter mehr (BfN, 2009). Dies kann in der Regel mit einer fehlenden Überflutungsdynamik in Verbindung gebracht werden.

Resümierend kann festgehalten werden, dass über die letzten zwei Jahrzehnte ein grundlegendes Umdenken in allen Bereichen des Hochwasserschutzes stattgefunden hat und der Hochwasserschutz als Hochwasserrisikomanagement neu definiert wurde. Es muss jedoch auch in Zukunft nach integrierten Lösungsansätzen gesucht werden, welche an unterschiedliche Risiken und geographische Bedingungen angepasst sind.

2.3 Das Hochwasserrisikomanagement auf regionaler Ebene in Sachsen

Auf regionaler Ebene wurde das Umdenken im Freistaat Sachsen - nach den Erfahrungen mit dem Hochwasser im Elbeinzugsgebiet 2002 - quasi als Vorläufer der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie schon recht früh realisiert (Schulte et al., 2009). Damit verbunden war eine landeseinheitliche Neuausrichtung und Anpassung der Hochwasserschutzstrategie in Bezug auf Hochwasservorsorge, -risikomanagement und -schutz mit einer gesetzlich verankerten Eigenvorsorge jedes Einzelnen (SMUL, 2007). Die Strategie umfasst die Realisierung eines umfassenden Hochwasserschutzes durch:

- ❖ eine Vorsorge in der Flächennutzung,
- ❖ Maßnahmen am Gewässer,
- ❖ Warnung und Hochwasserabwehr,
- ❖ Eigenvorsorge,
- ❖ über regionale Initiativen zur Hochwasservorsorge
- ❖ als auch durch eine Zusammenarbeit mit Nachbarländern und -staaten und der Entwicklung eines Hochwasseraktionsplanes (SMUL, 2007).

Bei der Umsetzung dieser Strategie hat der Freistaat Sachsen einen Schwerpunkt auf die Vorsorge in der Flächennutzung gelegt. Die rechtlichen und fachlichen Voraussetzungen zur *Ausweisung von Überschwemmungsgebieten* der Gewässer I. Ordnung wurden mit der Novellierung des Sächsischen Wassergesetzes (SächsWG) 2002 geschaffen. Es waren bis 2007 98% der insgesamt 155 Überschwemmungsgebiete an Gewässern I. Ordnung und an der Elbe und 66% der Überschwemmungsflächen an Gewässern II. Ordnung festgesetzt. Damit wurden die inhaltlichen Vorgaben des Bundes bzgl. des "Gesetzes zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes" weitestgehend umgesetzt. Es wurden seit 2004 65.000 Hektar an Überschwemmungsgebieten ausgewiesen, in denen zwar Bestandsschutz gewährleistet wird, aber ein Verbot zur Ausweisung neuer Baugebiete gilt. Ausnahmen sind nach dem Grundsatz zulässig, dass der Hochwasserabfluss oder -rückhalt nicht wesentlich beeinträchtigt wird und Gefahren für Leben, Gesundheit und bedeutende Sachgüter ausgeschlossen werden können. Es wurde weiterhin die Umwandlung von Grünland in Acker untersagt (Bröker, 2012). Flankiert wurde diese Maßnahme durch die Einführung des Rechtsbegriffes der *Hochwasserentstehungsgebiete* in das Landeswasserrecht (§ 100b SächsWG). Dies sind Gebiete, welche besonders zur Hochwasserentstehung neigen und per Rechtsverordnung als solche auszuweisen sind. In diesen Gebieten ist das natürliche Wasserversickerungs- als auch das Wasserrückhaltevermögen zu erhalten und zu verbessern. Dies wurde ergänzt durch eine Umstellung auf *pfluglose konservierende Bearbeitungstechniken* (Mulchsaat), was bisher auf 1/3 der sächsischen Ackerflächen umgesetzt werden konnte. Bedingt durch die langen Umlaufzeiten ist die Flächenvorsorge im forstwirtschaftlichen Bereich durch *Erstaufforstung und den Umbau* von reinen Fichtenbeständen hin zu Mischwäldern eine effektive, aber eher langfristig angelegte Maßnahme (Bröker, 2012; Schulte et al., 2009; SMUL, 2007).

Ein weiterer Schwerpunkt wurde bei der Umsetzung der Strategie auf die Maßnahmen am Gewässer gelegt. Es ist anzumerken, dass die Unterhaltspflicht für Gewässer I. Ordnung dem Freistaat und für Gewässer II. Ordnung den Gemeinden unterliegt. Der Wiederaufbau der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur nach dem Hochwasser 2002 und die Maßnahmen des präventiven Hochwasserschutzes wurden auf der Grundlage einer konzeptionellen Gesamtschau für alle Gewässer I. Ordnung durchgeführt (SMUL, 2007). Es wurden bis zum Frühjahr 2005 für 3.000 km Fließgewässer, deren Einzugsgebiete 95 % der Landesfläche umfasst, 47 Hochwasserschutzkonzepte (HWSK) für Gewässer I. Ordnung und die Elbe als Bundeswasserstraße erarbeitet und als wasserwirtschaftliche Planungsgrundlage bestätigt. Darin sind 1.600 konkrete Maßnahmen enthalten, welche notwendig sind zur Erreichung eines festgelegten Schutzzieles (SMUL, 2005a). Dies ist in Ortslagen in der Regel ein HQ_{100} . Es wurde zur Ableitung eines konkreten Umsetzungsprogramms eine landesweite Priorisierung durchgeführt. Sie basierte auf den Kriterien (1) Schadenspotenzial, (2) Vulnerabilität (Verletzlichkeit von Leib und Leben, Verteidigbarkeit, Folgegefahren), (3) Nutzen-Kosten-Verhältnis und (4) wasserwirtschaftliche Effekte (Retention bzw. Hochwasserabfluss) (SMUL, 2005a; SMUL, 2007).

Es musste auf Basis der erstellten 47 Hochwasserschutzkonzepte für priorisierte Maßnahmen an Gewässern I. Ordnung zwischen 2005 bis 2008 ein Maßnahmenplan entwickelt werden (SMUL, 2005a; SMUL, 2007). Von den 1.600 Maßnahmenvorschlägen wurden 268 in die Priorisierungskategorie "hoch" eingestuft, 780 als "mittel" und die restlichen als "gering" (SMUL, 2005a; SMUL, 2007). Die Maßnahmen sind insbesondere dem vorbeugenden technischen Hochwasserschutz zuzurechnen und umfassen ein hier nicht vollständig auflistbares Repertoire, welches vom Deichbau, über die Schaffung von Poldern und Rückhaltebecken bis zur Konstruktion von Uferschutzmauern reicht. Eine vollständige Auflistung findet sich im Bericht des Sächsischen Staatsministeriums zu den Ergebnissen der landesweiten Priorisierung von Hochwasserschutzmaßnahmen (SMUL, 2005a; SMUL, 2007). Es wurde 2005 mit der Umsetzung eines staatlichen Investitionsprogrammes begonnen. Von 351 Hochwasserschutzvorhaben wurden bis 2012 80 abgeschlossen, 55 Projekte waren 2012 in Bau und 216 befanden sich noch in der Planungsphase. Es wurden zusätzlich in vorhandenen Talsperren und durch die Rückhaltebecken Glashütte und Lauenstein 50 Millionen Kubikmeter Retentionsraum geschaffen (Bröker, 2012).

Es wurde neben den technischen Hochwasserschutzmaßnahmen zur Sicherung eines naturnahen Gewässerausbaus, der vorzugsweise Einsatz ingenieurbioologischer Bauweisen an Gewässern I. und II. Ordnung vorgeschrieben. Die Renaturierung des Lungwitzbaches im Landkreis Chemnitz ist stellvertretend dafür, wie Gewässerrenaturierungen gleichzeitig dem Hochwasserschutz und der Verbesserung des ökologischen Zustandes dienen können. In Ergänzung dessen wurden nicht mehr benötigte Querbauwerke wie Wehre oder Sohlschwelle entfernt und Gewässeraufweitungen wie an der Roten Weißeritz durchgeführt (Bröker, 2012).

Der Hochwasserschutz an den 12.000 Kilometern Gewässern II. Ordnung obliegt nach §99 Abs. 4 des Sächsischen Wassergesetzes grundsätzlich den Gemeinden. Auch für diese Gewässer sind nach Sächsischem Wassergesetz flussgebietsübergreifende Schutzkonzepte zu erarbeiten (SMUL, 2007), wovon bis 2012 30 kommunale Hochwasserschutzkonzepte durch den Freistaat Sachsen gefördert wurden (Bröker, 2012).



Abb. 5: Märzhochwasser 2006 am Rübenauer Bach im Oberlauf der Natzsung

Im Rahmen der Warnung und Hochwasserabwehr wurde darüber hinaus in Sachsen mit der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im Maßstab 1:50.000 und Gefahrenhinweiskarten im Maßstab 1:100.000 für alle Fließgewässer I. Ordnung und die Elbe frühzeitig ein zentraler Aspekt der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie realisiert (SMUL, 2007).

Schulte et al. (2009) schreiben, dass es bei dieser Entwicklung bemerkenswert ist, dass der vorbeugende Hochwasserschutz den Blick zunehmend auf Gebiete richtet, in denen Hochwasser entsteht. Die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten rückt damit auch die "Headwater areas" von einigen Quadratkilometern Größe stärker in den Vordergrund (Schulte et al., 2009), also jene Gebiete, die nicht nur Quellregion sondern auch der Ausgangspunkt für Hochwasser sind. Hinsichtlich der morphologischen Ausprägung vieler Einzugsgebiete gerade im Erzgebirge, ist diese Herangehensweise sinnvoll, da die ausgedehnten Hochflächen der Kammlagen in einem scharfen Kontrast stehen zu den oftmals kerbtalartigen Strukturen der Gebietsauslässe und dies bei Niederschlägen hoher Intensität zu einem schnellen, stark konzentrierten und hohen Abfluss führen kann.

Es wird diesem Aspekt Rechnung getragen durch die in der Sächsischen Hochwasserschutzstrategie aufgelisteten Maßnahmenbereiche, unter anderem über die flächenhafte Hochwasservor-

sorge. Es muss an dieser Stelle jedoch überlegt werden, wie vorhandene Maßnahmen im Unterlauf sinnvoll ergänzt werden können. Insbesondere ist diese Überlegung von zentraler Bedeutung, wenn die Talmorphologie keine oder nur eingeschränkte Handlungsoptionen zulässt und diskutiert werden muss, welche Art von Maßnahmen in den Hochwasserentstehungsgebieten ergänzend oder auch alternativ sind.

An dieser Stelle setzt der dezentrale Hochwasserschutz an, welcher sich nicht als Konkurrenz sondern als Erweiterung bestehender Konzepte versteht und zum Teil, wie sich im Folgenden zeigen wird, schon integraler Bestandteil dieser Konzepte ist. Der Gedanke des dezentralen Hochwasserschutzes wird sowohl im 5-Punkte-Programm der Bundesregierung als auch in den Empfehlungen der DWA von 1995 schon explizit genannt, allerdings ohne weiter ausgeführt zu werden. Er findet keine direkte Nennung in der Sächsischen Hochwasserschutzstrategie, manifestiert sich aber über die flächenhafte Vorsorge, die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten und im Detail über die ausgewiesenen Hochwasserschutzkonzepte. Eine Publikation der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft beschreibt sehr anschaulich dezentrale, vorbeugende Hochwasserschutzmaßnahmen im ländlichen Raum (Schulte et al., 2007; SLfL, 2006). Es wurden darüber hinaus in der Vergangenheit verschiedene Projekte in Sachsen gefördert, die wesentliche Aspekte des dezentralen Hochwasserschutzes beinhalteten (Matschullat et al., 2007; Reinhardt, 2010; Reinhardt et al., 2011; Schulte et al., 2009; Schulte et al., 2007; Sieker et al., 2007).

2.4 Charakterisierung des dezentralen Hochwasserschutzes

Nach Koehler (2006) wird "...unter dezentralen Maßnahmen zur Hochwasserminderung [...] eine größere Zahl kleiner, gleichartiger, im Gebiet verteilter Maßnahmen..." verstanden. Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten und zur Förderung der Infiltration auf landwirtschaftlichen Flächen, aber auch zur Nutzung der natürlichen Retention von Talauen ordnen sich hier ein. Technische Maßnahmen wie der Rückbau von Deichen oder die Nutzung von Kleinstspeichern, zählen nach Koehler ebenso zu den dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen (Koehler, 2006). Röttcher schreibt hierzu, dass der Wasserrückhalt auf der Fläche oder auch das Hochwasserflächenmanagement in Ergänzung dezentrale Maßnahmen, wie das Vorhalten von Retentionsräumen, die Renaturierung von Fließgewässern, die Regenwasserbewirtschaftung und Maßnahmen in Land- und Forstwirtschaft, umfasst (DWA, 2013a).

Definition zum dezentralen Hochwasserschutz

- Unter dezentralen Maßnahmen zur Hochwasserminderung kann nach Auffassung des Autors ein hochwasserstrategisch sinnvoll zu kombinierendes Bündel von technischen und nichttechnischen Maßnahmen verstanden werden, welches u.a. durch den Erhalt, die Sicherung, Wiederherstellung und der Erstellung von flächenhaften und lokalen Speichern, der Retention des Oberflächen-, Zwischen- und Gerinneabflusses und damit der Verminderung und Vermeidung von Hochwasserrisiken dient.
- Für den dezentralen Hochwasserschutz ist die integrative, skalenübergreifende und einzugsgebietsweite Betrachtung potenzieller Retentionsmöglichkeiten das charakteristische Merkmal.
- Er ist weiterhin dadurch gekennzeichnet, dass die Maßnahmen schon in den obersten Einzugsgebieten ansetzen und wirken können. Sie können als Maßnahmenbündel für sich stehen, aber auch eine sinnvolle Ergänzung zu vorhandenen Hochwasserschutzmaßnahmen bilden.

In Anlehnung an Koehler (2006) besteht die Wirkungsweise dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen in der Erhöhung der Infiltration und damit in der Verringerung des Oberflächenabflusses, in der Dämpfung und zeitlichen Verzögerung der Abflusswellen im Gewässer und in der Retention in künstlichen Speicherräumen. Es erfolgt damit ein Eingriff in den Prozess der Abflussbildung, Abflusskonzentration und den Wellenablauf im Gerinne.

Im DWA-Merkblatt "Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung" werden folgende fünf dezentrale Maßnahmen zur Dämpfung von Hochwasserabflüssen behandelt (DWA, 2013a). Im Sinne des Hochwasserrisikomanagements handelt es sich hier um Maßnahmen im Bereich der Hochwasservorsorge zur Vermeidung neuer und zur Verminderung bestehender Risiken. Der Begriff des dezentralen Hochwasserschutzes umfasst damit sowohl Bereiche des technischen Schutzes als auch Maßnahmen, welche der Retention auf der Fläche dienen.

Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung

- 1) Maßnahmen in Siedlungsgebieten:** Flächen- und Muldenversickerung, Mulden-Rigolen-Systeme, Rückhalt im Kanal durch Rückhaltebecken und Stauraumkanäle, Retentionsbodenfilter und Erdbecken, Entsiegelungsmaßnahmen, Einsatz von Gründächern, Regenwassernutzung.
- 2) Maßnahmen in der Landwirtschaft:** Förderung der Versickerung durch konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat, Lockerungsmaßnahmen, Umwandlung von Acker- zu Grünland, Aufforstung, Begrünung von Tiefenlinien, Schlagunterteilung, Anlage von Rand- und Saumstrukturen, Dränagen.
- 3) Maßnahmen im Wald:** Aufforstung, angepasste Waldwirtschaft und Waldumbau, angepasster Wegebau und Einsatz von Rücke-Technologien.
- 4) Maßnahmen im Gewässer und in der Aue:** Gewässerbettumgestaltung, Sohlanhebung, Förderung einer dynamischen Gewässerentwicklung, Veränderung des Längsprofils, Herstellung der Gewässerdurchgängigkeit, Verbesserung der Ufer- und Sohlstruktur, Aufweitung der Querprofile und Überschwemmungsflächen, Veränderung des Vorland- und Uferbewuchses, Nutzungsänderungen, Aufbau von Gewässerentwicklungstreifen, Änderung des Höhenniveaus der Aue.
- 5) Maßnahmen zur lokalen Retention:** Anlage von Muldenspeichern durch Ausgrabung, Bau und Nutzung von kleinsten, sehr kleinen und kleinen Stauanlagen.

(DWA, 2013a)

2.4.1 Begriffsbestimmung und Definition von (dezentralen) Hochwasserrückhaltebecken

Im Zentrum der vorliegenden Untersuchung stehen die Potenziale für dezentral, d.h. über das Einzugsgebiet verteilte Hochwasserrückhaltebecken als Maßnahmen zur lokalen Retention. Ungeachtet der räumlichen Lage dienen Hochwasserrückhaltebecken dem temporären Einstau von Hochwasserzuflüssen und geben diese gedrosselt an den Unterlieger ab. Die zeitliche Verzögerung des Wellenablaufes führt zu einer Verformung der Hochwasserganglinie und zu einer Veränderung des Hochwasserscheitels hinsichtlich des Maximums und des Zeitpunktes (vgl. Abb. 6: S.48). Die Veränderungen beziehen sich auf den Speicherauslass und auf beliebige

Punkte unterhalb des Speichers. Sie können im Idealfall zu einer Verzögerung und Verringerung der Abflussspitze im Unterlauf des Einzugsgebietes führen, jedoch können auch durch Scheitelüberlagerungen gegenteilige Effekte erwartet werden. Hochwasserrückhaltebecken dienen nicht zur Volumenretention, vielmehr werden sie für den vorübergehenden Rückhalt von Hochwasser eingesetzt. Sie können daher als grüne Hochwasserrückhaltebecken oder Trockenbecken bewirtschaftet werden.

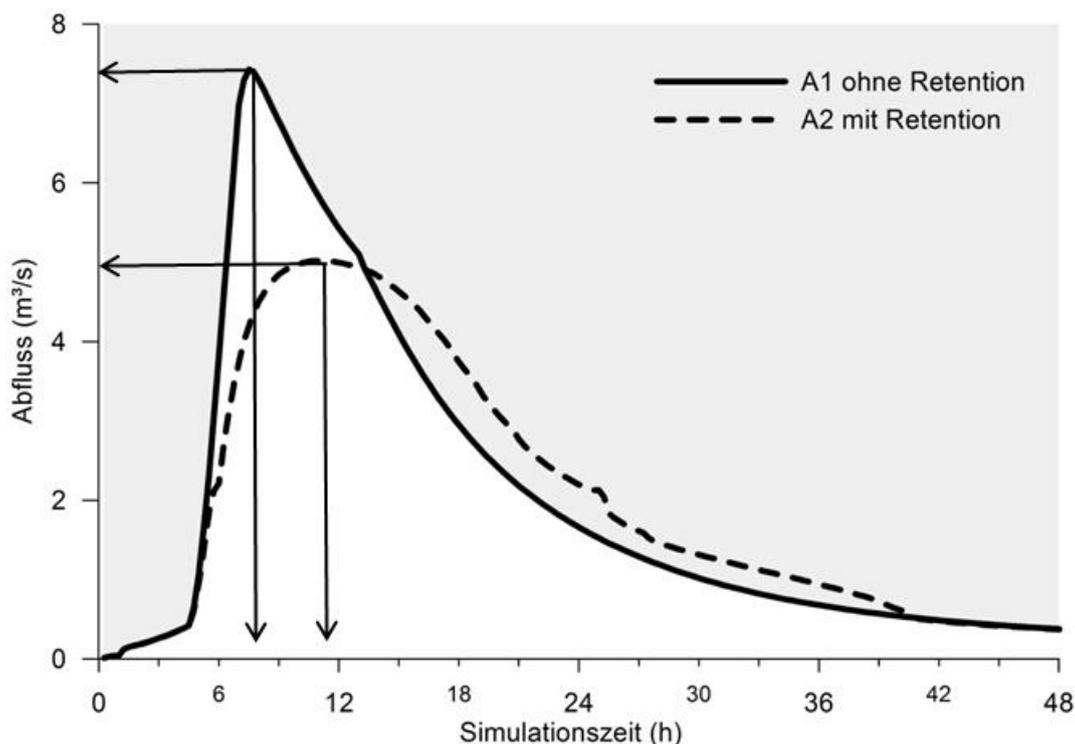


Abb. 6: Schematische Darstellung der Hochwasserretention in der fließenden Welle

Von den (dezentralen) Hochwasserrückhaltebecken sind die Muldenspeicher abzugrenzen. Als **Muldenspeicher** werden Hohlformen oder Senken verstanden, welche sich nur über Versickerung und Verdunstung entleeren und über kein Absperrbauwerk verfügen. Solche Mulden können morphologisch bedingt sein oder durch Ausgrabung entstehen. Das Volumen ist auf wenige hundert Kubikmeter begrenzt. Ihre Wirkung ist beschränkt, jedoch vor allem von der Versickerungsleistung und dem auftretenden Oberflächenabfluss abhängig. Als Fallbeispiel zum Einsatz solcher Mulden dient das Bad Orber Modell (Assmann, 1999). Als Synonym wird auch der Begriff der "Microponds" verwendet (Rieger, 2012). Muldenspeicher fallen nicht unter die DIN-Norm 19700.

Hochwasserrückhaltebecken sind hingegen aufgrund ihres Absperrbauwerkes und ihrer Funktionsweise als Stauanlagen zu betrachten. Die technischen Regeln zum Bau und Betrieb von Anlagen, die dem Aufstau von Flüssen oder Bächen dienen, sind in Deutschland in der Normreihe der DIN-Norm 19700 beschrieben (DIN, 2004a).

Stauanlagen bestehen aus einem Absperrbauwerk zur Stauerzeugung und einem Speicherbecken sowie den notwendigen technischen Einrichtungen. Es wird nach Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken unterschieden. Beide Kategorien legen zunächst einmal keine Untergrenzen fest. Das Merkblatt DWA-M 522 untersetzt die DIN-Norm 19700-11 für Talsperren und die DIN-Norm 19700-12 für Hochwasserrückhaltebecken (DIN, 2004b; DIN, 2004c; DWA, 2013b). Letztere werden in der DIN-Norm 19700-12 behandelt und klassifiziert nach Stauvolumen und Höhe des Absperrbauwerkes, um unterschiedlich hohen Gefährdungspotenzialen Rechnung zu tragen.

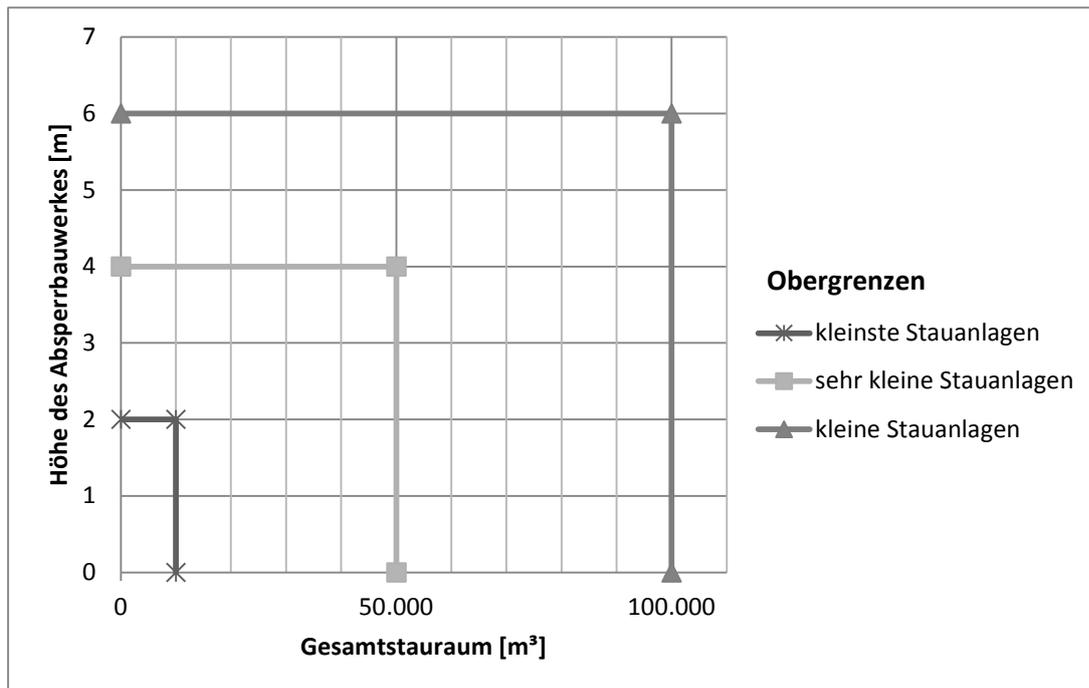


Abb. 7: Klassifizierung kleiner Stauanlagen bzw. kleiner Hochwasserrückhaltebecken nach DWA (2013b)

Es wird zunächst unterschieden zwischen **mittleren bzw. großen Stauanlagen** und **kleinen Stauanlagen** mit einem Volumen größer bzw. kleiner als 100.000 m³ und einer Höhe des Absperrbauwerkes größer bzw. kleiner als 6 Meter. Für eine Einteilung müssen beide Bedingungen (Volumen und Höhe) berücksichtigt werden. Das Absperrbauwerk befindet sich im Haupt- oder Nebenschluss von Gewässern. Der Abfluss erfolgt über ein zumeist ungesteuertes Auslass- oder Drosselbauwerk. Ein Einstau erfolgt in Abhängigkeit von der vorgegebenen Abflussleistung dieses Bauwerkes. Dieser kann sich an bestimmten Bemessungszielen wie der Retention eines HQ_{100} orientieren. Ein bestimmter Abflussanteil wird hingegen i.d.R. permanent abgeführt. In Abhängigkeit vom permanenten Abfluss und Bemessungsziel kann die Retentionsfläche weiterhin genutzt werden (DIN, 2004a; DWA, 2013a; DWA, 2013b).

Die kleinen Stauanlagen werden nochmals in einen Bereich **sehr kleiner Stauanlagen** unterteilt. Das Volumen der sehr kleinen Hochwasserrückhaltebecken ist kleiner als 50.000 m³ und die Höhe

des Absperrbauwerkes ist kleiner als 4 Meter. Verwendete Synonyme sind Retentionsareale, Retentionsräume oder Kleinrückhalte (DIN, 2004a; DWA, 2013a; DWA, 2013b).

Als weitere Unterteilung empfiehlt die DWA die Abgrenzung kleinster Stauanlagen. Diese **kleinsten Stauanlagen** sind Anlagen mit einem Speichervolumen von bis zu 10.000 m³. Sie befinden sich in Tiefenlinien oder im Nebenschluss von Gewässern. Zumeist sind dies kleine Gewässer, Gräben oder Tiefenlinien. Diese führen nur einen geringen Abfluss, welcher jedoch im Hochwasserfall schnell ansteigen kann. Die Absperrung besteht zumeist aus einem Damm oder mehreren hintereinander liegenden Verwallungen mit einer Höhe bis zu 2 Metern. Die Anlage bietet sich vor allem in Bereichen mit einer morphologisch günstigen Situation an. Die Entleerung erfolgt ungesteuert über einen Grundablass oder auch Drosselbauwerk. Verwendete Synonyme sind auch Feldabflussretention, Retentionsbecken, Klein- oder Kleinstrückhalte oder Retentionsflächen. Kleinste Stauanlagen können auch zum Sedimentrückhalt dienen (DWA, 2013a).

Für alle Bauwerke gilt die DIN-Norm 19700 und für alle Anlagen bis zu einer Größe von 100.000 m³ wird die Anwendung des Merkblattes DWA-M 522 empfohlen. Für mittlere und große Stauanlagen greift bzgl. der hydrologischen Bemessung, des Standsicherheitsnachweises und der Bauwerksüberwachung die DIN-Norm 19700 und das DWA-Merkblatt 514 (DIN, 2004a; DWA, 2013a; DWA, 2013b).

Stauanlagen / Hochwasserrückhaltebecken

Im Rahmen der Untersuchungen werden Hochwasserrückhaltebecken und Teiche mit einem nutzbaren Stauraum zwischen 10.000 und 100.000 m³ und einer entsprechenden Höhe des Absperrbauwerkes von unter 6 Metern behandelt.

Es handelt sich damit im Sinne der Normen und Empfehlungen um **kleine bis sehr kleine Stauanlagen** bzw. **kleine bis sehr kleine Hochwasserrückhaltebecken**. Sie werden je nach Autor wechselnd als Hochwasserrückhaltebecken, Hochwasserspeicher, Speicher oder Retentionsräume bezeichnet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden diese Begriffe synonym verwendet.



Abb. 8: Standorte potenzieller dezentraler Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet der Natzschung (Gewässer; Speichernummer): a.) Bily Potok (N13); b.) Natzschung (N15); c.) Rübenauer Bach (N8); d.) Großer Steinbach (N6); e.) Telêsky Potok (N3); f.) Telêsky Potok (N5); g.) Telêsky Potok (N2), h.) Telêsky Potok (N1). Quelle: A, B, D, E, F Bölscher (2011); C Pfaff & Sendlewski (2005); G, H Schatten (2005)

2.5 Untersuchungen zum dezentralen Hochwasserschutz

Im folgenden Kapitel werden Forschungsarbeiten behandelt, die sich mit einer Quantifizierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen beschäftigt haben, insbesondere mit der Wirksamkeitsabschätzung von Rückhalteräumen. Die Arbeiten wurden in Mittelgebirgslagen unterschiedlicher Ausprägung durchgeführt und dienen mit ihren Ergebnissen als Diskussionsgrundlage für die eigenen Untersuchungen an der Natzsung. Neben den hier vorgestellten Arbeiten gibt es eine Vielzahl an Forschungsarbeiten, die sich mit den Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes auseinandergesetzt haben (Bölscher et al., 2013; Chen et al., 2007; Eisenbies et al., 2007; Emerson et al., 2005; Evrard et al., 2008; Hancock et al., 2010; Koehler, 2006; Konjevic, 2008; Lee & Li, 2009; Liaw et al., 2006; Reinhardt et al., 2011; Robinson et al., 2010; Schanze et al., 2008; Schulte et al., 2009; Van Haveren, 1986; Verstraeten & Poesen, 1999; Villarreal et al., 2004; Whipple, 1981; Williams & Wise, 2006; Wilson et al., 2011).

In den Vereinigten Staaten beschäftigte sich bspw. Van Haveren (1986) schon recht früh mit Fragen des Managements von dezentral angelegten Hochwasserrückhaltebecken. Nix & Durrans (1996) untersuchten den Effekt von Retentionsbecken im Nebenschluss von Gewässern. Damodaram et al. (2010) arbeitete zur Simulation von Maßnahmen hinsichtlich eines nachhaltigen Regenwassermanagements.

Poulard veröffentlichte 2005 eine Konzeptstudie zum dezentralen Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Isepnica, Beskiden, südwestlich von Kraków (Poulard et al., 2010; Poulard et al., 2005). Scholz ging in Schottland insbesondere der Frage zur Lokalisierung von dezentralen Hochwasserschutzpotenzialen nach (McMinn et al., 2010; Robinson et al., 2010; Scholz & Sadowski, 2009; Scholz & Yang, 2010). Eine ausführliche Studie zur Effizienz dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen wurde im Rahmen eines europäischen Forschungsverbundes für Gebiete in Spanien, Österreich und Deutschland erarbeitet (Francés et al., 2008).

Einen Überblick über die Arbeiten im deutschsprachigen Raum geben die Publikationen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA, 2006; DWA, 2013a), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Mendel & Liebscher, 2010), die Dissertationen von Reinhardt und Rieger (Reinhardt, 2010; Rieger, 2012) und die Arbeiten von Schüler (2007).

2.5.1 Untersuchungen von Wegner am Eschbach im südlichen Taunus

Ein Anfangspunkt von Untersuchungen zum dezentralen Hochwasserschutz bzw. zur dezentralen Hochwasserminderung findet sich in einer Arbeit von Wegner (Assmann, 1999; Reinhardt, 2010; Rieger, 2012; Wegner, 1992). Wegner untersuchte das 55 km² umfassende Einzugsgebiet des Eschbaches nordwestlich von Frankfurt am Main hinsichtlich der Wirkung dezentral angeordneter Kleinstmaßnahmen auf den Hochwasserabfluss. Es handelt sich um Maßnahmen für den urbanen Bereich (Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Dachbegrünung, Schacht-, Rohr- oder Rigolenversickerung, Regenwassernutzung, privater Regenrückhalt und Flächenentsiegelungen). Aber auch Maßnahmen außerhalb urban geprägter Gebiete wie Nutzungsänderungen, zentrale Rückhaltung, Muldenrückhalt und bspw. die Kleinretention an

Wegdämmen wurden untersucht (Wegner, 1992). Die Publikation zeigt zum einen Maßnahmenkombinationen zum Hochwasserschutz auf, aber auch deren Wirksamkeit bis zu einer Jährlichkeit eines HQ_{20} (Assmann, 1999). Assmann greift das Konzept von Wegner auf (vgl. Kapitel 2.5.3: S.53) und erweitert es um die Frage, ob solche Maßnahmen auch geeignet sind, um einen Schutz vor höheren Hochwasserjährlichkeiten wie bspw. einem HQ_{100} zu bieten (Assmann, 1999).

2.5.2 Untersuchungen von Tönsmann & Röttcher an der Bauna im Hessischen Bergland

Eine weitere Studie zum dezentralen Hochwasserschutz wurde von Tönsmann und Röttcher für das Einzugsgebiet der Bauna, ein Zufluss zur Fulda in Nordhessen, erstellt (Röttcher & Tönsmann, 2001; Tönsmann, 1995). Das Einzugsgebiet ist aufgrund der Mittelgebirgslage im Hessischen Bergland durch Kerbtäler mit einer begrenzten Talauflage und steilen Gewässerläufen geprägt und zeigt eine entsprechend schnelle Reaktion bei starken sommerlichen Gewitterniederschlägen. Im Juli 1992 trat dort ein Hochwasser mit örtlichen Wiederkehrintervallen von über tausend Jahren auf und verursachte innerhalb weniger Stunden Schäden von rund 13 Mio. DM (Röttcher & Tönsmann, 2001). Vor diesem Hintergrund wurden ab 1993 die Möglichkeiten und Grenzen dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen mit dem Ziel untersucht, die hydrologische Wirksamkeit und die damit verbundenen Kosten zu quantifizieren (Tönsmann, 1995). Die Autoren zeigen auf, dass eine Regenwasserbewirtschaftung bei Wiederkehrintervallen > 10 Jahren kaum noch hochwassermindernd wirkt. Die größte Wirkung der Maßnahmen, mit knapp über 25% Abflussminderung, konnte für ein HQ_1 nachgewiesen werden, mit einem linearen Abfall auf unter 5% bis zu einem HQ_5 . Hingegen zeigt die Studie, dass eine Gewässerrenaturierung und eine Änderung der Flächennutzung mit 10%iger Wirkung bereits bei einem Wiederkehrintervall HQ_1 greifen, ein Maximum mit knapp unter 20% bei einem HQ_{20} erzielen und bis zu einem HQ_{100} eine 15%ige Abflussminderung bewirken können. Problematisch sind nach Ansicht der Autoren allerdings der Umfang und die langfristige Umsetzung solcher Maßnahmen. Vor diesem Hintergrund wurde unter anderem die Retentionswirkung von 28 Rückhalteräumen mit einem Gesamtvolumen von 338.000 m^3 geprüft. Die Einzelmaßnahmen umfassen ein Volumen zwischen 1.500-50.000 m^3 und können ein HQ_{100} (114 m^3/s) um rund 20% reduzieren. Werden zusätzlich an weiteren sechs Standorten Becken mit einem Stauvolumen von bis zu 100.000 m^3 gebaut, so würde die Reduktion der Hochwasserspitze fast 50% betragen.

2.5.3 Untersuchungen von Assmann an der Elsenz im Kraichgau

Basierend auf den Arbeiten von Wegner (Wegner, 1992) und Tönsmann (Tönsmann, 1995) publizierte Assmann 1999 ein Konzept zum dezentralen, integrierten Hochwasserschutz (Assmann, 1999). Er führt darin verschiedene Einflussfaktoren und Wirkungsmechanismen zur Hochwasserentstehung aus, zeigt verschiedene bestehende Maßnahmen zum Hochwasserschutz auf und postuliert die Forderung nach einem Schutzkonzept, bei dem sich die Lage und

Wirkungsweise einzelner Maßnahmen aus den jeweils ablaufenden Hochwasserentstehungsprozessen ergeben. Er argumentierte, dass weite Teile von Hochwasser betroffene Einzugsgebiete zumeist einer irreversiblen Nutzung zugeführt wurden und daher alle dem Hochwasserschutz noch zur Verfügung stehenden Flächen für den vorbeugenden Hochwasserschutz genutzt werden müssen. Dies geschieht nach seiner Ansicht konventionell durch die Anlage auf einen engen Raum beschränkter zentraler Rückhaltebecken. Hierdurch ist aber die Maßnahme räumlich entkoppelt von den hochwasserauslösenden Prozessen (Assmann, 1999). Bestehende Konzepte sollen wie Bausteine entsprechend den Bedürfnissen eines Einzugsgebietes effektiv und sinnvoll und unter Berücksichtigung ökologischer Sachverhalte kombiniert werden und eine Multifunktionalität aufweisen. Die wesentlichen Bausteine ergeben sich aus vorhergehenden Arbeiten wie dem Flutmuldenprojekt Bad Orber, dem genannten Projekt zum Hochwasserschutz an der Bauna, den Untersuchungen von Wegner zum dezentralen Hochwasserschutz und Arbeiten zu siedlungswasserwirtschaftlichen Konzepten u.a. von Sieker (Assmann, 1999). Die Bausteine beinhalten Maßnahmen:

- ❖ zur Änderung der Bewirtschaftungsweise auf landwirtschaftlichen Flächen zur Verminderung des Oberflächenabflusses und des Bodenabtrags,
- ❖ zur Schaffung von Flächen zum Sedimentrückhalt und zur Dämpfung der Abflussdynamik im Bereich kleiner Seitentäler,
- ❖ zur Schaffung von Retentionsarealen als Kompensation für nicht mehr vorhandene Überflutungsräume in den Auen,
- ❖ zur Verlängerung der Laufzeiten und Dämpfung des Hochwasserscheitels
- ❖ und schlussendlich siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen zur Entsiegelung bzw. zum Aufbau von Versickerungs- und Regenwassernutzsystemen.

Dieses Bausteinkonzept hat als Grundidee, dass Flächen nicht nur einer Funktion zur Verfügung stehen, sondern vielmehr eine Integration mehrerer Funktionen auf der gleichen Teilfläche anzustreben ist, bspw. Hochwasserschutz, Naturschutz und Landwirtschaft. Ein wesentlicher Effekt besteht neben der dezentralen Anordnung und Wirkung somit in einer deutlichen Raumersparnis gegenüber separaten Nutzungsfunktionen. Entscheiden ist aber auch, dass die Maßnahmen über das gesamte Einzugsgebiet entsprechend der vorhandenen Potenziale verteilt sind und somit sowohl eine örtliche, punktuelle Schutzfunktion aber auch eine überörtliche Schutzfunktion für die jeweiligen Unterlieger aufweisen. Die Maßnahmen sind auf die Nutzung vorhandener Potenziale ausgerichtet und dienen sowohl dem Hochwasserschutz als auch dem Sedimentrückhalt (Assmann, 1999; Assmann & Gündra, 1999). Eine zentrale Bedeutung hat in diesem Konzept die Ermittlung von Standorten für Retentionsareale, da diese den größten Flächenbedarf aufweisen, hohe Anforderungen an die Standorteigenschaften stellen, am stärksten in das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes eingreifen und gleichzeitig den größten Volumenbeitrag für den Gesamtrückhalt liefern. Sie sind im Gegensatz zu allen anderen oben genannten Bausteinen bzgl. der

Hochwassersicherheit / hydrologische Effekte durch hydrologische Modelle am sichersten quantifizierbar und wurden daher in der Arbeit von Assmann näher betrachtet (Assmann, 1999). Darin geht er der Frage nach, ob es im Untersuchungsgebiet der Elsenz genügend Standorte gibt, die für die Anlage von Retentionsarealen geeignet sind und der Frage, ob mit diesen Standorten für die Stadt Eppingen ein Hochwasserschutz bei einem HQ_{100} erreichbar ist. Der rechnerische Nachweis erfolgte über ein hydrologisches Modell. Für die zuvor vorzunehmende Auswahl der Standorte für Retentionsareale mussten hingegen Flächen gesucht werden, die ohne große Umgestaltung einen maximalen Wasserrückhalt bieten können. Es wurde daher solche Flächen ausgewählt, bei denen aktuell eine Hochwasserretention stattgefunden hatte und diese lediglich verstärkt werden musste und solche Flächen, welche durch geringen baulichen Aufwand in einen Retentionsraum umgestaltet werden konnten (Assmann, 1999).

Als Retentionsareale werden in der Arbeit von Assmann Gebiete mit folgenden Eigenschaften bezeichnet. Die Ausführungen lehnen sich dabei an die Arbeiten von Röttcher & Tönsmann und Wegner an (Röttcher & Tönsmann, 2001; Wegner, 1992):

- ❖ Sie sollen bzgl. der Größenordnung über potenzielle Stauvolumina von mehreren zehntausend Kubikmetern verfügen.
- ❖ Die Einstauhöhe soll ca. 1,8 Metern bei einem Einstauvolumen von 50.000 m³ betragen. Die Volumenobergrenze sollte aus Sicherheitsgründen bei 50.000 m³ pro Anlage liegen.
- ❖ Der Normalabfluss soll über einen permanenten Grundablass erfolgen, welcher einen Verkläusungsschutz aufweisen soll.
- ❖ Das Stauvolumen soll erst bei höheren Jährlichkeiten in Anspruch genommen werden, um eine landwirtschaftliche Nutzung so wenig wie möglich einzuschränken.
- ❖ Es sollen möglichst schon bestehende Querbauwerke (Wege, Bahndämme, etc.) genutzt und ggf. technisch modifiziert werden, um die Eingriffe in die Landschaft zu minimieren. Die Querbauwerke sollen über befahrbare Dammkronen mit einer Wegbreite von 2-3 Metern verfügen, um die Nutzung des Gebietes nicht einzuschränken.
- ❖ Die Querbauwerke sollen als überströmbare Dammkronen konzipiert werden.
- ❖ Die Einstauzeit soll so kurz sein, dass es zu keiner längerfristigen Beeinträchtigung der Nutzungsfunktion kommt.

Assmann lokalisierte für das 75 km² große Einzugsgebiet der oberen Elsenz bis zur Stadt Eppingen 35 dezentral über das Gebiet verteilte Retentionsareale. Diese verfügen über ein Stauvolumen von ca. 520.000 m³ bei einer maximalen Dammhöhe von 1,8 Metern, einem maximalen Einzelstauvolumen von <50.000 m³ und einem durchschnittlichen Stauvolumen von ca. 14.900 m³. Es konnte gezeigt werden, dass ein solches Maßnahmenzenario für die am Ausgang des Untersuchungsgebietes liegende Stadt Eppingen einen 100jährigen Hochwasserschutz gewährleisten könnte (Assmann, 1999; Assmann & Gündra, 1999).

2.5.4 Untersuchungen von Marenbach & Koehler an der Nahe zwischen Hunsrück und Pfälzer Wald

Marenbach veröffentlichte 2002 eine umfassende Arbeit zum Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung (Marenbach, 2002). Die Ergebnisse wurden von Marenbach und Koehler 2003 zusammengefasst (Marenbach & Koehler, 2003) und zeigen am Beispiel des knapp über 4.000 km² großen Einzugsgebietes der Nahe die Wirkung verschiedener Hochwasserschutzkonzepte auf. Die Berechnungen wurden mit dem Flussgebietsmodell FGMOD (Ludwig 1979) durchgeführt.

Darin wurden Maßnahmen zur Gewässerrevitalisierung in Form einer Fließwegverlängerung bei gleichzeitiger Reduzierung des Gefälles und Erhöhung der Profilrauheit gerechnet. In einer Variante wurde die Profilrauigkeit um 10 bzw. 20 % und alternativ die Fließwegverlängerung um 10 bzw. 20 % erhöht. Zusätzlich wurden 2 Kombinationen aus beiden Einzelmaßnahmen mit einer jeweiligen Erhöhung von 20 %, aber für eine Maximalumsetzungs- und eine Realumsetzungsvariante gerechnet. Die Gewässerrevitalisierungsmaßnahmen wurden in der Maximalvariante für 59 Abschnitte der Nahe (mittlere Fließlänge von 2 km) und für 233 Nebengewässerstrecken (mittlere Fließlänge 2,6 km) gerechnet. Für das Realszenario wurden für 40 % der Laufabschnitte Fließwegverlängerungen und für 70 % Rauheitserhöhungen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Simulation eines HQ₁₀₀ (D=12 h) zeigen für die Revitalisierungsvariante, dass eine maximale Fließwegverlängerung von 20 % eine Scheitelabminderung von 5,6 %, hingegen eine maximale Rauheitserhöhung von 20 % eine Absenkung von 4,4 % an der Nahemündung erzielen würde. Die Betrachtung der real umsetzbaren Varianten beider Maßnahmen ergibt für die Fließwegverlängerung (+20 %) nur noch eine Scheitelabminderung von 2 % und für die Erhöhung der Rauigkeitswerte (+20 %) eine Reduktion von 4 %. Kombiniert man beide Varianten, dann zeigt sich für die Maximalumsetzung ein Wert von 10,7 % und für das Realszenario eine Scheitelabminderung von nur noch 6,6 % (Marenbach & Koehler, 2003). Die Wirkung der Maximalvariante schwankt an den Mündungen der jeweiligen Nebengewässer zwischen 29,2 und 2,3 % (Alsenz, Heimbach), auch für die Realvariante wird für den Heimbach der niedrigste Wert mit 1,7 % erzielt. Der höchste Wert ergab sich jedoch hier für die Lauter mit 19,9 % (Marenbach & Koehler, 2003). Marenbach konnte in diesem Zusammenhang am Beispiel des Fischbaches zeigen, dass es örtlich zu Wellenüberlagerungen kommen kann, welche in diesem Fall die Abflussganglinie der Nahe verbreitert und den Scheitel zeitlich vorverlagert. Hingegen erreicht der Hochwasserscheitel des Hahnenbaches verzögert die Mündung in die Nahe und verschiebt deren Scheitel nach hinten und mindert dadurch den Nahescheitel ab.

Als weitere Variante fanden naturnahe kleine dezentrale Rückhalteräume Berücksichtigung. Diese mussten folgende Kriterien erfüllen: Beschränkung der Einstauhöhe über Talsohle auf 2 Meter, das Vorhandensein eines Absperrbauwerkes bspw. in Form eines Wegedamms und ein Mindestvolumen von 5.000 m³. Es wurde hier eine Variante mit 150 Speicherräumen und einem mittleren Volumen von 22.500 m³ gerechnet, zusätzlich wurde eine zweite Variante mit höheren

Rückhaltepotenzialen in den Quellgebieten angenommen, welche 161 Standorte mit einem durchschnittlichen Volumen von 33.800 m³ umfasste. Der Gesamtspeicherraum wurde auf 3,4 bzw. 5,4 Mio. m³ beziffert. Die Regelabgabe wurde variiert zwischen einem QR = HQ₂, HQ₅ oder HQ₁₀ oder als Auslassorgan in Form einer Rohrdrossel. Der Rohrdurchmesser wurde so optimiert, das bei einem Wasserstand von h = 1,5 Meter ein HQ₂ abfließen konnte.

Weiterhin wurden 32 "konventionelle" Rückhaltebecken in die Berechnung einbezogen, welche größere Stauhöhen und Volumina und damit auch baulich aufwendige Absperwerke besitzen. Diese Hochwasserrückhaltebecken umfassen dasselbe Gesamtvolumen wie die 150 bzw. 161 kleinen Rückhalteräume und wurden für Standorte an Nebengewässern kurz vor deren Ausmündung simuliert. Das mittlere Volumen der Einzelspeicher betrug 105 dam³ bzw. 165 dam³. Die Regelabgabe wurde für ein HQ₂ bemessen. Als dazu alternative Maßnahme wurde ein zentrales Hochwasserrückhaltebecken mit einem Speichervolumen von ebenfalls 3,4 bzw. 5,4 Mio. m³ gerechnet. Das Einzugsgebiet umfasste knapp 2.900 km². Der Grundablass wurde für eine höchstmögliche Scheitelreduzierung bei konstanter Regelabgabe ausgelegt.

Die Simulation ergab für die Gesamtwirkung aller 150 Rückhalteräume bei einem Gesamtvolumen von 3,4 Mio. m³ lediglich eine Scheitelabminderung von 2,5 % (bei Anpassung der Drosselorgane auf ein HQ₂). Wurde die zweite Variante mit 161 kleinen Speichern mit einem Gesamtvolumen von 5,4 Mio. m³ gerechnet, ergab sich bei gleicher Regelabgabe wie oben eine Scheitelabminderung von 3,8 %, bei Nutzung einer Rohrdrossel lagen die Werte mit 4,1 % leicht höher. Die auf ein HQ₁₀ angepasste Regelabgabe ergab einen Wert von nur noch 2,4 %. Örtlich fallen für die zweite Variante mit 161 Speichern die Werte hingegen weitaus höher aus und zeigen eine Spanne zwischen 4,1 % (Nahemündung) und über 50 % (Wiesbach). Werden die realisierbaren Revitalisierungsmaßnahmen mit den 150 Rückhalteräumen kombiniert, so ergibt sich bei einem HQ₁₀₀ eine Scheitelabminderung an der Nahe von knapp über 8 %. Örtlich schwanken die Werte hingegen zwischen 2,1 und 62 % (Marenbach & Koehler, 2003). Aus den vorliegenden Daten lässt sich nicht erkennen, dass die Wirkung mit Einzugsgebietsgröße abnimmt. Unklar ist, wie groß der Anteil der Maßnahmen an welchen Nebengewässern ist, jedoch ist anzunehmen, dass die Teileinzugsgebiete über unterschiedlich große Potenziale verfügen und damit die Wirkung örtlich so unterschiedlich ausfällt. Trotz der großen Zahl an Einzelmaßnahmen und Maßnahmentypen fällt die Wirkung an der Nahemündung jedoch eher gering aus. Die alleinigen Revitalisierungsmaßnahmen wirken jedoch im Gegensatz zu den vielen dezentralen Rückhaltebecken stärker scheidelmindernd. Die oben genannten 32 konventionellen Rückhaltebecken erzielen bei einem Volumen von 5,4 Mio. m³ an der Nahemündung eine Kappung des Hochwasserscheitels von 4 %, führen jedoch im Naheoberlauf z.T. zu einer Scheitelerhöhung. Das entsprechende zentrale Speicherbecken liegt mit 7 % etwas höher in der Wirkung. Eine Reduzierung des Stauvolumens auf 3,4 Mio. m³ würde auch die Wirkung des Einzelspeichers auf 4,2 % und die der 32 Becken auf 1,8 % reduzieren. Für alle Varianten gilt, dass die Scheitelverzögerung klein und die Wellenverformung gering ist. Insgesamt fällt damit die Scheitelreduzierung bei allen Maßnahmen sehr klein aus. Würden die Revitalisierungsmaßnahmen in der Maximalvariante ausschließlich im oberen Nahegebiet und im Bereich der Glans durchgeführt werden, so würde dies zu einer Scheitelreduktion an der Nahemündung von 11,5 %

führen. Eine zusätzliche Revitalisierung im Naheunterlauf würde - wie schon oben gezeigt - mit 10,7 % eine leicht schwächere Wirkung haben (Marenbach & Koehler, 2003).

Marenbach konnte auf diese Weise die Wirkung von Revitalisierungsmaßnahmen, kleiner dezentraler Rückhalteräume, konventioneller Speicher und eines zentralen Hochwasserrückhaltebeckens anhand der erzielten Scheitelreduzierung gegenüber dem IST-Zustand gegenüberstellen (Marenbach, 2002). Die Autoren kommen aber zu dem Schluss, dass sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere Einzugsgebiete übertragen lassen, sich aber in dem aufgezeigten Rahmen bewegen werden (Marenbach & Koehler, 2003).

2.5.5 Untersuchungen von Lang & Tönsmann an der Lahn im Rothaargebirge

Lang und Tönsmann veröffentlichten 2002 eine Studie zum vorbeugenden Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Lahn, welche als rechter Nebenfluss des Rheins im Rothaargebirge entspringt und südlich von Koblenz mündet (DWA, 2006; Lang & Tönsmann, 2002). Das Einzugsgebiet der Lahn umfasst 5.964 km². Die mittlere Höhe beträgt 315 m. ü. HN und die größte Erhebung wurde mit 680 m. ü. HN angegeben. Die Lahn entspringt auf einer Höhe knapp über 600 m. ü. HN und überwindet auf einer Länge von 245 km einen Höhenunterschied von 534 Metern. Für den Pegel Biedenkopf nahe des Quellbereiches der Lahn, oberhalb der Stadt Marburg gelegen, wurde das HQ₁₀₀ mit 202 m³/s und für die Mündung in den Rhein mit 866 m³/s angegeben.

Die Hochwassersimulationen erfolgten mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS der TU Braunschweig. Zur Modellanpassung wurden 32 Hauptpegel verwendet, die Kalibrierung erfolgte an Hochwasserereignissen der Jahre 1984, 1993, 1995 und 1998. Abschließend wurde die Simulation mit Hilfe von Bemessungsereignissen (HQ₁₀, HQ₂₀, HQ₅₀ und HQ₁₀₀) durchgeführt und für 10 Längsprofilbereiche der Lahn dargestellt (DWA 2006).

In der Studie wurden als Maßnahmentypen eine hier nicht näher vorgestellte Deichrückverlegung an der Lahn selbst sowie Gewässerrenaturierungsmaßnahmen mit a.) Fließwegverlängerung durch Laufkrümmung (1,2 bzw. 6,6 % relativer Verlängerung des Gewässernetzes) und b.) Rauheitserhöhungen von bis zu 30 % (durch Bewuchs- und Querprofilentwicklung an 27 bzw. 81 % des Gewässernetzes) simuliert. Weiterhin wurde die Wirkung kleiner Speicherräume an den Nebengewässern der Lahn untersucht.

Für die Gewässerrenaturierung wurden zwischen obersten Einzugsgebieten und dem Mündungsbereich bei Umsetzung eines Maximalszenarios für ein HQ₁₀₀ Scheitelsenkungen von 4 bis 29 % erreicht. An 7 von 10 Bezugspunkten wurde ein Wert von 10 % überschritten. Speziell am Pegel Marburg wurden mit ca. 29 % die größten Werte erreicht, welche durch eine Wellenentzerrung zwischen Lahn und Ohm bedingt waren. An der Mündung in den Rhein betrug der Wert nur noch 8 %. Wurde ein Realszenario gerechnet (d.h. ein geringerer Umsetzungsgrad an Maßnahmen), fielen die Werte deutlich geringer aus. Es wurde an 8 von 10 Stellen nur noch Scheitelminderungen von 1 bis 4 % erreicht. An zwei Stationen lag der Wert zwischen 7 und 9 %, an der Mündung ging dieser auf knapp über 1 % zurück, was auf Überlagerungseffekte entlang der über 100 km langen Fließstrecke der Lahn zwischen Marburg und Lahnstein und dort entlang

einmündender Gewässer zurückgeführt wurde. Fließwegverlängerung und Rauheitserhöhung führten je nach Umsetzungsgrad zu unterschiedlich starken Scheitelminderungen, die offenbar vor allem durch Laufzeiteffekte bedingt waren (DWA, 2006).

Als weitere Maßnahme fanden Becken mit einem Hochwasserrückhaltevolumen von max. 100.000 m³ und einer Einstauhöhe von < 5 Metern (kleine Becken nach DIN 19700) Berücksichtigung. Bedingt durch die Größe des Gesamtgebietes der Lahn und der hohen Anzahl an Einzelbecken wurden diese zu 47 "fiktiven Becken" an den jeweiligen Mittelläufen der Nebengewässer zusammengefasst. Das betrachtete Gesamtvolumen aller 47 Becken betrug 13,1 Mio. m³ (Realszenario) bzw. 19,5 Mio. m³ (Maximalszenario). Damit lag die durchschnittliche Speichergröße bei 280.000 bzw. 420.000 m³ und wirkte auf 65 % des Einzugsgebietes. Die Speicherabflüsse wurden in der Regel zu Beginn des Einstaus auf ein HQ₂ gedrosselt, bis 50 % der Gesamtfüllung erreicht wurde. Danach wurde die Speicherabgabe verdoppelt und ab Vollstau auf einen Abfluss für ein HQ₅₀ angehoben, um das Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage zu verhindern. Die Simulationsergebnisse für das Maximal- und Realszenario zeigten, dass für die mesoskaligen Zuflüsse zur Lahn (Lumda, Weil, Wohra) und im Oberlauf der Lahn bis Marburg die Scheitelreduktion mit zunehmenden Wiederkehrintervall (HQ₁₀, HQ₂₀, HQ₅₀ und HQ₁₀₀) zunahm. An der Dill erhöhte sich trotz der 6 Speicher der Hochwasserscheitel minimal mit ca. 1 %. An der Lahn selbst konnte nur bis zum Pegel Marburg eine maximale Minderung von 2-3 % festgestellt werden. Im weiteren Verlauf der Lahn stieg für beide Szenarien der Scheitelabfluss wieder an und erreichte bis zur Mündung sogar eine leichte Zunahme mit steigendem Wiederkehrintervall von 1-2 %. Dies wurde begründet durch eine ungünstige Überlagerung der Hochwasserwellen aus Lahn und den Nebengewässern wie Lumda und Weil. Für das HQ₁₀₀ lagen für Lumda, Weil und Wohra die Scheiteländerungen für das Maximalszenario zwischen 16 und 18 %. Für das Realszenario betragen sie 11-14 %. An der Oberen Lahn bis zum Pegel Biedenkopf fielen die Scheitelabsenkungen mit 5 % (Real) und 8 % (Maximal) geringer aus und stiegen dann - wie schon oben erwähnt - auf positive Werte an.

Während für vier der fünf genannten mesoskaligen Nebengewässer eine deutliche Scheitelreduzierung für ein HQ₁₀₀ gezeigt werden konnte, blieb eine überörtliche hochwassermindernde Wirkung der dezentralen Speicher sowohl für das Maximalszenario als auch für das Realszenario aus. An der Einmündung der Lahn in den Rhein zeigte sich sogar noch für alle Wiederkehrintervalle eine Erhöhung des Hochwasserscheitels. Die 47 "fiktiven" Hochwasserrückhaltebecken mit einem Speichervolumen von 13 bzw. 19 Mio. m³ könnten daher lokal als dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen fungieren, würden jedoch auf überörtlicher Ebene keine Wirkung entfalten und die Gefahr einer Wellenüberlagerung bergen. Die Wirkung dezentraler Speicher ist gegenüber den Renaturierungsmaßnahmen in den genannten Nebengewässern -also auf örtlicher Ebene- deutlicher ausgeprägt. Entlang der Lahn zwischen Pegel Marburg und dem Rhein würden alleinig die Renaturierungsmaßnahmen eine hochwassermindernde Wirkung zeigen, welche mit zunehmenden Wiederkehrintervall bis auf über 7 % Scheitelreduktion für ein HQ₁₀₀ an der Mündung in den Rhein ansteigen würde (DWA, 2006; Lang & Tönsmann, 2002).

2.5.6 Untersuchungen von Röttcher an der Erpe im Hessischen Bergland

Röttcher untersuchte am Beispiel der Erpe die Potenziale verschiedener zentraler und dezentraler Maßnahmen auf die Hochwasserminderung (DWA, 2006; Röttcher, 2005). Das Einzugsgebiet liegt westlich von Kassel, ist Teil des Westhessischen Berglandes und umfasst eine Fläche von 153 km². Es wird von Mittelgebirgszügen zwischen 331 bis 599 m. ü. HN umrahmt. Die Mündung in die Twiste befindet sich auf einer Höhe von 174 m. ü. HN unterhalb der Ortschaft Ehringen. Wasserstandsdaten werden am dortigen Pegel seit 1961 erhoben. Es wurden mit Hilfe des N-A-Modells NASIM drei Berechnungsvarianten durchgeführt. Die erste Variante berücksichtigte die Möglichkeit, oberhalb der Ortschaft Ehringen ein zentrales Hochwasserrückhaltebecken mit einem Stauvolumen von 1 Mio. m³ anzulegen. Alternativ dazu wurde ein Stauvolumen von 387.500 m³ (Fläche: 396.000 m²) angenommen. Dieses Volumen entsprach exakt der zweiten Variante, die 9 dezentrale Standorte an der Erpe mit einem Retentionsvolumen zwischen 5.500 und 32.000 m³ und zwei Standorte mit einem zusätzlichen Volumen von mehr als 100.00 m³ berücksichtigte. Die mittlere Einstauhöhe der Becken wurde mit 1-2 Meter angegeben, die Beckenabflüsse wurden alternativ mit festen Drosseln und beweglichen Drosseln gerechnet. Bei festen Drosseln begann der Einstau bei 50-70 % des HQ₁₀, bei den beweglichen Drosseln bei 50-70 % des HQ₁₀₀. Die Standorte wurden im Zuge eines Landesprojektes zur Erfassung vorhandener und potenzieller Retentionsräume an hessischen Fließgewässern ermittelt (Retentionskataster Hessen) (HLUG, 2010).

In der dritten Variante wurde untersucht, welche Auswirkung eine Gewässerrenaturierung auf den Hochwasserabfluss hat. Dies wurde anhand der Erhöhung der Rauheit im Gewässer mit im Mittel um 11 % (Zustand 1) bzw. um 27 % (Zustand 2) modelltechnisch für ein repräsentatives Querprofil für den jeweiligen Vorfluter eines Teileinzugsgebietes umgesetzt. Nebengewässer wurden über eine Änderung der Abflusskonzentrationszeit im Modell berücksichtigt. Ausgangsbasis für die Wirkungsabschätzung der aufgezeigten Maßnahmen war die Hochwasserganglinie für ein HQ₁₀₀ mit einem Scheitelabfluss von ca. 95 m³/s für die Mündung der Erpe.

Die dritte Variante Gewässerrenaturierung (Zustand 1) brachte im Vergleich zu Variante 1 und 2 mit knapp 5 % die geringste Scheitelreduzierung, jedoch mit Zustand 2 die größte zeitliche Verschiebung des Maximums von 1,5-2,5 Stunden. Die 11 Retentionsräume mit steigender Drosselung (feste Drossel) von einem HQ₁₀ auf ein HQ₁₀₀, erreichten mit knapp über 13 % dieselbe Scheitelreduzierung wie die 27 % Rauheitserhöhung im Zuge der Gewässerrenaturierung (Zustand 2). Der Scheitel wurde auf knapp über 80 m³/s gesenkt.

Sowohl die Variante 2 (11 Retentionsräume mit beweglichen Drosseln) als auch das Hochwasserrückhaltebecken Ehringen -beide mit einem Stauvolumen von 387.000 m³ ausgestattet- konnten den Scheitel jeweils um ca. 24 % auf knapp über 70 m³/s senken, bei Ausnutzung von 1 Mio. m³ Stauvolumen konnte dieser Wert für Ehringen mit ca. 42 % weiter erhöht werden.

Die Wirkungsabschätzung von Maßnahmenkombinationen berücksichtigte im weiteren nur noch die 11 Speicher mit festen Drosseln, das Ehringer Hochwasserrückhaltebecken mit 1 Mio. m³ und den Zustand 2 der Rauheitserhöhung mit 27 %. Eine Kombination aus Retentionsräumen und

Renaturierung hat eine Scheitelverzögerung von ca. 3 Stunden und die kleinste Scheitelminderung von 25 % zur Folge. Die Kombination aus dem Hochwasserrückhaltebecken Ehringen, weiteren Retentionsräumen und der Renaturierung erreichte mit 63 % den Höchstwert. Die beiden anderen Kombinationen HRB Ehringen und Renaturierung bzw. HRB Ehringen und Retentionsräume lagen bei 51 bzw. 56 % Scheitelreduktion. Der maßgebliche Anteil der Scheitelreduktion wurde in allen Fällen durch das HRB Ehringen verursacht. Wurden die Summen der Einzelmaßnahmen mit denen der Maßnahmenkombination verglichen, so ergab sich immer eine Differenz zwischen beiden Werten. Es konnte in der Untersuchung gezeigt werden, dass die zusätzlichen Effekte von Maßnahmenkombinationen abnehmen, je größer das flussabwärts liegende zentrale Hochwasserrückhaltebecken wird. Dies hat zur Folge, dass Maßnahmenkombinationen unter Betrachtung größerer flussabwärts liegender zentraler Becken einen Wirkungs-Grenzwert haben. Ungeachtet dessen bleibt die lokale Wirkung der betrachteten Maßnahmen erhalten, ihre überörtliche Wirkung muss hingegen im Kontext flussabwärts liegender Maßnahmen betrachtet werden. Dezentral angelegte Maßnahmen können nach Ergebnissen dieser Untersuchung ganz eindeutig eine überörtliche Schutzwirkung haben. Dies wird dann von Interesse, wenn es im Unterlauf an ausreichenden Schutzmöglichkeiten fehlt (DWA, 2006; Röttcher, 2005).

2.5.7 Untersuchungen von Matschullat et al. zum Hochwasser- und Naturschutz an der Weißeritz im Osterzgebirge

Zwischen 2003 und 2007 wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt das Projekt Hoch-Natur gefördert, welches zum Ziel hatte beispielhaft Optimierungsstrategien und Maßnahmen für die Landnutzung zu entwickeln, um vorsorgenden Hochwasser- und den Naturschutz besser miteinander verbinden zu können. Der vorsorgende Hochwasserschutz beinhaltete in dem Projekt die Verbesserung der Infiltration und Perkolation des Niederschlagswassers, die Erhöhung des Wasserrückhalts auf der Fläche sowie die Verzögerung der Abflusskonzentration im Gerinne. Es sollte darüber hinaus eine Abschätzung der Übertragbarkeit der Methodik und Maßnahmen auf andere Mittelgebirgsräume, eine Initiierung der Maßnahmenumsetzung vor Ort zusammen mit betroffenen Akteuren und Maßnahmensteckbriefe im Sinne von Handlungsempfehlungen erarbeitet werden (Matschullat et al., 2007).

Das Einzugsgebiet der Weißeritz wurde ausgewählt, da es während des Augusthochwasser 2002 besonders stark in Mitleidenschaft gezogen wurde, die Oberläufe zu den Hochwasserentstehungsgebieten in Sachsen gehören und im Einzugsgebiet FFH-Gebiete (NATURA 2000) gemeldet sind bzw. im Oberlauf besonders schützenswerte Biotopvorkommen. Für die betrachteten Teileinzugsgebiete Weißbach und Höckenbach, die über unterschiedliche Landnutzungs- und Biotoptypenausstattungen verfügen, wurde eine detaillierte landschaftsökologische und hydrologische Analyse des aktuellen Zustandes durchgeführt und Biotop und Fließgewässer aus naturschutzfachlicher Sicht bewertet. Darauf aufbauend wurden unterschiedliche Szenarien zur Landnutzungsänderung entwickelt: Waldmehrung, ökologischer Waldbau, Extensivierung der Grünlandwirtschaft und Umwandlung von Acker in

Extensivgrünland, konservierende Bodenbearbeitung, Etablierung von Kleinstrukturen wie Feldhecken, Renaturierung von Gewässern bspw. durch Änderung der Bewuchsstruktur am Gewässer und auf dem Vorland. Die Szenarien wurden in die Modellierung der Abflussverhältnisse (WBS FLAB, WASIM-ETH) integriert und hinsichtlich ihrer Hochwasserschutzwirkung bewertet. Ein wichtiger Untersuchungsaspekt stellte die Betrachtung der Abflussanteile dar. Darüber hinaus wurde eine hydraulische Simulation der Gewässer und Vorländer durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Bewuchstypen auf den Hochwasserabfluss darstellen zu können (Matschullat et al., 2007).

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass bei zu geringer Flächengröße für Waldumbau, Waldmehrerung und Feldhecken die Abflusswirksamkeit lokal beschränkt bzw. sehr gering ist. Dieser Effekte stellte sich auch für flache, skelettreiche Böden in den oberen Lagen des Einzugsgebietes ein. Hingegen zeigten alle Maßnahmen -wie die konservierende Bodenbearbeitung auf Acker-, welche auf großen Arealen den Oberflächenabfluss verkleinern, einen deutlichen Effekt. Als Untersuchungsergebnis konnte für das lößbodengeprägte Gebiet des Höckenbaches bei kurzen Starkniederschlägen die Abflussspitze um 20 % reduziert werden. Eine Nutzungsextensivierung führte bei den dort häufig auftretenden Starkniederschlägen zu Scheitelabminderungen von bis zu 25 %. Eine vollständige Gebietsbewaldung machte hingegen aus Sicht des Hochwasserschutzes keinen Sinn. Eine strukturierte Landschaft mit extensiver Nutzungsform reduzierte hingegen die schnellen Abflusskomponenten (Matschullat et al., 2007).

Die untersuchten Landnutzungsänderungen zeigten ihre größte Wirkung in kleinen bis mittelgroßen Einzugsgebieten und bei Niederschlägen mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 5-50 a. Je nach Ausgangslage waren hierfür jedoch Landnutzungsänderungen oder Anpassung der Bewirtschaftungsform auf 25-50 % der Flächen notwendig. Für den Höckenbach konnte eine deutliche Scheitelabminderung durch eine Fließgewässerrenaturierung und Kleinstspeicher in Form von Teichen und eine deutliche Reduzierung der Fließgeschwindigkeit nachgewiesen werden (Matschullat et al., 2007).

Insgesamt zeigte sich bei den Analysen, dass der vorbeugende Hochwasserschutz mit den Anforderungen des Naturschutzes gut kombinierbar ist, sich beide Landnutzungsaspekte nicht ausschließen, sondern sich positiv ergänzen können. Das Hauptproblem dieses Konzeptes ist nach Auffassung der Verfasser jedoch die notwendige Flächenverfügbarkeit und die damit zu schaffenden Anreize zur dauerhaften Umsetzung solcher Maßnahmen. Grundsätzlich sehen sie aber dieses Konzept vor allem für kleinere Einzugsgebiete als geeignet an (Matschullat et al., 2007).

2.5.8 Untersuchungen von Sieker et al. an der Mulde im Erzgebirge und Erzgebirgsvorland

Das Forschungsprojekt HONAMU veröffentlichte 2007 seinen Abschlussbericht zum Thema „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen“. Der Grundgedanke des Projektes bestand darin, dass ein Großteil der Niederschlags-

mengen bei einem extremen Hochwasser nicht während und im direkten Gefolge der Niederschläge als Hochwasserwelle abfließt, jedoch auf der Einzugsgebietsfläche zurückgehalten wird. Als Beispiel gaben die Autoren das Rheinhochwasser 1993 an, bei dem nur rund 50 % des Niederschlages in der Hochwasserwelle abgeflossen ist und der Rest bis zum Ende des Hochwassers im Einzugsgebiet zurückgehalten wurde (Sieker et al., 2007).

Ein solches theoretisches Rückhaltepotenzial wird begrenzt durch die örtliche Bodenmächtigkeit und die Infiltrationskapazität, durch welche erst die ungesättigten tieferen Bodenschichten erschlossen werden können. Eine Wassersättigung und Verschlammung des Oberbodens wirkt diesem in Form des "Horton'schen Oberflächenabflusses" entgegen. Übertrifft die Niederschlagsintensität die Infiltrationsfähigkeit und ist der Oberboden gesättigt, kommt es zum hochwasserrelevanten Oberflächenabfluss. Darüber hinaus müssen die tieferen Bodenschichten das Wasser entsprechend lange speichern können. Die hydraulischen Eigenschaften und die Vorsättigung der tieferen Bodenschichten sind somit weitere steuernde Faktoren, wenn das Retentionspotenzial der Böden betrachtet werden soll. Es wurde im Rahmen des Projektes am Beispiel der Mulde untersucht, wie durch gezielte Maßnahmen die Speicherfähigkeit auf der Fläche besser genutzt bzw. erhöht werden kann. Vor diesem Hintergrund berechneten die Autoren ein sogenanntes theoretisches "Senkenpotenzial" für die Mulde (EZG 6.800 km²), welches für ein hundertjähriges Regenereignis (mit unterschiedlicher Dauer, Intensität und regenfreier Vorperiode) zwischen 70 und 375 Mio. m³ lag. Dies würde einem durchschnittlichen Retentionsvolumen von 105 bis 550 m³ pro ha bzw. einer speicherbaren Niederschlagshöhe von 10 bis 55 mm entsprechen, welche der Hochwasserwelle entzogen würde. Die Untersuchungen zeigten auch, dass dieses "Senkenpotenzial" ungleichmäßig verteilt ist und sich in erster Linie auf das dem Erzgebirge vorlagerte Lößhügelland beschränkt. Die flachgründigen und stark geneigten Böden in den höheren Lagen des Erzgebirges konnten kaum dazu beitragen. Dieses "theoretisch vorhandene Rückhaltepotenzial" wurde so definiert, dass es sich um Speichervolumen handelt, welches bei hochwasserrelevanten Niederschlägen durch die Infiltration erschlossen werden kann. Eine Oberbodenverschlammung führt bspw. zu einer Reduktion dieses Potenzials. Vor diesem Hintergrund wurden konkret umsetzbare Maßnahmen untersucht, die einer positiven Beeinflussung der Infiltrationseigenschaften dienen. Es wurden daher dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten und die Umstellung auf pfluglose Bodenbearbeitung bewertet. Würden 15 % der bisher an das Kanalnetz angeschlossenen Siedlungsflächen dezentral bewirtschaftet werden, so würde dies in Bezug auf das Hochwasser von 2002 ein zusätzliches Retentionsvolumen von 4,5 Mio. m³ bedeuten. Die Umstellung von 20 % konventionell bearbeiteter Ackerflächen auf konservierende Techniken würde weitere 7 Mio. m³ Volumen erbringen. Würde man darüber hinaus alle Flächen konservierend bearbeiten, dann ließe sich das Retentionsvolumen auf 23 Mio. m³ steigern. Im Vergleich zu den an der Mulde vorhandenen Talsperrenvolumina von insgesamt über 27 Mio. m³, befände man sich damit in einer wasserwirtschaftlich relevanten Größenordnung (Sieker et al., 2007).

Das Projekt verfolgte neben der Quantifizierung solcher "Senken" unter anderem das Ziel der Entwicklung einer auf beliebige Einzugsgebiete übertragbaren Methodik, das Wasserrückhaltepotenzial flächendeckend zu ermitteln. Zudem wurden Synergieeffekte zwischen den Zielen und

Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes und des Naturschutzes identifiziert und ein Katalog von multifunktionalen Hochwasserschutzmaßnahmen für die Bereiche Siedlungswasserwirtschaft und Landwirtschaft entwickelt. Weiterhin wurden „Regelwerke“ zur Definition geeigneter Maßnahmen, Kartenwerke zur Verortung geeigneter Maßnahmen für den Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Landwirtschaft erstellt und Handlungsempfehlungen und beispielhafte Anwendungen naturschutzfachlicher Maßnahmen entwickelt. Darüber hinaus wurden beispielhafte Berechnung der Auswirkungen angenommener Umsetzungsszenarien im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft und der Landwirtschaft auf den Hochwasserabfluss im Muldegebiet durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse wurde abschließend eine Handlungsstrategie zur Umsetzung der vorgeschlagen Ziele und Maßnahmen (Umsetzungsinstrumente, Integration in die räumliche Planung) erarbeitet und eine zusammenfassende Bewertung flächenbezogener Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts bei Hochwasserereignissen vorgenommen (Sieker et al., 2007).

2.5.9 Untersuchungen von Ley & Kreiter an Blies, Prims und Thalfanger Bach zwischen Saar-Nahe-Bergland und Pfälzer Wald

Ein weiterer Fokus der Forschungsaktivitäten wurde durch das INTERREG IIIB Projekt WaReLa (Water Retention by Land use) auf die Stärkung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Fläche gesetzt. Ein Ziel des Projektes war die Untersuchung der Verminderung der Hochwassergefahr durch eine angepasste Landnutzung. Es wurden verschiedene dezentrale und naturnahe Hochwasserschutzmaßnahmen insbesondere in der weiteren Mittelgebirgsregion um die Stadt Trier exemplarisch umgesetzt, untersucht und bewertet (Schüler, 2007). Vor diesem Hintergrund beschäftigen sich die Arbeiten von Kreiter und Ley mit der Wirksamkeitsabschätzung unterschiedlicher dezentraler Maßnahmentypen (vgl. Tab. 1: S.65) auf den Hochwasserabfluss und mit der Identifikation der wesentlichen, den Retentionsprozess beeinflussenden Faktoren (Kreiter, 2007; Ley, 2006). Die Ergebnisse sollten im Rahmen des Projektes als hydrologische Grundlage für ein Decision-Support-System dienen. Weitere Ergebnisse des Projektes finden sich in den Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr.64/07 (vgl. Schüler (2007)).

Es wurde zunächst mit Hilfe des zweidimensionalen Strömungsmodells Hydro-AS-2d ein 7 km langer Gewässerabschnitt der Mittleren Blies hinsichtlich der hochwassermindernden Wirkung einer Auenwaldaufforstung untersucht. Als Referenzereignis diente ein 5-10 jährliches und ein 50-80 jährliches Hochwasser. In allen untersuchten Varianten lag die Scheitelminderung deutlich unter 1 % (Kreiter, 2007).

Darüber hinaus wurde versucht, für das Einzugsgebiet der oberen Blies den Einfluss von Tiefenlockerungsmaßnahmen und wegebaulichen Maßnahmen im Forst abzubilden. Mit Hilfe des prozessorientierten Modellprogramms CATFLOW konnten die an einem 30 m² großen Hang experimentell gewonnen Prozesskenntnisse abgebildet werden. Der beobachtete Effekt der Tiefenlockerung basiert nach diesen Ergebnissen in erster Linie auf einer Verlangsamung der lateralen Wasserbewegung im Boden. Diese Erkenntnis wurde auf die mesoskalige Modellierung

mit WASIM-ETH übertragen. Der Effekt konnte reproduziert werden. Die Autoren geben jedoch an, dass die Simulation des Effektes im Modell nicht physikalisch begründet ist (Kreiter, 2007).

Der Einfluss wegebaulicher Maßnahmen auf das hydrologische Routing führt nach Überlegung von Kreiter über das Anschneiden des Bodenkörpers zu einem "künstlichen Return-Flow" mit sich anschließendem Oberflächenabfluss (Anmerkung des Autors: ...und möglicher sekundärer Infiltration). Dieses Routing ließ sich nicht im Modell darstellen. Daher wurden als Behelf Wege als voll versiegelte Flächen simuliert (Kreiter, 2007).

Tab. 1: Überblick über simulierte Maßnahmentypen, Einzugsgebiete und verwendete Modelle; verändert nach Kreiter (2007)

Maßnahmentyp	Einzugsgebiet	Simulationsmodelle
Auwaldaufforstung	Mittlere Blies	Hydro_AS-2D
Tiefenlockerung	Obere Blies	WaSIM-ETH
Wegebaumaßnahmen	Obere Blies	WaSIM-ETH
Kleinrückhalte	Einzugsgebiet Blies	NAM-NKF Wasp Tools
	Einzugsgebiet Obere Blies	
	Einzugsgebiet Prims	
	Einzugsgebiet Thalfanger Bach	
	"Fiktivsysteme"	

Für ein HQ_{100} (Dezember 1993) lag die Wirkung beider Maßnahmen bei unter 5 % Scheitelminderung. Große, schadbringende Ereignisse können nach Kreiter durch solche Maßnahmen nicht signifikant im Scheitel reduziert werden (Kreiter, 2007). Aufgrund der begrenzten Modellabbildbarkeit wäre zu diskutieren, wie belastbar diese Ergebnisse sind.

Die Wirksamkeit von Kleinrückhalten (KRH) wurde zusammen von Ley (Ley, 2006) und Kreiter (Kreiter, 2007) für die Einzugsgebiete der Oberen Blies (AE ca. 8,5 km²) und des Thalfanger Baches (AE ca. 17 km²) mit dem Modell NAM-NKF geprüft. Für die Untersuchungen wurden als KRH Stauräume betrachtet, die durch talquerende Strukturen wie bspw. Wegedämme entstanden sind. Weiterhin wurden auch ehemalige Fischteiche mit in die Betrachtung einbezogen. Die Abflussregulierung erfolgte anhand von quadratischen Drosseln mit einer Kantenlänge zwischen 200-2000 mm. Die Drosselmindestgrößen orientierten sich an einem fünffachen MQ und wurden in einer weiteren Variante hinsichtlich einer effizienten Stauraumauslastung optimiert. Wasser sollte nur bei Hochwasser zurückgehalten werden. An der Oberen Blies wurden fünf potenzielle Standorte für Kleinrückhaltebecken untersucht. Diese umfassten ein Gesamtvolumen von rund 54.000 m³ mit Volumina zwischen 149 und 41.036 m³. Die Standorte sind hier ehemalige Fischteiche oder Talquerungen in Form von Eisenbahn- und Straßendämmen. Die Teileinzugsgebietsgrößen erstrecken sich zwischen 0,18 und 5,91 km² (Kreiter, 2007; Ley, 2006).

Das untersuchte Gesamtspeichervolumen der fünf lokalisierten Standorte im Untersuchungsgebiet Thalfanger Bach umfasste 69.805 m³ mit Volumina zwischen 1.800 und 50.000 m³. Die Standorte befanden sich wie schon an der Oberen Blies entlang von schon vorhandenen Talquerungen. Vier Becken waren zum Teil deutlich kleiner als 10.000 m³. Die entsprechenden Einzugsgebiete umfassten Flächen zwischen 1 und 13,1 km² Größe (Kreiter, 2007).

Die Simulation eines HQ₁₀₀ ergab an der oberen Blies für eine drosseloptimierte Variante eine Scheitelreduzierung unterhalb des letzten Speichers von bis zu 48 %, am Thalfanger Bach lag diese bei bis zu 28 %. Kreiter schreibt weiterhin, dass in Abhängigkeit des Stauvolumens lokale Scheitelabminderungen zwischen <1 und bis zu über 60 % berechnet wurden. Die Obere Blies und der Thalfanger Bach zeigten, bedingt durch unterschiedliche Abflusscharakteristika und einem höheren spezifischen Retentionsvolumen an der oberen Blies (Anmerkung des Autors: Retentionsvolumen im Verhältnis zur Einzugsgebietsfläche), unterschiedliche Scheitelminderungen auf (Kreiter, 2007). Die Abflussganglinien des Thalfanger Baches waren bei gleichen Niederschlagsverhältnissen breiter und flacher im Vergleich zur oberen Blies, das damit verbundene größere Wellenvolumen ließ daher die Scheitelminderung am Thalfanger Bach niedriger ausfallen. Für kurze, steil ansteigende im Vergleich zu langhaltenden, flacher ansteigenden Hochwasserereignisse, konnten größer Scheitelminderungen erzielt werden. Für den Fall drosseloptimierter Speicher in den Untersuchungsgebieten sind das Wellenvolumen und das spezifische Volumen der Kleinrückhalte die beiden scheitelmindernden Größen. Es konnte gezeigt werden, dass Standorte mit Volumina kleiner 1.000 m³ nicht signifikant zur Hochwasserminderung beitragen und dieser Volumengrenzwert mit zunehmender Einzugsgebietsgröße noch zunimmt. Insgesamt können jedoch nach den Autoren dieser Studien derartige Maßnahmen einen wirksamen lokalen Schutz auch vor großen Hochwasserereignissen darstellen (Kreiter, 2007; Ley, 2006).

Eine weiterführende Betrachtung auf einer größeren Skala erfolgte durch Kreiter anhand der Flussgebiete Prims (AE 730 km²) mit 104 potenziellen Standorten für Kleinrückhalte und der Blies (AE 1.890 km²) mit 79 Standorten (Kreiter, 2007). Diese 79 Standorte umfassten 3.65 Mio. m³ Retentionsvolumen. Davon entfiel allerdings auf 50 % der Standorte nur ein Stauvolumen von jeweils kleiner 10.000 m³, de facto wurden hier nur 6 % des Gesamtstauvolumens abgedeckt. An der Prims waren die Verhältnisse ähnlich. Das Gesamtstauvolumen der 104 Standorte lag bei 1.5 Millionen m³, davon entfielen auf die 56 % Standorte kleiner 10.000 m³ nur 13 % des Gesamtstauvolumens.

Es wurden für die Blies, je nach Ereignis (Dezember 1993 und Januar 1995) und Lage, 3-14 % und für die Prims 3-10 % Scheitelminderung an den vier bzw. drei amtlichen "Hochwasserbrennpunkten" simuliert. Die größten Scheitelminderungen entlang des hydrologischen Längsschnittes / der Hochwasserbrennpunkte beider Gewässer wurden in den oberen Bereichen der Einzugsgebiete bis zu einer Gesamtfläche von AE 500 km² erzielt, die überregionale Wirkung nahm in beiden Gebieten danach stetig ab. Am Gebietsauslass der Blies lag sie bei einem HQ₅₀ bis HQ₁₀₀ bei 2-4 %, an der Primsmündung bei 3-5 %. Die hydrologische Wirkung der Maßnahmen war durch Standorte mit einem Volumen zwischen 10.000 und 50.000 m³ begründet. Kleinrückhalte mit einem Volumen kleiner 10.000 m³ zeigten kaum eine überregionale Wirkung auf, konnten

jedoch in den Oberläufen mit bis zu 10 km² Einzugsgebietsfläche Scheitelreduktionen von rund 5 % erzielen. Betrug das Gesamtvolumen weniger als 2 mm Gebietsrückhalt, konnte jedoch keine signifikante Hochwasserreduzierung erreicht werden (Kreiter, 2007).

Entscheidend für eine scheidelmindernde Wirkung solcher Maßnahmen ist naturgemäß das Volumen des jeweiligen Standortes, welches jedoch in Relation zum betrachteten Hochwasser gesehen werden muss. Eine Steigerung des Retentionspotenzials kleiner Rückhaltebecken kann über die Optimierung der Drosselöffnungen erzielt werden. Kleinstrückhalte können damit nach den Ergebnissen von Ley und Kreiter zum lokalen Hochwasserschutz beitragen, insbesondere in Gebieten bis 500 km² Fläche, jedoch vermindert sich ihre Wirkung bei größeren Einzugsgebieten deutlich. Eine überregionale Wirkung auf Flussgebietsebene ist nicht gegeben (Kreiter, 2007; Ley, 2006; Reinhardt, 2010).

2.5.10 Untersuchungen von Jeníček an der Chomutovka im Mittleren Erzgebirge

Jeníček arbeitete im Mittleren Erzgebirge zum Einfluss kleiner, ungesteuerter Rückhaltebecken auf das Abflussverhalten der Chomutovka (Jeníček, 2008). Das Einzugsgebiet wird im Nordwesten vom Erzgebirgskamm und dem Einzugsgebiet der Natzschung und der Schwarzen Pockau begrenzt. Die Quellregion der Chomutovka liegt westlich unterhalb des 994 Meter hohen Jeleni Hora. Der Bach entwässert über die steile Südwestabdachung des Erzgebirges in die Ohře. Das sehr schmale Untersuchungsgebiet umfasst bis zum Bezugspegel Tišina (ca. 400 m. ü. HN) oberhalb der Stadt Chomutov (320 m. ü. HN) eine Fläche von 14,5 km² bei einer ungefähren Fließlänge von 12 km. Ähnlich wie die Natzschung oberhalb der Gemeinde Rothenthal, verläuft die Chomutovka entlang der Erzgebirgsabdachung in einem steilen Kerbtal ohne Retentionsmöglichkeiten, bevor sie die Stadt Chomutov erreicht. Mögliche Hochwasserschutzpotenziale oberhalb der Stadt Chomutov sind damit am ehesten und wenn überhaupt, in den oberen Einzugsgebietslagen zu erwarten. Die Notwendigkeit hierfür ergab sich, wie auch im restlichen Erzgebirge, u.a. aus dem Augusthochwasser 2002 (Jeníček, 2008).

Für die Simulation wurde das konzeptionelle hydrologische Modell HEC-HMS verwendet und anhand des Zeitraums 27.09.2007-01.10.2007 kalibriert und für das Augusthochwasser 2002 (11.-19.08.2002) validiert. Es wurden für die Szenariorechnungen drei Standorte für potenzielle Rückhaltebecken betrachtet, welche sich auf einer Geländehöhe zwischen 764 und 824 Meter ü. HN und damit auch sehr weit oben im Einzugsgebiet befanden. Die Volumina wurden anhand eines digitalen Geländemodells ermittelt. Die Abflusssteuerung der Becken erfolgte anhand mehrerer übereinander angeordneter Drosseln mit unterschiedlichen Durchmessern, welche aufeinander abgestimmt waren. In Szenario 1 wurde ein Gesamtspeicherraum von 57.740 m³ mit maximalen Dammhöhen von 4 Meter und einen Sicherheitsüberlauf auf einer Höhe von 3,5 Meter betrachtet. Die Einzelspeicher hatten ein Fassungsvermögen zwischen 23.750 und 29.700 m³. Für das Szenario 2 wurden die Dammkronen auf 5 Meter (4,5 Meter Überlaufhöhe) erhöht und damit der Speicherraum auf 110.700 m³ erweitert. Die Einzelspeicher konnten nun zwischen 45.980 und

55.540 m³ Wasser zwischenspeichern. Es wurden 24 stündige Niederschlagsereignisse mit Wiederkehrintervallen von 10, 20, 50 und 100 Jahren untersucht und in 15 Minuten Zeitschritten modelliert (Jeníček, 2008).

Die jeweiligen Scheiteldurchflüsse betragen in obiger Reihenfolge zwischen 4 und 10 m³/s. In Szenario 1 konnten diese entsprechend auf 2,4 bis 8,4 m³/s und in Szenario 2 auf 2,4 bis 5,9 m/s reduziert werden. Insgesamt wurde in Szenario 1 eine im Vergleich zu Szenario 2 erklärbar niedrigere Scheitelreduktion zwischen 41 % bei einem Wiederkehrintervall von 10 Jahren und 21 % bei einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren erzielt. In Szenario 2 fielen mit größerem Speicherraum die Scheitelreduktion für die Wiederkehrintervalle N₂₀, N₅₀ und N₁₀₀ höher aus mit Werten zwischen 43 und 44 %. Damit zeigte sich die größte Wirksamkeit der Hochwasserrückhalteräume in Szenario 1 bei dem kleinsten Bemessungsniederschlag und in Szenario 2 für die beiden größten Bemessungsniederschläge. Für die beiden letztgenannten Niederschlagsereignisse konnte zudem die Scheitellaufzeit um jeweils 30 Minuten verzögert werden. Abschließend wurde geprüft -hier wurde vom Autor nicht angegeben, ob es sich um die kleinere oder größere Speichervariante handelte-, welche Retentionswirkung für das Auguthochwasser 2002 erzielt worden wäre. Die Anordnung und Kapazität der Drosselorgane wurden für dieses Hochwasser optimiert. Simuliert wurde ein 72 stündiger Niederschlag mit einer Summe von 237 mm. Die erste Hochwasserwelle mit einem Scheitel von 25,4 m³/s konnte um 11,8 % reduziert und um 60 Minuten verzögert werden. Hingegen zeigte sich für die 12 Stunden spätere eintreffende, zweite Hochwasserwelle mit einem Scheitel von 24,7 % keine weitere Veränderung. Die Dammkronen wurden zwar nicht überspült, jedoch gibt der Autor ebenfalls an, dass das Speichervolumen für das Auguthochwasser nicht ausgereicht habe. Demnach konnte für das Auguthochwasser 2002 zwar für die erste Hochwasserwelle eine signifikante Scheitelreduktion herbeigeführt werden, jedoch reichte das Speichervolumen nicht, um die zweite Welle beeinflussen zu können (Jeníček, 2008).

Insgesamt zeigt sich jedoch, dass solch dezentral, in den obersten Einzugsgebietsbereichen angesiedelte Speicher eine durchaus realistische Hochwasserschutzvariante für die Stadt Chomutov darstellen können und auf jeden Fall bis zu einem 100 jährlichen Niederschlags-Wiederkehrintervall eine deutliche Wirkung zeigen. Die vertikale Anordnung mehrerer Drosselorgane ist in diesem Kontext eine sinnvolle Variante zur optimierten Durchflusskontrolle der Speicher. Eine Vergrößerung des Retentionsvolumens würde darüber hinaus durchaus die Möglichkeit zu einer maßgeblichen Scheitelreduzierung für Extremereignisse wie im August 2002 bieten (Jeníček, 2008).

2.5.11 Untersuchungen von Reinhardt an der Oberen Flöha im Mittleren Erzgebirge

Reinhardt veröffentlichte 2010 seine Ergebnisse zum dezentralen Hochwasserrückhalt im Einzugsgebiet der Oberen Flöha im Mittleren Erzgebirge (Reinhardt, 2010; Reinhardt et al., 2011). Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Interreg-Projektes DINGHO mit Hilfe des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM durchgeführt (Reinhardt, 2010; Reinhardt et al., 2011; Schulte et al., 2007). Das betrachtete Einzugsgebiet umfasst die Obere Flöha zwischen der

Talsperre Rauschenbach sowie zwischen den Pegeln Rothenthal / Natzsung (Schnittstelle zum Einzugsgebiet der Natzsung) und Pockau 1 / Flöha, darin enthalten ist auch das Teileinzugsgebiet der Schweinitz, welches dem der Natzsung direkt angrenzt. Als zentraler Bezugspunkt der Untersuchungen diente die Stadt Olbernhau, welche unterhalb der Konfluenz von Oberer Flöha, Schweinitz und Natzsung liegt und durch das Hochwasser 2002 massiv betroffen war. Das hydrologische Einzugsgebiet der Flöha umfasst eine Fläche von 385 km² bis zum Pegel Pockau 1, davon entfallen 239 km² auf das oben genannte Untersuchungsgebiet. Während das Untersuchungsgebiet knapp dreimal größer als das der Natzsung ist, sind beide Gebiet hinsichtlich ihrer Geographie weitestgehend vergleichbar. Neben dem Quellgebiet der Schweinitz und dem Zulauf aus der Natzsung und der Talsperre Rauschenbach setzt sich das Untersuchungsgebiet aus zwölf Teileinzugsgebieten zusammen, welche über Flächengrößen zwischen 4,9 und 33,5 km² verfügen. Ein markanter Unterschied zur Natzsung besteht in der breiteren Talsohle der Oberen Flöha und einem geringeren Sohlgefälle von 0,6 %.

Vor dem Hintergrund der Hochwasserproblematik im Mittleren Erzgebirge wurden im Rahmen der Arbeit vier Fragestellungen bearbeitet: Es wurde die hydrologische Wirkung kleiner, dezentral angeordneter Rückhaltebecken bei einem größeren Hochwasserereignis mit einem längeren Wiederkehrintervall im Einzugsgebiet untersucht. Weiterhin analysierte Reinhardt die zusätzlichen Potenziale zur Hochwasserminderung durch Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur an den Nebengewässern. Darüber hinaus sollten obige Maßnahmen sinnvoll kombiniert und deren integratives Potenzial für den Hochwasserrückhalt simuliert werden. Abschließend wurde gefragt, ob durch diese Maßnahmen gleichzeitig eine örtliche Risikominderung für die Gemeinden in den Quellgebieten und eine überörtliche Wirkung in Olbernhau zu erreichen ist (Reinhardt, 2010).

Auf der Fragestellung aufbauend, formulierte Reinhardt drei Ziele für die Untersuchungen: Es sollte mit Hilfe des Modellsystems NASIM in einem ersten Schritt das natürliche Niederschlag-Abfluss-Verhalten des Einzugsgebietes der Flöha im Hochwasserfall nachgebildet werden. Darauf aufbauend sollte als Referenz für den abschließenden Untersuchungsschritt, auf Basis von Bemessungsniederschlägen, die Abflussganglinie eines HQ₁₀₀ simuliert werden. Die letzte Zielsetzung beinhaltet die Implementierung dezentraler Maßnahmen in das hydrologische Modell und die Ableitung differenzierte Aussagen zu deren Schutzleistung sowie zu optimierten Varianten mit größtmöglichem Realisierungspotenzial (Reinhardt, 2010).

Reinhardt führte zunächst für den Zeitraum 2002-2006 eine Modellkalibrierung anhand einer Tageswertsimulation durch. Die Modellkalibrierung erfolgte anhand der Messdaten des Pegels Pockau 1. In dieser Messreihe ist das Augusthochwasser 2002 mit einem Maximum von 315 m³/s enthalten, sowie zwei typische Frühjahrereignisse in einer Kombination aus Schneeschmelze und Regenfällen mit einem Scheitel von 109 m³/s (März 2005) und 115 m³/s (März 2006). Reinhardt gibt für das Sommerhochwasser ein statistisches Wiederkehrintervall von 200 Jahren an, dieses Hochwasser überschritt alle bis dahin gemessenen Durchflusswerte. Die weiteren Ereignisse entsprachen annähernd einer Hochwasserjährlichkeit eines HQ₁₀, welches mit 113 m³/s angegeben wird. Anhand des Tageswertmodells wurden hydrologische Anfangsbedingungen wie Bodenfeuchte und Anfangsschneehöhe für Einzelereignissimulationen

abgeleitet, die drei genannten Einzelereignisse nochmals auf Stundenwertbasis gerechnet und deren Modellgüte geprüft. Abschließend wurde als Bemessungshochwasser ein HQ_{100} mit einem Scheitel von $255 \text{ m}^3/\text{s}$ generiert und darauf basierend die Wirkung verschiedener Hochwasserschutzmaßnahmen analysiert. Diese umfassen 13 potenzielle Hochwasserrückhaltebecken mit Volumina zwischen 12.000 m^3 und 58.100 m^3 (kumuliert 360.400 m^3 , spezifisches Volumen von $1,6 \text{ mm}$). Die Einzugsgebietsgrößen liegen zwischen 3 und 24 km^2 . Die Becken verorten sich analog zum Gedanken des dezentralen Hochwasserschutzes an Standorten entlang der einzelnen Zuflüsse zur Flöha und Schweinitz bzw. oberhalb potenziell gefährdeter Ortslagen, wie bspw. dem Kurort Seiffen (Reinhardt, 2010). Es wurden darüber hinaus Fließwegverlängerungen, Aufforstungsmaßnahmen in ausgewählten Talsohlabschnitten und Maßnahmenkombinationen hinsichtlich ihrer hochwassermindernden Wirkung untersucht.

Ortslage	Gewässer	HRB-Standorte	spezifisches Volumen [mm]	Scheitelreduktion HQ_{100} [%]	Scheitelverzögerung HQ_{100} [h]
Seiffen	Seiffener Bach	Seiffen Zufluss Ortslage	13,3	28,3	8
Seiffen	Seiffener Bach	Seiffen Ortsausgang	5,9	11,4	0
Heidersdorf	Mortelbach	Mortelgrund Heidersdorf 1 Heidersdorf 2	7,4	17,2	5
Deutschneudorf	Schweinitz	Deutschneudorf Deutscheinsiedel 1 Deutscheinsiedel 2	7,4	17,2	5
Deutsch-Katharinenberg	Schweinitz	Deutschneudorf Deutscheinsiedel 1 Deutscheinsiedel 2 Deutschkatharinenberg	7,4	17,2	5
Hora Svaté Kateřiny	Kateřinský	Hora Svaté Kateřiny	3,7	8,6	3
Neuhausen	Frauenbach	Neuhausen	2,4	2,7	1

In Tabelle 2 sind die Modellierungsergebnisse hinsichtlich der örtlichen Wirkung der potenziellen Hochwasserrückhaltebecken aufgeführt. Die Werte erfassen immer die kumulative Wirkung der für die Ortslage relevanten Hochwasserrückhaltebecken, daher kommt es in der Tabelle zu Mehrfachnennungen. Während mit 28,3 % die größte Scheitelreduktion und mit 8 Stunden die größte Scheitelverzögerung am Zufluss zur Ortslage Seiffen erreicht wurde und am Ortsausgang Seiffen auf 11,4 % bzw. auf 0 Stunden abfiel, wurde hingegen für die Ortslage Neuhausen / Frauenbach mit 2,7 % der niedrigste Wert berechnet. Dort betrug die zeitliche Verzögerung 1 Stunde. Bezogen auf die Ortslage Heidersdorf betrug die Scheitelabminderung durch die drei Speicher am Mortelbach 17,2 % und die Abflussspitze wurde um 5 Stunden verzögert. Bis zur Ortslage Deutschneudorf konnten drei Speicher an der Schweinitz den Hochwasserscheitel um 13,3 % reduzieren. Hingegen fiel die Laufzeitverzögerung mit 1 Stunde sehr gering aus. Diese betrug für das weiter flussabwärts der Schweinitz gelegene Deutsch-Katharinenberg hingegen 2 Stunden, wobei die Scheitelreduktion trotz eines zusätzlichen Speichers und eines höheren spezifischen Volumens von 5,7 mm mit 12,6 % geringer ausfiel. Für die auf tschechischem Staatsgebiet liegende Ortschaft Hora Svaté Kateřiny konnte der Hochwasserscheitel des Kateřinský Potok um 8,6% verringert und um 3 Stunden verzögert werden. Der Tabelle ist weiterhin zu entnehmen, dass sich mit abnehmendem spezifischen Volumen auch die scheitelreduzierende Wirkung der Maßnahmen verringert (Reinhardt, 2010).

Reinhardt untersuchte darüber hinaus die überörtliche Wirkung der Maßnahmen entlang des Hauptvorfluters Flöha sowie im Stadtgebiet von Olbernhau. Deutliche Effekte sind erst unterhalb der Mündung des Mortelbaches in die Flöha zu erkennen, da oberhalb für eine Gebietsfläche von 43 km² mit drei Speichern lediglich ein Retentionsvolumen von 44.400 m³ zur Verfügung steht. Erst zwischen Mündung Mortelbach bis oberhalb der Einmündung der Schweinitz stehen drei weitere Speicher mit 98.900 m³ Volumen zur Verfügung. Es vergrößert sich zwar das Einzugsgebiet um 21,6 km², jedoch konnte durch die zusätzlichen Speicher der Scheitel von knapp über 60 m³/s auf 56 m³/s und damit bis zu 6,6 % gesenkt werden. Mit der Einmündung der Schweinitz in die Flöha vergrößern sich schlagartig das Einzugsgebiet um weitere 61,8 km² und damit auch der Gesamtabfluss der Flöha, welcher auf knapp über 100 m³/s ansteigt. Bedingt durch die Rückhaltemaßnahmen (217.000 m³, 7 Speicher) im Einzugsgebiet der Schweinitz liegt der Scheitel an der Flöha um 6 m³/s bzw. 5,4 % niedriger im Vergleich zum Ist-Zustand. Mit Einmündung der Natzsung in die Flöha wird der Abfluss nochmals stark erhöht. Am Pegel Olbernhau 2, welcher unterhalb der Einmündung im Stadtgebiet Olbernhau liegt, beträgt der Abfluss dann schon 185 m³/s. Der Scheitel wird nur noch um 4 % gesenkt, die absolute Differenz zwischen IST- und SOLL-Zustand ist jedoch mit 7,3 m³/s sogar noch leicht gestiegen. Es findet am Pegel Olbernhau 2 eine nur sehr geringe Wellenverformung statt, der schnell ansteigende Hochwasserast bleibt nahezu unverändert, der Scheitel wird gesenkt, jedoch nicht verzögert und erst mit fallendem Ast findet eine leichte Abflussverzögerung statt. Bis zum Bezugspegel Pockau 1 bleibt die absolute Scheitelreduktion unverändert, bedingt durch den zunehmenden Gesamtabfluss fällt der relative Anteil mit 2,6 % weiter ab. Eine überörtliche Wirkung der dezentral angelegten Speicher für die Stadt Olbernhau kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Speicher im Mittel nur zu 82 % (296.700 m³) ausgelastet werden, hier also noch

Optimierungsbedarf besteht. In den Untersuchungen wurde darüber hinaus auch die Wirkung der Hochwasserrückhaltebecken für das Augusthochwasser 2002 simuliert. Die Becken waren bzgl. der Einstauleistung auf ein HQ_{100} ausgelegt, welche für dieses Extremszenario ausnahmslos für alle 13 Speicher überschritten wurde und zum Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage führte. Am Pegel Olbernhau konnte für dieses Szenario eine Scheitelminderung von 1,6 % ermittelt werden.

Sowohl die Modellierung der Wirkung von Gehölzstreifen (Erhöhung der Vorlandrauheit durch Anlage von beidseitigen, 5 Meter breiten Gehölzrandstreifen am Gewässer) und Fließwegverlängerungen (verringertes Sohlgefälle, verlängerter Fließweg) ergab keine signifikante Retentionswirkung dieser Maßnahmen. Die Aufforstung der Talsohle entlang der gesamten abflusswirksamen Querschnitte der Flusstäler zeigte auf örtlicher Bezugsebene eine Wirkung, die unter 1 % lag. Hingegen konnte Reinhardt zeigen, dass am Pegel Olbernhau das HQ_{100} um $8 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. 4,3 % gesenkt werden konnte und eine zeitliche Verzögerung des Scheitels von 2 Stunden erreicht wurde. Wurde die Aufforstung bzw. die Erhöhung der Vorlandrauheit ausschließlich auf das breite, schwächer geneigte Flöhatal beschränkt, blieb zwar eine Scheitelverzögerung aus, jedoch konnte dessen Retentionswirkung genutzt und der Scheitel immer noch um 3,5 % gesenkt werden. Für das Augusthochwasser 2002 wurde unter der Annahme einer vollständigen Bewaldung aller Talsohlen insgesamt eine absolute Reduzierung von $249 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $233 \text{ m}^3/\text{s}$ (6,4 %) erreicht (Reinhardt, 2010).

Abschließend wurden in einer kombinierten Maßnahme die 13 dezentral angeordneten Hochwasserrückhaltebecken zusammen mit einer maximal möglichen Aufforstung der gesamten Talsohle gerechnet. Die Ergebnisse der Simulation für ein HQ_{100} zeigen, dass es auf örtlicher Ebene einen nicht nennenswerten Unterschied zur alleinigen Wirkung der 13 Becken gibt. Erst auf überörtlicher Ebene konnte für den Pegel Olbernhau 2 eine Scheitelreduktion von 8,2 % ($15 \text{ m}^3/\text{s}$) und eine Scheitelverzögerung von 2 Stunden beobachtet werden. Die verstärkte Retentionswirkung ließ sich entlang des gesamten Flöhatal nachweisen. Es ergab sich bereits im oberen Gewässerabschnitt eine Reduktion, welche bis zur Mündung des Mortelbaches bis auf 3,4 % anstieg und bis zur Einmündung der Schweinitz bis auf 8,7 % zunahm. Hiernach fiel der Wert wieder auf 6,6 % ab, konnte jedoch durch den zeitlichen Versatz zur Natzschung-Hochwasserwelle danach wieder auf 7,5 % und schlussendlich bis auf 8,2 % am Pegel Olbernhau 2 ansteigen (Reinhardt, 2010).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich eine Wirkung eines Teils der Maßnahmen aufzeigen lässt, diese jedoch differenziert nach Problemstellung, Zielsetzung und Örtlichkeit beurteilt werden muss. Reinhardt schreibt, dass die Potenziale zur Anlage kleiner Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet begrenzt sind und sich ihre Wirkung auf die lokale Ebene reduziert. Auch haben nach dieser Untersuchung Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur und die Gewässerrandstreifenaufforstung keinen nachhaltigen Hochwasserschutzeffekt. Interessant scheint für den Hochwasserschutz vor allem die Kombination aus Rückhaltebecken und Talsohlenbewaldung zu sein. Die Kombination zeigt auch für die Stadt Olbernhau einen spürbaren Effekt, sie reicht jedoch als alleinige Maßnahme für den Hochwasserschutz in Olbernhau nicht aus. Die Maßnahmen können hier nur flankierend zu anderen Lösungsansätzen

agieren. Dies sind bspw. die Verbesserung des Hochwasserrückhalts an der Natzschung als auch zusätzliche Maßnahmen wie bspw. flächenhafte Nutzungsänderungen (Reinhardt, 2010). Es kann jedoch durch solche Maßnahmenkombinationen sowohl der Hochwasserschutz in den Hochlagen oberhalb steilerer Talbereiche als auch in den sich anschließenden breiten Talsohlen, wo die Wirkung kleiner Speicher nachlässt, berücksichtigt werden. Die Ergebnisse von Reinhardt sind sowohl aufgrund der geographischen Lage und Ausstattung des Untersuchungsgebietes als auch durch die Methodik und Maßnahmen mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar und bilden eine ausgezeichnete Grundlage zur Einordnung eigener Ergebnisse.

2.5.12 Untersuchungen von Rieger an der Windach im Bayerischen Alpenvorland

Rieger veröffentlichte 2012 seine Arbeit zur prozessorientierten Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen (Rieger, 2012). Diese sehr umfangreiche Arbeit wird im Folgenden ausführlicher besprochen, da sie den aktuellen Stand der Forschung behandelt und die unterschiedlichen Aspekte des dezentralen Hochwasserschutzgedankens aufgreift, modelltechnisch umsetzt und ergänzt.

Als Untersuchungsgebiet diente Rieger die Windach zwischen Windachspeicher (617 m. ü. HN) und Einmündung in die Amper (532 m. ü. HN) mit einer Lauflänge von 18,5 km und einem mittleren Gefälle von 0,46 %. Es umfasst eine Fläche von 68 km². Das Einzugsgebiet der Windach befindet sich in einer welligen mit zahlreichen Senken ausgestatteten Jungmoränenlandschaft des Alpenvorlandes 50 km westlich von München. Das Gesamteinzugsgebiet inkl. des Bereiches südlich des Windachspeichers erstreckt sich auf eine Fläche von 128 km². Der für die Modellierung verwendete Bezugspegel Greifenberg umfasst ein Einzugsgebiet von 124 km². Das dortige HQ₁₀₀ wurde mit 70 m³/s angegeben. Sieben Zuflüsse, welche 2/3 des Untersuchungsgebietes und 1/3 des Gesamteinzugsgebietes einnehmen, haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Abflussgeschehen der Windach, sie umfassen Flächen zwischen 1,4 und 14,2 km². Deren HQ₁₀₀ variiert zwischen 0,8 und 13 m³/s. Die Windachzuflüsse wurden im Gegensatz zur Windach im Zuge einer Flurbereinigung umfassend begradigt. 1930 und zwischen 1965 und 1975 wurden größere Dränmaßnahmen durchgeführt, so dass heute 11 % der Gesamtfläche und 50 % der Ackerfläche drainiert sind. Im Rahmen der Untersuchung wurden ausschließlich Maßnahmen für ländlich geprägte Einzugsgebiete betrachtet, da mit 51 % Flächenanteil die Grünlandnutzung und Weidewirtschaft (Milchviehwirtschaft) die dominierende Nutzungsform ist. Ihr folgen Waldbestände mit 25 % Anteil (vornehmlich Fichtenwald mit 17%) und mit 17 % konventionell bewirtschaftete Ackerflächen (Rieger, 2012).

Rieger stellte vor dem Hintergrund bisheriger Forschungsarbeiten zum dezentralen Hochwasserschutz (Assmann, 1999; Assmann & Gündra, 1999; Bölscher & Schulte, 2007; Kreiter, 2007; Marenbach & Koehler, 2003; Reinhardt, 2010; Reinhardt et al., 2011; Wegner, 1992) die Überlegung an, dass bedingt durch das dichte Gewässernetz und die Topographie zahlreiche Möglichkeiten zur Schaffung dezentraler Retentionsräume vorhanden sind. Weiterhin wurde berücksichtigt, dass die begradigten und hochwasserrelevanten Windachzuflüsse und die dortige Grünlandnutzung ein hohes Renaturierungspotenzial bieten. Durch Sohlanhebung und

Gefälleverringering sollte ein frühzeitiges Ausuferen herbeigeführt und durch Auwaldaufforstungen die Retention in der fließenden Welle verstärkt werden, so dass über die gewählten Maßnahmen sowohl lokal als auch überörtlich eine hochwassermindernde Wirkung erzielt wird. Weiterhin sollte der Einfluss konservierender Bodenbearbeitungsmaßnahmen sowie der Einfluss von Dränmaßnahmen auf den Hochwasserabfluss analysiert werden. Eine abschließende Ergänzung der Analysen erfolgte durch die Betrachtung der Hochwasserwirksamkeit von Aufforstungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und von Waldumbaumaßnahmen auf Forststandorten (Rieger, 2012). Eine Übersicht über die geplanten Maßnahmen gibt Tabelle 3.

Tab. 3: Umsetzbare dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet der Windach nach Rieger (2012)		
Einzelmaßnahmen	Modellrelevante Parameter	Hydrologische Teilprozess
1. Konservierende Bodenbearbeitung im Ackerbau	Makroporenkapazität, Makroporenlänge, Bodenart	Abflussbildung
2. Dränmaßnahmen auf Ackerstandorten	Dränabstand, Dräntiefe, Bodenart	Abflussbildung, Abflusskonzentration
2. Veränderung der mechanischen Belastung auf Grünlandstandorten	Lagerungsdichte	Abflussbildung
4. Renaturierung von Nieder- und Hochmoorflächen	Gesättigte Leitfähigkeit, Porosität	Abflussbildung
3. Ökologischer Waldumbau und Aufforstungsmaßnahmen	Interzeption, Wurzelstruktur, Makroporenfluss, Landnutzungsanteile	Abflussbildung
4. Dezentrale Kleinrückhalte	Speicher im Gerinne	Abflusskonzentration, Wellenablauf
5. Renaturierung von Fließgewässern, inkl. Auwaldaufforstung	Lauflänge, Sohlgefälle, Bewuchs	Abflusskonzentration, Wellenablauf

In der Arbeit wurde unter Zuhilfenahme von numerischen Modellen die Effektivität einzelner dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen am Beispiel dieses ländlich geprägten Einzugsgebietes analysiert. Auf Basis der Einzelergebnisse wurde eine optimierte Kombination wirksamer Maßnahmen simuliert und ein Hochwasserschutzkonzept für die Windach formuliert. Es wurden im Einzelnen folgende Maßnahmen geprüft, von denen im weiteren Verlauf des Kapitels lediglich

die dezentralen Kleinrückhalte und die Renaturierung von Fließgewässern genauer besprochen werden. Detaillierte Ausführungen zu den übrigen Aspekten finden sich in Rieger (2012).

Die hydrologische Modellierung erfolgte mit dem physikalisch basierten Modell WASIM-ETH. Zur genaueren Abbildung der Fließprozesse im Gerinne wurde dieses Modell mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell (HYDRO_AS-2D) gekoppelt und lieferte für das Strömungsmodell die Eingangsdaten. Im Untersuchungsgebiet und im Labor gewonnene bodenhydraulische Kennwerte dienten zur verbesserten Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodells. Für die Kalibrierung wurde der Zeitraum 01.06.02 bis 31.05.03 (inkl. Augusthochwasser 2002) und für die Validierung der Zeitraum 01.06.03 bis 31.08.05 (inkl. Augusthochwasser 2005) gewählt (Rieger, 2012).

Tab. 4: Untersuchte Hochwasserereignisse an der Windach zur Wirksamkeitsanalyse dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, verändert nach Rieger (2012)

Hochwasserereignis und Bezeichnung	Jährlichkeit und Typus	Dauer	Abflussspitze
Augusthochwasser 2002: HQ _{10_a}	HQ ₁₀ (advektiv)	76 h	21 m ³ /s
Pfingsthochwasser 1999: HQ _{100_a}	HQ ₁₀₀ (advektiv)	68 h	43 m ³ /s
Hochwasserszenario 1 (Klimamodell): HQ _{50_k}	HQ ₅₀ (konvektiv)	39 h	31 m ³ /s
Hochwasserszenario 2 (Klimamodell): HQ _{60_k}	HQ ₆₀ (konvektiv)	26 h	32 m ³ /s

Zur Wirksamkeitsabschätzung der dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen wurden insgesamt 4 unterschiedliche Hochwasserereignisse zugrunde gelegt, die in Tabelle 4 aufgeführt sind. Es handelte sich um das Hochwasser vom August 2002 und das Pfingsthochwasser 1999, welche durch Jährlichkeiten von 10 bzw. 100 a und Abflussspitzen von 21 bzw. 43 m³/s gekennzeichnet sind. Sie wurden durch advective Niederschläge hervorgerufen, hatten eine Dauer von 76 bzw. 68 Stunden und waren durch ein "langsames" Auflaufen der Hochwasserwelle nach ein bis zwei Tagen charakterisiert.

Die Hochwasserszenarien 1 (HQ₅₀) und 2 (HQ₆₀) wurden anhand von Klimamodellen erstellt und standen stellvertretend für konvektive Niederschlagsereignisse. Ihre Dauer ist auf 39 bzw. 26 Stunden begrenzt gewesen und die Abflussvolumina waren im Vergleich zu den advektiv bedingten Ereignissen kleiner. Jedoch vollzog sich das Auflaufen der Welle rasch in wenigen Stunden. Die Abflussspitzen für die Jährlichkeit HQ₅₀ bzw. HQ₆₀ lagen bei einem Abfluss von 31 bzw. 32 m³/s. Die Auswahl dieser vier Ereignisse erlaubt die Analyse des Einflusses von Abflussspitzen, Abflussvolumina, Hochwasserreaktionszeiten und Hochwasserdauer auf die

hochwassermindernde Wirkung oben vorgestellter Maßnahmen. Die Simulationsergebnisse wurden für die Windachzuflüsse und für den Bezugspegel Greifenberg betrachtet (Rieger, 2012). Rieger untersuchte in diesem Kontext und unter Berücksichtigung der DIN-Norm 19700 (2004) dezentrale Kleinrückhalte, die den Kriterien in Tabelle 5 entsprechen. Die Standortfindung erfolgte GIS-gestützt und die Vorgehensweise bei der Klassifizierung der Standorte orientierte sich an einem Schema von Konjevic (2008). Von den 100 möglichen Standorten konnten am Ende 19 Standorte als geeignet und wahrscheinlich umsetzbar klassifiziert und für die weiteren Analysen berücksichtigt werden. Die Volumen- und Flächenermittlung erfolgte anhand eines DGM 1 m und mittels DGPS-Vermessungen. Die Becken wurden mit starren Drosseln ausgestattet und erfassten ein Gesamtvolumen von 235.430 m³ mit einem spezifischen Volumen von $sV = 3,6$ mm (Bezugsfläche: 65 km²). Die Drosselweiten wurden für die angegebenen Hochwasserereignisse jeweils so optimiert, dass die Becken immer nahezu gefüllt waren und für höhere Abflüsse eine Überströmung in Kauf genommen wurde.

Anhand der konvektiv bedingten Hochwasserereignisse konnte gezeigt werden, dass neben der Abflussspitze auch das Abflussvolumen maßgeblich für die Bemessung der Drosselweite ist. So ergaben sich für das HQ_{60,k}, welches ein geringes Abflussvolumen aber eine höhere Abflussspitze im Vergleich zum HQ_{50,k} hatte, kleinere optimale Drosselweiten (Rieger, 2012).

Retentionsvolumen	5000 m ³ - 50.000 m ³
Stauhöhe	$h \leq 3,0$ m
Drosselöffnung	200 mm - 2.000 mm

Die Betrachtung der acht Windachzuflüsse zeigte, dass die 19 Speicher ein spezifisches Volumen zwischen 1,3 und 25,5 mm aufweisen. Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Maßnahmen zeigten die Speicher einen deutlichen Einfluss auf alle vier untersuchten Hochwasserereignisse. Die geringste Scheitelabminderung wurde mit 15,7 % im Mittel für das HQ_{100,a} und die größte Reduzierung mit 30,7 % für das HQ_{60,k} simuliert.

Rieger folgerte daraus, dass weniger die Hochwasserspitze als vielmehr das Abflussvolumen entscheidend für das Retentionspotenzial der Becken ist (Rieger, 2012). Auch führte er aus, dass die dezentralen Kleinrückhalte bei den kleinvolumigeren, konvektiv bedingten Hochwasserereignissen grundsätzlich wirksamer sind als bei advektiv bedingten Ereignissen. Weiterhin führte er für seine Untersuchungen an, dass die Einzugsgebietsgröße allein keine Aussage über die Wirksamkeit der Speicher zulässt. Er betrachtete das spezifische Volumen der Speicher in den zugehörigen Teileinzugsgebieten und konnte insbesondere für die advektiv bedingten Hochwasserereignisse eine Korrelation zwischen spezifischem Volumen und Scheitelabminderung feststellen. Gebiete mit einem sV unter 2 mm wiesen mit Scheitelabminderungen kleiner 10 % die geringsten Werte auf. Gebiete mit einem $sV \geq 5$ mm

zeigten eine Abflussreduzierung von durchweg über 20 % für das $HQ_{10,a}$, $HQ_{50,k}$ und das $HQ_{60,k}$. Für das $HQ_{100,a}$ lagen hingegen die simulierten Scheitelreduktionen durchweg niedriger, aber immer noch zwischen 10 und 20 %. Rieger betonte, dass das spezifische Volumen neben dem Hochwasserereignis an sich der entscheidende Faktor für die Wirksamkeit dezentraler Kleinrückhalte ist (Rieger, 2012). Damit bestätigte er auch Ergebnisse von Kreiter, dass erst ab einem spezifischem Volumen $sV \geq 2$ mm eine besondere hochwassermindernde Wirkung zu erwarten sei (Kreiter, 2007; Rieger, 2012).

Die Betrachtung der Ergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet von 65 km² zeigt, dass die 17 dezentralen Kleinrückhalte mit einem Gesamtvolumen von 235.430 m³ auch überörtlich eine deutliche Wirkung aufweisen und bei den konvektiven Ereignissen deutlich wirksamer sind im Vergleich zu den advektiv bedingten Hochwasserereignissen. Es wurde am Pegel Greifenberg für das $HQ_{50,k}$ und das $HQ_{60,k}$ eine Scheitelabminderung von 15 bzw. 22 % erreicht, hingegen lag sie für das $HQ_{10,a}$ noch bei knapp 14 % und für das $HQ_{100,a}$ mit 9,5 % auf dem niedrigsten Wert. Entscheidend ist dabei offenbar auch, dass die Drosselweite optimal auf das jeweilige Hochwasser angepasst ist. Eine Erhöhung der Drosselweite um 25 % gegenüber dem optimalen Wert würde das Retentionspotenzial halbieren. Es gilt auch erneut als weiteres Ergebnis der überörtlichen Betrachtung, dass Scheitelabminderung und Gesamtvolumen der Hochwasserwelle zueinander umgekehrt proportional sind und der Spitzenabfluss bei der Bewertung der Wirksamkeit dezentraler Hochwasserrückhaltebecken keine primäre Rolle spielt. Nach Aussage von Rieger sind damit Kleinrückhaltungen als äußerst wirksame dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen anzusehen. Ihr Retentionspotenzial hängt vor allem vom spezifischen Volumen, dem Abflussvolumen bis zum Hochwasserscheitel (und damit von der Anstiegszeit der Hochwasserganglinie) und der gewählten Drosselweite ab (Rieger, 2012).

Abschließend wurde mit Hilfe des hydrodynamischen Modells HYDRO_AS-2D der IST-Zustand der begradigten und eingetieften Windachzuflüsse simuliert und den unten folgenden Zuständen gegenübergestellt. Hierfür wurden wiederum die oben genannten Hochwasserereignisse zugrunde gelegt: Als Alternativszenario wurden einmal die renaturierten Windachzuflüsse gemäß ihres historischen Verlaufes simuliert. Es wurden Laufverlängerungen zwischen 11 und 32 % angenommen. Die Gefälle, welche zuvor zwischen 4,8 und 13 % lagen, wurden auf Werte zwischen 3,9 und 9,9 % reduziert, die Sohle um 50 cm angehoben und die Gewässer um 50 % aufgeweitet. Eine zusätzliche Maßnahme bestand in einer angenommenen Auwaldaufforstung aller Windachzuläufe. Dies wurde im Modell durch eine Anpassung des Stricklerbeiwertes auf $10^{1/3}/s$ für den gesamten Böschungs- und Uferbereich und für großflächige Ausdehnungen im Überflutungsreich erreicht.

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass eine Laufverlängerung eine mittlere Scheitelabminderung von etwa 3,8 % für das „kleine“ Hochwasser $HQ_{10,a}$ erzeugte. Im Gegensatz dazu lag dieser Wert für ein $HQ_{100,a}$ -Ereignis nur noch bei 0,8 %. Hier trat der Effekt der Laufverlängerung bedingt durch einen stark erhöhten Vorlandabfluss in den Hintergrund. Hingegen kam bei erhöhtem Vorlandabfluss der Retentionseffekt durch die Auwaldaufforstung voll zum Tragen. Gegenüber der Laufverlängerung ohne Auwaldaufforstung wurden die Hochwasserspitzen deutlich reduziert. Für ein $HQ_{10,a}$ lag die mittlere Scheitelabminderung für

5 ausgewählte Windachzuflüsse noch bei 5,5 % und stieg für alle anderen Hochwasserereignisse im Schnitt auf einen Wert zwischen 11,0 und 12,5 % an. Bei seltenen Hochwasserereignissen zeigten Laufverlängerungen allein kaum eine hochwassermindernde Wirkung. Als Grenzwert für ein noch hochwasserwirksames Gefälle wurde für kleine Einzugsgebiete ein Wert von max. 1 % angegeben. Rieger bestätigt damit, dass das Fließgefälle und der Vorland- und Uferbewuchs die maßgeblichen hochwasserwirksamen Faktoren bei der Gewässerrenaturierung sind. Die Betrachtung der Wirkung solcher Maßnahmen auf Ebene des Untersuchungsgebietes bis zum Pegel Greifenberg zeigte, dass sich die Ergebnisse mit der vorhergehenden Aussage decken. Die Simulationsergebnisse ergaben zudem, dass eine Laufverlängerung eine mittlere Scheitelabminderung von etwa 6 % für das kleine Hochwasser HQ_{10_a} erzeugt. Im Gegensatz dazu lag dieser Wert für ein HQ_{100_a} -Ereignis nur noch bei 0,9 %. Die Laufzeitverzögerung wurde mit 1-2 Stunden angegeben. Wurden diese Maßnahmen durch eine Auwaldaufforstung zusätzlich flankiert, konnte für alle Hochwasserereignisse eine Laufzeitverlängerung von 2 Stunden festgestellt werden. Die größte Scheitelreduktion am Pegel wurde für die konvektiv bedingten Hochwasserereignisse mit jeweils 11 % erzielt. Bei einem HQ_{100_a} hingegen fiel dieser Wert auf 5 % ab und lag damit noch unter dem eines HQ_{10_a} mit 6,4 %. Rieger hält abschließend fest, dass bei einem Fließgefälle von unter 1 % durch Veränderung der Gewässerstruktur, kleine Hochwasserereignisse um ca. 5 % abgemindert werden können. Eine zusätzliche Erhöhung der Rauheit des Vorlandbewuchses auf einen Stricklerbeiwert von $10^{1/3}/s$, kann Hochwasserspitzen aus mittleren, vor allem aus konvektiven Ereignissen um über 10 % reduzieren (Rieger, 2012).

Basierend auf den Ergebnissen der Einzelbetrachtungen, wurde in einer Synthese ein realisierbares und möglichst effektives Maßnahmenkonzept entwickelt und die Auswirkung auf den Hochwasserabfluss für genannte Ereignisse simuliert. Es kamen 13 dezentrale Kleinrückhaltebecken, die Renaturierung inkl. der Auwaldaufforstung der Windachzuflüsse, Aufforstungen um 10 % als naturnaher Mischwald mit 27,5 % der Einzugsgebietsfläche und die Renaturierung einer Niedermoorfläche in Betracht. Die dezentralen Speicher umfassten ein Retentionsvolumen von 176.000 m³, was einem spezifischen Volumen von 3 mm entspricht. Rieger weist unter Bezugnahme auf Assmann (Assmann, 1999) darauf hin, dass über dieses Maßnahmenbündel alle Abflussprozesse in Form einer Volumenreduktion als auch durch eine fließende bzw. stehende Retention beeinflusst werden können. Darüber hinaus kann das Potenzial der Rückhaltebecken, welches primär vom Zuflussvolumen abhängig ist, durch vorgeschaltete volumenmindernde Maßnahmen wie bspw. dem Waldumbau effektiver genutzt werden (Rieger, 2012). Nutzungskonflikte bleiben aufgrund von Synergieeffekten mit bspw. Erosions- und Umweltschutzaspekten häufig aus (Assmann, 1999; Assmann & Gündra, 1999; Rieger, 2012).

Die dezentralen Kleinrückhaltebecken trugen in diesem Kontext im Mittel mit über 50 % zur Wirkung des Maßnahmenkonzepts bei. Gefolgt wurden sie von den Renaturierungsmaßnahmen mit ca. 25 %. Die Wirkung der renaturierten Moorfläche war vernachlässigbar klein und die der Waldumbaumaßnahmen war ereignisabhängig. Die hochwassermindernde Wirkung des Maßnahmenbündels hing primär vom jeweiligen Abflussvolumen ab. Die größten Scheitelreduzierungen aller Maßnahmen zusammen, konnten demnach für das HQ_{60_k} -Ereignis mit annähernd 50 % in den jeweiligen Teileinzugsgebieten, aber auch mit 26 % am Pegel Greifenberg erzielt werden.

Für das HQ_{10_a} bzw. das HQ_{50_k} betrug am Pegel die Reduzierung des Hochwasserscheitels 17,6 % bzw. 19,2 %. Das HQ_{100_a}-Ereignis konnte immerhin noch mit diesen Maßnahmen in den Teilgebieten bis zu 22 % und mit über 10 % am Pegel Greifenberg reduziert werden. Für alle Maßnahmenkombinationen konnten somit die Scheitel in einem erheblichen Umfang zwischen 10,7 und 26 % gesenkt werden. Neben der Scheitelminderung wurde für die Wirksamkeitsbetrachtung noch die Scheitelverzögerung am Pegel Greifenberg betrachtet. In Bezug auf die Anstiegszeiten der Hochwasserwelle wurde für das HQ_{10_a} die größte Verzögerung mit 4 Stunden berechnet. Für das HQ_{100_a} lag dieser Wert noch bei 2 Stunden und für die zwei weiteren Ereignisse bei jeweils 3 Stunden, was einer prozentualen Verzögerung in Bezug auf die Ausgangssituation von 6,9 bis 50 % entsprach (Rieger, 2012). Eine Übersicht über genannte Ergebnisse bietet Tab. 6: unten.

Tab. 6: Scheitelverzögerung der Hochwasserwelle am Pegel Greifenberg bei Umsetzung des dezentralen Maßnahmenkonzeptes an der Windach (verändert nach Rieger 2012)

Hochwasserereignis und Bezeichnung	Jährlichkeit	Anstiegszeit ohne Maßnahmen	Scheitelverzögerung durch Maßnahmen
Augusthochwasser 2002: HQ _{10_a}	10 a	30 h	4 h / 13,3 %
Pfingsthochwasser 1999: HQ _{100_a}	100 a	29 h	2 h / 6,9 %
Hochwasserszenario 1 (Klimamodell): HQ _{50_k}	50 a	15 h	3 h / 20 %
Hochwasserszenario 2 (Klimamodell): HQ _{60_k}	60 a	6 h	3 h / 50 %

Rieger (2012) kommt zu dem Schluss, dass das Maßnahmenkonzept nicht nur für kleine Teileinzugsgebiete, sondern auch für das gesamte Untersuchungsgebiet als sinnvoll zu erachten ist und auch für größere Hochwasserereignisse eine spürbare Scheitelabminderung bewirkt. Hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes schlussfolgert er aus den Untersuchungsergebnissen, dass diese maßnahmenspezifisch von unterschiedlichen Parametern, wie dem Verlauf der Abflussganglinie oder der Höhe der Abflussspitze gesteuert werden. Als Haupteinflussfaktor nennt er hier jedoch das Abflussvolumen einer Hochwasserwelle. Das größte Potenzial zeigt sich insofern auch bei den durch konvektive Starkniederschläge gesteuerten Hochwasserereignissen. Er sieht eine Übertragbarkeit der Ergebnissen der Arbeit auf andere Untersuchungsgebiete grundsätzlich als gegeben an, da die Wirksamkeit der Maßnahmen vor allem durch das spezifische Volumen der Becken, der Veränderung des Längsgefälles oder auch durch die Veränderung des Ufer- und Vorlandbewuchses bestimmt wird. Es konnte vor allem dann ein hohes Retentionspotenzial erzielt werden, wenn die Maßnahmen - wie oben vorgestellt - als integriertes Konzept umgesetzt

werden, wobei die dort integrierten dezentralen Kleinrückhalte sich als effektivste Maßnahme herausstellten. Auf Einzugsgebietsebene konnte für das Maßnahmenkonzept eine Abminderung zwischen 11 und 26 % erzielt werden. Allein für die dezentralen Kleinrückhalte lag die Scheitelreduzierung auch noch bei einem HQ_{100} bei ca. 10 %. Die Simulationsergebnisse zeigen nach Überlegungen von Rieger, dass solche Maßnahmen einen wirksamen dezentralen, örtlichen Schutz für Siedlungen bieten können. Insbesondere dort, wo auf Grund räumlicher und wirtschaftlicher Verhältnisse zentrale Maßnahmen nicht durchführbar sind. Hier stellen dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen dann häufig die einzige, aber eine effektive Schutzmöglichkeit dar (Rieger, 2012).

3 Das Einzugsgebiet der Natzschung

Während Geologie und Morphologie „hydrologische Grundformen“ für Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf im Gerinne vorgeben, wird das hydrologische System extern über die klimatisch-meteorologischen Randbedingungen angetrieben. Die Böden als Verwitterungsprodukt der anstehenden Ausgangsgesteine bilden dabei den hydrologischen Zwischenspeicher und gleichzeitig in Verbindung mit den klimatischen Randbedingungen die Ausgangsbedingungen für die potenzielle und aktuelle Vegetationsentwicklung und Landnutzung. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden Kapitel das Untersuchungsgebiet in den geologischen Kontext eingeordnet, die Lage, Topographie und Geomorphologie erläutert, um dann die Böden, die Landnutzung, die potenzielle Vegetation und darauf aufbauend die klimatischen und hydrologischen Verhältnisse zu charakterisieren.



Abb. 9: Geländeformen und Landnutzung im mittleren und oberen Einzugsgebiet der Natzschung

3.1 Geologische Einordnung

Das Erzgebirge bildet zusammen mit dem Vogtland, dem Elstergebirge, der Sächsischen Schweiz, dem Zittauer Gebirge und dem Oberlausitzer Bergland die typischen Naturräume des Sächsischen Berglandes und Mittelgebirges. Zusammen nehmen sie ein Drittel der Fläche Sachsens ein (Röder & Richter, 2008).

Das Erzgebirge kann hinsichtlich seiner Höhenzonierung nach KAULFUß & KRAMER (2000) in die unteren Berglagen (bis 500 m. ü. HN), die mittleren Berglagen (500 – 750 m. ü. HN), die oberen Berglagen (750 – 900 m. ü. HN) und die daran anschließenden Kammlagen (ab 900 m. ü. HN) unterteilt werden.

Das Untersuchungsgebiet ist in seiner Struktur geprägt durch die Geologie des Erzgebirges. Das Erzgebirge, eine im Tertiär angehobene Bruchscholle am nördlichen Rande des Böhmisches Massivs, streicht über 80km in NE-SW Richtung und baut sich im Kern aus Metamorphiten und eingeschalteten Magmatiten auf. Die Kammlinie erreicht die höchsten Punkte mit dem Klínovec (1243 m. ü. HN) und dem Fichtelberg (1214 m. ü. HN). Die sich von hier erstreckende Abdachung reicht ca. 30-40 km nach Nord-Nordwest, fällt hingegen nach Süd-Südost auf wenigen Kilometern steil um mehrere hundert Meter ab.

Das Erzgebirge findet seine großräumige Begrenzung im Südosten durch die Egertal-Störung und das böhmische Becken. Nordöstlich wird es durch die Elbtalzone und dem sich anschließenden Elbsandsteingebirge und nordwestlich durch das lößbedeckte sächsische Tief- und Hügelland – der Vorerzgebirgssenke und der nachgeschalteten Erzgebirgsvorlandschwelle – abgegrenzt. Die Antiklinalstruktur des Erzgebirges taucht in Richtung Vogtland ab, welches den fließenden südwestlichen Übergang zu den Schiefen des Thüringer Waldes bildet (vgl. (Röder et al., 2008)). Das Untersuchungsgebiet der Natzschung befindet sich westlich des Übergangs zwischen Mittleren und Östlichem Erzgebirge, welcher durch die tektonisch bedingte Tiefenstörung der Flöha-Querzone markiert wird.

Typisch für das Erzgebirge - als Teil der saxothuringischen Zone am Nordrand der Böhmisches Masse und damit Teil der mitteleuropäischen Varisziden - ist die kreidezeitlich einsetzende germanotype Überprägung des variszisch konsolidierten kristallinen Grundgebirges, welches während der variszischen Orogenese zu Sätteln und Mulden gefaltet worden war. Ab dem Perm bis zum Tertiär wurden diese Strukturen abgetragen und eingeebnet. Die Einebnung zeigt eine wichtige Voraussetzung für die heutige Form des Erzgebirges auf, so war das variszische Gebirge schon am Ende des Rotliegenden weitgehend zu einer Flachlandschaft erniedrigt, die als „Permischer Rumpf“ bezeichnet wird (Sammel, 1972). Eozäne Flusskiese, die sich im Erzgebirge auf Höhen zwischen 750-1000 m. ü. HN, geschützt durch tertiäre Basaltdecken, erhalten haben, zeugen von einem vormals flacheren Relief und der Heraushebung im Tertiär (Henningsen & Katzung, 2002; Wagenbreth & Steiner, 1990).

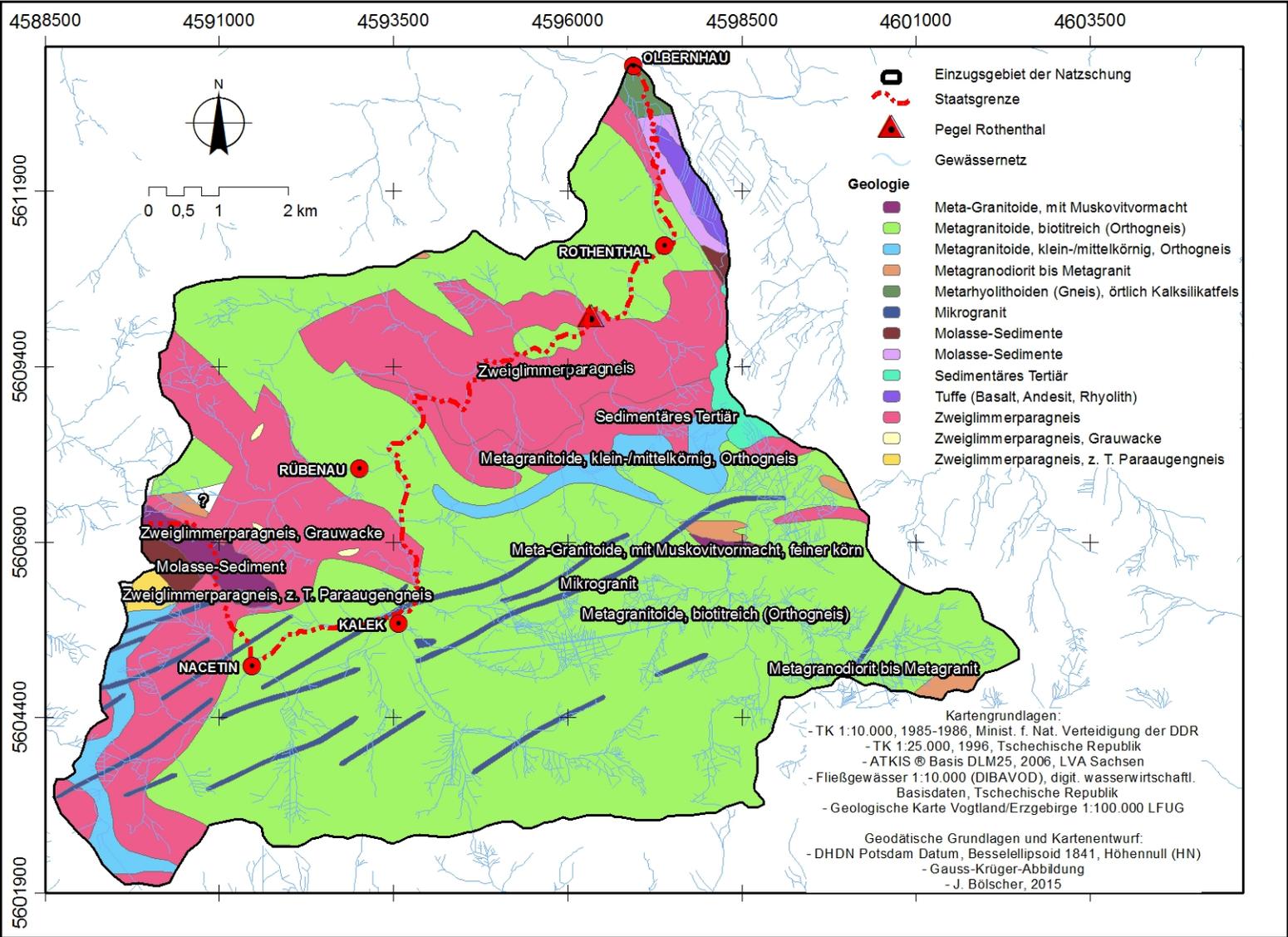


Abb. 10: Geologische Übersicht (Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 1995 (LFUG, 1995))

Im Zuge der Fernwirkung der alpidischen Gebirgsbildungsphase wurden durch die isostatisch bedingte Heraushebung der Alpen die „alten“ geologischen Grundstrukturen, im Sinne der Sächsischen Bruchschollentektonik, verändert bzw. überprägt und vorhandene Störungen reaktiviert. Die alpidische Orogenese setzte schon vor rund 120 Millionen Jahren in der Kreide ein und endete vor 30 Millionen Jahren im Tertiär. Damit war die Herausbildung einer morphologischen „Pultscholle“ verbunden, welche entlang mehrerer herzynisch orientierter Störungszonen (bspw. Flöha-Querzone, Mittelsächsische Störung der Elbtalzone) unterbrochen und in mehreren Staffeln unterschiedlich stark gehoben wurde. Entlang einer sich von WSW nach ENE erstreckenden (erzgebirgisch-streichenden) Achse wurden die geologischen Formationen des Erzgebirges in nordwestlicher Richtung gekippt und in südöstlicher Richtung herausgehoben. Der Haupthebungsprozess des Erzgebirges zur Pultscholle fand im Jungtertiär, dem Pliozän über einen Zeitraum von etwa 30 Millionen Jahren statt (Richter, 1995). Als Folge der Hebung und Schrägstellung der Erzgebirgsscholle rissen südlich des heutigen Gebirges SW - NE gerichtete Spalten auf, an denen der Eger oder auch Ohřetalgraben einsank (Wagenbreth & Steiner, 1990). Begleitet wurde dieser Prozess insbesondere im frühen Stadium von miozänem Basaltvulkanismus, welcher sich ebenfalls entlang weiterer Bruchzonen im Erzgebirge in Form von kleineren Eruptivzentren zeigt und die o.g. eozänen Flusskiese vor weiterem Abtrag schützte.

Diese nun nach NW orientierte schiefe Ebene, die erzgebirgische Pultscholle, zeichnet sich durch einen markanten Steilabfall zum Egergraben ab, welcher über 600 Höhenmeter betragen kann. Dazu steht im Kontrast die flache, nordwestlich gerichtete Abdachung, die keine so markanten Geländespünge aufweist, jedoch in sich stark zertalt ist und dadurch kleinräumig eine sehr heterogene Reliefstruktur aufweist. Diese ist vor allem entlang des Erzgebirgskamms durch flache, zertalte Hochflächen gekennzeichnet, ändert sich zum Teil jedoch lokal sehr abrupt in Form von tief eingeschnittenen Kerbtälern mit steilen, gradartigen Flanken und sich dann anschließenden breiten, aufgeschotterten Kerbmuldentälern wie dem Flöhatal, welches entlang einer schon variszisch angelegten Störungszone, dem Flöha-Lineament, verläuft. Mit der Schrägstellung der Pultscholle nach dem späten Eozän war auch die generelle Ausbildung einer Wasserscheide und eines nordwärts orientierten Flussnetzes verbunden, welches sich an den präquartären Bruchstrukturen orientiert, im Quartär eingetieft und u.a. neben Muldentälern, die erläuterten Kerbtäler ausgebildet hat (Henningsen & Katzung, 2002).

Als eine der verbreitetsten Talformen gilt das Kerbsohlental (Röder & Richter, 2008). Abweichend von der Nordausrichtung der meisten Talverläufe finden sich insbesondere in Nähe der Kammlagen quer oder stumpfwinklig, subsequent verlaufende Fließgewässer. Röder & Richter 2008 weisen darauf hin, dass dies möglicherweise ein Indiz für alte Talanlagen des Böhmisches Massivs ist.

Das prämetamorphe Ausgangsgestein des Erzgebirges besteht einerseits aus Grauwacken und Grauwackenschiefern präkambrischen Ursprungs (Pälchen & Walter, 2008), andererseits finden sich im nordwestlichen und südwestlichen Bereich altpaläozoische Quarzsandsteine und Tonsteine, in denen u.a. ordovizische Quarzite und kambrische, basische Vulkanite eingeschaltet sind. Durch eine intensive Faltung und Metamorphisierung bildeten sich aus den präkambrischen Sedimentgesteinen Paragneise und aus den kambrischen und ordovizischen Gesteinen

Glimmerschiefer und Phyllite aus. Die Paragneise lassen sich je nach Metamorphosegrad in Zweiglimmergneise und in die stärker metamorphosierten Biotitgneise unterteilen. Weiterhin haben sich durch Aufschmelzungen Anatexite gebildet, welche sich insbesondere entlang der Flöha-Störungszone finden. Paragneise und Anatexite bilden den klassischen Graugneis-Komplex des Erzgebirges. In diesen eingeschlossen, befinden sich Ortho- oder Rotgneise, die sich Ende des Präkambriums aus granitischen Magmatiten gebildet haben und vor allem zusammen mit Muskovitgneisen und Granuliten in der zentralen Erzgebirgszone hervortreten (Henningsen & Katzung, 2002; Pälchen & Walter, 2008). Am Ende der variszischen Orogenese intrudierten saure Magmen in die anstehenden Gesteinsverbände und bildeten die Granite des Erzgebirges aus, die oberflächlich bspw. in Eibenstock und Altenberg zu Tage treten (Henningsen & Katzung, 2002). Bei dem Graugneis-Komplex und den Rotgneisen handelt es sich um schichtförmige Körper, die im Kern einzelner Kuppeln erkennbar sind (Henningsen & Katzung, 2002). Während im Übergang zur Vorerzgebirgsenke vor allem Phyllite und Glimmerschiefer auftreten, wird das Osterzgebirge durch Graugneise und Anatexite dominiert. Dort schalten sich um Altenberg herum, karbonische Quarzporphyre und Granitporphyre ein. Der südöstliche Teil des Mittleren Erzgebirges zeichnet sich durch einen kleinräumigen Wechsel von Para- oder auch Graugneisen, Orthogneisen und Anatexiten aus. Im Übergang zum Westerzgebirge, welches vor allem durch den Eibenstockgranit dominiert wird, findet sich zwischengeschaltet eine südwestliche Verlängerung der oben genannten Phyllite und Glimmerschiefer (Henningsen & Katzung, 2002).

Diese proterozoischen und altpaläozoischen Gesteine bilden als Produkt der variszischen Metamorphose und Gebirgsbildungsphase den heutigen Kern des Erzgebirges. Pälchen & Walter (2008) fassen diese Entwicklung zusammen und beschreiben den wesentlichen Aufbau des Erzgebirgskristallin bestehend aus einem Gneiskern, welcher von einer inneren Glimmerschiefer- und einer äußeren Phyllithülle überdeckt ist. Die Gneise treten dadurch vor allem im höchsten Bereich, der zentralen Erzgebirgszone zu Tage. Die anstehenden Gesteinsformationen des Mittleren Erzgebirges sind insgesamt durch den kleinräumigen Wechsel der Gneisvarianten geprägt. Lokal haben sich noch tertiäre Basaltreste erhalten und entlang des Flöhatal tauchen o.g. Anatexite auf.

Das Einzugsgebiet der Natzschung wird durch biotitreiche Orthogneise dominiert (vgl. Abb. 10: oben). Sie ziehen sich von Rothenthal entlang des nördlichen Einzugsgebietes bis hin zur westlichen Begrenzung und knicken dann über Rübenau nach Südosten ab. An dieser Stelle sind sie nordöstlich und westlich begrenzt durch Zweiglimmergneise. Die Orthogneise breiten sich von dort fächerförmig über die Hochflächen des gesamten südlichen Einzugsgebietes aus. In diesem Bereich sind schmale Bänder aus Mikrogranit eingeschaltet. Das untere Natzschungtal besteht entlang seiner Steilflanken hingegen aus Zweiglimmerparagneisen. Sie bilden auch den Kern des Rübenauer Hügels und den westlichen Abschluss des Einzugsgebietes. Sind aber dort durchsetzt mit Molasseresten und klein- bis mittelkörnigen Orthogneisen, welche sich auch nochmals weiter östlich als Übergang zwischen den Zweiglimmergneisen und den biotitreichen Orthogneisen nachweisen lassen. Östlich der Linie Olbernhau-Rothenthal findet sich eine enge Verzahnung von Metaryolithoiden, Molassesedimenten und Tuffen. Im südöstlichen Bereich

lassen sich darüber hinaus einzelne Bestände an Metagranodioriten bzw. Metagraniten nachweisen. Die anstehenden Gesteine wurden im Tertiär intensiv chemisch verwittert und bildeten als Saprolithe das Ausgangssubstrat für die im Quartär folgenden periglazialen Umlagerungs- und Bodenbildungsprozesse.

3.2 Lage, Topographie und Geomorphologie

Das Einzugsgebiet der Natzschung liegt im Mittleren Erzgebirge südwestlich der Stadt Olbernhau beiderseits der deutsch-tschechischen Grenze und umfasst das gesamte Höhenspektrum des Erzgebirges. Die Einmündung der Natzschung in die Flöha kennzeichnet den niedrigsten Punkt mit ca. 467 m. ü. HN. Der Bezugspegel Rothenthal, 5km stromaufwärts, liegt auf 538 m. ü. HN, die Größe des Einzugsgebietes beträgt an dieser Stelle 75 km². Zweidrittel des Einzugsgebietes befinden sich auf Territorium der Tschechischen Republik.

Höhenzüge umranden das Gebiet auf einem Niveau zwischen 800-900 m. ü. HN. Die durchschnittliche Geländehöhe beträgt ca. 750 m. ü. HN. Der höchste Punkt im Gelände wird durch die südöstlich gelegene Erhebung des Lesenská Pláň mit 921 m. ü. HN markiert.

Das Gebiet wird im Süden durch den Erzgebirgskamm und dem sich anschließenden Steilabfall zum Egergraben (Jeleni Vrch 863 m. ü. HN), Kamenna Hurka (878m. ü. HN), Bernovský Vrch (838 m. ü. HN), Mezihořský Vrch (908 m. ü. HN), Jahodník (916 m. ü. HN), Blahutov (855 m. ü. HN) und Lesna (910 m. ü. HN) begrenzt.

Im Norden endet das Gebiet entlang der Erhebungen des Kriegswaldes, die durch eine Linie zwischen Steinhübel im Osten (816 m. ü. HN), dem Dürrer Berg (787 m. ü. HN), dem roten Hirschweg nordwestlich der Gemeinde Rothenthal (Höhenpunkt 742 m. ü. HN) und der Ortslage Olbernhau (440-460 m. ü. HN) gekennzeichnet werden kann.

Der östliche Abschluss wird durch einen Höhenzug entlang der Linie Lesna, Lesenská Pláň (921 m. ü. HN), Malý Háj (849 m. ü. HN), Kamenna Vrch (842 m. ü. HN), Brandov (480 m. ü. HN), und Olbernhau gebildet.

Die westliche Grenze ist markiert durch die Linie Steinhübel (816 m. ü. HN), Cihadlo (842 m. ü. HN) und dem Quellgebiet der Natzschung südöstlich des Jeleni Vrch (863 m. ü. HN), welches auf 825 m. ü. HN liegt.

Während die Geologie des Gebietes gut erschlossen ist, fehlt es an umfassenden Untersuchungen zur Morphogenese und Morphologie des Mittleren Erzgebirges. Zwei morphologische Strukturen sind jedoch prägend für das Einzugsgebiet. Dies sind zum einen die markant eingeschnittenen und steilen Kerbtäler. Die starken Gefälle und steilen Talflanken prägen das Erscheinungsbild des Untersuchungsgebietes an den Mittel- und Unterläufen der Fließgewässer wie an der Natzschung, am Telčský Potok und am Steinbach.

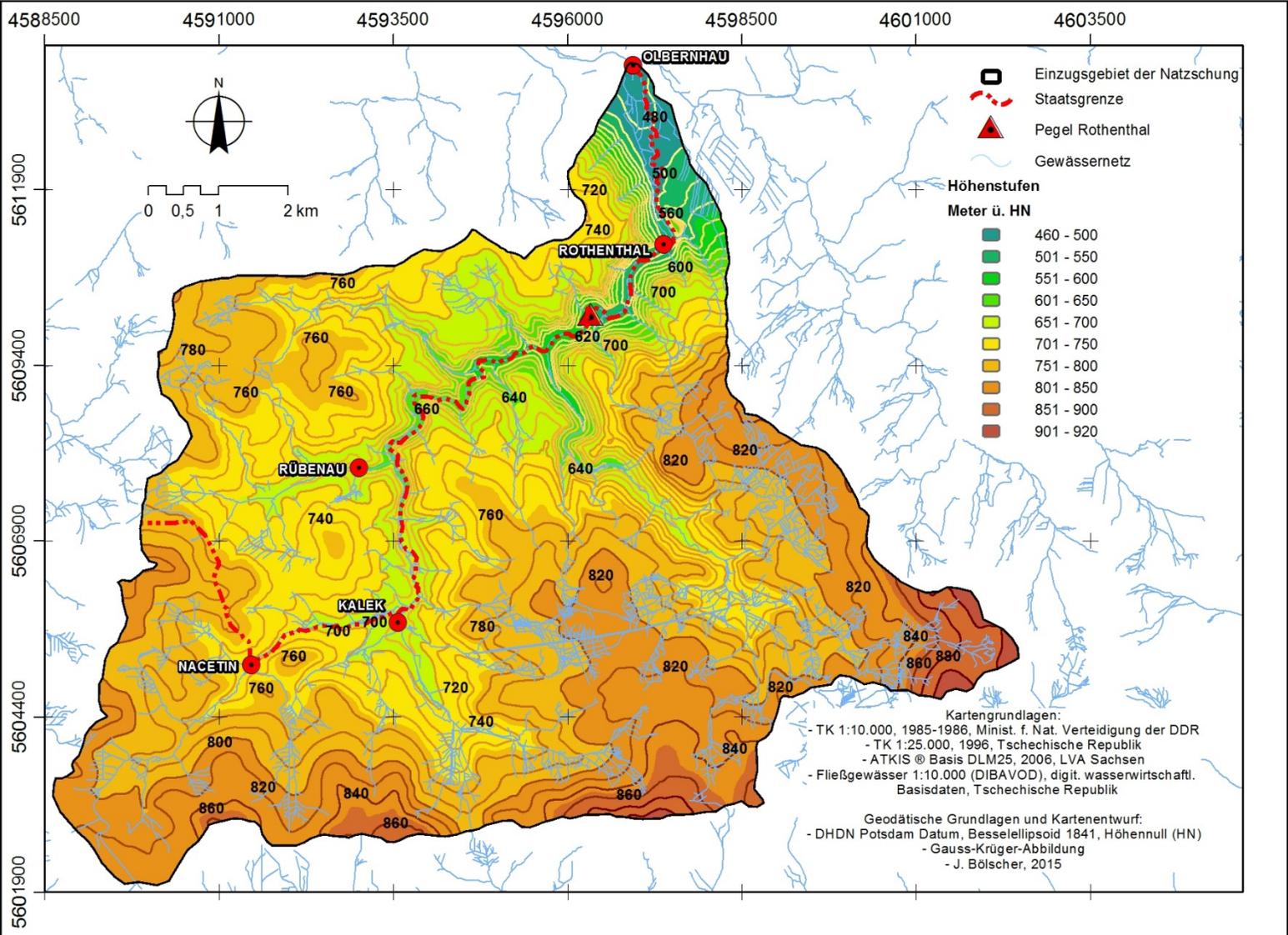


Abb. 11: Topographie und Morphologie des Einzugsgebietes der Natzschung

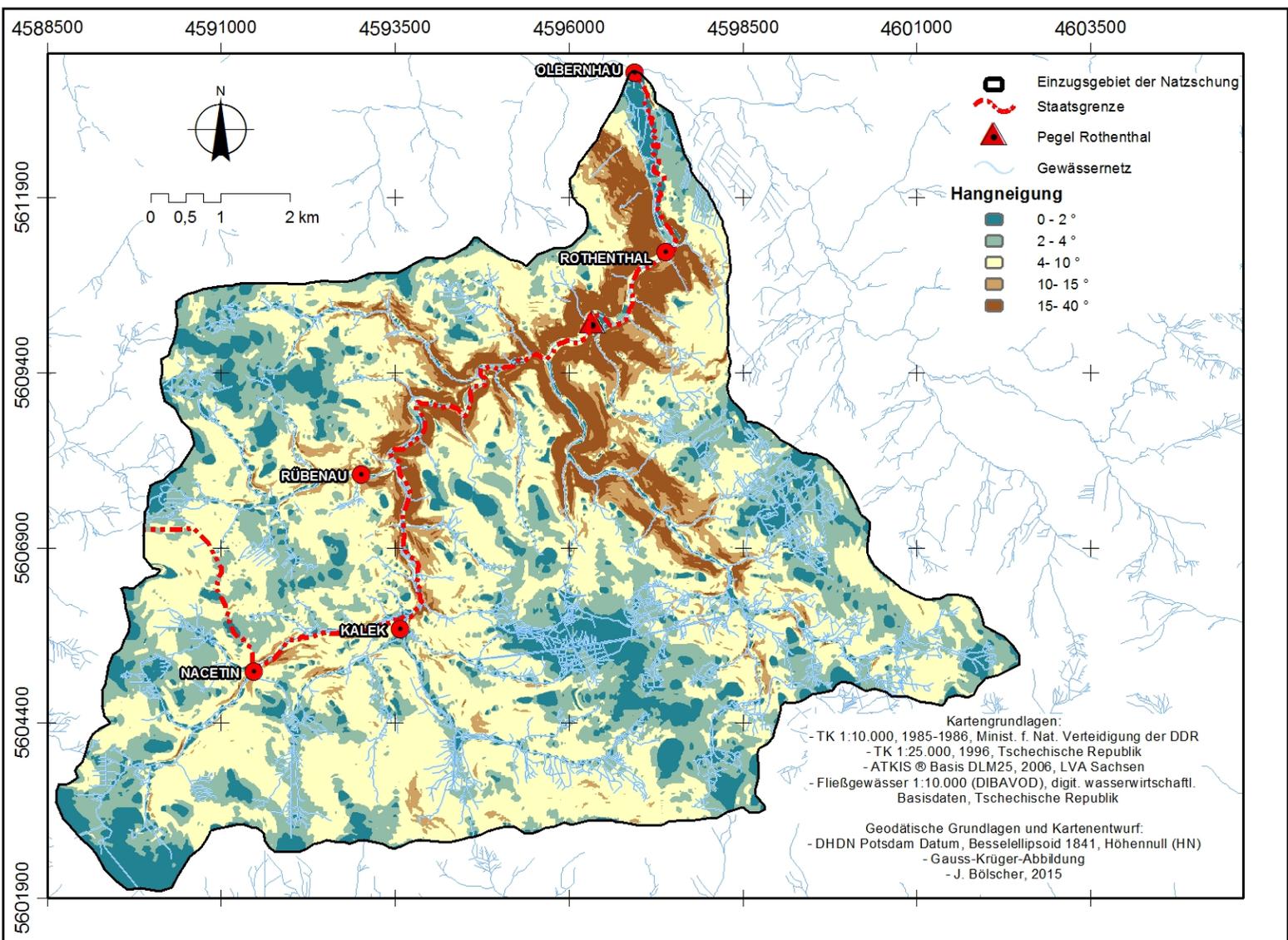


Abb. 12: Hangneigungen im Einzugsgebiet der Natzsung

Ihre Ausbildung oder zumindest ihre Anlage muss zwangsläufig mit der tertiären Schrägstellung der erzgebirgischen Pultscholle verbunden gewesen sein. In wie weit sie sich an die Gesteinsverhältnisse und vorhandene Bruchstrukturen anlehnt, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die Talsysteme im Quartär weiter eingetieft wurden und sich im Zuge einer rückschreitenden Erosion die Kerbtäler (weiter) ausgebildet haben (Henningsen & Katzung, 2002).

Das Relief des Gebietes in den oberen Höhenlagen und in den Oberläufen der Gewässer ist hingegen gekennzeichnet durch eine wellig reliefierte Landschaft mit leicht bis mittel geneigte Kuppen und Hänge. Die Hänge sind überwiegend schwach konvex geformt und weisen eine Neigung von durchschnittlich 2 bis 3 Grad auf. Die Hänge werden am Fußende durch zumeist muldenartige Talverläufe begrenzt. Erst nordöstlich des Dorfes Rübenau, am Zusammenfluss des Rübenauer Baches mit der Natzschung, wird das Relief steiler und ist gekennzeichnet durch einen markanten Gefälleknick der Natzschung. Die Gefälleänderung wird begleitet durch die Ausprägung von Kerbtalstrukturen entlang der Bäche. Das südöstliche Einzugsgebiet des Telčský Potok zeigt ebenfalls unterhalb der Konfluenz der kleineren Zuflüsse eine Änderung des Reliefs an, die von einer großräumigen konkaven Kesselstruktur mit mittelsteilen Hängen in ein Kerbtal übergeht, das durch ein starkes Gefälle geprägt ist und damit neben dem Oberlauf der Natzschung maßgeblich zur Abflusskonzentration im Untersuchungsgebiet beiträgt.

Während das Erzgebirge im jüngsten Paläozoikum und fast im gesamten Mesozoikum Abtragungsgebiet war, kam es zu Beginn der Oberkreide zu kurzen marinen Transgressionen aus dem Elbtal ins Osterzgebirge sowie zur Ablagerung von terrestrischen Sedimenten (Bernhardt & Röder, 2008; Henningsen & Katzung, 2002). Für die Abtragsphase, die zur flächenhaften Einebnung der variszisch konsolidierten Formationen geführt hat, sind noch an einigen Stellen im Osterzgebirge Reste mesozoischer Verwitterungshorizonte erhalten geblieben, die nach Henningsen & Katzung bis zu 40 Meter mächtig gewesen sein können und in ihrer Bildungsphase zwischen Zechstein und Unterkreide einzuordnen sind (vgl. Bernhardt & Röder 2008). In Erweiterung dessen hat Julius Büdel für das Westerbirge eine ebenfalls tiefreichende Verwitterung und Abtragung postuliert, die jedoch tertiären Ursprungs ist und für den Bereich um Gottesgab und Aue untersucht wurde. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen war die Darstellung einer viergliedrigen Rumpftreppe auf der flachen NW-Abdachung der erzgebirgischen Pultscholle. Diese Rumpftreppen werden anhand der Theorie der Rumpfflächenbildung bzw. doppelten Einebnung erklärt (Büdel, 1981). Dieser Prozess ist an die klimatischen Bedingungen der Tropen gebunden und verbindet die Ausbildung einer Verwitterungsbasissschicht und einer fast ebenen Spüloberfläche. Diese Ergebnisse bilden einen Erklärungsansatz für die ausgeprägten, jedoch wellig verlaufenden Hochflächen des Erzgebirges. Für die weitere Genese ist wie auch in anderen deutschen Mittelgebirgsregionen sicherlich der mehrfache Wechsel der klimatischen Bedingungen im Quartär verantwortlich. Die in dieser Phase entstandenen periglazialen Deckschichten spielten für die Formung im Pleistozän eine wesentliche Rolle, da sie zum einen die Geröllfracht für die Bäche und Flüsse bereitstellten, aber offenbar auch einen großräumig reliefkonservierenden Einfluss hatten und bedingt durch ihre hydrologischen Eigenschaften auch immer noch haben (Völkel, Leopold, et al., 2002).

Festzuhalten ist, dass sich die Formung der Morphologie zwangsläufig an den Pultschollencharakter des Erzgebirges und an die anstehenden Gesteine anlehnen musste, dies aber sicherlich darüber hinaus über altangelegte geologische Störungszonen und die Hebungs- und Verwitterungsvorgänge im Tertiär als auch durch die wechselklimatischen Bedingungen des Quartärs bestimmt und im Holozän nochmals überprägt wurde.

3.3 Böden

Die Böden im Einzugsgebiet der Natzschung sind Produkte des anstehende Gesteins oder aber von Schuttdecken; die das anstehende Gestein überlagern. Diese Schuttdecken entstanden während des Quartärs in den deutschen Mittelgebirgsräumen unter periglazialen Bedingungen (Sommel & Terhorst, 2010; Völkel, Leopold, et al., 2002). Sie sind aufgrund ihrer flächendeckenden Erhaltung in unterschiedlichen Varietäten ein wesentliches Merkmal der naturräumlichen Ausstattung, unterbrochen wird ihr Auftreten durch Auensedimente, Kolluvien und Hochmoore (Röder & Richter, 2008; Völkel, Leopold, et al., 2002). Genauere Forschungsergebnisse liegen lediglich für das Osterzgebirge vor (Heller & Kleber, 2011). Es ist in Analogie zu anderen Untersuchungen anzunehmen, dass durch Frostverwitterung zersetztes Material über mehrere Gefrier- und Schmelzzyklen hinweg durch Solifluktionsprozesse hangabwärts verlagert wurde (Jaesche, 1999). Dieser Prozess basiert auf zwei wesentlichen Bewegungsmechanismen, dem Frostkriechen und der Gelifluktion. Dies führte zu einer Überlagerung des anstehenden Gesteins mit Frostschuttdecken, die in der Literatur als periglaziale Lagen oder periglaziale Deckschichten beschrieben werden und sich in Basis-, Mittel-, und Hauptlage unterteilen (Völkel, Leopold, et al., 2002; Völkel, Zepp, et al., 2002). Periglaziale Deckschichten bestehen in ihrer typischen Erscheinung aus mehreren sich überlagernden Schichten, die sich in ihrem Vertikalprofil durch Lagerung, Dichte, Korngrößenzusammensetzung, Skelettgehalt und Mineralzusammensetzung unterscheiden (Veit et al., 2002; Völkel, Leopold, et al., 2002). Die Basislage ist solifluidalen, kalthumiden Ursprungs, lösslehmfrei und besitzt einen hohen Anteil an hangparallel eingeregelteten Skelettkomponenten. Völkel, Leopold, et al. (2002) geben für Studien im Arber-Gebiet (Bayerischer Wald) als Bildungszeitraum das Pleistozän bis zum Hochglazial an. Die jüngere Mittel- und Hauptlage setzen sich hiervon und auch untereinander durch differierende Lagerungsmerkmale, Gefüge, Farbe und Skelettanteil ab. Sie werden generell als löss(lehm)reich, also durch äolisch eingetragene Komponenten beschrieben. Die äolischen Sedimente sind Ausdruck einer kaltariden Bildungsphase und wurden durch Solifluktion und Kryoturbation in die Lagen eingearbeitet. Sommel & Terhorst (2010) geben als jüngstes Alter für die Hauptlage die Jüngere Dryas (12.700-11.600 BP) an. Völkel nennt als Bildungszeitraum für die Hauptlage das Last Glacial Maximum (LGM) bis zur Ältesten Dryas. Eine genauere Klassifizierung und zeitliche Einordnung der einzelnen Lagen ist Thema der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion (Sommel & Terhorst, 2010; Völkel, Leopold, et al., 2002; Völkel, Zepp, et al., 2002).



Abb. 13: Braunerden auf Wald- (l.) und Weidestandorten (r.) mit unterschiedlich starken Skelettanteilen in schluffiger Matrix (Fotos: Mike Ramelow 2004)

Die periglazialen Deckschichten bilden das Ausgangsmaterial für die mit dem Ende der Weichselkaltzeit einsetzende Bodenbildung und sind nach Heller & Kleber (2011) ein wichtiger Einflussfaktor für die Entwicklung des Zwischenabflusses. Die Untersuchungen von Heller & Kleber (2011) zeigen, dass die Basislage bedingt durch eine hohe Lagerungsdichte, vertikal wasserstauend wirkt, jedoch das hangparallel eingeregelt Bodenskelett lateral wasserleitende Eigenschaften besitzt und bei mittleren bis hohen Bodenvorfeuchten die Entstehung von Zwischenabfluss an Hängen begünstigt. Auf diesen Schuttdecken haben sich, je nach Lage und kleinklimatischen Verhältnissen, vor allem Braunerden in verschiedenen Varietäten ausgebildet. Sie dominieren insbesondere die unteren und mittleren Berglagen. Die mit zunehmender Höhe abnehmenden Temperaturen und ansteigenden Niederschläge führen zu einer vermehrten Podsolierung der Böden. So finden sich hier vor allem podsolierte Braunerden und in den oberen Berglagen, vor allem auf tschechischer Seite des Einzugsgebietes, Braunerde-Podsole (Ramelow, 2006). In den Tallagen dominieren vereinzelt Vegen und verschiedene Varietäten von Gleyböden, die grundwasserbeeinflusst sind. Weiterhin treten lokal immer wieder (Hang-) Pseudogleyböden und Stagnogleye auf. Diese sind durch einen wasserstauenden Horizont gekennzeichnet, der die Vertikalbewegung des Bodenwassers einschränkt und für den Interflow von Bedeutung ist. Auf einem Großteil der ackerbaulich genutzten Flächen, insbesondere auf der Rübenaauer Insel im Südwesten des Einzugsgebietes, finden sich nach Ramelow (2006) Pseudogley-Braunerden, die in der Bodenkarte jedoch nicht gesondert ausgewiesen wurden. Entlang der steilen Talflanken der Natzschung und des Telčský Potok haben sich Ranker entwickelt.

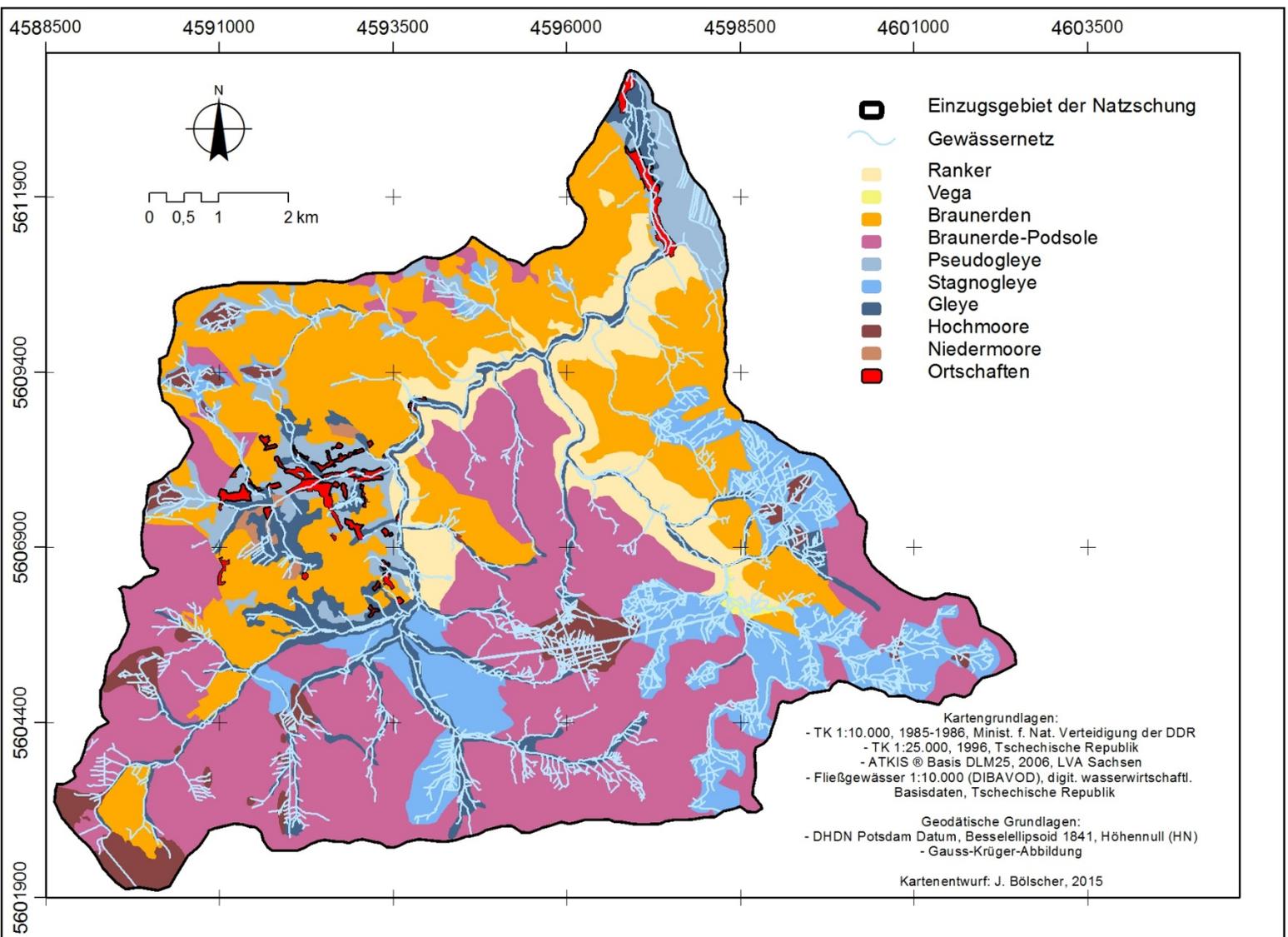


Abb. 14: Bodentypenverteilung im Einzugsgebiet der Natzschung (modifiziert, nach Ramelow 2006)

Neben den mineralisch geprägten Böden, lassen sich im Einzugsgebiet der Natzschung ebenso organische Moorböden, mit zum Teil großen Mächtigkeiten, jedoch in einem stark degradierten Zustand, nachweisen. Sie treten in den obersten Höhenlagen auf und umfassen 6 % der Einzugsgebietsfläche (Lindenkreuz, 2006).

Die Entstehung der Hochmoore setzte am Übergang zwischen Präboreal und Boreal mit der Ausbildung von geogenen Hang- und Versumpfungsmooren ein. Begünstigt wurde diese Entwicklung durch schlecht wasserleitende Böden in Geländemulden und durch den Austritt von Quell- und Hangwasser. Niederschlagszunahme und Erwärmung führten im Atlantikum bis zum Subboreal zur Besiedlung der bisherigen Riedtorfe mit Torfmoosen, die den Moorkörper über den Grundwasserspiegel zu einer geschlossenen Torfmoosdecke hinauswachsen ließen. Damit verbunden waren eine zunehmende Isolierung vom mineralischen Untergrund, die Ausbildung eines sauren Milieus und eine fortschreitende Nährstoffverarmung. Kühl-feuchtere Klimabedingungen im älteren Subatlantikum forcierten nochmals das Moorwachstum und schufen die Voraussetzung zur Ausbildung mächtiger Torflagerstätten. Eine zweite Wachstumsphase erfolgte unter ähnlichen Klimabedingungen im jüngeren Subatlantikum und führte zur Ablagerung der jüngeren Hochmoortorfe aus Torfmoosen und Wollgras bestehend (Böhm, 2006).

Die Hochmoore des Erzgebirges wurden über mehr als 800 Jahre, bis ins 21. Jahrhundert hinein, in verschiedenen Formen genutzt. Die anthropogene Überprägung ist eng verbunden mit der Besiedlungs- und Bergbaugeschichte der Region. Voraussetzung für die Nutzung der Moore war immer die Anlage und Unterhaltung von teils sehr tiefreichenden Grabensystemen zur Entwässerung und Trockenlegung der Mooregebiete. Neben der Brenntorfgewinnung setzte Anfang des 19. Jahrhundert auch eine verstärkte forstliche Nutzung der Moore zur Etablierung von Fichtenkulturen ein, welche in den oberen Gebirgslagen im 20. Jahrhundert durch Rauchgasschäden stark geschädigt wurden (Böhm, 2006; Schwarze, 2007). Die notwendig gewordene Wiederaufforstung führte ab den 1970 Jahren im Mittel- und Osterzgebirge zur erneuten Nutzung der Grabensysteme (Böhm, 2006).

Die kartierten Böden sind teils gut leitende, flach- bis tiefgründige und skelettreiche Braunerde-Podsole und Braunerden (vgl. Abb. 14: S.92). Im Gegensatz dazu stehen die stauwassergeprägten Stagnogleye und Pseudogleye, die begleitet werden von stark mineralisierten Moorböden. In Abhängigkeit von Lage und Ausprägung variiert die mittlere Gründigkeit der untersuchten Böden im Untersuchungsgebiet schätzungsweise zwischen 0,40 – 1,20 m (Löhe, 2006; Ramelow, 2006). Eine genaue Angabe ist schwer möglich, da bei den Felduntersuchungen von Löhe und Ramelow, bedingt durch den hohen Skelettanteil der Böden, Bodenschichten tiefer als einen Meter kaum aufgeschlossen oder erbohrt werden konnten (Löhe, 2006; Ramelow, 2006). Ähnliche Ergebnisse wurden jedoch im Rahmen der forststandortlichen Kartierungen erzielt (VEB, 1956; VEB, 1979). Es ist daher anzunehmen, dass tiefere Bodenhorizonte eher einen Saprolithcharakter haben und keine größeren Mächtigkeiten aufweisen. Trotzdem kann eine Unterschätzung der Gesamtbodenmächtigkeit im Untersuchungsgebiet nicht ausgeschlossen werden. Die in den Tallagen ausgebildeten Gleyböden sind jedoch nach vorliegenden Kenntnissen etwas tiefgründiger als die Böden der Top- und Hanglagen, was auch auf die oben genannten Solifluktuationsprozesse

hindeutet. Während der nördliche Bereich von Braunerden dominiert wird, treten südlich der Natzschung vor allem Braunerde-Podsole auf. Die Tallagen werden von Gleyböden und Stauwasserböden in Form von Pseudo- und Stagnogleyen dominiert, die steilen Talflanken hingegen von Rankern und entlang der Quellbereiche der Bäche finden sich Moorböden. Im Zuge der bodenkundlichen Untersuchungen von Ramelow und Löhe konnten damit für das Einzugsgebiet der Natzschung insgesamt neun unterschiedliche Bodentypen in unterschiedlichen Varietäten ausgewiesen werden. Sie wurden hinsichtlich modellrelevanter bodenphysikalischer Eigenschaften charakterisiert und können somit als Grundlage für den Aufbau des Niederschlag-Abfluss-Modells dienen.

3.4 Landnutzungsformen

Die dominierende Nutzungsform im Einzugsgebiet der Natzschung ist die Forstwirtschaft (vgl. Abb. 15: S.95 & Abb. 16: S.96). 81 % der Fläche (69 km²) werden von Wäldern in unterschiedlichen Zusammensetzungen bedeckt. Es existieren ausgedehnte Bestände an Nadelwäldern, die vornehmlich von Fichten dominiert werden und mit 25 km² 30 % der Gesamtwaldfläche einnehmen. Hierbei ist insbesondere der Bereich nördlich und westlich von Rübenau durch annähernd 100 Jahre alte, hochstämmige Fichten geprägt. Nadel-Laubmischwälder umfassen mit 9,2 % etwa 8 km² Fläche und reine Laubwälder sind nur mit 1,8 % vertreten. Die reinen Laubwälder beschränken sich auf alte Buchenbestände westlich des Unterlaufes der Natzschung. Sie zählen zu den letzten erhaltenen Beständen in Sachsen und weisen auf 361 ha ein Alter von über 120 Jahren auf (Dittrich & Schmieder, 2001). Drei weitere Laubwaldflächen finden sich südöstlich von Načetín und südlich von Rothenthal. Knapp über 40 % der Waldfläche werden als Wald-Strauch-Übergangsstadien klassifiziert. Diese Klasse stellt eine nicht weiter differenzierbare Mischung aus verschiedenen Anteilen von Nadelhölzern (vornehmlich jüngere Fichten), Laubbäumen (insbesondere Ebereschen und Birken) und einer offenen Krautschicht, die aus dichten hochwüchsigen Grasbeständen zusammengesetzt ist, dar. Diese Klasse nimmt einen Flächenanteil von fast 35 km² ein und findet sich insbesondere südlich und östlich der Natzschung auf tschechischem Territorium.

Die verbleibenden 19 % der Einzugsgebietsfläche werden überwiegend landwirtschaftlich genutzt (vgl. Abb. 15: S.95 & Abb. 16: S.96). Diese Nutzungsform setzt sich zusammen aus Ackerland, Wiesen, Weiden und einer kleinparzelligen Mischnutzung. Eine reine Ackernutzung umfasst 2,6 % der Fläche, Wiesen und Weiden nehmen 5,9 % ein. Flächen mit einer komplexen landwirtschaftlichen Parzellenstruktur mit einem Ackerlandanteil von unter 75% umfassen 5,6 %, Flächen mit einem nicht näher klassifizierbaren landwirtschaftlichen Nutzungsanteil von 25-75 % und einem Restanteil natürlicher Bodenbedeckung umfassen mit 1,5 % lediglich 1,2 km². 0,9 % des Einzugsgebietes werden von Siedlungsflächen eingenommen, die eine nicht durchgängig städtische Prägung aufweisen. Und 2 % entfallen auf Torfmoore, welche zu 50% eine Fichtenforstbedeckung aufweisen, also schon stark anthropogen überprägt sind.



Abb. 15: Land- und forstwirtschaftliche Nutzungsformen (l. Blick Süd; r. Blick Nord)

Die Ortslage Rothenthal zählt administrativ zur Stadt Olbernhau. Sie beginnt knapp oberhalb der Mündung der Natzschung und zieht sich im langgestreckten Talverlauf und entlang der Staatsgrenze bis fast zum Stößerfelsen am Pegel Rothenthal hin. Weiter flussaufwärts befinden sich die Siedlungen Rübenau, Einsiedel-Sensenhammer, Kalek und Načetín.

Die Siedlungsflächen auf deutscher Seite befinden sich, insbesondere im Zentrum des Einzugsgebietes, um den Rübenauer Hügel. Diese intensiv landwirtschaftlich genutzte Erhebung von 755 m. ü. HN wird im Norden vom Rübenauer Bach und im Norden und Westen vom forstlich genutzten Kriegswald bzw. im Süden und Osten von der Natzschung begrenzt. Der Streusiedlung Rübenau gehören mehrere kleiner Ortslagen an, bspw. das an der Natzschung gelegene Deutsch-Einsiedel. Der Dorfkern von Rübenau befindet sich nördlich des Rübenauer Hügels am Rübenauer Bach. Südlich der Grenze zwischen Deutschland und der Tschechischen Republik befinden sich entlang der Natzschung die Siedlungen Načetín und Kalek. Zwischen diesen Siedlungen zieht sich ein schmales landwirtschaftlich genutztes Band, welches sich südöstlich von Kalek im Talbereich des Bily Potok aufweitet und damit insgesamt eine Fläche von ca. 2 km² einnimmt. Eine weitere Grünlandfläche ähnlicher Größe befindet sich im südöstlichsten Areal des Einzugsgebietes, entlang der Wasserscheide zur Schweinitz. Dies sind die einzigen landwirtschaftlichen Nutzflächen im tschechischen Teil des Einzugsgebietes. Sie werden umrahmt von rein forstwirtschaftlich genutzten Flächen, die das gesamte südliche Einzugsbereich umfassen. Diese Forstflächen sind größtenteils jüngeren Ursprunges und entsprechen weitestgehend den Wald-Strauch-Übergangsstadien.

Hintergrund dieser Landnutzungsform sind massive Waldschäden durch Rauchgasemissionen, die in ganz Europa und im gesamten Erzgebirge Anfang der 80er Jahre ihren Höhepunkt hatten. Über 90% der Waldbestände im Einzugsgebiet der Natzschung waren stark betroffen, mehr als 70% der Bestände galten 1982 als abgestorben. Flächen, die seitdem keiner Wiederaufforstung unterlagen, bildeten im Zuge einer natürlichen Sukzession eine Sekundärvegetation aus, die sich heute als Wald-Strauch-Übergangsstadium präsentiert und sich insbesondere aus Fichten, Ebereschen, Birken und einer offenen Krautschicht zusammensetzt (Schwarze, 2007).

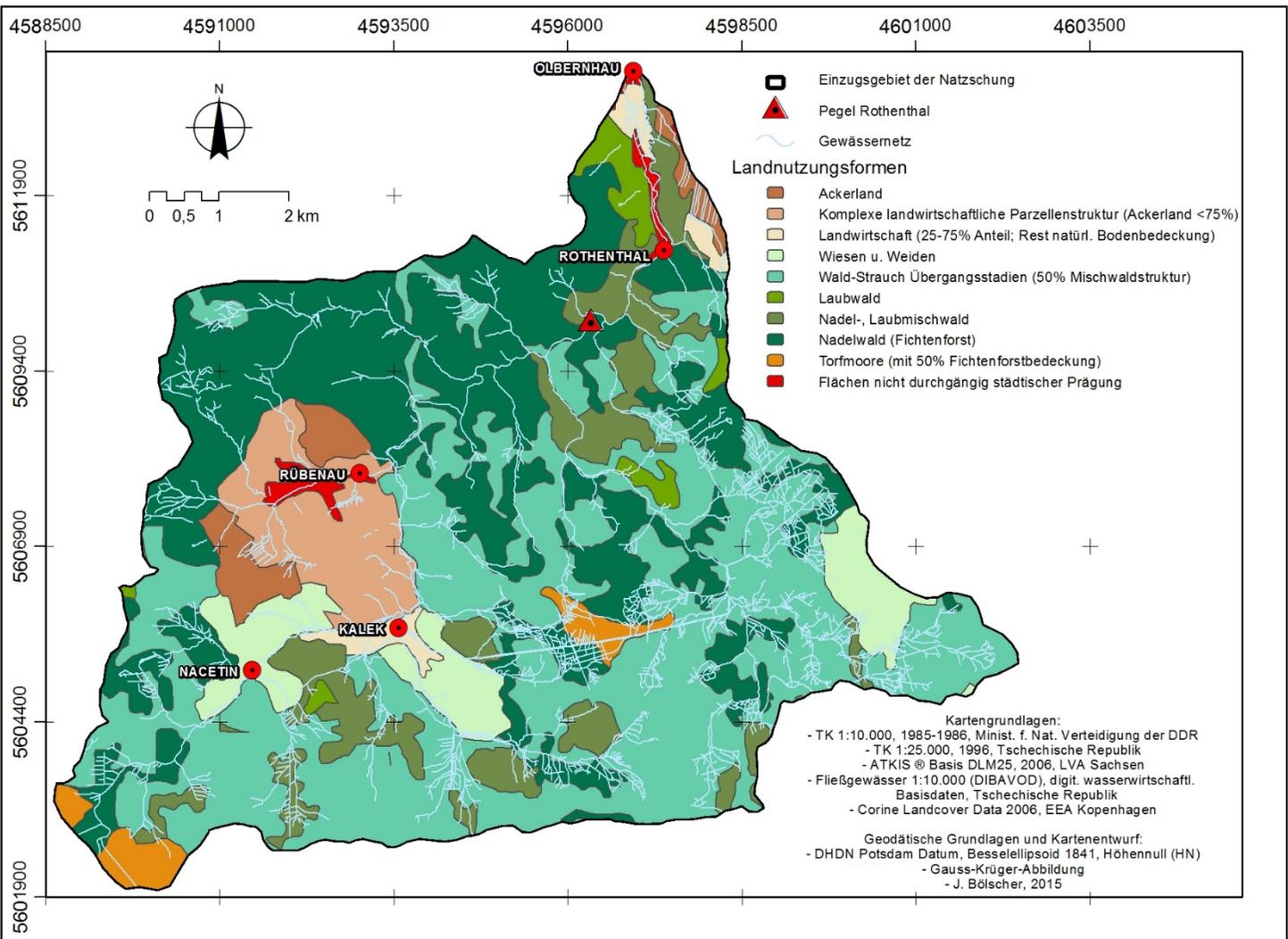


Abb. 16: Verteilung der Landnutzungsformen im Einzugsgebiet der Natzschung

3.5 Potenzielle Vegetation

Um hingegen ein Bild von der Vegetation zu bekommen, die potenziell vorhanden wäre wenn es keine weiteren anthropogenen Eingriffe geben würde, wird in der Geobotanik der Begriff der "Potenziellen Natürlichen Vegetation (PNV)" verwendet. Dieser wurde 1956 von R. Tüxen in die Literatur eingeführt. Nach Schmidt ist hierunter "ein gedanklich konstruierter Zustand [zu verstehen], und zwar einer höchstentwickelten Vegetation (Schlussgesellschaft), wie sie unter gegenwärtigen Standortsbedingungen und einer Berücksichtigung der aktuell naturnahen Vegetation bei Ausschaltung menschlicher Einflüsse vorzustellen wäre. Ihre kartographische Darstellung spiegelt das naturräumliche Potenzial und damit das natürliche ökologische Grundgerüst der Landschaft bei Akzeptanz gegebener irreversibler Standortveränderungen wider" (Schmidt et al., 2003). Die PNV erlaubt damit einen differenzierten Einblick in die ein Gebiet potenziell dominierenden Vegetationszusammensetzungen, deren Standortansprüchen und den hydrologischen Randbedingungen. Die im Erzgebirge kartierten Vegetationseinheiten sind überwiegend mit syntaxonomischen Einheiten vergleichbar und haben hier zumeist den Rang einer Pflanzengesellschaft auf Ebene einer Assoziation oder gehören edaphischen Ausbildungsformen oder Höhenformen an. Kleinflächige Mosaik- oder Übergänge von Gesellschaften werden als Komplex-Einheiten dargestellt. Für das Untersuchungsgebiet werden nach Schmidt et al. (2003) sieben dominante Vegetationseinheiten beschrieben (vgl. Tab. 7: unten).

Tab. 7: Potenzielle Vegetationseinheiten im Einzugsgebiet der Natzschung

- | | |
|----|--|
| a. | Wollreitgras-Fichten-Buchenwälder |
| b. | Vernässte montane Wollreitgras-Fichtenwälder |
| c. | Fichten-Moorwälder |
| d. | Fichten-Schwarzerlen-Bachwälder |
| e. | Montane Sumpfdotterblumen-Erlenwälder |
| f. | Hangwaldkomplexe mit Buchen-, Eichen- u. Edellaubbaumwäldern |
| g. | Hainsimsen-(Tannen-Fichten-) Buchenwälder |

a.) Die Gesellschaft der Wollreitgras-Fichten-Buchenwälder (*Calamagrostio villosae-Fagetum*) ist nur noch kleinflächig im Erzgebirge vertreten und besiedelt mittel- bis tiefgründige Standorte aus sandigem Grus und Lehm auf basenarmen Silikatgesteinen in Höhenlagen zwischen 750 bis 850 m. ü. HN. Die ebenen bis schwach geneigten Standorte verfügen zumeist über eine gute Wasserversorgung und haben einen geringen Grund- und Stauwassereinfluss. Sie besitzen jedoch nur eine arme bis mäßige Nährstoffversorgung und eine leicht saure bis saure Bodenreaktion. Die Standorte weisen als Hauptbodentypen Braunerden und Podsol-Braunerden auf. Potenziell treten die Wollreitgras-Fichten-Buchenwälder im montanen bis hochmontanen Bereich auf, u.a. in den

Kammlagen, sind jedoch aktuell aufgrund von forstwirtschaftlichen Eingriffen und Immissionsbelastungen durch Fichtenforste als Ersatzgesellschaft verdrängt worden. Die Baumschicht und die Strauchschicht wird von Fichten (*Picea abies*) und Rot-Buchen (*Fagus sylvatica*) in ausgeglichenen Anteilen dominiert und durch Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*) und Eberesche (*Sorbus aucuparia*) ergänzt. Die Bodenvegetation ist mit einem hohen Deckungsgrad durch das Wollige Reitgras (*Calamagrostis villosa*) vertreten und wird je nach Ausprägungsform durch Buchenwaldformen wie Hasenlattich (*Prenanthes purpurea*) und Quirlblättrigem Weißwurz (*Polygonatum verticillatum*) oder durch Arten des Wollreitgras-Fichtenwaldes, wie dem Gewelltblättrige Schiefkapselmoos (*Plagiothecium undulatum*) und dem Tannenbärlapp (*Huperzia selago*) ergänzt. Typisch ist auch das Auftreten der Wald-Hainsimse (*Luzula sylvatica*) (Schmidt et al., 2003). Potenzielles Verbreitungsgebiet ist innerhalb der sächsischen Kartiereinheiten das gesamte Einzugsgebiet der Natzschung oberhalb des Zusammenflusses von Natzschung und Rübenauer Bach. Ausgenommen bleiben die Tallagen und deren Unterhangbereiche als auch der Unterlauf der Natzschung. Aufgrund der oben genannten Standortbedingungen kann jedoch angenommen werden, dass sich der Wollreitgras-Fichten-Buchenwald auch südlich der Linie Načetín-Kalek erstreckt haben muss. Dort würden insbesondere die schwach geneigten Hanglagen als auch die Kammlagen selbst potenzielle Standorte bilden. Eine Ausnahme bilden die dort auffindbaren Moorflächen (Schmidt et al., 2003).

b.) In den Randbereichen der Tallagen und in den Tallagen selbst würde hingegen die im Folgenden beschriebene Gesellschaft der vernässten montanen Wollreitgras-Fichtenwälder auftreten. Potenzielle Standorte sind für den schwach geneigten Oberlauf des Steinbaches, den Rübenauer Bach und seine Zuflüsse als auch an der Natzschung zwischen Quellbereich und Zulauf Rübenauer Bach kartiert. Die Gesellschaft der Fichten-Schwarzerlen-Bachwälder würde in Ergänzung den steileren Unterlauf des Rübenauer Baches als auch den schnell fließenden Mittellauf der Natzschung zwischen Kalek und Rübenau einnehmen (Schmidt et al., 2003). Vermutlich würden sich derartige potenzielle Bestände auch in den Tallagen des Bily Potoks und Telčský Potok auskartieren lassen. Die Quellgebiete werden hingegen von der Gesellschaft der Fichten-Moorwälder bestimmt. Die Gesellschaft der vernässten montanen Wollreitgras-Fichtenwälder (o.a. Torfmoos-Fichtenwald) ist eine edaphische Ausbildungsform der Gesellschaft des Wollreitgras-Fichtenwaldes (*Calamagrostio villosae-Piceetum*). Diese leitet über zum o.g. Wollreitgras-Fichtenbuchenwald und findet sich auf ebenen bis hängigem Relief. Die Fichte ist auch hier die dominierende Baumart, sie wird durch Ebereschen in der Strauchschicht (*Sorbus aucuparia*) und Birken (*Betula pendula*, *B. pubescens*) ergänzt. Als Ersatzgesellschaft treten Fichtenforste auf. Sie sind charakteristisch für die hochmontanen Lagen oberhalb 850-900 m. ü. HN. Die Standorte sind durch hohe Jahresniederschläge >1000 mm bis zu 1400 mm und Jahresmitteltemperaturen < 5°C geprägt, daher kann diese Gesellschaft von den Kamm- und Hochlagen des Erzgebirges und aufgrund von örtlichen Gegebenheiten, wie Stagnogleyen und Kaltluftmulden, auch hinunter bis in die submontanen Bereiche auftreten. Die Böden bestehen zumeist aus lehmreichem Grundschutt, grusigem Ton bzw. Torfen auf basenarmen Silikatausgangsgestein. Die Bodentypen weisen eine weite Spanne zwischen

podsolierten Braunerden, Podsolen, Pseudogleyen und verschiedenen Gley-Varietäten auf und sind zumeist durch eine schlechte Nährstoffversorgung und eine gestuft, saure Bodenreaktion gekennzeichnet. Die Standorte sind nass bis mäßig trocken und schwanken zwischen fehlendem bis starkem Grund- und Stauwassereinfluss. Geringmächtige Torfstandorte geben dann die Voraussetzung für die Ausbildung der edaphischen Form, den Torfmoos-Fichtenwälder, welche neben der Fichte (*Picea abies*) das Wollige Reitgras (*Calamagrostis villosa*), das Pfeifengras (*Molinia caerulea*) und Torfmoos-Arten (*Sphagnum spec.*) als typische Arten aufweisen (Schmidt et al., 2003).

c.) Dieser Gesellschaftstypus leitet zur Gesellschaft der Fichten-Moorwälder über (*Vaccinio uliginosi-Piceetum*), welche im montanen und hochmontanen Bereich auf Übergangs- und Hochmooren auftreten, sich auf ebenen bis schwach geneigten Positionen befinden und zumeist intensiv drainiert werden. Die Standorte sind potenziell nur kleinflächig vertreten. Sie weisen als Hauptbodenarten degradierte Hochmoortorfe auf und sind naturgemäß sauer, oligotroph und grund- und stauwasserbeeinflusst. Während auf nasseren Standorten noch die Moorkiefer vorherrscht, wird sie auf trockneren Standorten von Fichten verdrängt, welche zusammen mit den bodenbedeckenden Torfmoosen den typischen Fichten-Moorwald ausbildet. Stark degradierte und tief entwässerte Standorte werden zwar auch noch von Fichten in der Baumschicht dominiert, jedoch tritt aufgrund der lichten, schwachwüchsigen Bestände eine Krautschicht in den Vordergrund, welche durch Beersträucher, wie Heidel- und Preiselbeere, gekennzeichnet ist (*Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*), daneben zeigen sich auch typisch Torfmoose. Als Ersatzgesellschaft treten auch hier Fichtenforste auf (Schmidt et al., 2003).

d.) Die Gesellschaft der Fichten-Schwarzerlen-Bachwälder ist die hochmontane Variante der Hainmieren-Schwarzerlen-Bachwälder (*Stellario-Alnetum*) und zählt zu den Auen- und Niederungswäldern. Hainmieren-Schwarzerlen-Bachwälder treten in Tälern und Niederungen auf zumeist sauerstoffreichen, mäßig bis gut mit Nährstoffen versorgten, neutral bis schwach sauren, jedoch feucht bis nassen Standorten auf, welche unter Grundwassereinfluss stehen und episodisch überflutet werden. Die Standorte unterliegen damit auch einer starken Morphodynamik, welche jedoch durch wasserbauliche Eingriffe eingeschränkt ist, so dass Rohböden als Pionierstandorte insbesondere für Bruch-Weiden (*Salix fragilis*) kaum noch auftreten. Die Hauptbodentypen bilden Gley-Paternien und Auengleye, bestehend aus sandig-lehmigem, aber auch steinigem Substrat, welches in tieferen Lagen durch feinkörnigere Auensedimente ergänzt bzw. ersetzt wird. Die Bestandsstruktur setzt sich in der Baumschicht primär aus Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) zusammen und wird ergänzt durch Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*), Weiden (*Salix fragilis*) und Berg- und Flatterulme (*Ulmus glabra*, *U. laevis*). Typisch für die Strauchschicht sind der Gemeine Schneeball (*Viburnum opulus*), die Sal-Weide (*Salix caprea*) und der Jungwuchs der Baumarten. Die Krautschicht ist äußerst artenreich und setzt sich zusammen aus Elementen der Hochstaudenfluren bzw. Geophyten. Kennzeichnend sind Arten wie Hainmiere (*Stellaria nemorum*), Rauhaariger Kälberkropf (*Chaerophyllum hirsutum*), Gefleckte Taubnessel (*Lamium maculatum*), Großes Springkraut (*Impatiens noli-tangere*), Große Brennessel (*Urtica dioica*) oder die Rote Lichtnelke (*Silene dioica*). Neben der Fichte als weitere Baumart, treten insbesondere im hochmontanen Bereich die Hochstauden als prägende Elemente

der Fichten-Schwarzerlen-Bachwälder in den Vordergrund, gleichzeitig verarmt durch die rauerer klimatischen Bedingungen die restliche niedere Krautschicht. Kennzeichnend sind hier Arten wie Waldgeißbart (*Aruncus dioicus*), Bunter Eisenhut (*Aconitum variegatum*) oder die Akeleiblättrige Wiesenraute (*Thalictrum aquilegifolium*) (Schmidt et al., 2003).

e.) Der Montane Sumpfdotterblumen-Erlenwald zählt im Gegensatz zu den Hainmieren-Schwarzerlen-Bachwäldern zu den Bruch- und Moorwälder, tritt jedoch im Einzugsgebiet nur selten auf. Ein Standort befindet sich in einer Oberlaufsituation eines kleinen Baches an der Westflanke des Rübenauer Hügels. Ein weiterer Standort wurde an einem nördlichen Zufluss zum Rübenauer Bach kartiert. Die Höhengrenze liegt bei 850 m. ü. HN. Die Standorte sind schwach sauer und weisen eine mittlere Nährstoffversorgung auf. Sie sind feucht bis nass und besitzen niedrige Sickerwasserraten, die Standorte sind grundwasserbestimmt und episodisch überstaut oder überflutet. Die Moorgleye und Niedermoorböden bestehen aus (Deck-) Lehmen, Tonen oder Niedermoorstraten und finden sich in Senken, Mulden und entlang von Bach- und Flusstälern. Bestimmend ist die Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa*), Birken (*Betula pubescens*, *B. pendula*) und Aspen (*Populus tremula*) finden sich als Nebenbaumarten. Die Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*) ist stellvertretend für die Krautschicht und wird bspw. ergänzt durch die Wiesen-Segge (*Carex nigra*) (Schmidt et al., 2003).

f.) Der Unterlauf der Natzschung wird am Unterhangbereich seiner nördlichen, sehr steilen Talflanke von bodensauren Buchenmischwäldern grundwasserferner Standorte besiedelt. Im Detail handelt es sich um sogenannte Hangwaldkomplexe mit verschiedenen, nicht näher differenzierten Gesellschaftsformen, bestehend aus einer Variation von Buchen-, Eichen- und Edellaubbaumbeständen. Diese Hangwaldkomplexe sind typisch für enge, steile und gewundene Engtäler des Erzgebirges und kennzeichnen ein Standortmosaik, bedingt durch einen kleinräumigen Wechsel von Exposition, Neigung, Topographie, Feuchte und Trophie. Es dominiert in der montanen Höhenstufe zumeist die Gesellschaft der bodensauren (Tannen-Fichten-) Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum*), im submontanen Bereich sind es hingegen bodensaure Eichen-Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum*, planare bis submontane Höhenform). Diese werden (je nach Lage und mikroklimatischen Bedingungen) durch Waldmeister-Buchenwälder (*Galio Odorati-Fagetum*), Waldschwingel-(Tannen-) Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum festucetosum*) sowie durch Eschen-Ahorn-Schlucht und Schatthangwälder (*Fraxino-Aceretum*) ergänzt. Es kommen im submontanen Bereich, auf Standorten mit einer besseren Nährstoffversorgung, noch punktuell Linden-Hainbuchen-Eichenwälder vor. Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) und Drahtschmiele (*Deschampsia flexuosa*) sowie das Wald-Reitgras (*Calamagrostis arundinacea*) bilden die wichtigsten Bestände im Unterwuchs aus (Schmidt et al., 2003).

g.) Entlang des Mittelhanges bis zum Oberhang werden die Mosaik der Hangwaldkomplexe von reinen Hainsimsen-(Tannen-Fichten-) Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum*) abgelöst, welche im Erzgebirge großflächig entlang der Nordabdachung in einer Höhenstufe zwischen 550 und 750 m. ü. HN auftreten und ein breites Spektrum an Standorten einnehmen. Die Standorte sind flach- bis mittelgründig und zeigen kaum einen Grund- und Stauwassereinfluss. Als Bodentypen haben sich auf mittelsteinigem, lehmigem Schluff Ranker-Braunerden, Podsol-Braunerden und

Braunerden entwickelt. Sie verfügen über eine arme bis mäßige Nährstoffversorgung, gelten als schwach sauer bis sauer, sind mäßig trocken bis frisch und zeigen keine besondere Reliefaffinität. Die häufig auftretende Fichte (*Picea abies*) wird ergänzt durch Buche (*Fagus sylvatica*) und Weißtanne (*Abies alba*). Die schwach ausgebildete Strauchschicht wird insbesondere von Rotem Holunder (*Sambucus racemosa*) bestimmt, während die Krautschicht primär charakterisiert wird durch Quirlblättrigen Weißwurz (*Polygonatum verticillatum*), Fuchs-Greiskraut (*Senecio ovatus*), Hasenlattich oder Purpurlattich (*Prenanthes purpurea*) und vor allem durch das Wollige Reitgras (*Calamagrostis villosa*) (Schmidt et al., 2003).

3.6 Klima

Bestimmt durch die Höhe, die geographische Lage und Erstreckung in Europa als auch in Abhängigkeit von der Morphologie ist das Erzgebirge aus klimatischer Sicht dem Deutschen Mittelgebirgsklima zuzuordnen und durch eine Zunahme der Kontinentalität von West nach Ost geprägt (Hendl, 1995). Durch die Lage im Regenschatten vorgelagerter Mittelgebirge, sind die Niederschlagssummen im Erzgebirge in allen geographischen Höhen geringer als in anderen Mittelgebirgen Deutschlands (Büttner et al., 2001). So wird das Klima vor allem bei den vorherrschenden westlichen und nordwestlichen Luftströmungen durch die Lee-Wirkung der in dieser Richtung vorgelagerten Mittelgebirge (Harz, Thüringer Wald, Fichtelgebirge) beeinflusst. Röder et al. (2008) ordnen dem Erzgebirge eine vermittelnde Position vom atlantisch zum kontinentalen Klima zu und zeigt anhand phänologischer und klimatologischer Daten auf, dass einerseits die maximalen Niederschlagssummen zum Osterzgebirge hin abnehmen, andererseits die Sonnenscheindauer und die Länge der Vegetationsperiode in vergleichbaren Höhenlagen zunehmen. Modifiziert wird dieses Bild jedoch durch die sehr typischen, aber wechselhaften Luv- und Leeeffekte, die lokal das vorherrschende Klima überprägen können (Röder et al., 2008; Röder & Richter, 2008).

Tab. 8: Jahresmitteltemperaturen und Jahresmittelniederschlag im Erzgebirge nach Kaulfuß & Kramer (2000)

	Jahresmitteltemperatur	Jahresmittelniederschlag
Untere Gebirgslagen bis 500 m	7,0 – 7,6 °C	720 – 850 mm
Mittlere Gebirgslagen bis 750 m	5,5 – 7,0 °C	850 – 1.000 mm
Obere Gebirgslagen / Kammlagen bis 950 m	4,3 – 5,5 °C	ca. 1.000 mm

Ebenso wie andere Mittelgebirge, zeigt auch das Erzgebirge eine Höhengliederung von Temperatur und Niederschlägen (vgl. Tab. 8: oben). Kaulfuß & Kramer geben für die unteren Lagen des Erzgebirges eine mittlere Temperaturspanne von 7,0-7,6°C und Niederschlagswerte von 720-850 mm/ an, die in den obersten Lagen auf durchschnittliche Werte von 4,3-5,5°C fallen

bzw. auf 1.000 mm/a ansteigen (Kaulfuß & Kramer, 2000). In den Kammlagen werden im Westerzgebirge mit 1.200 mm/a die höchsten Niederschlagssummen erreicht, nur die Luvgebiete der Kammregionen im Osterzgebirge (Seiffener Hoch- und Kammlage, Zinnwald) weisen annähernd hohe Summen von 1.000 mm/a auf. Insgesamt nehmen jedoch die Jahresniederschläge im Osterzgebirge ab. Dort wurden auch in den untersten Lagen für das langjährige Mittel der Periode 1961-1990 nur noch Werte um 700 mm/a berechnet (Röder et al., 2008).

Zum Vergleich sind in folgender Tabelle (Tab. 9: S.102) die mittleren jährlichen Klimawerte von ausgewählten Stationen des Erzgebirges im West-Ost-Verlauf sowie von Chemnitz und Dresden dargestellt (DWD, 2011; Mannsfeld & Syrbe, 2008). Hierbei zeigt sich nochmals der Gradient in den Niederschlagssummen und der Temperatur im West-Ost- und auch im Höhenverlauf. Deutlich ausgeprägt ist bspw. der Sprung zwischen Flöhatal und der Kammhochfläche bei Seiffen.

Tab. 9: Mittlere jährliche Klimawerte für ausgesuchte Räume des Erzgebirges im West-Ost-Verlauf; zusammengestellt und verändert nach Mannsfeld & Syrbe (2008); Daten für Dresden und Chemnitz nach DWD-Zeitreihen 1961-1990 (DWD, 2011)				
	Niederschlag [mm/a]	Temperatur [°C]	Sonnenscheindauer [h/a]	Verdunstung (Grasfläche) [mm/a] / [%]
Westerzgebirge				
Hoch- und Kammlagen Auersberg und Aschberg	1.110	5,5	1.446	433 / 39
Mittleres Erzgebirge				
Flöhatal	847	7,3	1.471	517 / 61
Kammhochfläche bei Kühnhaide	879	6,1	1.463	449 / 51
Osterzgebirge				
Saydaer Rücken- und Riedelland	897	6,5	1.462	484 / 54
Hoch- und Kammlage bei Seiffen	980	5,7	1.463	451 / 46
Hochflächen bei Glashütte	786	6,8	1.416	527 / 67
Vergleichsgebiete				
Chemnitz	700	7,9	1.532	k.A.
Dresden / Klotz.	666	8,9	1.581	k.A.

Die Sonnenscheindauer variiert im gesamten Erzgebirge um die 1.400 h/a und liegt damit im Vergleich zu Dresden (227 m. ü. HN) mit 1.581 h/a oder Chemnitz mit 1.532 h/a (418 m. ü. HN) um über 100 h/a niedriger. Ebenso verhält es sich mit den Jahresmitteltemperaturen im Vergleich zu Dresden mit 8,9°C bzw. Chemnitz mit 7,9°C, bzw. mit den mittleren Jahresniederschlagssummen von 666 bzw. 700 mm/a (DWD, 2011). Während die Niederschläge auf den Hochflächen von West nach Ost mit 1.110 mm/a auf 786 mm/a deutlich abnehmen, zeigen die Temperaturwerte eine leichte Zunahme von 5,5 auf 6,8°C. Die Verdunstungswerte sind bei Auersberg mit 433 mm/a mit einem Anteil von 39% am niedrigsten und zeigen bei Glashütte mit 527 mm/a und einem Anteil von über 67 % die höchsten Werte. Die Werte für die verschiedenen Naturräume zwischen West- und Osterzgebirge zeigen hierbei sehr anschaulich die beträchtliche Spannweite und Variation von Niederschlag, Temperatur und Verdunstung auf und skizzieren deutlich das Spannungsfeld einer hydrologischen Modellierung.

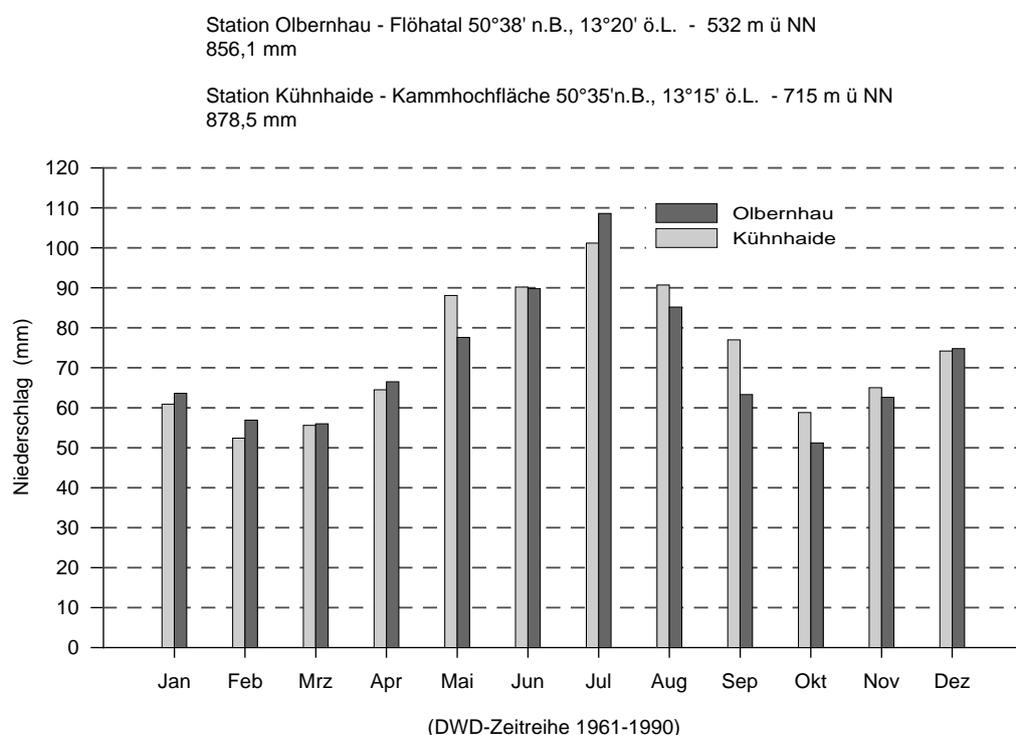


Abb. 17: Mittlere langjährige Monatssummen der Niederschläge an den Klimastationen Olbernhau und Kühnhaide für den Zeitraum 1961-1990 (Datenquelle DWD)

Im Gegensatz zu Harz und Thüringer Wald ist das Erzgebirge durch ein ausgeprägtes Niederschlagsmaximum im Sommer gekennzeichnet. Dies resultiert aus der relativ großen Häufigkeit von Nordwestwinden im Sommer und den entsprechenden Stauwirkungen an der Nordseite des Erzgebirges (SMUL, 2005b). Nördliche Luftströmungen führen in den unteren Berglagen und dem Erzgebirgsvorland zu Stauwirkungen, wodurch diese Gebiete am stärksten beregnet werden. Damit einhergehend können einströmende polare Luftmassen starke Temperaturgradienten von etwa 1 K/100 m Höhe verursachen. Entgegengesetzte südliche

Strömungen verursachen vor allem im Winterhalbjahr Föhneffekte und ausgeprägte Temperaturanomalien zwischen den sich trockenadiabatisch erwärmenden Luftmassen der Nordabdachung und dem Abfall zum Egergraben bzw. zu den bodennahen Kaltluftmassen, die über das Elbtal aus dem nordböhmischen Becken einströmen (Röder et al. 2008).

Sowohl die Stationen Kühnhaide als auch Olbernhau an der oberen Flöha zeigen das sommerliche Niederschlagsmaximum im Juli auf (vgl. Abb. 17: oben). Gleichzeitig zeigt sich, dass sich in der Regel ab April die Niederschlagsmengen bis zum Sommer stetig erhöhen und ein erstes Minimum im Oktober erreichen, um dann nochmals im Dezember anzusteigen. Es folgt ab Februar bis März ein zweites Minimum. Temperaturdaten lagen für diese Stationen nicht vor. Daher wurde der durchschnittliche Temperaturverlauf am Beispiel der Station Zinnwald-Georgenfeld dargestellt (Abb. 18: S.104). Die Kurve zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Niederschläge, jedoch bildet sich typischerweise das Minimum in Form einer sehr deutlichen Unterschreitung der 0°C-Grenze erst zwischen Dezember und Februar aus. Expositions- und lagebedingt können die Temperaturen lokal auch deutlich unter -10°C liegen.

Vor allem die Hochflächen im Mittleren Erzgebirge sind stark windexponiert und mit zunehmender Höhe durch Schneeverwehungen und Raufrost gekennzeichnet. Die Kammhochfläche um Reitzenhain gehört daher zusammen mit dem Fichtelberg zu den kältesten Gebieten im Erzgebirge, sie weisen eine Jahresmitteltemperatur von 5°C bzw. 4°C auf, während sie zum Vergleich im unteren Flöhatal bei 7-8°C liegt (Bernhardt & Röder, 2008).

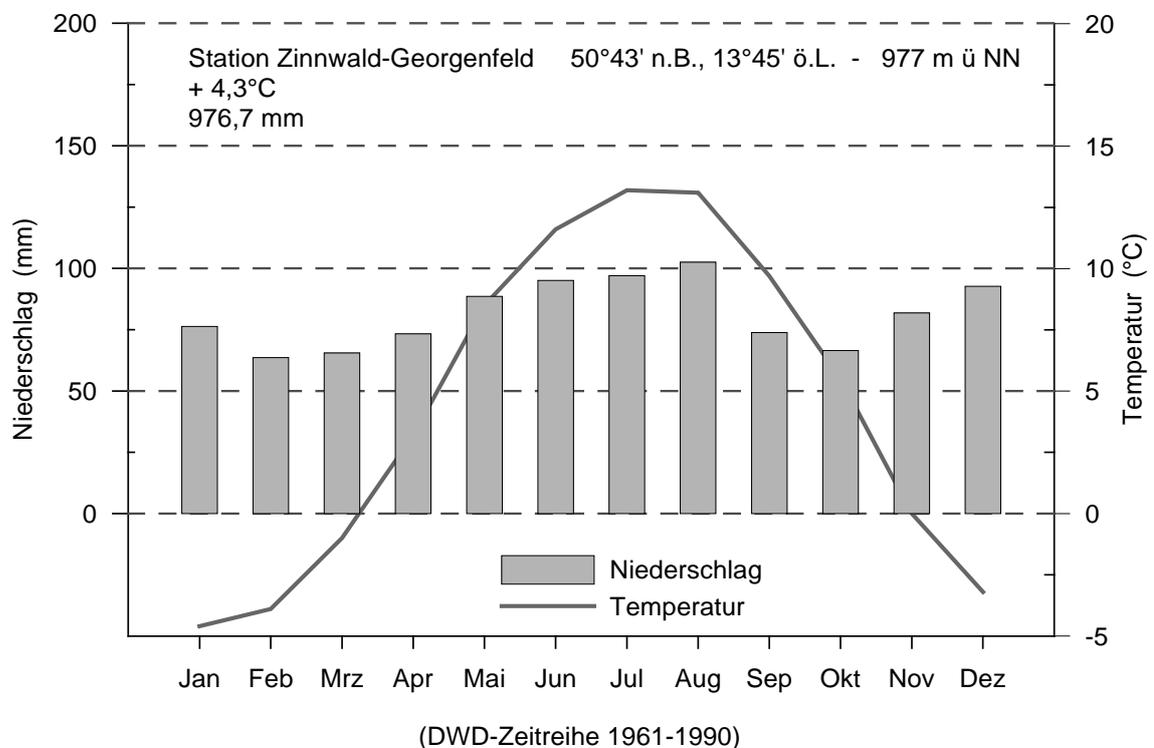


Abb. 18: Klimadiagramm Station Zinnwald-Georgenfeld

Die orographische Situation des Erzgebirges führt dazu, dass in den Hoch- und Kammlagen die höchsten Niederschläge und die geringsten Temperaturen auftreten und damit einher auch die geringste Verdunstung geht und sich in den Hochlagen eine deutlich positive Wasserbilanz einstellt (Röder et al., 2008). Dies zeigen auch Berechnungen von Scherzer (2004) für die Level-II Station Olbernhau (vgl. Tab. 10: S.105). Die Station liegt am nördlichen Rand des Einzugsgebietes der Natzschung. Die Messdaten wurden für die hydrologische Modellierung genutzt. Daher geben die Berechnungen von Scherzer einen Hinweis auf die Plausibilität der Modellierungsergebnisse. Für den Zeitraum 1997-2003 wurden Jahresniederschläge zwischen 763 und 1.367 mm gemessen. Die Daten zeigen absolute Verdunstungswerte zwischen 460 und 562 mm/a bzw. 33 und 73 % an. Sie liegen im Mittel um die 46 %. Die klimatische Wasserbilanz schwankt zwischen 201 und 907 mm/a. Das Jahr 2002 war im Verhältnis relativ feucht und die Verdunstung nahm für den Betrachtungszeitraum sowohl absolut als auch relativ den niedrigsten Wert ein. 907 mm standen für den Abfluss zur Verfügung. Hingegen fiel als anderes Extrem das Jahr 2003 mit nur 763 mm Niederschlag sehr trocken aus, es standen nur 201 mm Wasser für den Abfluss zur Verfügung, hingegen lag die Verdunstung mit 562 mm bei einem Anteil von über 70 %.

Geprägt wird darüber hinaus das gesamt-klimatische Bild durch lokale Luv-Leeeffekte und vor allem durch nordostwärts ziehende Tiefdruckgebiete, die zuvor im Mittelmeerraum erwärmt und stark aufgesättigt wurden. Diese Vb-Wetterlagen sind typisch für das Erzgebirge, führen im Frühjahr zu raschen Schneeschmelzen und gelten im Sommer durch die langen, intensiven und extremen Niederschläge als eine der Hauptursachen für die Hochwasserereignisse im Erzgebirge (LFULG, 2009; Petrow et al., 2007; Röder et al., 2008).

Tab. 10: Klimadaten der Level-II Station Olbernhau für den Zeitraum 1997-2003

Jahr	Niederschlag* ¹ [mm/a]	FAO-Grasreferenz- verdunstung ETO * ² [mm/a]	Klimatische Wasserbilanz [mm/a]	Potenzielle Verdunstung [%]
1997	1.096	491	605	44
1998	1.240	509	731	41
1999	957	505	452	52
2000	1.228	525	703	42
2001	1.165	471	694	40
2002	1.367	460	907	33
2003	763	562	201	73

*¹ Niederschlag wurde für Messhöhe 1 Meter mit dem Faktor 1,05 korrigiert.

*² Penman-Monteith-Gleichung als Standardverfahren der FAO (nach Allen et al. 1998)

Quelle: (Scherzer, 2004)

Dies spiegelt sich auch in den Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Landestalsperrenverwaltung (LTV) zu den extremwertstatistisch ermittelten Starkniederschlagshöhen für das Untersuchungsgebiet (Tab. 11: S.106). Die Angaben des KOSTRA-Atlas des DWD weisen, je nach Dauerstufe für hundertjährige Niederschlagshöhen, noch einen Wertebereich zwischen 85 und 155 mm aus (KOSTRA: Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung). Diese Werte wurden für Sachsen nach den Erfahrungen aus der Vb-Wetterlage vom August 2002 und dem daraus resultierenden Hochwasser angepasst (STRASA; Starkniederschläge für Sachsen). Sie zeigen nun einen Wertebereich zwischen 160 und 254 mm auf und dienen als Bemessungsgrundlage für die Hochwassersimulationen an der Natzschung (DWD, 2006).

Aus den oben genannten Jahrestemperatur- und Niederschlagsverläufen lassen sich mehrere hydrologisch relevante Aspekte für die Untersuchungen ableiten: Der vorsommerliche Anstieg der Niederschläge bis zum Juli begünstigt wie die relativ niedrigen Temperaturen und die damit verbundene Verdunstung eine Zunahme der Bodensättigung, was zu ungünstigen Vorbedingungen bei Starkniederschlägen führt. Die nochmals verstärkten Niederschläge im Herbst begünstigen hingegen bei abnehmender Lufttemperatur den frühzeitigen, jedoch lokal sehr variabel Aufbau von Schneedecken, die ab März abschmelzen und zum Hochwasser führen können. Das Abschmelzen kann durch eine ungünstige Überlagerung von Temperaturanstieg und Niederschlagszunahme im April die Hochwasserentwicklung zusätzlich forcieren, jedoch expositions- und höhenbedingt ebenfalls sehr heterogen ausfallen. Der Aufbau von zum Teil mächtigen Schneedecken konnte bspw. im Winter 2005/2006 im gesamten Erzgebirge beobachtet werden. Das Abschmelzen führte im Frühjahr 2006 zu einer langanhaltenden und angespannten Hochwassersituation an der Elbe, welche im völligen Gegensatz stand zu dem extrem trockenen Jahr 2003.

Tab. 11: Statistische Starkniederschlagshöhen für das Untersuchungsgebiet (DWD, 2006)

	DWD (KOSTRA-Atlas 2000)	LTV & DWD (STRASA-Daten)	
Niederschlagsdauer D [h]	Niederschlagshöhe h [mm] (Toleranzbereich +/-20 % für Planungszwecke)	Niederschlagshöhe h [mm]	Wiederkehrzeit T [a]
12	85 +/-	160	100
24	110	185	100
48	140	220	100
72	155	254	100

3.7 Hydrologie

Das Erzgebirge befindet sich im Einzugsgebiet der Elbe und wird insbesondere über die Vereinigte Weißeritz und die Vereinigte Mulde entwässert. Die Zwickauer Mulde und Freiburger Mulde bilden bei Sermuth oberhalb des Pegels Golzern (117 m. ü. HN) die Vereinigte Mulde, welche nach 147 km nördlich von Dessau in die Elbe einmündet. Sie umfasst bei Dessau ein Einzugsgebiet von über 7.100 km² und bis zum Pegel Golzern eine Fläche von 5.433 km² mit einem mittlerem Abfluss von 61,8 m³/s. Das HHQ betrug am 13.08.2002 2.600 m³/s (LFULG, 2010).

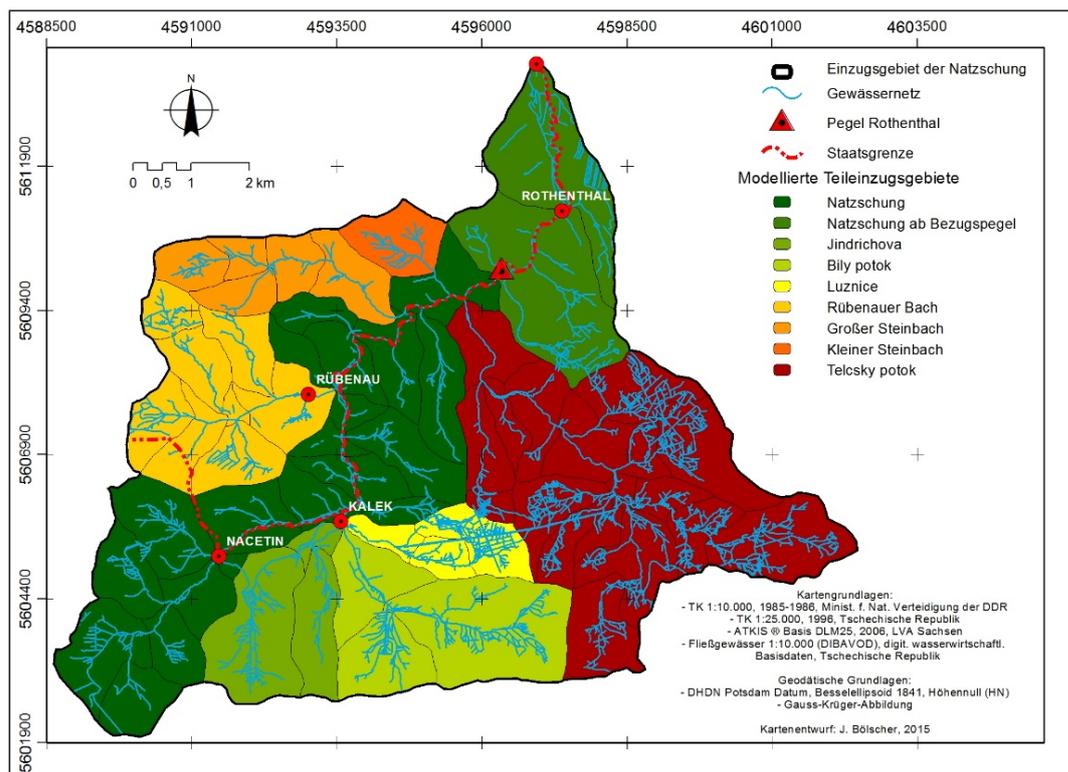


Abb. 19: Einzugsgebietsaufteilung mit Hauptgewässern

Im Mittleren Erzgebirge treffen oberhalb der Stadt Olbernhau (450 m. ü. HN) auf kurzer Entfernung die obere Flöha, Schweinitz und Natzschung zusammen und entwässern über die Flöha in die Zschopau, einem direkten Zufluss zur Freiburger Mulde. Vom Auslass der Talsperre Rauschenbach bis zum Pegel Olbernhau 2 umfasst das Einzugsgebiet von Flöha, Schweinitz und Natzschung ein Gebiet von 228 km² (Reinhardt, 2010). Unterhalb der Stadt Olbernhau werden die Durchflusswerte der Flöha erstmalig am Pegel Pockau 1 (397 m. ü. HN) aufgezeichnet.

Bis zum Pegel Pockau 1 legt die Obere Flöha eine Fließlänge von 27,7 km zurück und hat ein mittleres Gefälle von 0,6 %. Bei einer Gesamtfläche von 385 km² beträgt die mittlere Abflussspende 15 l/(s*km²) und die mittlere Wasserführung 5,9 m³/s (LFULG, 2010). Im Jahresverlauf

zeigt die Abflussganglinie der Flöha am Pegel Pockau 1 ein Abflussmaximum in den Monaten März und April. Das MQ liegt in diesen Monaten für die Pegelzeitreihe 1921 – 2005 in einer Größenordnung von rd. 9 – 11 m³/s und wird dominiert von winterlichen Schneeschmelzen. Das HHQ für den Pegel Pockau 1 wurde im August 2002 mit 315 m³/s und das NNQ im November 1953 mit 0,120 m³/s registriert. Das statistische HQ₁₀₀ liegt mit 254 m³/s deutlich niedriger als das HHQ (LFULG, 2010). Während die Flöha durch die Rauschenbach- und die Fláje-Talsperre (Fertigstellung 1968 bzw. 1964) reguliert wird, sind Schweinitz und Natzschung weitestgehend unbeeinflusst von größeren wasserbaulichen Eingriffen.

Die Fläche des Einzugsgebietes umfasst bis zum Pegel Rothenthal 75 km² und bis zur Mündung der Natzschung in die Flöha 85 km² (vgl. Abb. 19: S.107). Der Quellbereich der Natzschung (Načětinský Potok) liegt innerhalb der Seeheide, einem ausgedehnten Hochmoorgebiet an der westlichen Flanke des Jeleni Vrech (863 m. ü. HN) auf einer Höhe von 825 m. ü. HN. Der Pegel Rothenthal befindet sich auf einer Höhe von 538 m. ü. HN und der Mündungsbereich liegt nochmals 81 Meter tiefer auf 467 m. ü. HN.

Das Einzugsbiet der Natzschung überwindet zwischen Quelle und Mündung eine Laufstrecke von 17 km bei einem Sohlgefälle zwischen anfänglich über 3 % im Quellbereich, 1-1,5 % im Mittellauf und fast 4 % auf einer Strecke von annähernd 5 km im oberen Bereich des Unterlaufs. Auf den letzten 5 km Fließstrecke zwischen Pegel Rothenthal und der Mündung in die Flöha verringert sich das Sohlgefälle wieder auf 1,7 %. Zwischen Quell- und Mündungsbereich (825 m. ü. HN, 467 m. ü. HN) liegt eine Höhendifferenz von 358 Metern. Dies entspricht einem durchschnittlichen Gefälle von 2,1 %.

Der Oberlauf der Natzschung entspringt im südwestlichen Bereich des Einzugsgebietes an der Nordabdachung des Erzgebirgskamms. Dieser stellt gleichzeitig die Wasserscheide zur südlich abfließenden Chomutovka dar (Jeníček, 2008). Im Süden und Südosten des Einzugsgebietes wird die Nordabdachung des Erzgebirgskamms durch den Bily Potok bzw. den Telčsky Potok entwässert. Der Rübenauer Bach bildet einen der Vorfluter für den zentralen Bereich um den Rübenauer Hügel und für die westlichen und nordwestlichen Areale des Einzugsgebietes im Bereich des Kriegswaldes. Der nördliche Bereich (Wasserscheide zum Rungstockbach) wird hingegen über den Großen und Kleinen Steinbach entwässert. Die östliche Wasserscheide zur Schweinitz bildet das Einzugsgebiet des Telčsky Potok.

Zwischen der Quelle und der Ortschaft Kalek fließt die Natzschung zunächst nach Nordost und knickt danach scharf nach Norden ab. Neben etlichen kleineren Zuflüssen, münden bis zur Ortschaft Kalek die Einzugsgebiete der Jindrichova, des Bily Potoks und der Luznice rechtsseitig in den Oberlauf der Natzschung.



Abb. 20: Pegel Rothenthal am Unterlauf der Natzschung

Diese Gebiete umfassen eine Fläche von 16 km². Die Natzschung umfasst bis Kalek eine Fläche von 12 km² und eine Lauflänge von 6 km. Bis zur Ortschaft Kalek wird damit 32 % des Einzugsgebietes abgedeckt und hierüber insbesondere der südliche Bereich der Natzschung entwässert.

Nach weiteren 2 km Laufstrecke in einem flachen und breiten Talverlauf mündet der Rübenauer Bach linksseitig in die Natzschung. Dieser umfasst an der Mündung eine Fläche von 8,5 km² und entwässert, wie schon oben erwähnt, den zentralen Bereich um den Rübenauer Hügel und den westlichen und nordwestlichen Bereich des Kriegswaldes.

Unterhalb der Einmündung des Rübenauer Baches verändert sich die Fließrichtung wieder nach Nordost. Die Natzschung versteilt ab hier ihr Gefälle und verläuft in engen Bögen, gesäumt von steilen Talflanken bis zur Gemeinde Rothenthal. Auf diesem Abschnitt münden, als größere Bachsysteme oberhalb des Pegels Rothenthal, noch linksseitig der Große Steinbach mit einem Einzugsgebiet von 4,6 km² und rechtsseitig der Telčsky Potok mit einer Gesamtfläche von knapp 22 km² in die Natzschung und verstärken nochmals das Abflussvolumen. Danach öffnet sich der Talabschnitt und die Natzschung ändert erneut die Fließrichtung nach Norden, um dann kurz unterhalb der Schweinitz in die Obere Flöha zu münden.

Die Gesamtlänge aller Fließgewässer im Einzugsgebiet der Natzschung beläuft sich auf 109 Kilometer, bis zum Pegel Rothenthal sind es immer noch 102 Kilometer. Berücksichtigt man hingegen alle Drainagesysteme und kleineren Nebengerinne, so ergibt sich mit 396 Kilometer Fließlänge bis zur Mündung bzw. 353 Kilometer bis zum Pegel Rothenthal ein weitaus größeres abflusswirksames System an Vorflutern. Die Gewässernetzdichte liegt an der Mündung bei 4,6 km/km².

1929-2009	Jahr	Sommer	Winter
MNQ	0,27	0,34	0,37
MQ	1,37	1,07	1,68
MHQ	15	11,8	10,9

Grundwasser

Zu Grundwasserständen, Grundwasservorkommen und zur Grundwasserführung liegen keine Angaben vor. Die anstehenden Gneisvarietäten neigen jedoch aufgrund ihres spröden Verhaltens zur Ausbildung von Kluftsystemen. Es ist weiterhin anzunehmen, dass das anstehende Gestein tiefgründig verwittert ist und wasserleitend wirkt. Es kann an dieser Stelle jedoch nicht geklärt werden, wie mächtig potenzielle Grundwasserleiter sind bzw. welche Durchlässigkeit, Fließrichtung und Abflussspende sie besitzen. Auch ist nicht bekannt, wie weit sich das ober- und unterirdische Einzugsgebiet überlagern. Lediglich die hydrogeologische Karte des Gebietes macht eine Angabe zur unterirdischen Abflussspende von 1,0-1,5 l/(s*km²) (VEB, 1984).

Niedrigwasser

Der langjährige mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) der Natzschung beträgt am Pegel Rothenthal 0,27 m³/s, wobei Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr mit 0,34 bzw. 0,37 m³/s ähnliche Abflussverhältnisse aufweisen (vgl. Tab. 12: oben). In der Zeitspanne von 1926-2009 wurde der mittlere niedrigste Durchflusswert auf Monatsbasis (MNQ) für den August bzw. September mit 0,47 bzw. 0,43 m³/s erreicht. Der niedrigste Tagesmittelwert von 0,06 m³/s wurde 1943 für den Monat Dezember registriert. Die Wasserführung wird daher in der Regel zum Spätsommer und während der Frostperioden im Winter stark reduziert (LFULG, 2011c).

Mittelwasser

Der mittlere jährliche Abfluss der Natzschung für den Zeitraum 1929-2009 beträgt 1,37 m³/s. Für das hydrologische Winterhalbjahr liegt dieser Wert bei 1,68 m³/s und für das hydrologische Sommerhalbjahr bei 1,07 m³/s (Tab. 12: oben). Im Vergleich zur Vereinigten Mulde (Pegel Golzern) bzw. zur Flöha (Pegel Pockau 1) entspricht dies etwa 2% bzw. 23% der mittleren Wasserführung (LFULG, 2011b; LFULG, 2011c). Die höchsten mittleren Abflüsse werden im Frühjahr erzielt. Während die Niederschläge noch bis zum Maximum im Juli ansteigen, fällt der Abfluss bis Mai erst stärker und dann niederschlagsbedingt schwächer aber stetig bis zum Minimum im September ab. Mit fallenden Niederschlägen bis Oktober setzt dann im Spätsommer die „Wasserklemme“ ein. Mit Ende der Vegetationsperiode im Herbst steigen Niederschlag und Abfluss wieder an. Der Verlauf des Mittelwasserabflusses spiegelt den Verlauf des mittleren Niedrigwasserabflusses auf einem höheren Niveau.

Hochwasser

Für die Periode 1929 bis 2009 wird das mittlere Hochwasser (MHQ) mit $15 \text{ m}^3/\text{s}$ und die mittlere Hochwasserspense mit $203 \text{ l}/(\text{s km}^2)$ angegeben (Tab. 12: S.110). Für das hydrologische Sommerhalbjahr liegt das MHQ bei $11,8 \text{ m}^3/\text{s}$ und für das Winterhalbjahr bei $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (LFULG, 2011c). Einen ähnlichen Jahresverlauf wie das MQ zeichnet auch der langjährige mittlere Hochwasserabfluss nach (MHQ). Das Maximum setzt jedoch schon im März ein, mit einem Wert von über $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Zwischen Mai und August verbleibt der Abfluss auf einem Wert von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ und fällt dann bis zum September stark bis auf $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ab. Im Dezember wird erneut ein Abfluss von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht, der bis Februar auf diesem Niveau verbleibt (vgl. Abb. 21: unten).

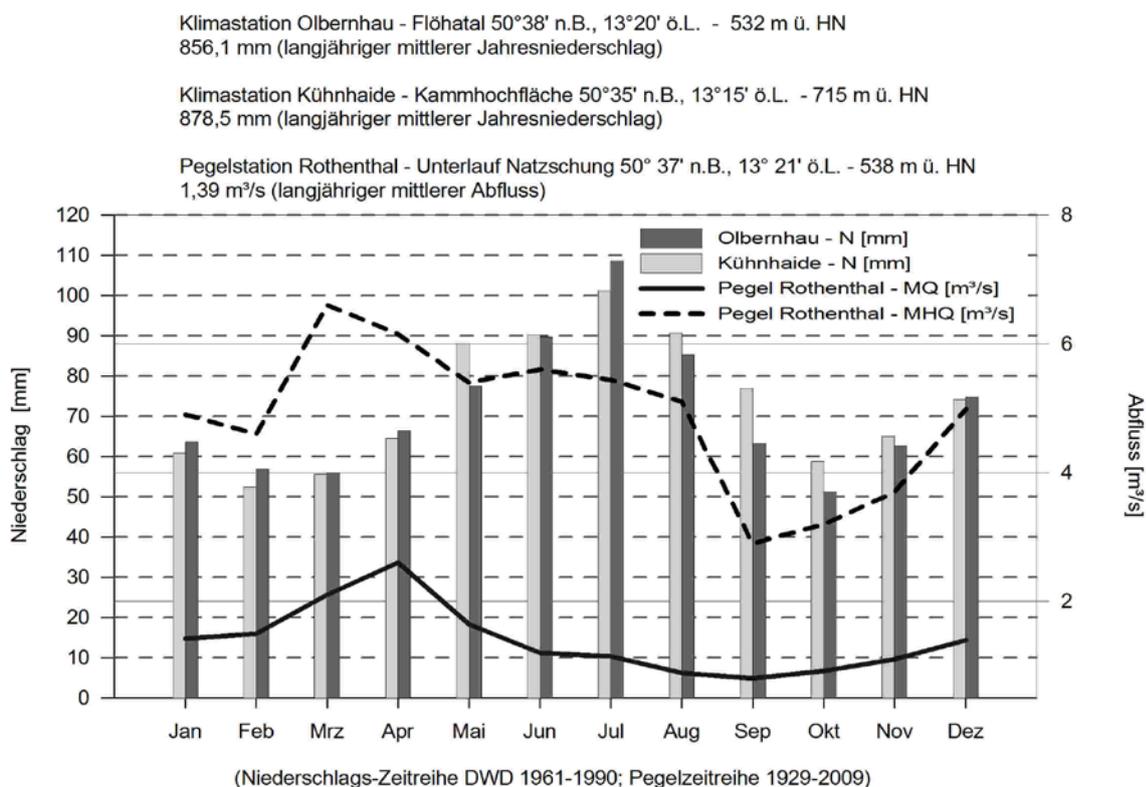


Abb. 21: Jahresgang des mittleren Abflusses und des mittleren Hochwasserabflusses am Pegel Rothenthal (langjährige Monatsmittel MQ und MHQ für den Zeitraum 1929-2009)

Das HQ_2 wird mit einem Hochwasserscheitel von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben (vgl. Tab. 13: unten). Das berechnete HQ_{100} liegt bei einem Wert von $63,4 \text{ m}^3/\text{s}$ und das HQ_{200} erreicht einen theoretischen Spitzenabfluss von $82,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Am 12. August 2002 wurde mit einer Abflussspitze von $88 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem Wasserstand von 243 cm das HHQ erreicht. Die maximale Abflussspende betrug $1.170 \text{ l}/(\text{s km}^2)$. Die Wiederkehrwahrscheinlichkeit wurde vom LFUG mit $\text{HQ}(T) 237$ angegeben (LFULG, 2010; LFULG, 2011c). Am Pegel Pockau1 wurde im August 2002 ein entsprechender Durchfluss von $315 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen, davon entfielen ca. 28% auf die Natzschung (LFULG, 2011b).

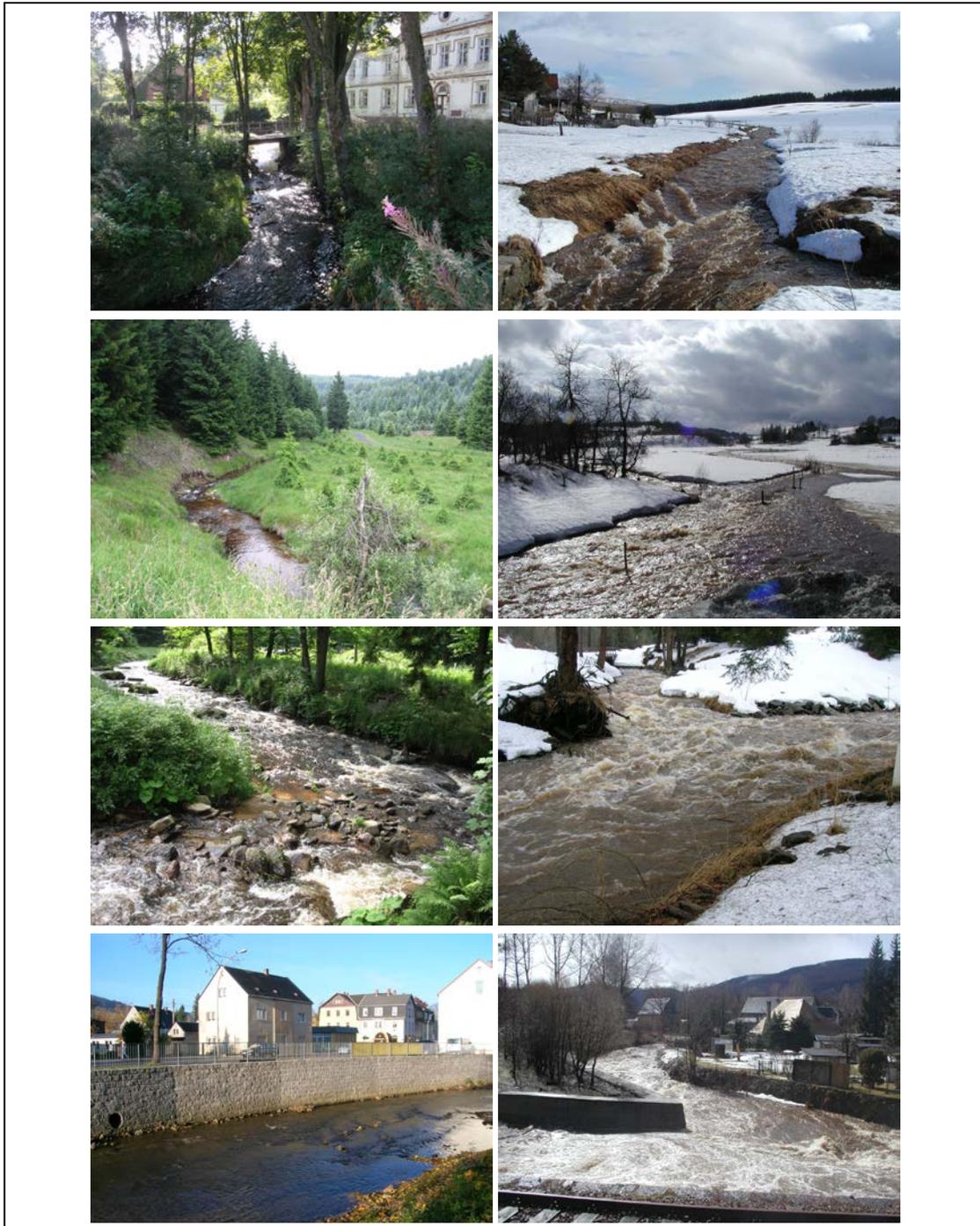


Abb. 22: Mittelwasserführung am Oberlauf der Natzschung (l.o.), am Telčsky Potok (l.m.o.), am Zusammenfluss von Telčsky Potok u. Natzschung (l.m.u.), an der Flöha in Olbernhau (l.u.); Hochwasserführung während der Schneeschmelze (03.2006) am Bily Potok (r.o.), am Zusammenfluss von Bily Potok u. Natzschung (r.m.o), am Zusammenfluss von Natzschung u. Telčsky Potok (r.m.u.), am Zusammenfluss von Natzschung u. Flöha (r.u.)

Tab. 13: Hochwasserscheitelabflüsse (HQ) bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (T); HQ_T [m³/s]

Quelle: (LfUG, 2004b; LFULG, 2009; LFULG, 2010; LFULG, 2011c)

Pegel	HQ ₂	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀	HQ ₍₂₃₇₎
Rothenthal	12	25,8	34	48,6	63,4	82,6	88,0
Periode 1929-2009							

Die Betrachtung des jährlich publizierten gewässerkundlichen Datenblattes für den Pegel Rothenthal (LFULG, 2011c) zeigt anhand der Auswertung der Extremwerttabelle, dass sich die 10 größten Hochwasserereignisse auf 7 Monate verteilen (vgl. Tab. 14: unten). Aus folgender Abbildung (Abb. 23: S.113) geht zudem hervor, dass sich die Hochwasserereignisse an der Natzschung entlang der Monate März und April, zwischen Juni und August und zwischen Dezember und Januar konzentrieren. Ähnlich verhält es sich am Pegel Pockau 1.

Allen oben genannten 10 Extremereignissen ist zu eigen, dass die Unterschreitungsdauer des oberen Hüllwertes min. 362 Tage beträgt, es sich also um kurze Hochwasserereignisse gehandelt hat. Hingegen erreicht das mittlere Hochwasser eine Unterschreitungsdauer von knapp 360 Tagen (LFULG, 2010; LFULG, 2011c).

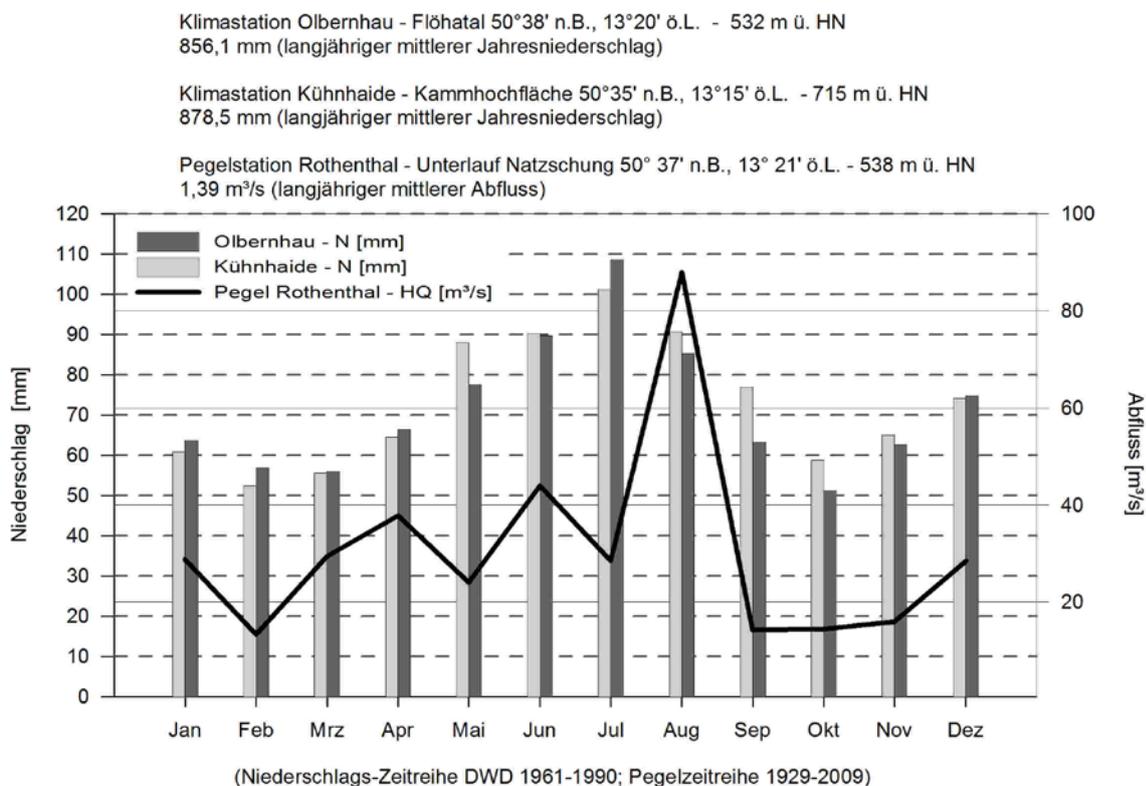


Abb. 23: Jahrgang des Hochwasserabflusses am Pegel Rothenthal (langjährige monatliche Höchstwerte HQ für den Zeitraum 1929-2009)

Es deutet darauf hin, dass diese Hochwasserereignisse durch unterschiedliche Mechanismen ausgelöst werden. Dies kann bedingt sein durch eine rasche Schneeschmelze oder durch Starkniederschläge. Beide Mechanismen verursachen als Folge der morphologischen Charakteristika und der hohen Gewässernetzdichte des Einzugsgebietes ein schnelles Auflaufen der Hochwasserwelle und erlauben daher nur kurze Vorwarnzeiten.

Die Schwankungsbreite der Hochwasserscheitel bewegt sich zwischen den drei größten Hochwasserereignissen, die allesamt über 35 m³/s lagen und den weiteren 7 Ereignissen, die sich in einer Größenordnung zwischen 29 und 25 m³/s befanden (2002, 1975, 1987) (vgl. Tab. 14: unten). Das beobachtete und durch eine Schneeschmelze bedingte Hochwasser vom März 2006 reiht sich mit einer Spitze von 27,4 m³/s erst an achter Stelle der zehn größten Hochwasserereignisse an der Natzschung ein (LFULG, 2011c). Sieben der zehn Ereignisse besaßen Scheitelabflüsse unterhalb eines HQ₂₀, zwei lagen zwischen einem HQ₂₀ und einem HQ₅₀ und das Hochwasser vom August 2002 übertraf als HHQ den Scheitelabfluss eines HQ₂₀₀.

Das HQ₁₀₀ wird mit einem statistischen Hochwasserabfluss von 63,4 m³/s angegeben und dient als Bemessungsgrundlage für die Berechnung verschiedener Modellszenarien. Die drei jüngsten Hochwasserereignisse (2002, 2005, 2006) sind Bestandteil der hier vorgestellten Niederschlag-Abfluss-Simulation. Es können damit sowohl unterschiedliche Mechanismen und Reaktionszeiten des Einzugsgebietes als auch unterschiedliche Wiederkehrintervalle berücksichtigt werden, welche bei Betrachtung anderer Pegelstationen typisch sind für das Erzgebirge (LFULG, 2010; Reinhardt, 2010).

Tab. 14: Die zehn größten Hochwasserereignisse an der Natzschung			
Hochwasserscheitel [m ³ /s]	Max. Abflusssspende [l/(s*km ²)]	Wasserstand [cm]	Datum
88,0	1170	243	12.08.2002
44,0	587	175	24.06.1975
37,8	504	137	10.04.1987
29,4	387	135	18.03.2005
28,8	379	keine Angabe	04.01.1932
28,5	375	149	06.07.1992
28,4	374	140	08.12.1974
27,4	361	130	31.03.2006
26,4	348	120	05.08.1983
25,3	333	keine Angabe	23.07.1957

Quelle: (LFULG, 2011c)

4 Methodik

4.1 Hydrologische Modelltypen

Hydrologische Modelle werden eingesetzt zur Simulation und Vorhersage von natürlichen oder auch anthropogen veränderten Abflussvorgängen (Maniak, 2010). Beven nimmt eine Klassifikation von Modellierungsstrategien vor und unterscheidet grundsätzlich sowohl zwischen einem flächenkonzentrierten (lumped model) und einem flächendetaillierten als auch zwischen einem stochastischen und deterministischem Modellierungsansatz (Beven, 2012). Während stochastisch basierte Modelle als Resultat Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Abflusses liefern, erzeugen deterministische Modelle als Reaktion auf einen Niederschlagsinput Ganglinien für einzelne Hochwasserereignisse oder auch für lange Zeitspannen (Langzeit- oder Kontinuumsmodell). Die Aufgabe stochastischer Modelle ist die statistische Beschreibung von Beobachtungsdaten und deren Beziehung zueinander, insbesondere wenn der gesamte Komplex an Parametern schwer überschaubar und messbar ist. Ein hydrologischer Aspekt ist nur in den Daten selbst enthalten. Hingegen setzen deterministische Modelle physikalisch begründbare Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung (bspw. Niederschlag und Abfluss) voraus, welche mit charakteristischen Gleichungen beschrieben werden. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Transformation des meteorologischen Inputs in eine Abflussganglinie. Die Durchführung einer hydrologischen Modellierung besteht damit aber auch im Kern in der Bestimmung dieser Transformation bzw. der Übertragungseigenschaften, der zugehörigen Eingangsdaten und der Überprüfung anhand von repräsentativen Naturmessungen (Maniak, 2010).

Wesentlich für diesen Modellansatz ist aber auch, dass in einem deterministischen Modell ein Satz an Eingangsparametern immer dieselben Ausgangsparameter erzeugt. Beven zeigt in diesem Zusammenhang auf, dass jedoch unterschiedliche Modelle und Parametereinstellungen bzw. im weiteren Sinne verschiedene Randbedingungen vergleichbare Resultate erzielen können. Er bezeichnet dies als das Konzept der Äquifinalität in der hydrologischen Modellierung (Beven, 2012). Dies bedeutet in der logischen Konsequenz, dass es kein Optimum sondern eine Vielzahl an hydrologischen Modellansätzen und Kombinationen von Modellparametern gibt, welche für ein Untersuchungsgebiet und eine Fragestellung Verwendung finden können. Daher ist es bei der Modellauswahl entscheidender, welche Modelle verfügbar sind, welche Erfahrungswerte vorliegen, ob mit dem Modell die Fragestellung in einem vertretbaren Rahmen bearbeitet werden kann, ob die benötigten Datensätze und in welcher Qualität verfügbar sind und welche räumliche und zeitliche Auflösung benötigt wird.

Maniak unterscheidet bei den Niederschlag-Abfluss-Modellen - als eine große Gruppe der deterministischen Modelle- die Blockmodelle (Black-Box o. Lumped Models). Das Einzugsgebiet wird als homogene, nicht weiter differenzierte zeitinvariante Einheit aufgefasst. Während solche flächenkonzentrierten Black-Box-Modelle die hydrologischen Vorgänge durch rein empirische, mathematische Beziehungen beschreiben, die keine physikalisch begründeten Transferfunktionen enthalten, um den System-Input in den System-Output zu überführen, basiert die Gruppe der

White-Box-Modelle auf komplexen physikalischen Gesetzen der Wasserbewegung. Sie ermitteln die Flüsse von Energie und Masse. Die dritte Gruppe der Grey-Box-Modelle, wie bspw. NASIM, nimmt hier eine Zwischenstellung derart ein, dass physikalisch begründete Prozesse betrachtet, jedoch überwiegend konzeptionell vereinfacht werden. Sie stützen sich auf physikalische Gesetze in vereinfachter Näherung zur Beschreibung der Transport- und Speichervorgänge. Sowohl die White- als auch die Grey-Box-Modelle verfolgen damit in der Regel den oben von Beven genannten flächendetaillierten Ansatz (distributed models), d.h. eine innere Differenzierung des Einzugsgebietes anhand der räumlichen Variabilität von Eingabeparametern wie den Boden- oder Vegetationseigenschaften (Maniak, 2010). Der quantitative Nachweis über die Wirkung dezentraler Maßnahmen zur Hochwasserretention erfolgt mit Hilfe von solchen mathematischen Simulationsmodellen, welche an die Gegebenheiten des betrachteten Untersuchungsgebietes angepasst werden müssen. Diese Modelle sollten hinsichtlich dieses speziellen Aspektes zwei Anforderungen erfüllen (Koehler, 2006):

- I. eine hinreichende räumliche Auflösung zur Erfassung aller in das Modell zu implementierender Maßnahmen,
- II. eine möglichst gute Abbildung der physikalischen Prozesse, die durch die jeweiligen Maßnahmen verändert werden.

Die genannten Untersuchungen zum dezentralen Hochwasserschutz zeigen eine Fülle an verwendeten hydrologischen Modellen auf. Mendel und Liebscher geben eine ausführliche Übersicht über die Entwicklung, Leistungsfähigkeit und Anwendungsbereiche verschiedenster hydrologischer Modelle. Es werden darüber hinaus die Entwicklungsperspektiven und Handlungsfelder der Modellierung aufgezeigt (Mendel & Liebscher, 2010). Eine vertiefende Betrachtung der theoretischen Grundlagen der hydrologischen Modellierung erfolgt darüber hinaus bei Beven und Maniak (Beven, 2012; Maniak, 2010).

4.2 Modellstruktur NASIM

4.2.1 Einleitung

Die Simulation der Gebietshydrologie der Natzschung wurde mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM Version 3.7 (NASIM© Hydrotec GmbH Aachen) realisiert. NASIM zählt zur Gruppe der flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss-Modelle. Die Beschreibung der Niederschlags- und Abflussprozesse basiert auf einem deterministisch-konzeptionellen Ansatz (Grey-box-Modelle).

NASIM wurde mit dem Ziel entwickelt, die wesentlichen Aufgaben der deterministischen Hydrologie mit einem Modell bearbeiten zu können. Es kann aufgrund seiner Modellstruktur sowohl zur getrennten als auch integrierten Modellierung von urbanen und ländlichen

Einzugsgebieten eingesetzt werden. Es erlaubt insbesondere die komplexe Abbildung wasserwirtschaftlicher Einrichtungen wie Kanalnetze und Speichersysteme. Die Einsatzbereiche dieses Gebietsniederschlagsmodells erstrecken sich von der Simulation und Bemessung von Hochwasserschutzanlagen über die Erstellung von Klimaszenarien und der Echtzeitsteuerung von Hochwasserschutzsystemen bis hin zur flächendetaillierten Erstellung wasserwirtschaftlicher Daten für Siedlungsgebiete und der Schmutzfrachtmodellierung (Hydrotec, 2009).

4.2.2 Speicher- und Transportvorgänge im Modell

Das Modell erfasst bzw. berechnet flächendetailliert die Belastungsbildung, Belastungsverteilung, Belastungsaufteilung, die Abflusskonzentration und den Wellentransport (vgl. Tab. 15: unten). Es werden alle wesentlichen hydrologischen Prozesse der Speicherung und Wasserbewegung (für Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser, Gewässer) abgebildet und physikalisch basierte, allgemein verfügbare Parameter für die Böden und die Landnutzung verwendet (Hydrotec, 2009).

Tab. 15: Belastungsformen, Abflusskonzentration und Wellentranslation im Modell		
Speicher- und Transportvorgänge	Erläuterung	Berechnungsverfahren
Belastungsbildung	Bildung der Belastung aus Regen oder Schneeschmelze	Direkte Eingabe über Niederschlagszeitreihen, Temperaturfaktor / Snow-Compaction Verfahren
Belastungsverteilung	Verteilung des Gebietsniederschlags auf das Einzugsgebiet	Thießen-Verfahren
Belastungsaufteilung	Aufteilung der Belastung in Versickerung, Verdunstung und Abfluss	Linearer / nichtlinearer Bodenspeicher (Ansätze nach Holtan, Bear, Ostrowski)
Abflusskonzentration	Transport und Verzögerung der Abflussanteile: Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss	Oberflächenabfluss: Bildung von Zeitflächenfunktion für den Oberflächenabfluss mit nachgeschalteter Berechnung der Fließzeit und Retention über Einzellinearspeicher mit Retentionskonstanten
Translation der Welle	Verformung der Abflusswelle durch Gerinneretention	Kalinin-Miljukov-Verfahren

Während die Belastungsbildung und dessen räumliche Verteilung die übergeordneten und antreibenden Eingangsfaktoren darstellen, umfassen die Belastungsaufteilung, Abflusskonzentration und Wellentranslation die Prozesse, welche zur Speicherung des Wassers und der zeitlich verzögerten Weiterleitung führen. Diese Prozesse werden in Form von räumlich verteilten und verknüpften Speichern abgebildet, die anhand von empirisch begründeten Funktionen linearer und nichtlinearer Art den Input, die Verweilzeit und den Output eines Speichers bestimmen. Die Beschreibung der hydrologischen Prozesse erfolgt mithilfe von semi-empirischen Formeln. Modellparameter können daher nicht nur aus beobachteten Daten, sondern auch im Zuge der Modellkalibrierung gewonnen werden. Die Abbildung der wesentlichen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs im NASIM-Modellaufbau lässt sich anhand des Schemas (Abb. 24: S.118) der Speicher- und Transportvorgänge charakterisieren (Hydrotec, 2009).

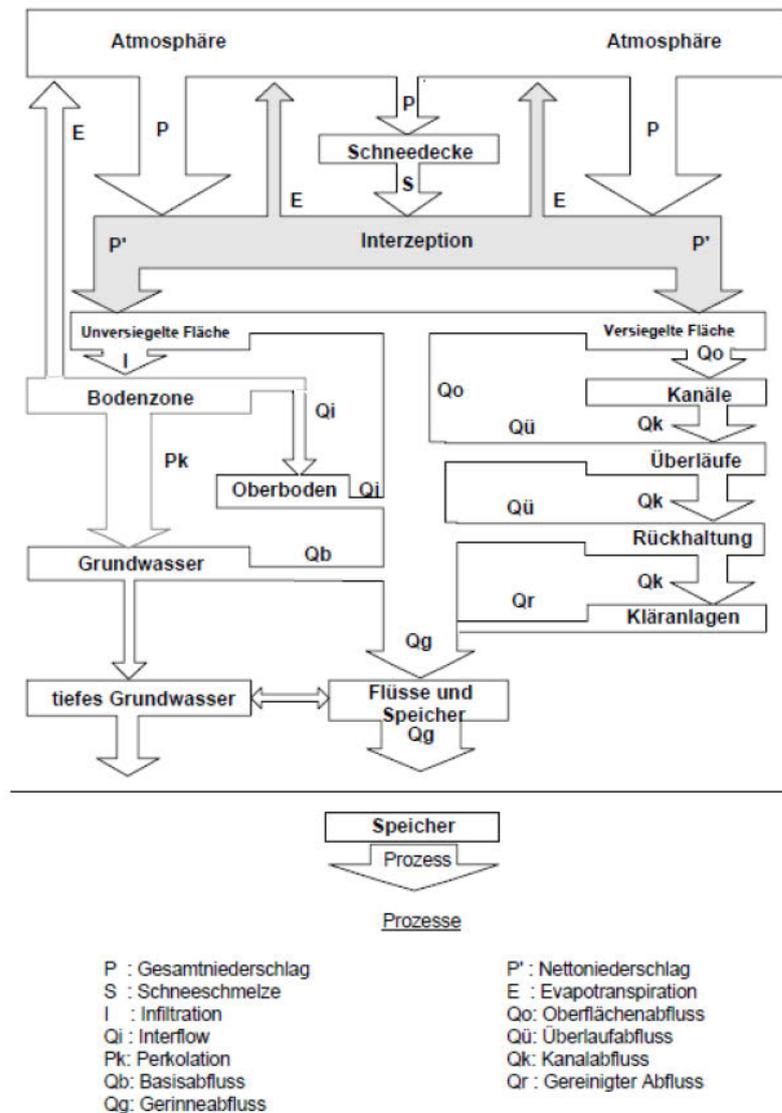


Abb. 24: Speicher- und Transportvorgänge in NASIM (Hydrotec (2009))

4.2.3 Modelleingangsvariablen für Speicher- und Transportvorgänge

Das Modellsystem benötigt zur Simulation der Belastungsbildung als Eingangsvariablen eine Anzahl von meteorologischen Zeitreihen wie Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Hydrologische Reihen (Wasserstands- und Abflussdaten) werden für die Modellkalibrierung verwendet. Sie dienen nur dann als Eingangsvariablen, wenn sie zur Abbildung externer Zuläufe wie bspw. Speicher oder Kläranlagen benötigt werden.

Als räumliche Eingangsdaten dienen die Einzugs- und Teileinzugsgebietsabgrenzungen, welche in der Regel aus den digitalen Geländemodellen bzw. über topographische Karten generiert werden. Informationen zum Gewässernetz (Länge, Gefälle, Querschnittsgeometrie, Rauheiten) und ggf. vorhandene Kanäle, Speicher, etc. dienen zur Ermittlung der Hauptvorfluter pro Teileinzugsgebiet und deren hydraulischer Randbedingungen. Die Landnutzung und Vegetationsbedeckung als auch die Bodeninformationen als flächenhafte Eingangsgrößen haben die Funktion, die Belastungsaufteilung und Abflusskonzentration abzubilden. Diese räumlichen Eingangsinformationen werden mit den Teileinzugsgebieten zu Elementarflächen oder auch "Hydrological Response Units HRU" verschnitten und über eine Datenbank mit physikalischen Eingangsparametern verknüpft.

Die Abgrenzung der Teileinzugsgebiete und die Definition der Fließwege dienen als operatives Modellgerüst für den Aufbau des Systemplans bzw. der Modellstruktur. Alle weiteren Variablen dienen der Definition der hydrologischen Eigenschaften des Systemplans bzw. des hydrologischen Modellinputs.

4.2.4 Räumliche und zeitliche Diskretisierung der Modelleingangsvariablen

Sowohl der Niederschlag selbst als auch sämtliche sich anschließenden Speicher- und Transportprozesse müssen aufgrund des flächendetaillierten Ansatzes des Modells räumlich diskretisiert werden. Räumlich kontinuierliche Informationen wie bspw. die Geländeoberfläche werden in abgrenzbare Einheiten unterteilt. Grundsätzlich wird dies in NASIM darüber gelöst, dass das hydrologische Einzugsgebiet in natürliche oder versiegelte Teilflächen und Gewässerteilstrecken gegliedert wird. Die Untergliederung richtet sich dabei v.a. nach der räumlichen Auflösung verfügbarer Daten, Gefälle und Geometrieänderungen entlang der Gewässerabschnitte, nach vorhandenen und/oder geplanten wasserbaulichen und infrastrukturellen Einrichtungen (bspw. Pegelanlagen, Speicherbecken, Straßen, Kanalnetzen), einer vergleichbaren Flächengröße von Teileinzugsgebieten und den topographisch-morphologischen Gegebenheiten. Die Abgrenzungen werden über eine GIS-Schnittstelle in das Modell implementiert und dienen als Grundlage für den Systemplan in NASIM. Dieser Systemplan setzt sich aus Systemelementen zusammen, welche anhand der natürlichen und künstlichen Fließwege miteinander verknüpft werden und einen abschließenden Auslasspunkt haben (i.d.R. eine Pegelstation).

Die Systemelemente sind zum einen Teil(einzugs-)gebiete, die über einen Transportkörper in Form eines natürlichen Gerinnes oder eines Kanals verfügen können. Diese können ein ganzes Einzugs- oder Teileinzugsgebiet oder auch nur einen einzelnen Gewässerabschnitt beinhalten. Weitere Systemelemente können bspw. zu definierende städtische Kanalnetze und Speicherbauwerke sein. Sie bilden den strukturellen Kern des hydrologischen Simulationsmodells. Für jedes Systemelement werden eine Wasserbilanz und ein Gebietsauslass mit den entsprechenden Abflussanteilen gerechnet.

Zur weiteren Beschreibung und Modellierung des Systemplans bzw. der Systemelemente, also zur Charakterisierung der zugrunde liegenden Speichereinheiten, müssen diese über die Art der Landnutzung und der Bodeneigenschaften definiert werden. Die unterschiedlichen Landnutzungsflächen werden über die Durchwurzelungstiefe und den Interzeptionsspeicher parametrisiert. Die Durchwurzelungstiefe ist wesentlich für die aktuelle Evapotranspiration im Modell.

Die Böden werden anhand der ausgewiesenen Hauptbodentypen klassifiziert und hierüber räumlich verortet. Den Hauptbodentypen liegen in der Regel Leitbodenprofile (bspw. aus Bodenkarten) zugrunde, aus denen die Modelleingangsvariablen Schichtaufbau und Schichtmächtigkeit (analog den Bodenhorizonten) und die jeweiligen Bodenarten ermittelt werden. Die Mächtigkeit der Schichten und die Bodenarten dienen zur Bestimmung der Transport- und der Speicherleistung der jeweiligen Bodenflächen. Die im Modell verwendeten Bodenarten werden wiederum durch im Modell vorhandene Bodenkennwerte charakterisiert, welche aus Regelwerken wie der bodenkundlichen Kartieranleitung abgeleitet wurden. Dies sind der permanente Welkepunkt, die Feldkapazität, das Gesamtporenvolumen, die maximale Infiltrationsrate und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit.

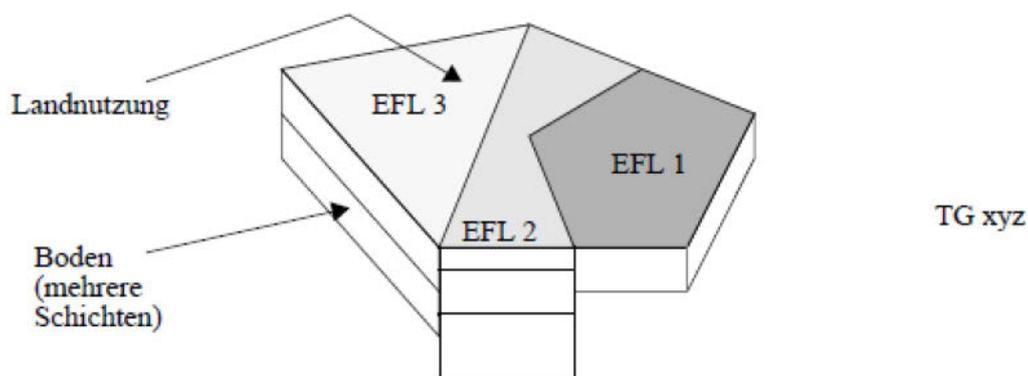


Abb. 25: Simulationseinheit untergliedert in Elementarflächen bestehend aus Einzugsgebietsgrenze, Boden- und Landnutzungsinformationen (HRU) (Hydrotec, 2009)

Die räumliche Verschneidung der Landnutzungsinformation mit den Bodeninformationen innerhalb eines hydrologischen Teilgebietes führt zur Ausbildung von Elementarflächen und vollzieht damit auch den Übergang von einer zwei- in eine dreidimensionale Betrachtung. Die räumliche Auflösung kann individuell bestimmt werden. Mit diesem Schritt wird eine Lagebeziehung zwischen den vektorbasierten Geoobjekten hydrologisches Teilgebiet, Landnutzung und Bodeneigenschaften über die Bildung von Elementarflächen realisiert. Jedes Teilgebiet, und damit jedes Systemelement welches über eine Fläche verfügt, setzt sich zusammen aus einer Anzahl von Elementarflächen. Jede Elementarfläche besteht aus einem homogenen Bodentyp und einer homogenen Landnutzung. Pro Teilgebiet muss mindestens eine Elementarfläche vorliegen.

Innerhalb eines Teilgebietes, das im Systemplan ein Systemelement darstellt, erfolgt damit eine weitere räumliche Differenzierung (Disaggregation, Abskalierung) des hydrologischen Systems über die Berechnung von Elementarflächen als Komponenten ähnlichen hydrologischen Regimes. Eine Elementarfläche kann also als Hydrotop, eine hydrologisch homogene Einheit, definiert werden (Hydrotec, 2009). Sie ist die kleinste räumliche Einheit und dient als sinnvolle Berechnungsgrundlage für den Bodenwasserhaushalt.

Zur Reduktion der Rechenzeit und um die Berechnungselemente nicht unendlich groß werden zu lassen, werden Elementarflächen in einem weiteren Schritt zu Simulationsflächen aggregiert. Simulationsflächen setzen sich aus einer oder einer größeren Anzahl von Elementarflächen zusammen und sind Teilflächen der ausgewiesenen Systemelemente bzw. Teilgebiete, soweit diese über eine eigene Fläche verfügen. Für jede Simulationsfläche werden Bodenwasserhaushalts- und Interzeptionsberechnungen durchgeführt. Die Art der Aggregation kann gesteuert werden.

Für das vorliegenden Modell wurde die Aggregationsmethode „Aggregiere Gleiches“ verwendet. Im Gegensatz zur Funktion „Aggregation alles“ werden nicht alle Elementarflächen eines Teilgebietes zusammengefasst, wodurch eine bessere zeitliche und räumliche Darstellung des Prozessgeschehens bei längerer Rechnerlaufzeit möglich ist. Die gewählte Methode fasst innerhalb eines Teilgebietes lediglich alle Böden und Landnutzungseinheiten mit identischen Eigenschaften zu einer Simulationsfläche zusammen. Die Boden- und Landnutzungskennwerte werden flächengewichtet arithmetisch gemittelt. Es muss grundsätzlich bei der Aggregation berücksichtigt werden, dass die unterschiedlichen Schichtungen der einfließenden Elementarflächen zusammengefasst werden, wobei alle vorgegebenen Horizonte übernommen werden (Hydrotec, 2009).

4.2.5 Belastungsbildung und -verteilung

Die Belastungsbildung erfolgt in Abhängigkeit von der Temperatur als Regen oder Schnee. Bei Schneefall erfolgt die Belastungsbildung erst nach Schneeakkumulation und Schneeschmelze. Die Belastungsverteilung erfolgt entweder über eine manuelle Zuweisung von

Niederschlagsreihen bspw. mit Hilfe des Thiessen-Verfahrens, automatisch entsprechend des Abstandes der Teilgebietsschwerpunkte zur Niederschlagsstation oder nach Höhenlage, oder über eine teilgebietsweise Berechnung und Zuweisung von Niederschlagszeitreihen mit Hilfe von Niederschlagsmodellen (Hydrotec, 2009).

Grundlage für die Schneesimulation ist ein kombiniertes Temperatur-Faktor/Snow-Compaction-Verfahren, welches Akkumulation, Kompression und Ablation abbilden kann. Die Parameter Schneehöhe, Wassergehalt und Ablation des Schnees werden als Funktion der Zeit und auf Basis der Eingangsgrößen Niederschlag und Temperatur berechnet. Höhenbedingte Temperaturabweichungen vom Wert der Beobachtungsstation werden über einen auf die mittlere Höhe der Teilgebiete bezogenen Korrekturfaktor ausgeglichen. Expositionsbedingte Unterschiede können hingegen nur über teilgebietspezifische Eichungen der Schneehöhe und Schmelzrate vorgenommen werden. Akkumulation und Abschmelzen des Schnees bedingen eine Änderung von Schneehöhe und -wassergehalt. Auftretendes Schmelzwasser erhöht den Wassergehalt der Schneedecke und bewirkt ein Zusammendrücken dieser. Wird ein kritischer Wert der Schneedichte (=Wassergehalt/Schneehöhe) von 0,4 überschritten, wird Überschusswasser über den Interzeptionsspeicher an den Untergrund abgegeben. In diesem Verfahren kann der Schnee drei Zustände annehmen, welche von 1 nach 2 und von 2 nach 3 übergehen können (Hydrotec, 2009):

1. Akkumulation: Schnee liegt oder wird neu gebildet und es findet keine Ablation statt
2. Ablation: Es ist eine Schneedecke vorhanden und es kommt zur Ablation
3. Es ist kein Schnee vorhanden

Die Belastungsbildung, deren räumliche und zeitliche Verteilungen sind grundlegenden Einflussgrößen für die Wasserbilanz, den zeitlichen Verlauf des Abflusses und die Abflussfülle des Einzugsgebietes. Eine abnehmende Stationsdichte vermindert in aller Regel eine zuverlässige Aussage über den Gebietsniederschlag, insbesondere wenn es sich um konvektive Niederschläge handelt (Mendel 2000). Genau darin liegt aber eine der Schwierigkeiten der hydrologischen Modellierungen. Es muss eine genügend große Anzahl an Wetterstationen vorhanden sein. Diese müssen über langjährige Messreihen verfügen, die digital vorliegen, verfügbar sind und den Betrachtungszeitraum vollständig abdecken. Die zeitliche Auflösung muss sich für den Fall der Simulation von schnell auflaufenden Hochwasserereignissen mindestens im stündlichen Bereich bewegen. Vor allem aber müssen sie auch für heterogene Einzugsgebiete - bspw. in Hinblick auf Höhenlage, Morphologie, Exposition, Luv- und Leeeffekte- repräsentativ sein und über eine Anordnung und Nähe zueinander verfügen, die überhaupt eine Zuweisung über bspw. das Thiessen-Verfahren sinnvoll macht.

4.2.6 Belastungsaufteilung

Der Belastungsverteilung und der Belastungsaufteilung ist ein Interzeptionsspeicher zwischengeschaltet, der zum Bestandsabfluss (Bestandsniederschlag) führt, wenn der maximale landnutzungsspezifische Speicherinhalt überschritten wird. Zeitgleich wird dieser Speicher durch Verdunstung von der Pflanzenoberfläche entleert, vorgegeben ist die potenzielle Verdunstung. Dieser Speicher wird für jeden Simulationszeitschritt neu berechnet und kann auch als Jahresgang dynamisch angepasst werden, um den saisonalen Aspekt und den Wechsel von bspw. Fruchtfolgen abbilden zu können. Die maximale Interzeption wird für jede Art der Landnutzung angegeben.

Wurde der Interzeptionsspeicherinhalt vollständig durch die Interzeptionsverdunstung aufgebraucht, wird ein verbleibendes Sättigungsdefizit der Luft an den Bodenspeicher quasi weitergeleitet und es findet eine Verdunstung über den Bodenspeicher in Abhängigkeit vom verfügbaren Bodenwasser statt. Die Summe der Prozesse aus der Verdunstung von der Bodenoberfläche (Evaporation) und der Verdunstung über die Pflanze (der Transpiration) werden im Modell zusammengefasst über den Bodenspeicher modelliert, wobei die Verdunstung über die Durchwurzelungstiefe der Pflanze gesteuert wird. Die aktuelle oder tatsächliche Verdunstung im Modell setzt sich somit aus der Interzeptionsverdunstung und aus der Evapotranspiration des Bodens zusammen (Hydrotec, 2009).

Die Verdunstung wird im Modell je nach Datenlage nach dem empirischen Ansatz von Haude oder alternativ nach einem deterministischen Ansatz von Penman gerechnet und fließt als externe Zeitreihe „potenzielle Evapotranspiration“ in das Bodenfeuchtemodell ein. Für das vorliegende Modell wurde der Ansatz nach Haude gewählt, da hierfür lediglich die Variablen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit benötigt werden.

Die Verdunstung berechnet sich nach folgenden Formeln (1-3, S. 124) und wurde von Haude für gemäßigte humide Klimagebiete entwickelt (Maniak, 2010). Es wird zunächst der Sättigungsdampfdruck der Luft für eine gegebene Temperatur bestimmt. Der Sättigungsdampfdruck und die relative Luftfeuchtigkeit ergeben das aktuelle Sättigungsdefizit der Luft, welches in Kombination mit dem Haude-Faktor die potenzielle Evapotranspiration ergibt. Nach einer Vergleichsberechnung von Maniak für das Einzugsgebiet der Sieber/Harz wurde mit dem Ansatz von Haude die Verdunstung im Trockenjahr überschätzt und im folgenden feuchten Jahr unterschätzt (Maniak, 2010). Daher sind bzgl. der Wasserhaushaltsbilanzierung im Modell Limitierungen möglich.

Während die Verdunstung den Bodenspeicher entleert, findet eine Auffüllung des Bodenspeichers über den Bestandsniederschlag statt. Die notwendige Belastungsaufteilung des Niederschlages wird im Bodenmodell für unversiegelte Flächen derart simuliert, dass alle wesentlichen Prozesse und Speicher – Infiltration, aktuelle Evapotranspiration und Perkolation bzw. Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss, Exfiltration und Leakage– dargestellt werden können. Die Methode zur Ermittlung des Bodenwasserhaushaltes erfolgt über verfügbare und physikalisch begründete Eingabedaten (Hydrotec, 2009). Die prozessbeschreibende Bodenfunktion ist von ihrer Art her ein konzeptioneller deterministischer Ansatz, die Berechnung erfolgt für diskrete Flächen,

Schichten und Zeiträume. Die Berechnung der Bodenwasserbewegung erfolgt über eine Bilanzgleichung. (Hydrotec, 2009). Die Füllung des Bodenspeichers wird über den Grad der Bodenfeuchte, also dem Erreichen des Gesamtporenvolumens, der Feldkapazität und des Welkepunktes beschrieben. Das Speicherpotenzial des Bodens, dessen hydraulische Leitfähigkeit und die maximale Infiltrationsrate werden im Modell aus der Bodenart und der Lagerungsdichte abgeleitet. Die Böden werden in bodenartenspezifische Schichten unterteilt. Die Schichten werden als getrennte Speicher simuliert, die einen Zufluss über die Infiltration bzw. Perkolation erhalten und deren Abgabe über den Interflow, die Exfiltration und über die Evapotranspiration gesteuert wird. Die Verdunstung greift jedoch nur für die Schichten, welche über die landnutzungsspezifische Durchwurzelungstiefe erfasst werden (Hydrotec, 2009). Die aktuelle Verdunstung wird durch eine lineare Abnahme der Bodenfeuchte zwischen Feldkapazität des Bodens und dem permanenten Welkepunkt bestimmt.

Formel 1: Potenzielle Evapotranspiration

$$ETp_{Haude} = f_{Haude} \times (e_s(T) - e)_{14}$$

mit

f_{Haude} Empirisch ermittelter monatlich variabler Pflanzenfaktor (Haude-Faktor) für die einzelnen Monate in mm/hPa

$(e_s(T) - e)_{14}$ Aktuelles Sättigungsdefizit der Luft für Temperatur (T) in hPa , gemessen um 14 Uhr

Formel 2: Aktuelles Sättigungsdefizit der Luft

$$(e_s(T)_{14} - e) = e_s(T) \times \left(1 - \frac{r}{100}\right)$$

mit

r Relative Luftfeuchtigkeit in %

$e_s(T)$ Sättigungsdampfdruck der Luft bei Temperatur (T) in hPa

Formel 3: Sättigungsdampfdruck der Luft für $T > 0^\circ\text{C}$ über Wasser

$$e_s(T) = 6,11 \times \exp\left(\frac{17,62 \times T}{243,12 + T}\right)$$

mit

T Temperatur in $^\circ\text{C}$, gemessen um 14 Uhr

(Maniak, 2010)

Die aktuelle Infiltrationsrate wird im Modell in Abhängigkeit von der potenziellen Infiltrationsrate und der aktuellen Bestandsniederschlagsintensität berechnet (vgl. Formel 4 & Formel 5, S.126). In dem hier verwendeten Berechnungsansatz fällt die potenzielle Infiltrationsrate linear mit zunehmender Bodenfeuchte (Hydrotec, 2009). Es können damit sowohl Infiltrations- als auch Sättigungsüberschüsse bei der Bodenwasserhaushaltsberechnung Berücksichtigung finden. Die Perkolation wird vereinfacht mit Hilfe des Gravitationspotenzials im Boden und die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in Anlehnung an die Gleichung von Bear ebenfalls über die Bodenfeuchte als Eingangsgröße bestimmt. Die Exfiltration wird ebenfalls nach einem linearen Ansatz berechnet (Formel 6, S.126). Sie setzt bei Erreichen der Feldkapazität ein und steigt linear an bis das Gesamtporenvolumen bzw. eine völlige Wassersättigung der Schicht erreicht ist.

Der Bestimmung des Interflows liegen drei alternativ zu wählende Berechnungsansätze zugrunde. Ersterer berücksichtigt den Interflow nur für die oberste Bodenschicht und die vertikale und horizontale Leitfähigkeit werden als identisch angenommen, die Wasserbewegung wird über das Gravitationspotenzial berechnet.

Der zweite Ansatz ist identisch mit dem ersten Ansatz, jedoch werden alle Bodenschichten für den Interflow berücksichtigt. Beiden Ansätzen liegt die Annahme zugrunde, dass der Interflow direkt von der Bodenfeuchte abhängig ist.

Für den dritten Ansatz wird angenommen, dass der Interflow erst dann erfolgt, wenn die Niederschlagsintensität die aktuelle Infiltrationsrate überschritten hat, da dann zunächst hangparallele Makroporen aufgefüllt werden, die zum Interflow beitragen. Wenn deren maximale Abflussleistung erreicht ist und kein weiteres Niederschlagswasser aufgenommen werden kann, findet Oberflächenabfluss statt.

Um die Retention des Interflows von Oberflächenabfluss und Grundwasser abzukoppeln, wird der Interflow des gesamten Teilgebiets gesammelt und im Interflowspeicher gespeichert. Dabei wird der Interflowspeicher über einen Linearspeicher modelliert.

Das Modell umfasst weiterhin einen Grundwasser- oder auch Basisspeicher, welcher der Retention von Wasser dient, welches aus dem Bodenspeicher exfiltriert bevor es als Leakage in den tiefen Grundwasserspeicher oder als Basisspeicherabfluss zu einem Unterlieger gelangt. Dieser Speicher ist immer einem Teileinzugsgebiet zugeordnet und wird über die Exfiltration aus der ungesättigten Bodenschicht gespeist. Über diesen Basisspeicher wird der Basisabfluss des Modells gesteuert. Die Berechnung des tiefen Grundwassers bspw. für Karstgebiete erfolgt ebenfalls über einen Linearspeicher und erlaubt eine einfache Darstellung tieferer Grundwasserstockwerke, welche mit ihrer unterirdischen Wasserscheide nicht mit denen der oberirdischen Einzugsgebietsgrenze übereinstimmen müssen. Die Zuflüsse können über das Leakage des Basisabflusses der Teileinzugsgebiete, durch Gerinneversickerung oder über andere tiefe GW-Speicher erfolgen. Der Abfluss kann innerhalb und außerhalb des betrachteten Gebietes erfolgen.

Formel 4: Aktuelle Infiltrationsrate

$$ia(t) = \min(ip(t), nb(t))$$

mit

$ia(t)$	aktuelle Infiltrationsrate [mm/h]
$nb(t)$	Bestandsniederschlagsintensität [mm/h]
$ip(t)$	potenzielle Infiltrationsrate [mm/h]

Formel 5: Potenzielle Infiltration (linear)

$$ip(wv) = maxInf \times \left(\frac{GPV - wv}{GPV - WP} \right)$$

mit

ip	potenzielle Infiltrationsrate [mm/h]
wv	Inhalt des Bodenspeichers [mm]
GPV	Gesamporenvolumen [mm]
WP	Welkepunkt [mm]

Formel 6: Exfiltration (linear)

$$ex(bf) = \begin{cases} 0 & wv < FK \\ max.Ex \times \frac{wv - FK}{GPV - FK} & wv \geq FK \end{cases}$$

mit

$ex(bf)$	Exfiltrationsrate in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte [mm/h]
wv	Inhalt des Bodenspeichers [mm]
GPV	Gesamporenvolumen [mm]
FK	Feldkapazität [mm]

(Hydrotec, 2009)

4.2.7 Abflusskonzentration

Die Abflusskonzentration bzw. der Abflussprozess beschreibt den zeitlich verzögerten Transport der Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss) des gefallenen Niederschlages (Belastung) vom Bodenspeicher bis zum Eintreffen in ein Gewässer. Dieser Prozess wird in NASIM getrennt für unversiegelte und versiegelte Flächen gerechnet.

Der Oberflächenabfluss versiegelter Flächen wird mit Hilfe von Linearspeicherkaskaden beschrieben. Für natürliche Flächen werden Transport und Translation (zeitlicher Versatz) von Interflow und Basisabfluss jeweils über Einzellinearspeicher, also die Speicher- oder auch Retentionswirkung des betrachteten Gebietes abgebildet. Der Oberflächenabfluss wird mittels Isochronen-Verfahren mit nachgeschalteter Retention durch einen Einzellinearspeicher simuliert.

Zur Bestimmung der Fließwege und Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses werden digitale Höhenmodelle als Grundlage für eine Zeitflächenfunktionsberechnung (Isochronenberechnung) verwendet. Die Berechnungen erfolgen pro Teilgebiet. Für den Oberflächenabfluss sind die mittlere Hangneigung und das Widerstandsverhalten der Bodenbedeckung (Strickler-Beiwerte) notwendig. Weiterhin müssen obere Schwellwerte für den flächenhaften Abfluss bestimmt werden, welche die notwendige Mindestfläche und ein initiales Wasserspiegellagengefälle zur Ausbildung von schneller fließendem, konzentriertem Oberflächenabfluss festlegen.

Bei der Zeitflächenberechnung wird damit unterschieden zwischen flächenhaftem Abfluss und der Ausbildung von linienhaftem Abfluss. Um den linienhaften Abfluss möglichst gut an das vorhandene Gewässernetz anzupassen, kann dieses bei der Bildung der Zeitflächenfunktion berücksichtigt werden. Die Zeitflächenfunktion benötigt hierfür als Eingangsgröße ein rasterbasiertes Höhenmodell. Sie beschreibt die Verlagerung einer Welle auf der Oberfläche in der Zeit ohne Retention. Für jede gebildete Rasterzelle wird berechnet, wie groß die Fläche bis zum jeweiligen Gebietsauslass ist und wie hoch die Konzentrationszeit ist. Die Konzentrationszeit entspricht der Fließzeit, die ein Wasserteilchen von diesem Punkt bis zum Gebietsauslass auf Basis der ermittelten Fließwege benötigt. Es wird für jede Zelle die Fließgeschwindigkeit zur Nachfolgezelle nach Manning-Strickler berechnet. Liegt die Zelle laut Gewässernetzkarte in einem Gerinne oder wurde der Gerinneschwellwert überschritten (Übergang zum linienhaften Abfluss), wird ein Default-Wert für die Gerinnegeschwindigkeit angegeben, der sich an der topographischen Situation orientieren sollte.

Die Zeitflächenfunktion dient damit der Berechnung der zeitlichen Verformung des Oberflächenabflusses in Form einer teilgebietspezifischen Einheitsganglinie. Über das Bodenwassermodell wird die Abflussmenge für jedes Teilgebiet berechnet und an einen Translationsspeicher zur zeitlichen Verschiebung der Wasserteilchen weitergegeben. Dessen Abgabe wird über eine spezifische Einheitsganglinie reguliert. Dem Translationsspeicher ist ein Linearspeicher nachgeschaltet, dessen Abfluss ist direkt proportional zum Speicherinhalt zum Zeitpunkt t .

Die Abgabe der Linearspeicher für den Oberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss wird über teilgebietspezifische Retentionskonstanten (RetOb, RetInt, RetBas) reguliert. Die Retentionskonstanten berücksichtigen im Modell nicht quantifizierbare bzw. im digitalen Geländemodell nicht abbildbare, aber abflusswirksame Faktoren wie bspw. kleine Mulden und Senken oder Ackerfurchen.

Alle Retentionskonstanten sind erste Abschätzungen, welche im Kalibrierungsprozess teilgebietspezifisch angepasst werden sollten. Weitere Ausführungen zur Bestimmung der Retentionskonstanten finden sich im NASIM-Modellhandbuch und bei Maniak (Hydrotec, 2009; Maniak, 2010).

Der Oberflächenabfluss wird im Modell dem Gerinneabfluss –soweit ein geometrisch definierter Transportkörper in Form eines Kanals oder eines offenen Gerinnes definiert wurde– am Auslasspunkt eines jeden Gebietes hinzu summiert und an das stromabwärts liegende nächste Teilgebiet als Zufluss weitergegeben. Diesem Zufluss werden die Abgaben aus den Interflow- und Basisabflussspeichern ebenfalls hinzugerechnet und ggf. noch um Zuflüsse aus bspw. einem städtischen Kanalnetz ergänzt.

4.2.8 Translation der Welle

Nach Maniak kann der Ablauf einer (Hoch-) Wasserwelle vereinfacht als eindimensionale, instationäre Wasserbewegung im Gerinne aufgefasst werden. Sie ist charakterisiert durch die zeitliche Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe an jeder Stelle des Gewässers (Maniak, 2010). Bedingt durch Länge, Gefälle, Morphologie und Oberflächenrauigkeit des Gewässerabschnittes erfährt die Hochwasserwelle eine Verformung durch eine Verschiebung auf der Zeitachse (Translation) und eine Wellendämpfung (Retention). Die Berechnung erfolgt entweder mittels hydraulischer Verfahren (hydronumerische Modelle), welche mit hydrologischen Modellen gekoppelt werden oder mittels integrierter hydrologischer Ansätze (Flood Routing) (Maniak, 2010; Reinhardt, 2010; Rieger, 2012).

Die hydraulischen Verfahren beruhen auf der Integration der Saint-Venant'schen Gleichung zur Erhaltung der Masse und der Energie. Sie benötigen jedoch einen hohen numerischen Aufwand, umfangreiche Profildaten und Wasserspiegellagenfixierungen für mehrere Abflusssituationen zur Modelleichung (Maniak, 2010).

Die Flood Routing Ansätze, wie das Muskingum-Verfahren vereinfachen die physikalischen Prozesse derart, dass die instationäre Strömung näherungsweise durch eine quasistationäre ersetzt werden kann (Maniak, 2010). In NASIM wird zur Berechnung der instationären Hochwasserwellenabläufe in Kanälen und offenen Gerinnen ein modifiziertes Verfahren nach Kalinin-Miljukov verwandt, welches das Modellkonzept einer Speicherkaskade aus nicht-linearen Speichern benutzt. Es steht die Retention eines betrachteten Fließabschnittes im Vordergrund. Das Verfahren setzt die Annahme voraus, dass es einen linearen Zusammenhang

zwischen dem Abfluss und dem Volumen eines Gerinneabschnittes gibt, welcher normalerweise nur für stationäre Strömungsverhältnisse gegeben ist (Hydrotec, 2009).

Bei instationären Strömungen führt das veränderliche Wasserspiegellagengefälle innerhalb eines Gerinneabschnittes zur Abflussschleife. Es kann nicht von einer einzigen Abflusskurve ausgegangen werden. Lediglich im Bereich des maximalen Durchflusses entspricht der stationäre dem instationären Wasserstand. Ein gegebener Abfluss erzielt damit bei ansteigendem Hochwasserast einen geringeren Wasserstand als bei abfallendem Ast. Diesen Hysteresis-Effekt kann man in dem Modellkonzept deswegen umgehen, da die beiden instationären (unterschiedlich hohen) Wasserstände, die bei gleichem Abfluss auftreten, in einem zeitlichen Verhältnis zum stationären Wasserstand stehen (Maniak, 2010; Patt & Jüpner, 2013).

Wesentliches Fazit dieser Betrachtung ist, dass für einen betrachteten Fließabschnitt somit ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Volumen bzw. Wasserstand und Abfluss hergestellt werden kann. Damit kann für die Mitte eines Gerinneabschnittes mit einem angenommenen linearen Verlauf der Wasserspiegellage, die Wassertiefe eines instationären Abflusses gleichgesetzt werden mit einem stationären Abfluss an dieser Stelle des Gerinnes und ist damit auch gleich der Wassertiefe des Abflusses, welcher sich am Ende des Gerinneabschnittes ergibt. Die Länge eines Gewässerabschnittes muss damit die Bedingung erfüllen, dass der Verlauf des Wasserspiegels linear verläuft und die Wassertiefe stationär ist.

In der Praxis der Modellierung bedeutet dies, dass Gewässerabschnitte immer so zu unterteilen sind, dass dazwischen keine markanten Gefälleänderungen oder Änderungen in der Querschnittsgeometrie auftreten, also ein hydraulisch gleichartiger Querschnitt (mit ähnlicher Form und Rauheit) und ein gleichmäßiges Sohlgefälle auftritt (Hydrotec, 2009).

Formel 7: Abfluss im offenen Gerinne

$$Q = v \times A$$

Formel 8: Fließgeschwindigkeit nach Gaukler-Manning-Strickler für offene Gerinne

$$v = k_{St} \times r_{hy}^{\frac{2}{3}} \times I_E^{\frac{1}{2}}$$

mit

Q =	Abfluss	[m ³ /s]
k _{St} =	Strickler-Rauheit	[m ^{1/3} /s]
r _{hy} =	hydraulischer Radius	[m]
A =	durchströmte Fläche	[m ²]
I _E =	Energiehöhengefälle	[-]

(Patt & Jüpner, 2013)

Zur Berechnung der Abflusskurve im Zuge des modifizierten Kalinin-Miljukov-Verfahrens wird damit nur die stationäre Abfluss-Breite-Höhe-Beziehung des Gerinnes benötigt. Der hierfür benötigte Abfluss wird über die Fließformel nach Gaukler-Manning-Strickler berechnet (vgl. Formel 7 & Formel 8, S.129). Eingangsdaten in Form eines idealisierten Gerinne- und Vorlandquerprofils mit entsprechenden Rauheitsbeiwerten, Länge und mittlere Sohlneigung müssen hierfür pro Vorfluter eines Teileinzugsgebietes bzw. eines charakteristischen Gerinneabschnittes vorliegen. Die Transportelemente (Gerinne und Kanäle) können damit bis zum Gebietsauslass in Einzelabschnitte unterteilt werden, die als nichtlineare Speicherkaskade mit jeweils einer anderen Retentionsleistung gerechnet werden (Hydrotec, 2009).

4.2.9 Retention durch Speicherbauwerke

Wasserspeicher wie Seen, aber auch Talsperren oder Hochwasserrückhaltebecken werden als eigenständige Systemelemente in Form eines Speichers in das Modellsystem integriert und in ihren Eigenschaften definiert. Diese Form der Speicherung wird in der Literatur als "Seeretention" beschrieben und kann aufgefasst werden als ein Sonderfall des Hochwasserwellenablaufs mit horizontaler Wasserspiegellage (Maniak, 2010).

Grundlage für die Bemessung des Speichers ist die Kenntnis über die Speicherinhaltslinie und die Festlegung des Stauziels. Erstere ergibt sich aus der spezifischen Geometrie des Speichers. Es wird die Füllhöhe des Speichers in Beziehung gesetzt zum jeweils standortspezifisch verfügbaren Speichervolumen. Dieses Verhältnis variiert bspw. je nach Talmorphologie.

Der Speicherzufluss wird im Modell abgebildet über die simulierte Abflussganglinie eines Gerinnes eines höher gelegenen Einzugsgebietes, welcher durch das oben erläuterte Flood Routing Verfahren nach Kalin-Miljukov berechnet wird. Optional kann für die Fläche des Speichers der Niederschlag als weitere Eingangsgröße berücksichtigt werden. Damit muss die Lage vorhandener oder potenzieller Speicher schon zu Beginn der Einzugsgebietsunterteilung in Teilgebiete (Systemelemente) berücksichtigt werden.

Die Abgabe des Speichers setzt sich aus dem Abfluss, dem Überlauf und einer Entnahme (bspw. zur Trinkwassergewinnung) zusammen. Die Abgabe wird an das nächste oder auch tiefer gelegene Systemelement weitergeleitet, welches in der Regel der Gewässerunterlauf ist. Bei größeren Stauseen wird auch die Verdunstung als Abgabe gerechnet.

Der Überlauf eines Speichers wird festgelegt, um das Risiko einer unkontrollierten Überspülung der Dammkrone zu vermeiden und damit eine rechtzeitig einsetzende Hochwasserentlastung zu gewährleisten. Simulationstechnisch wird dies derart realisiert, indem ein Stauziel in Form eines maximalen Speichervolumens definiert wird. Diesem ist über die Speicherinhaltslinie ein eindeutiger Wasserstand zugeordnet. Ist dieses Speichervolumen bzw. der Wasserstand erreicht, erfolgt die zusätzliche Abgabe des Speichers als Überlauf bzw. über das Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage.

Formel 9: Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_z - Q_a$$

mit

$Q_a =$ Gesamtabfluss (Drosselabfluss+Überlauf+Verdunstung)

$Q_z =$ Gesamtzufluss (Zufluss+Niederschlag)

(Hydrotec, 2009)

Die Berechnung der Abgabe des Speichers über eine feste ungesteuerte Drossel mit definiertem Querschnitt setzt als Berechnungsgrößen eine Speicherinhaltskurve und Drosselkurve voraus. Letztere gibt die Abgabemenge einer Drossel in Abhängigkeit vom Wasserstand und damit deren hydraulische Leistungsfähigkeit an. Mit steigendem hydrostatischem Druck erhöht sich der Drosselabfluss, womit grundsätzlich auch die Hochwasserganglinie nachgezeichnet wird, jedoch deren Abflussspitze gedämpft wird. Der Drosselabfluss errechnet sich aus der Formel für den vollkommenen Abfluss als Grundstrahl unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten, unter Vernachlässigung der Zuströmgeschwindigkeit im Speicher und unter Annahme eines freien Wasserspiegels. Der Abflussbeiwert setzt sich hierbei zusammen aus allen einwirkenden Verlustarten wie der Form des Einlaufes, der Reibung der Rohrwand oder vor dem Ausflussrohr befindliche Treibgut-Rechen. Dieser wird in der Literatur auch als Verlustbeiwert ζ ausgedrückt (Bollrich, 2000).

Formel 10: Drosselabflussgleichung

$$Q = \mu * A * \sqrt{2 * g * h_s}$$

mit

$Q =$ Drosselabfluss

$\mu =$ Abflussbeiwert für hydraulische Verluste

$A =$ Querschnittsfläche der Drossel in m^2

$g =$ Erdbeschleunigung

$h_s =$ Wasserstand (Stauhöhe) in m

(Jamitzky, 2006; Patt & Jüpner, 2013)

Beide genannten Funktionen stehen über den Wasserstand miteinander in Beziehung, womit eine eindeutige Wasserstand-Volumen-Abfluss-Beziehung hergestellt ist. Diese Beziehung dient dem Modell, Stauinhalt und die Abgabe der Drossel in Abhängigkeit von der Zeit zu berechnen. Es bleibt - unter Wahrung der Kontinuitätsgleichung - die Volumenänderung des Speichers immer gleich der Differenz aus Zu- und Abflüssen des Speichers für jeden Zeitschritt der Simulation (Hydrotec, 2009).

4.2.10 Eichfaktoren

Messungen und Messergebnisse sind die unabdingbare Voraussetzung für die Entwicklung und Anwendung von Modellen jedweder Art. Es bestehen gängige Theorien über den Aufbau und die Funktionsweise hydrologischer Systeme, aus dieser Erkenntnis werden mathematische Modelle entwickelt. Die Grundlagen werden intensiv in der gängigen hydrologischen und wasserbaulichen Literatur behandelt (Baumgartner & Liebscher, 1996; Beven, 2012; Maniak, 2010; Mendel, 2000; Patt & Jüpner, 2013). Die Modellvorstellungen finden ihre Anwendung in einer Vielzahl von Forschungsprojekten und erzielen plausible, belastbare Ergebnisse (Kreiter, 2007; Marenbach, 2002; Reinhardt et al., 2011; Rieger, 2012). Es besteht jedoch immer eine Unsicherheit hinsichtlich der vollständigen und exakten räumlichen und zeitlichen Erfassung von Prozessen, Randbedingungen und der mathematische Beschreibung dieser (Beven, 2012; Blöschl & Sivapalan, 1995; Wainwright & Mulligan, 2013). Daraus ergibt sich für die Simulation hydrologischer Systeme immer auch, da sie Räume abbilden, das Problem der räumlichen Übertragbarkeit von Daten und Prozessen (Beven, 2012; Blöschl & Sivapalan, 1995). Das Modellsystem NASIM erfordert daher, wie auch alle anderen Modelle, eine Anpassung der Modellkomponenten und Eingangsparameter durch Eichfaktoren zur bestmöglichen Anpassung des Modells an die natürlichen Gegebenheiten des untersuchten Einzugsgebietes. Hierfür stehen im Modell bis zu 27 Einzelfaktoren zur Verfügung, anhand derer sowohl das Gesamtmodell als auch einzelne Systemelemente in Kombination aller Eichfaktoren geeicht werden können (vgl. Tab. 16: unten). Unterschiedliche Kombinationen von Eichfaktoren können zu gleichen Modellergebnissen führen (Beven, 2012). Entscheidend für die Anwendung bestimmter Eichkonstellationen ist, dass sie aus hydrologischer Sicht plausibel sind und mit den Theorien über den Aufbau hydrologischer Systeme übereinstimmen. Die im Modell verfügbaren Eichfaktoren sind auszugsweise in folgender Tabelle (Tab. 16: S.133) dargestellt. Sie wirken an verschiedenen Stellen auf die Systemprozesse ein.

Die Veränderung der meteorologischen Eingangsgrößen bewirkt eine Veränderung der im System verfügbaren Wassermenge bzw. deren Zwischenspeicherung als Schnee. Die Änderungen im Parameterbereich Landnutzung, Bodenwasserspeicher und in der Leitfähigkeit des Bodens sind wirksam hinsichtlich der Belastungsaufteilung. Es wird an dieser Stelle die Größe der Speicher und deren Fähigkeit zur Auffüllung und Entleerung beeinflusst. Der Versiegelungsgrad beeinflusst, ob der Niederschlag als Oberflächenabfluss direkt abgeführt wird oder in den Bodenspeicher gelangen kann. Die Veränderung dieser Parameter zielt damit sowohl auf eine zeitliche Veränderung der Abflussganglinie, der Gewichtung der Abflussanteile als auch auf eine Veränderung der Abflussfülle ab.

Die Veränderung der im Vorfeld abgeschätzten Retentionskonstanten und der Fließgeschwindigkeit bewirkt eine rein zeitliche Veränderung im Abflussverhalten von Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss, dem Abfluss von versiegelten Flächen und aus tiefen Grundwasseraquiferen. Es können damit die absoluten Mengen der Abflussanteile nicht mehr verändert werden. Entscheidender ist jedoch an dieser Stelle, dass deren zeitliche Relation

zueinander verschoben werden kann. Damit kann sowohl die Form als auch die Höhe der Abflussganglinie und damit die Reaktionszeit maßgeblich beeinflusst werden.

Die Komplexität dieses Zusammenspiels soll am Beispiel des Bodenwasserhaushaltes erläutert werden: Der Bodenwasserhaushalt wird geeicht über die Parameter Welkepunkt, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen. Hierüber wird einmal die Größe des Gesamtbodenspeichers aber auch die Größe und die Relation der Teilspeicher zueinander verändert. Dies hat zur Folge, dass der Boden nicht nur ein verändertes Wasservolumen aufnehmen kann, sondern das auch die pflanzenverfügbare Wassermenge verändert wird und daraus eine Veränderung im Poren- und Versickerungswasseranteil resultiert. Es ergibt sich zwangsläufig ein direkter Einfluss auf bspw. die tatsächliche Verdunstung, wenn die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser verändert wird.

Tab. 16: Einfluss von Eichfaktoren auf Modellsystemänderungen

Art der Systemänderung	Eichfaktoren
Veränderung der Belastungsbildung und -verteilung	Meteorologische Eingangsgrößen <ol style="list-style-type: none"> a. Niederschlagsmenge b. Schneeschmelzrate (Temperatur, Strahlung) c. Potenzielle Verdunstung
Veränderung der Belastungsaufteilung	Landnutzung: <ol style="list-style-type: none"> a. InterzeptionsspeichergroÙe b. Potenzielle Verdunstung c. Versiegelungsgrad Bodenwasserspeicher: <ol style="list-style-type: none"> a. Welkepunkt b. Feldkapazität c. Gesamtporenvolumen Wasserleitfähigkeit des Bodens: <ol style="list-style-type: none"> a. Max. Infiltration b. Horizontale Leitfähigkeit c. Vertikale Leitfähigkeit
Veränderung der Abflusskonzentration und des Wellenablaufes	Retentionskonstante: <ol style="list-style-type: none"> a. Oberflächenabfluss b. Interflow c. Basisabfluss d. Tiefes Grundwasser e. Versiegelte Flächen Gerinne <ol style="list-style-type: none"> a. Fließgeschwindigkeit

Ist die potenzielle Verdunstung hoch genug, dann wird diesem Speicher Wasser entzogen. Dies kann mitunter für einen folgenden Starkniederschlag von erheblicher Bedeutung sein, da die Abflusswirksamkeit von der Bodenvorfeuchte abhängig ist. Ein Herabsetzen des Gesamtporenvolumens wird hingegen den Oberflächenabfluss verstärken, aber auch zu einer verstärkten Exfiltration und einem stärkeren Interflow führen. Welcher dieser Prozesse überwiegt, hängt dabei maßgeblich von der Eichtung der vertikalen und horizontalen Leitfähigkeit der Bodenschichten und der maximalen Infiltrationsrate ab. Die Erhöhung der Infiltration und der vertikalen Leitfähigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der horizontalen Leitfähigkeit führt zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses und des Interflows und verstärkt den Basisabfluss. Im Resultat wird eine solche Konstellation zu einer starken Glättung der Abflussganglinie führen, welche dominiert wird vom Grundwasserzustrom. Soll hingegen einer solchen Glättung entgegengesteuert werden, dann kann der Oberflächenabfluss durch eine Reduzierung der Infiltration und Leitfähigkeit verstärkt werden.

Im Zuge der Modelleichung wird nach Empfehlung der NASIM-Modellentwickler zunächst eine Liste und Reihenfolge an modellsensitiven Parametern erstellt (Hydrotec, 2009). Nach Durchführung einer Simulation ohne Parameteränderung (Null-Lauf) werden die Eingangsdaten überprüft und gegebenenfalls verändert.

4.2.11 Modelleignung

Die Modellstruktur von NASIM erlaubt es, Fragen des dezentralen Hochwasserschutzes in Mittelgebirgsräumen zu bearbeiten ohne dabei wesentliche Aspekte der Modellierung wie bspw. die räumliche und zeitliche Auflösung zu vernachlässigen. Das Modell ist zur Simulation von Einzelereignissen als auch zur kontinuierlichen Simulation der vollständigen Wasserbilanz und des gesamten Abflussspektrums über längere Zeiträume geeignet (Hydrotec, 2009). Als Langzeit-Kontinuumsmodell ist NASIM damit in der Lage, den Wasserkreislauf vom Auftreffen des Niederschlages über die Aufteilung in Verdunstung und Abfluss bis hin zur Verfolgung aller Abflusskomponenten bis zur Referenzstelle zu bilanzieren. Die Zeiträume können beliebig lang und in hoher zeitlicher Auflösung gewählt werden, wodurch sich das Modell insbesondere für Hochwassersimulationen in Mittelgebirgen eignet.

4.3 Modellerstellung für das Untersuchungsgebiet

Auf Grundlage der Zielsetzung der Untersuchungen können die Abläufe zur Modellerstellung in folgende Schritte untergliedert werden, die in den Unterkapiteln in ihren wesentlichen Zügen erläutert werden.

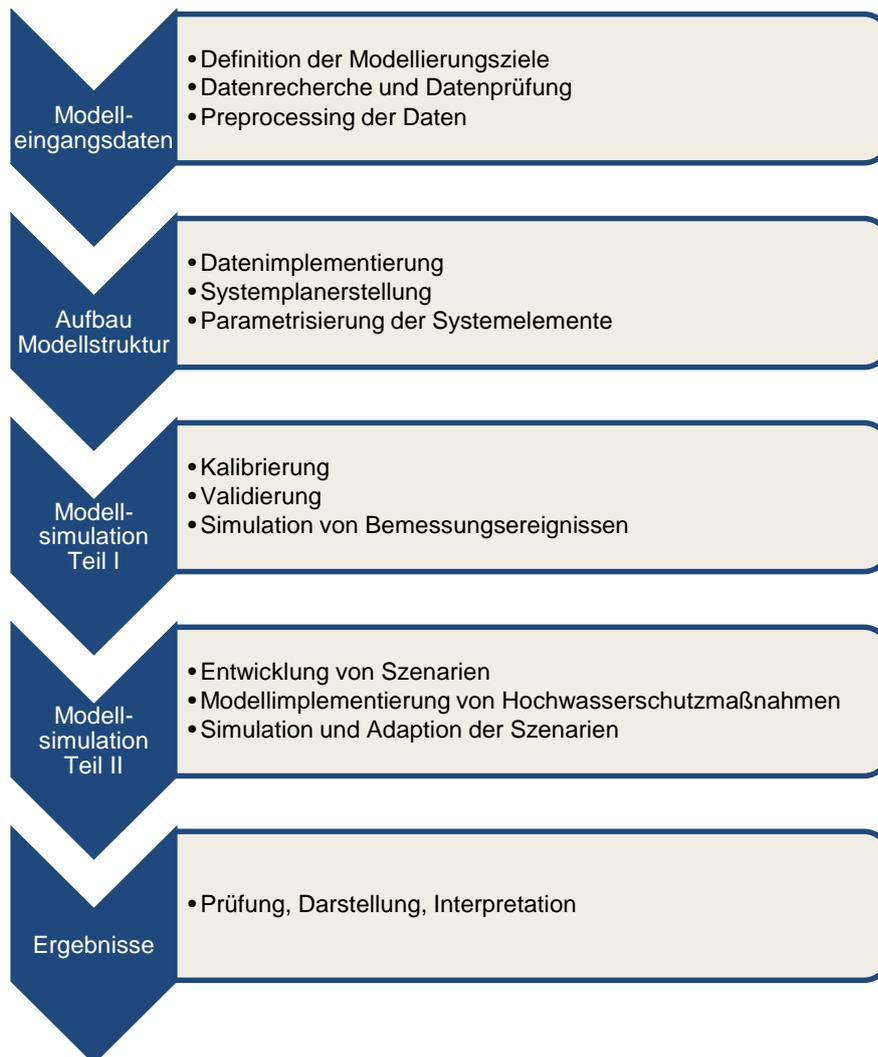


Abb. 26: Ablauf der Modellerstellung

4.3.1 Geländemodell und Gebietsabgrenzungen

Grundlage für alle Modellberechnungen ist ein digitales Geländemodell, welches die notwendigen Informationen über die Einzugsgebietsgröße, Gewässernetz und Topographie bereitstellt. Die topographischen Informationen müssen für die Berechnung der Fließzeiten als Rasterdaten in

Form eines GRIDs vorliegen. Es wurde für die Erstellung des Rasterdatensatzes eine Rasterweite von 10 Metern gewählt, um die heterogene Morphologie des Gebietes abbilden zu können.

Das digitale Geländemodell für das Einzugsgebiet der Natzschung wurde auf der Basis von topographischen Karten des Ministeriums für Nationale Verteidigung der DDR (Ausgabe Staat) im Maßstab 1:10.000 erstellt. Die Karten datieren aus den Jahren 1981-1984. Das vorliegende Kartenmaterial wurde deshalb als Datengrundlage genommen, da es in diesem Maßstab keine anderen Karten gab, die sowohl in der Äquidistanz der Isohypsen genau genug waren als auch den tschechischen Teil des Einzugsgebietes abdeckten. Recherchen im Bundesarchiv ergaben, dass weder Karten früherer als auch späterer Generationen dieses Kriterium erfüllen konnten. Die Äquidistanz der Karten beträgt 5 Meter und bietet daher eine hinreichende Genauigkeit zur Erstellung eines hochaufgelösten Geländemodells. Ein kleiner Bereich im südöstlichen Teil des Einzugsgebietes wurde –da kein anderes Kartenmaterial vorhanden war– durch eine tschechische Karte im Maßstab 1:25.000 abgedeckt. Die analog vorliegenden Kartenblätter wurden im Originalformat gescannt und georeferenziert. Zur Gewinnung der topographischen Daten wurden zunächst die Isohypsen mit einer Äquidistanz von 5 Metern in ARCGIS digitalisiert und danach die vorliegenden 8 Kartenblätter an den Blatträndern zusammengefügt und identische Isohypsen miteinander verbunden. Fehlende Informationen zu Höhenangaben auf den Bergkämmen und Bergkuppen wurden ergänzt, um bei der späteren Abflussberechnung völlig ebene Flächen zu vermeiden. Weiterhin wurde bei der folgenden TIN-Berechnung ein zuvor auf Kartenbasis generiertes Flussnetz als Tiefenlinie integriert, um die Ausbildung von Kaskaden in den Tälern zu vermeiden. Abschließend musste der Gesamtdatenbestand des TINs in einen Rasterdatensatz mit definierter Rasterzellengröße von 10 Metern überführt werden.

Auf Basis der Isohypsenverläufe wurde das Einzugsgebiet bis zur Mündung in die Flöha in insgesamt 63 Teilgebiete bzw. Systemelemente untergliedert. Jedes dieser Elemente ist mit einer Nummer benannt (bspw. 1001 für das Teilgebiet / Systemelement im Mündungsbereich der Natzschung, Nordosten) (vgl. Abb. 27: S.137). Systemelemente können rein wasserbauliche Strukturen im Modell darstellen (Kanäle, Speicher, Rohrleitungen), sind aber zumeist mit Flächen verknüpft. Eine solche Fläche ist in der Regel das natürliche Einzugsgebiet dieses Systemelementes für einen definierten Gerinneabschnitt. Ein Systemelement besteht aus einer größeren Anzahl an Elementarflächen (HRU's = Hydrological Response Units). Für jedes Element existiert ein hydrologischer Auslasspunkt, für welchen die Ergebnisse der einzelnen HRU- oder auch Elementarflächen-Modellberechnungen integriert werden.

Für die Untergliederung mussten verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Es sollten Gebiete ähnlicher Größe entstehen und die Einzugsgebiete aller Zuflüsse in die Natzschung abgegrenzt werden. Weiterhin sollten die Standorte für potenzielle Hochwasserrückhaltebecken immer an einer Schnittstelle zweier Teilgebiete liegen und die Lage von Pegeln, Ortschaften und Bauwerken hinsichtlich der Generierung von Abflussganglinien für diese Punkte Berücksichtigung finden. Darüber hinaus verlangt aber das Flood Routing Verfahren Gerinne- oder Talabschnitte mit einheitlicher Geometrie und einheitlichem Längsgefälle. Auftrennungen von Teilgebieten erfolgten damit immer auch dort, wo sich die Talgeometrie maßgeblich änderte.

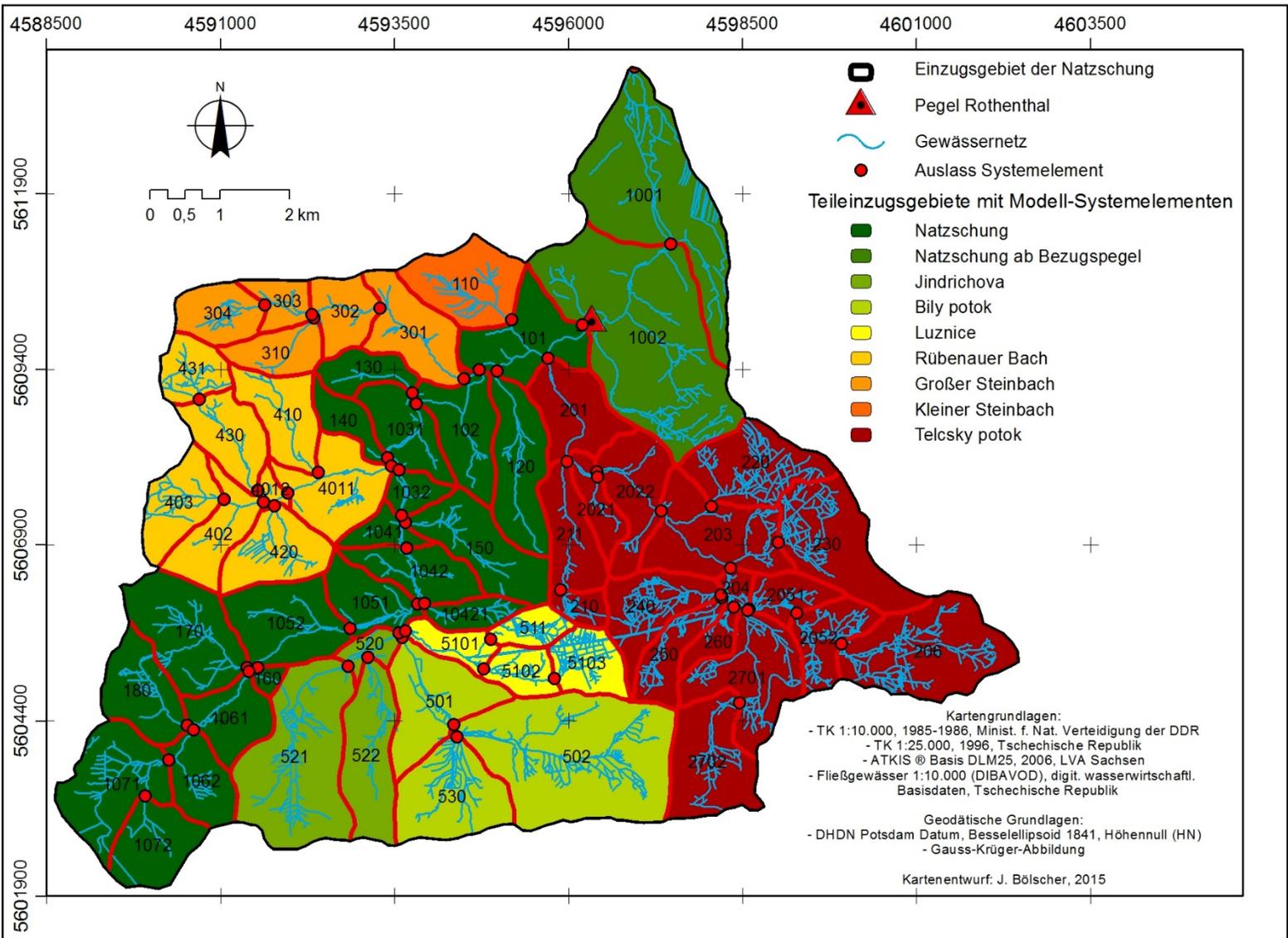


Abb. 27: Struktur der Fließgewässer, Teileinzugsgebiete bzw. Modellsystemelemente und deren Auslasspunkte (rot)

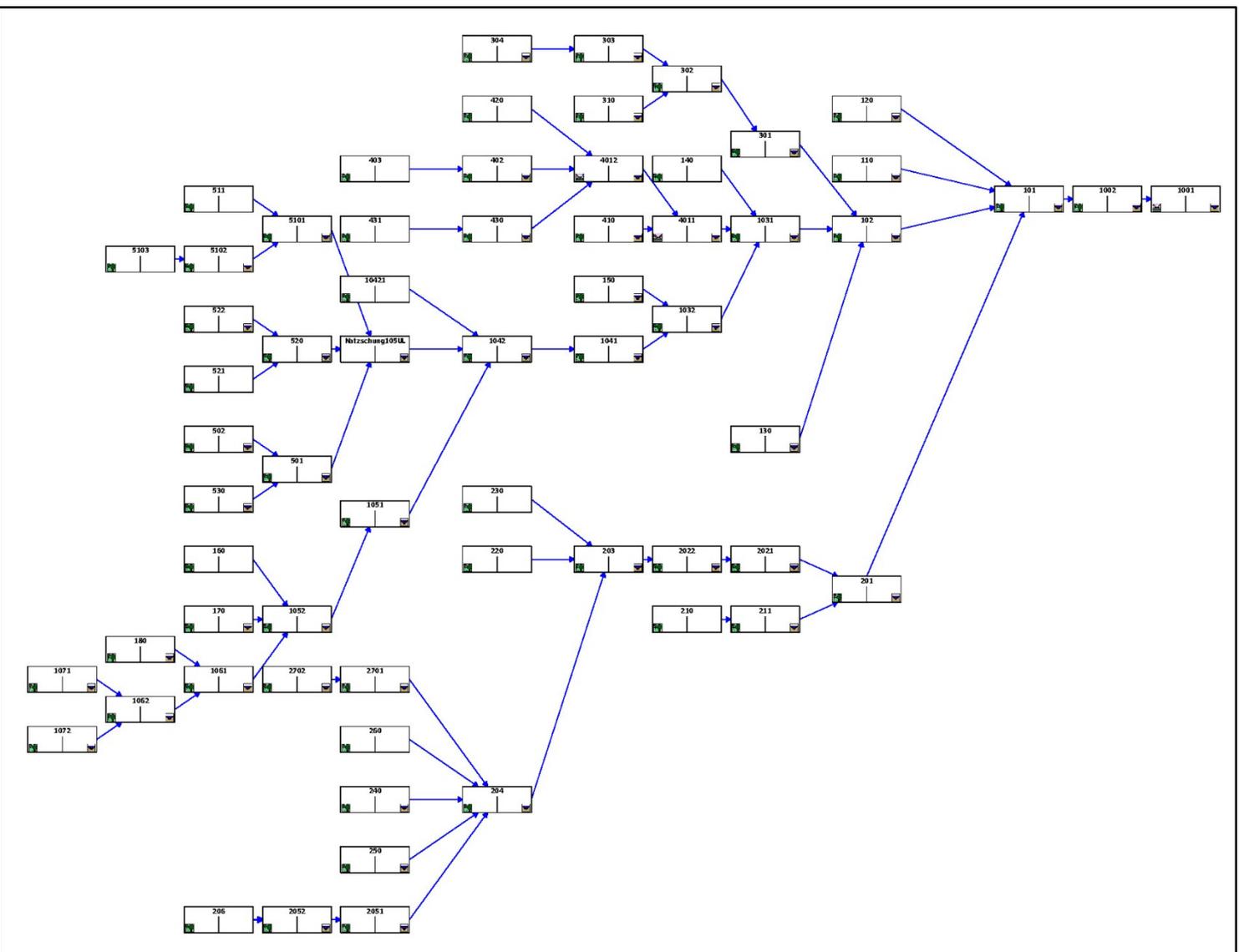


Abb. 28: Modell-Systemplan mit Systemelementen und Abflusswegen (ohne Rückhalteräume)

4.3.2 Isochronen und Elementarflächen

Die vorgenommenen Abgrenzungen zu Teilgebieten werden zusammen mit dem rasterbasierten Höhenmodell und dem Gewässernetz im GIS verschnitten, um pro Teilgebiet die Zeitflächenfunktion berechnen zu lassen. Zusätzlich fließen landnutzungsabhängige Werte für die Oberflächenrauigkeit (KS-Werte) ein, welche als weiterer Faktor zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit auf der Fläche dienen. Die Richtwerte entstammen dem NASIM-Modellhandbuch (Hydrotec, 2009). Über diesen Schritt fließen Landnutzung und die Topographie in das hydrologische Modell zur Berechnung der Abflusskonzentration ein.

Die Teilgebietsabgrenzungen werden darüber hinaus benötigt, um zusammen mit den raumbezogenen Boden- und Landnutzungsdaten Elementarflächen als kleinste hydrologische Einheit zu berechnen. Für den Modellaufbau wurden insgesamt über 2.200 Elementarflächen generiert. Sie setzen sich aus der Verschneidung der Informationen Bodentyp, Landnutzung und Teilgebiet innerhalb des Einzugsgebietes zusammen. Folgende Abbildung (Abb. 29: S.139) zeigt anhand der Farbtöne die Verteilung der Elementarflächen innerhalb eines jeden Teileinzugsgebietes an. Jedem Systemelement liegt eine Vielzahl an hydrologischen Berechnungseinheiten in Form dieser Elementarflächen zugrunde. An jedem Auslasspunkt eines Gebietes kann die summierte Wirkung der Elementarflächen auf den Gebietswasserhaushalt bestimmt werden.

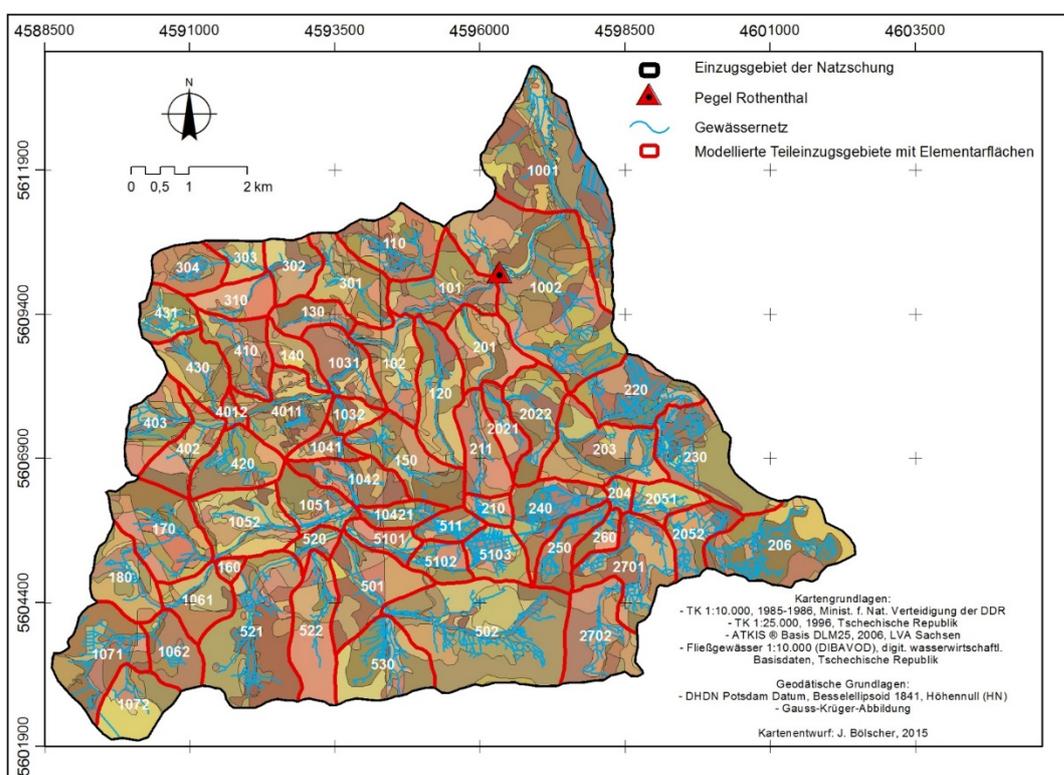


Abb. 29: Verteilung der Elementarflächen (HRU) innerhalb der Teilgebiete (rot)

4.3.3 Landnutzung

Das Modellsystem NASIM benötigt Informationen über die Landnutzung in der Art, dass Flächen einer bestimmten Nutzungsform die Parameter Versiegelungsgrad, Durchwurzelungstiefe und Interzeptionsspeichergröße zugewiesen werden. Über die Lage und Größe der Fläche werden diese Informationen damit räumlich verortet und können mit anderen Flächeninformationen wie Topographie und Böden verschnitten und einem Systemelement zugewiesen werden.

Die Verteilung der Landnutzungsformen wurde im Zuge der Einzugsgebietscharakterisierung beschrieben. Die Darstellung der aktuellen Situation der Landnutzung und Landbedeckung im Einzugsgebiet der Natzsung basiert auf einer homogenen Datengrundlage von CORINE LAND COVER Daten (CLC Daten).

Tab. 17: Parametrisierung der Landnutzungsformen			
Bedeckungs- und Nutzungskategorien der dritten Ebene von CLC2000 Rasterdaten (Anmerkungen in Klammern entsprechen eigenen Beobachtungen)	Durchwurzelungstiefe [m]	Max. Interzeption [mm]	Versiegelungsgrad [%]
1. Flächen nicht durchgängig städtischer Prägung (dörfliche Siedlungen)	0,1	0,5	80
2. Ackerland	0,3	2,5	2
3. Wiesen und Weiden	0,4	1,5	1
4. Komplexe landwirtschaftliche Parzellenstruktur (mit Ackerlandanteil <75%)	0,35	2,0	2
5. Landwirtschaft mit natürlicher Bodenbedeckung (mit 25 bis 75% Anteil Landwirtschaft)	0,3	2,0	1
6. Laubwald	1,0	2,6	1
7. Nadelwald (Fichtenreinbestände)	0,3	4,7	1
8. Mischwald (Nadel- Laubmischwald)	0,5	3,0	1
9. Wald-Strauch Übergangsstadien (Mischwaldstruktur mit 50 % Bedeckung)	0,5	3,0	1
10. Torfmoore (mit 50% Fichtenforstbedeckung)	0,3	3,5	1

Diese wurden im Rahmen einer europaweiten Erfassung der Bodenbedeckung auf Basis von Satellitendaten im Maßstab 1:100.000 erstellt und 1990 erstmalig erhoben. Für den Modellaufbau wurde auf den aktualisierten Landsat 7-Datensatz aus dem Jahre 2000 zurückgegriffen (EEA, 2000), welcher in der Projektion Gauß-Krüger Zone 4 vorlag.

Die Nomenklatur der CORINE Land Cover Klassen besteht aus drei Ebenen. Die oberste Ebene wird durch die fünf Hauptklassen: (1) bebaute Flächen, (2) landwirtschaftliche Flächen, (3) Wälder und naturnahe Flächen, (4) Feuchtfächen und (5) Wasserflächen gebildet. Die am stärksten räumlich aufgelöste dritte Ebene besteht aus 44 Klassen in Form von Bedeckungs- und Nutzungskategorien (Bossard et al., 2000). Basierend auf dem Klassifizierungsschlüssel für die CLC2000 Rasterdaten wurden 10 Klassen der dritten Ebene für das Untersuchungsgebiet ausgewiesen. Die den Klassen zugewiesenen Werte zur Durchwurzelungstiefe, Interzeption und dem Versiegelungsgrad wurden anhand von Literaturwerten, im Rahmen von Feldarbeiten und über Kartierungen der Revierförsterei Olbernhau ermittelt und ggf. abgeschätzt (vgl. Tab. 17: S.140) (Ellenberg, 1996; Hydrotec, 2009; Lindenkreuz, 2006; Löhe, 2006; Mendel, 2000; Ramelow, 2006).

4.3.4 Boden

Die Informationen über die Verteilung der Bodentypen im Einzugsgebiet sind ein weiterer wesentlicher Bestandteil für den Modellaufbau. Genau wie bei den Landnutzungsdaten werden über Flächen eines bestimmten Bodentyps diese Informationen räumlich verortet und können so mit anderen Flächeninformationen zu Elementarflächen, den kleinsten hydrologischen Berechnungseinheiten, verschnitten werden.

Die Datengrundlage für die Parametrisierung des Bodenmodells in NASIM war im Wesentlichen eine neu erstellte, bisher nicht vorhandene grenzübergreifende und einheitlich klassifizierte Bodentypenverteilungskarte (Ramelow, 2006) und eine parallel verlaufende Untersuchung boden-physikalischer Kennwerte im Gelände und Labor zur hydrologischen Charakterisierung der aufgenommenen Böden (Löhe, 2006). Hierüber konnten die räumliche Verteilung von Bodentypen und deren Bodenschichtung und zugehörige Bodenkennwerte ermittelt werden.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen mehrerer Geländepraktika und im Rahmen mehrerer Diplomarbeiten erhoben, da es keine ausreichend genaue, flächendeckende und einheitliche Bodenkarte mit entsprechenden Leitprofilen und Bodenkennwerten für das Untersuchungsgebiet gab (Ramelow, 2006).

Der Bodenkarte liegen neben den Ergebnissen der sehr detaillierten forstlichen Standorterkundung 1955/56 und 1979, der mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung im Maßstab 1:25.000 und der darauf aufbauenden digitalen Bodenkonzeptkarte (1:25.000), Bodenaufnahmen aus 20 beprobten Bodenaufschlüssen und weitere 19 Pürckhauer-Sondierungen zugrunde (Löhe, 2006; Ramelow, 2006; VEB, 1956; VEB, 1979). Sie sind repräsentativ über das Einzugsgebiet verteilt und berücksichtigen die Heterogenität des Untersuchungsgebietes. Für nicht beprobte Areale wurden die o.g. vorhandenen

Informationen ausgewertet und für das Modell, unter Zuhilfenahme analoger Bodenkarten, speziell für die Auenböden überarbeitet. Als Grundlage diente die Bodenkarte 1:50.000 Blatt Olbernhau, welche nur einen kleinen Ausschnitt des Einzugsgebietes abdeckte, jedoch für Rückschlüsse auf das Untersuchungsgebiet über Leitbodenprofile verfügte. Die Moorböden im tschechischen Teil des Einzugsgebietes wurden durch weitere Bohrungen näher differenziert (Lindenkreuz, 2006).

Die Daten wurden als Grundlage zur Parametrisierung der Bodenvariablen im Modell verwendet. Einzelheiten zu den Methoden und Ergebnissen finden sich bei Löhe, Lindenkreuz und Ramelow (Lindenkreuz, 2006; Löhe, 2006; Ramelow, 2006). Die Profile wurden auf Grundlage der bodenkundlichen Kartieranleitung (Boden, 1994) aufgenommen, beprobt und im Labor analysiert. Es konnten folgende Datensätze generiert werden: (1) räumliche Verteilung der Bodentypen, (2) Zuordnung von Leitbodenprofilen, (3) Ausweisung von Bodenhorizonten, (4) Organikanteil, Skelettgehalt, Korngrößen und Bodenarten, (5) Lagerungsdichte, (6) Kennwerte zum Bodenwasserhaushalt und zur Wasserleitfähigkeit.

4.3.5 Retentionskonstanten

Die Retentionskonstante beschreibt die gebietspezifischen Eigenschaften der Speicherentleerung über den Oberflächenabfluss, den Interflow und den Basisabfluss. Diese ist insbesondere von der Gebietsmorphologie abhängig. Die Retentionskonstante wurde nach einem einfachen empirischen Ansatz aus dem Modellhandbuch ermittelt (Formel 11). Hierzu wird angenommen, dass der abfallende Ast einer Hochwasserganglinie der Auslauffunktion eines linearen Speichers ohne Zufluss entspricht (Hydrotec, 2009).

Formel 11: Retentionskonstante

$$K = \frac{t_2 - t_1}{\ln(QA1) - \ln(QA2)}$$

mit

K = Retentionskonstante

$t_{1,2}$ = beliebige Zeitpunkte auf abfallendem Hochwasserast mit $t_2 > t_1$

$QA1$ = Abfluss auf abfallendem Hochwasserast zum Zeitpunkt t_1 mit $QA1 > QA2$

$QA2$ = Abfluss auf abfallendem Hochwasserast zum Zeitpunkt t_2

(Hydrotec, 2009)

Zur Abschätzung wurden zunächst für 15 Hochwasserereignisse zwischen 2002 und 2008 die abfallenden Äste der Abflussganglinien ausgewertet und die jeweiligen Konstanten bestimmt. Um die Dominanz eines bestimmten Abflussanteils (Oberflächenabfluss, Interflow, Basisabfluss)

bestmöglich zu treffen, wurden unterschiedliche Zeitspannen ausgewählt. Es wurde für jeden Abflussanteil der Median bestimmt und mit dem Faktor 0,75 bzw. 1,25 gewichtet. Die Gewichtung erfolgte vor dem Hintergrund, dass die am Unterlauf der Natzsung ermittelten Werte ein Integral des Gesamtgebietes darstellen, jedoch eine Zuweisung der jeweiligen Retentionskonstanten zu den einzelnen Teilgebieten erfolgen muss. Haupteinflussfaktor ist die Morphologie, welche in Form des mittleren Gefälles eines jeden Gebietes in die weitere Abschätzung einfließt. Es wurde Gebieten mit einem stärkerem Gefälle niedrigere Konstanten und Gebieten mit schwächerem Gefälle höhere Konstanten zugewiesen. Dazu mussten die Teilgebiete nach Hangneigungsklassen eingeteilt werden. Die Klasse im Bereich zwischen 5 und 9° Neigung umfasst 40% aller Gebiete. Dieser Klasse wurde der Median der Retentionskonstanten zugewiesen. Die Überlegung ist, dass die Gebiete mit einer Hangneigung im mittlerem Bereich am besten durch den Median für die Retentionskonstanten dargestellt werden und alle anderen Gebiete durch entsprechende Gewichtungen des Median. Dieses Verfahren stellt lediglich eine Abschätzung dar und ist nicht physikalisch begründet. Eine genaue Bestimmung der Retentionskonstanten könnte durch wiederholte Tracer-Messungen in charakteristischen Teilgebieten erfolgen, wäre jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden und müsste für unterschiedliche Abflussereignisse durchgeführt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden auch Hochwasserereignisse bedingt durch Schneeschmelzen analysiert, jedoch lagen hier im Vergleich zum restlichen Jahr die Werte für die Retentionskonstanten um ein Vielfaches höher. Eine gesonderte jahreszeitliche Differenzierung der Konstanten ist im Modell nicht vorgesehen und muss bei der Modellkalibrierung Berücksichtigung finden.

Tab. 18: Retentionskonstanten

Pegel Rothenthal 2002-2008	Retentions- konstante [h]	Retentions- konstante [h]	Retentions- konstante [h]
Hangneigungsklasse	<5°	5-9°	>9°
Gewichtungsfaktor Median	1,25	1	0,75
Oberflächenabfluss	14	11	8
Interflow	45	36	27
Basisabfluss	239	191	143

4.3.6 Gerinnequerschnitte

Die im Modell abgebildeten Gerinne werden als teilgebietsspezifische Querprofile charakterisiert nach Vegetation, Geometrie, Sohlgefälle und Beschaffenheit der Gewässersohle bzw. des Gerinnevorlandes. Die notwendigen Datensätze wurden in mehreren Geländekampagnen für jedes der 63 Teilgebiete ermittelt. Die Fließwiderstände wurden durch Strickler-Beiwerte beschrieben. Sie gehen über die Fließformel nach Gaukler-Manning-Strickler in das Modell ein zur Berechnung der Wellentranslation nach Kalinin-Miljukov (Hydrotec, 2009). Die hier verwendeten Strickler-Beiwerte entsprechen den Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg aus dem Jahre 2004 (LfUBW, 2004). Die dort aufgeführten Tabellenwerke basieren u.a. auf Daten von Chow, der DVWK und von Lange und Lecher (Chow, 1959; DVWK, 1990; Lange & Lecher, 1993). Die Werte wurden abgeglichen mit Literaturangaben von Bollrich, Schmidt und Patt (Bollrich, 2000; Patt et al., 2010; Schmidt, 1993).

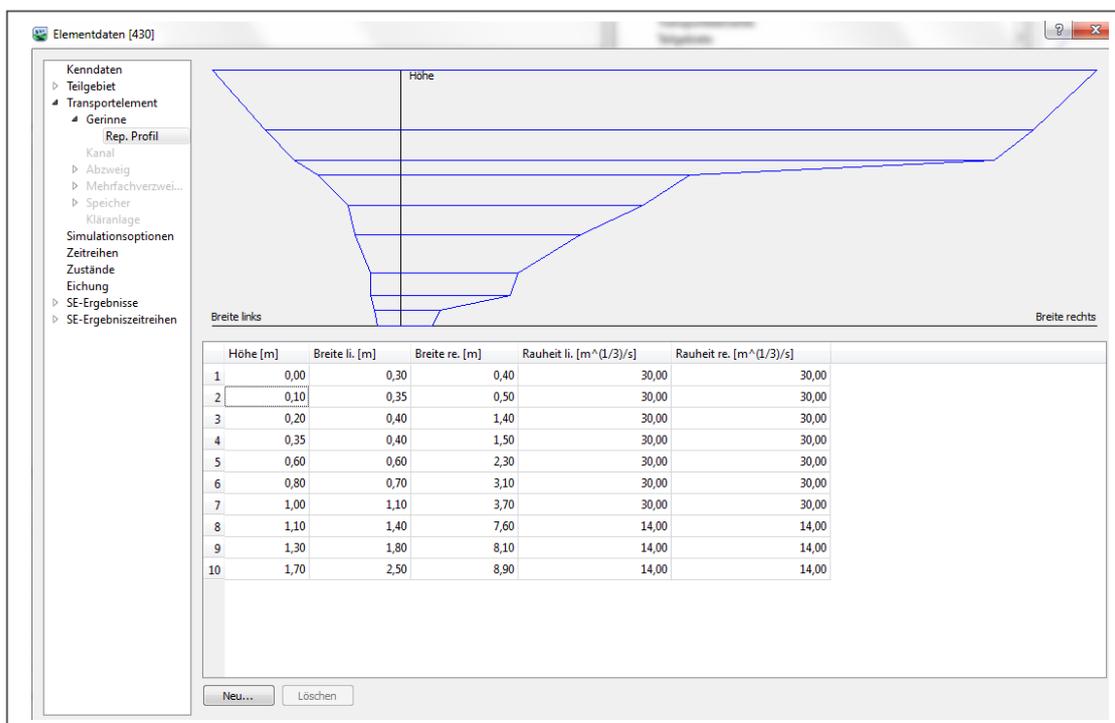


Abb. 30: Modellinterner Aufbau eines Gerinnequerprofils mit zugehörigen Strickler-Beiwerten am Beispiel des Teilgebietes Nr. 430

4.3.7 Meteorologische und hydrologische Eingangsdaten

Die grundlegenden, modellrelevanten Kriterien für die Auswahl meteorologischer Eingangsdatensätze waren die Datenverfügbarkeit von Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, die Nähe und Lage der Messstation zum Untersuchungsgebiet, Beginn und Ende der verfügbaren Messreihen und die zeitliche Auflösung der Daten.

Die Waldklimastation Olbernhau ist eine von 8 sächsischen Stationen, die im Rahmen eines europäischen Messnetzes (Level II) zur Überwachung forstlicher Dauerbeobachtungsflächen, kontinuierlich meteorologische Daten im Freiland aufzeichnen. Die im Modell verwendeten Daten umfassen den Zeitraum zwischen 2002-2008 und wurden freundlicherweise vom Staatsbetrieb Sachsenforst zur Verfügung gestellt. Die Station befindet sich am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes auf einer Höhe von 720 m. ü. HN im Freilandbereich eines Fichtenbestandes. Die Freiland-Niederschlagswerte werden in 1 Meter Höhe mit einer Kippwaage erfasst, kontinuierlich registriert und zu Stundenwerten zusammengefasst. Lufttemperaturen und Luftfeuchte werden über einen kombinierten Sensor in 2 Meter Höhe über dem Erdboden gemessen und ebenfalls zu Stundenwerten zusammengefasst. Die Klimastation Olbernhau war die einzige Station im näheren Bereich des Untersuchungsgebietes, welche die o.g. Kriterien vollständig abdecken konnte. Weitere Stationen besaßen eine ungünstige Lage, zeitlich zu niedrig aufgelöste Messwerte und konnten auch den Untersuchungszeitraum nicht abdecken.

Für das Einzugsgebiet stand ebenso nur eine Pegelstation zur Verfügung. Am Pegel Rothenthal werden seit 1929 Wasserstands- und Abflusswerte der Natzschung kontinuierlich aufgezeichnet und berechnet, die in zusammengefasster Form als gewässerkundliche Hauptwerte (von 1929-2009) für den Abfluss vorliegen (LFULG, 2010). Die Pegelmessstelle befindet sich 5,1 km oberhalb der Mündung in die Flöha und umfasst ein Einzugsgebiet von 75 km². Sie liegt oberhalb der Ortslagen Rothenthal und Grünthal. Der Pegelnullpunkt liegt auf 535,70 m. ü. HN. Die Durchflussdaten liegen als geprüfte Tagesmittelwerte vor. Seit 2002 erfolgt die Erfassung der Wasserstände als Viertelstundenwerte. Diese wurden vom Freistaat Sachsen freundlicherweise für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten und der ebenfalls bereitgestellten Wasserstands-Abfluss-Beziehungen wurde für die Jahre 2002-2008 eine Abflussganglinie erstellt und als Grundlage für die Modelleichung verwendet (LfUG, 2009; LFULG, 2010).

Die zur Modellierung notwendigen klimatischen und hydrologischen Daten sind auf insgesamt zwei Stationen beschränkt, weisen jedoch günstige Standorte auf, die einen repräsentativen Charakter besitzen. Die zeitliche Auflösung und Kontinuität der Messungen erlaubt hingegen die Simulation von schnellen Abfluss-Reaktionen als auch eine kontinuierliche Modellierung über längere Zeiträume.

4.3.8 Abgrenzung des Simulationszeitraumes

Es wurde das Frühjahr 2002 als Beginn und der Winter 2008 als Ende des Simulationszeitraumes festgelegt. Für diesen Zeitraum lagen Messreihen für den Niederschlag als auch für den Abfluss vor, die als Stundenwerte die kleinste gemeinsame zeitliche Auflösung besaßen. Damit war grundsätzlich die Abbildung von schnellen Abflussreaktionen gewährleistet.

Als weitere Voraussetzung für die Auswahl des Untersuchungszeitraumes und als Bedingung für die zeitliche Auflösung der Messdaten galt es, Hochwasserereignisse unterschiedlicher Art, Dauer und Höhe im Sinne von gebietstypischen Abflussreaktionen abbilden zu können.

Der Simulationszeitraum von 2002-2008 wurde somit vor dem Hintergrund gewählt, unterschiedliche Hochwasserereignisse zeitlich hochaufgelöst und möglichst gut in einer kontinuierlichen Simulation in einem Modell abbilden zu können. Ein Modell, welches sehr unterschiedlichen Anforderungen in einer kontinuierlichen Simulation versucht Rechnung zu tragen, zeigt einerseits die Schwächen des Modells und andererseits auch dessen Stärken und damit auch dessen Robustheit auf. Der Modellansatz löst sich von einer Kombination von Eichfaktoren und Randbedingungen, welche ausschließlich auf ein Einzelereignis ausgerichtet sind.

4.3.9 Prüfung der Modellqualität

Die Prüfung der Modellqualität dient der Identifizierung von Problemen im Modellaufbau und in der Simulation. Die für den Modellaufbau notwendigen Eingangsdatensätze sind als solche immer schon eine Abstraktion der zu modellierenden Landschaft. Sie beinhalten daher Vereinfachungen, Skalensprünge, zeitliche Inhomogenitäten oder auch einfach nur räumliche Lücken. Die Qualität der räumlichen Eingangsdatensätze ist schwer prüfbar und kann in der Regel nur subjektiv erfolgen. Das Modell birgt damit schon im Aufbau Fehler bzw. Unzulänglichkeiten, welche durch das Setzen bestimmter Randbedingungen oder über eine Kombination aus Eichfaktoren ausgeglichen werden. Wie gut dieser Ausgleich funktioniert, wird generell über Gütemaße ausgedrückt (Moriassi et al., 2007), welche sich an gemessenen Werten orientieren, die ebenfalls fehlerbehaftet sein können. Ein unbefriedigendes Gütemaß muss daher nicht zwangsläufig bedeuten, dass das Modell nicht ausreichend funktioniert. Es sagt lediglich etwas über die Übereinstimmung zwischen gemessenem Erwartungswert und modelliertem Ergebniswert zu einem bestimmten Zeitpunkt aus. Das Gütemaß beschreibt objektiv „Unstimmigkeiten“. Daher ist das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Modellqualität die Plausibilität der Daten. Darüber hinaus können hydrologische Modelle aber an subjektiven Erwartungswerten beurteilt werden. Das Modell sollte zwei Erwartungswerten gerecht werden.

- I. Zum einen sollte zeitlich hochaufgelöst und gleichzeitig über einen langjährigen Zeitraum der hydrologische IST-Zustand simuliert werden können, um die Modellstabilität zu gewährleisten.
- II. Weiterhin sollten Hochwasserereignisse mit unterschiedlicher Dauer, Höhe und Auslösemechanismen abgebildet werden können.

Vor Beginn der Kalibrierung wurden die Eingangsdatensätze Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wasserstand und Abfluss auf Konsistenz und Plausibilität geprüft. Es wurden Datenlücken und potenzielle Messfehler kenntlich gemacht. Weiterhin wurde gezeigt, wann es trotz Niederschlagsinput zu keiner Abflussreaktion kam und umgekehrt. Dies zeigte einmal auf, wann Niederschlagsereignisse lokal begrenzt waren. Weiterhin wurde geprüft, ob bei entsprechendem Niederschlag eine Abflussreaktion und in welcher Höhe erfolgte, ob die Temperaturverläufe und

vorhergehenden Niederschläge einen Schneedeckenaufbau und -abbau zulassen und ob sich dies in den Abflusskennwerten widerspiegelt. Es wurden anhand der gemessenen und modellierten Abflusswerte gewässerkundliche Kennwerte erstellt, diesen den bekannten Hauptwerten gegenübergestellt und auf Plausibilität geprüft.

Eine qualitative Prüfung des Modells wurde zusätzlich anhand des Nash-Sutcliffe-Gütemaßes vorgenommen. Dieses wird von der *American Society of Civil Engineers* zur Anwendung empfohlen und findet eine weite Verbreitung im Bereich der hydrologischen Modellierung, womit auch eine Vergleichbarkeit gegeben ist (Moriasi et al., 2007). Moriasi zitiert eine Arbeit von Servat & Dezetter (1991). Darin zeigt sich im Vergleich zu anderen Kriterien, dass obiges Gütemaß die Gesamtanpassung einer modellierten Ganglinie an eine gemessene am besten widerspiegelt. Die Autoren zeigen jedoch auch, dass die Anpassung für Niedrigwasserabflüsse nicht immer ausreichend ist.

Das Gütemaß nach Nash-Sutcliffe zeigt an, wie gut das Modell die gemessenen Verhältnisse widerspiegelt (1:1 Linie) oder ob diese durch das Modell nicht oder nur unzureichend erklärt werden können (vgl. Tab. 19: unten).

Formel 12: Gütemaß nach Nash-Sutcliffe

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y_i^{obs}})^2} \right]$$

mit

NSE	=	Nash-Sutcliffe Effizienzgrad
Y_i^{obs}	=	Messwert (Abfluss) zum Zeitpunkt i
Y_i^{sim}	=	modellierter Wert (Abfluss) zum Zeitpunkt i
$\overline{Y_i^{obs}}$	=	arithmetisches Mittel der gemessenen Werte

(Moriasi et al., 2007)

Der Nash-Sutcliffe Effizienzgrad eines Modells wird durch die Summe der absoluten quadrierten Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten gebildet. Diese wird normalisiert durch die Varianz der beobachteten Werte für den Beobachtungszeitraum. Der Quotient wird von 1 subtrahiert. Man erhält Werte zwischen $-\infty \leq 1$. Werte zwischen 0 und 1 gelten als akzeptabel. Werte ≤ 0 zeigen an, dass der Durchschnittswert der observierten Daten einen besseren Vorhersagewert darstellt als das Modell, womit die Leistungsfähigkeit des Modells nicht akzeptabel ist (Moriasi et al., 2007). Bedingt durch die Quadrierung der Abweichung zwischen gemessenen und modellierten Daten, führen große Abweichungen zu einer schlechteren Modellbewertung (Beven, 2012; Reinhardt, 2010). Liegen gemessener und modellierter Hochwasserscheitel auf selber

Höhe, jedoch zeitversetzt, dann ist das Gütemaß umso kleiner je größer der zeitliche Versatz ist. Dieser Effekt ist insbesondere bei Hochwasservorhersagemodellen von Bedeutung. Er muss jedoch bei der Modellbewertung ggf. auch als kritisch erachtet werden, bspw. dann wenn der Zeitversatz durch die Lage der Niederschlagsstationen bedingt ist. Dieser Aspekt sollte sowohl für Hochwasserabflüsse, aber auch für Mittelwasserabflüsse mit hohen Fluktuationen im Tagesverlauf Berücksichtigung finden.

Tab. 19: Einstufung für das Nash-Sutcliffe Gütemaß nach Moriasi et al. (2007)	
Bewertung	NSE
Sehr gut	$0,75 < NSE \leq 1$
Gut	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Befriedigend	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Unbefriedigend	$NSE \leq 0,50$

4.4 Simulationsszenarien

4.4.1 Bemessungshochwasser

Hochwasserereignisse mit hoher Jährlichkeit finden sich - wie auch am Pegel Rothenthal- nur selten oder nicht in den gemessenen Ganglinien wieder. Daher wird als Referenz für weitere Planungen in der Regel auf simulierte Abflussganglinien zurückgegriffen, die die geforderten Hochwasserjährlichkeiten in ihrer Spitze abbilden können und denen unterschiedliche Niederschlagsverläufe zugrunde gelegt werden können. Die Hochwasserverläufe und Abflussspitzen sind damit zwar abstrahiert von der Realität, jedoch untereinander direkt vergleichbar. Demgegenüber hätte zwar das Augusthochwasser direkt simuliert werden können, jedoch wäre bedingt durch ein fehlendes HQ_{100} keine direkte Vergleichbarkeit gegeben. Aus diesem Grund wurden als Grundlage für Hochwasserschutzszenarien, die synthetischen Hochwasserganglinien für das Bemessungshochwasser HQ_{100} auf der Basis von Bemessungsniederschlägen modelliert. Voraussetzung hierfür ist ein kalibriertes Modell.

Das HQ_{100} wurde als Bemessungshochwasser gewählt, da das staatlich festgelegte Schutzziel für geschlossene Siedlungsbereiche, Industrieanlagen und Gewerbesiedlungen in Sachsen der Schutz vor einem einhundertjährigen Hochwasser ist. Dieses Schutzziel wurde auch als Ergebnis der landesweiten Priorisierung von Hochwasserschutzmaßnahmen für die am Unterlauf der Natzschung gelegenen Ortslagen Grünthal und Rothenthal definiert. Darüber hinaus ergab die obige Erhebung des Freistaates Sachsen einen vorhandene Schutzgrad für die Ortslagen und ein geschätztes Schadenspotenzial für ein HQ_{100} von über 7 Mio. € (SMUL, 2005a; SMUL, 2007).

Tab. 20: Statistische Hochwasserabflüsse für den Pegel Rothenthal HQ(T)

Pegel	HQ ₁₀₀ [m ³ /s] * ₁	HQ ₂₀₀ [m ³ /s] * ₁	HQ ₃₀₀ [m ³ /s] * ₂	HQ _(HHQ) [m ³ /s] * ₁
Rothenthal	63,4	82,6	96,0	88,0

*1 Werte basiert auf Angaben des Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG, 2004b; LFULG, 2010; LFULG, 2011c).

*2 Wert basiert auf Erläuterungsbericht der Fa. RMD Consult GmbH zur Hochwasserschadensbeseitigung in Rothenthal; im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (RMD, 2005).

Anmerkung:

Die Berechnung der Werte erfolgte anhand von Beobachtungsdaten bis einschließlich 2002

Für die Berechnung eines HQ₁₀₀ am Pegel Rothenthal wurde mit Bemessungsniederschlägen der sächsischen Landestalsperrenverwaltung (LTV) gearbeitet. Die Bemessungsniederschläge wurden von der LTV in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst neu berechnet, um regional angepasste Daten für Starkniederschlagsereignisse in Sachsen zu erhalten. Für das Gebiet der Natzschung wurde eine Dauer des Bemessungsniederschlags von 12 Stunden zugrunde gelegt, bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von T=100 mit einer Intensität von 160 mm (vgl. Tab. 11: S.106). Die zeitliche Verteilung der Niederschläge erfolgte nach DVWK-Regel 113 als anfangsbetontes Ereignis mit 20% des Niederschlags nach 3 Stunden, 70% nach 5 Stunden und 100% nach 12 Stunden (vgl. Reinhardt (2010)). Um das Abflussmaximum von 63 m³/s für das HQ₁₀₀ zu erreichen, musste der Bemessungsniederschlag im Einzugsgebiet der Natzschung um 24 % auf 129 mm reduziert werden. Auf Basis des Bemessungsniederschlags wurde für diesen Zeitraum von 12 Stunden die Hochwasserganglinie für ein HQ₁₀₀ am Standort Pegel Rothenthal als Grundlage für weitere Simulationen generiert. Die Simulation erfolgte in Zeitschritten von 15 Minuten. So konnte die Auffüllung des Bodenspeichers optimiert werden. Bei der Simulation wurden zusätzlich 7 Tage Nachlaufzeit gerechnet, so dass sich ein Gesamtsimulationszeitraum von 7,5 Tagen ergeben hat. Darauf aufbauend wurden die vor Ort lokalisierten, potenziellen Standorte für dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen (Kap. 5.1) in das Modell implementiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf das Bemessungshochwasser HQ₁₀₀ geprüft.

4.4.2 Hochwasserrückhaltebecken

Die Grundvoraussetzung zur Ausweisung von potenziellen Standorten für Hochwasserrückhaltebecken sind geeignete hydrologische und geomorphologische Verhältnisse. Diese orientieren sich in einem ersten Ansatz an verschiedenen Aspekten, wie dem frühzeitigen Eingriff in die Hochwasserentstehung und einer Abschätzung der zu erwartenden Abflüsse und Abflussfülle hinsichtlich einer optimalen Speicherauslastung. Im Falle der Natzschung bedeutet dies, möglichst weit stromaufwärts nach möglichen Standorten im Einzugsgebiet zu suchen, da es bedingt durch die

steilen Kerbtäler in den Unterläufen der Bäche zu einer frühzeitigen Abflusskonzentration kommt und dort im Verhältnis nicht ausreichend Fläche und Volumen vorhanden sein wird.

Es ist weiterhin zu berücksichtigen, welche Schutzziele definiert werden. Diese sind unterteilbar in hydrologische und geographische Schutzziele. Für erstere wird das Bemessungsschutzziel festgelegt (HQ₁₀₀). Dieses orientiert sich in der Regel an gesetzlichen Vorgaben wie dem Sächsischen Wassergesetz. Letzteres Ziel bezieht sich auf zu schützende Ortschaften, Gewerbe- und Industriensiedlungen und die Infrastruktur. Damit verbunden sind auch die zu erwartenden Schadenskosten bei Eintritt definierter Hochwasserereignisse. In diesem Kontext muss überlegt werden, welche Hochwasserschutzmaßnahmen in Betracht gezogen werden können und welche Dimensionen für die Hochwasserrückhaltebecken notwendig sind. Die Hochwasserschutzmaßnahmen sind für die vorliegenden Untersuchungen auf dezentral verteilte, kleine bis sehr kleine Rückhaltebecken beschränkt, welche nach DIN-Norm 19700-12 über ein maximales Stauvolumen von 100.000 und eine maximale Dammkronenhöhe von < 6 Metern verfügen dürfen (DWA, 2013b). Vor diesem Hintergrund schließt sich die Frage nach einem geeigneten Relief an, welches über ein geringes Längsgefälle und flache Talquerprofile zur Volumenmaximierung verfügen sollte. Geeignete Positionen mit einer Verengung im Talverlauf, würden die Dammlänge von Speicherbauwerken und damit auch die Kosten minimieren. Dies gilt ebenso für schon vorhandene talquerende Bauwerke zur Nutzung als Speicherdamm, bzw. der Nutzung von bestehenden Speichern wie bspw. Teichen. Es gilt grundsätzlich für alle Standorte, dass eine Prüfung zur Eignung des Untergrundes, der Fläche und des Bauwerkes auf Basis der einschlägigen Normen, Regelwerke und gesetzlichen Bestimmungen durchgeführt werden muss. Dies ist jedoch nicht Ziel und Aufgabe dieser Untersuchung, sondern eines fachlichen Planungsprozesses, welcher auf den Ergebnissen aufbauen könnte.

Die Auswahl potenzieller Standorte für Hochwasserrückhaltebecken erfolgte durch Auswertung topographischer Karten im Maßstab 1:10.000 und des digitalen Geländemodells. Es wurden zunächst anhand von Hangneigungskarten und dem Gewässernetz sowohl Bereiche mit niedrigem Gefälle und schwacher Hangneigung als auch Talaufweitungen und Engpässe auskartiert, sowie anhand von topographischen Karten talquerende Bauwerke (bspw. in Form von Straßen) ausgewiesen. Weiterhin wurden Bebauungen und Ortschaften zur Definition der Schutzziele erfasst. Abschließend wurde das Kartenmaterial auf vorhandene Speicher in Form von Teichen analysiert. Die so ausgewählten Standorte wurden verortet, auf Schnittmengen geprüft und als Grundlage für eine Geländebegehung genutzt. Im Rahmen der Begehung wurde für alle Standorte die Situation vor Ort geprüft (Bebauung, Dimension von Durchlassbauwerken, Wasserführung und Geometrie des Gewässers, Schätzung der Abflüsse, Hochwassermarken, Sedimentablagerungen, Erosionsspuren, etc.). Mittels GPS und Nivelliergerät wurde eine erste Abschätzung der Eignung hinsichtlich Dammlänge, max. Dammhöhe und Aufstauvolumen durchgeführt und eine Prioritätenliste für eine genaue Vermessung und Volumenberechnung durchgeführt. Im Zuge der geodätischen Aufnahme der priorisierten Standorte, wurde deren Fläche und Volumen und die Geometrien geplanter und vorhandener Absperrbauwerke mit einem Tachymeter vom Typ Geodimeter 400 (Geotronics AB) und die Koordinaten mittels GPS erfasst. Den Volumina der Absperrbauwerke wurden Böschungsverhältnisse von 1:2 bis 1:3 und eine

Dammkronenbreite von 2,5 Metern zugrunde gelegt. Die Oberkante der Dammkrone wurde auf max. 5 Meter festgesetzt. Die Aufnahmen erfolgten im Rahmen der Abschlussarbeit von Timo Jamitzky und im Rahmen mehrerer Geländepraktika (Jamitzky, 2006). Die Vermessungsdaten wurden mittels "Kriging" interpoliert und in digitale Geländemodelle umgewandelt. Die Daten wurden von Jamitzky zur Anpassung der Dammhöhen und Berechnung der Stauvolumina genutzt. Die Freibordhöhe wurde auf 0,5 Meter unter Dammkrone festgelegt und damit auch die Höhenlage der Hochwasserentlastungsanlage definiert. Als Auslassbauwerk wurden kreisförmige Drosseln mit unterschiedlichen Nennweiten, scharfkantigen und gerundeten Einlässen und Rechen als Verkläusungsschutz gewählt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit der Drosseln wurde beschrieben über extern berechnete, spezifische Drosselkurven (Jamitzky, 2006). Die verorteten Rückhalteräume wurden in das hydrologische Modell implementiert und iterativ die optimalen Nennweiten und Einlasstypen für jeden Speicher auf Grundlage von Modellsimulationen berechnet. Ziel war es, die Retentionsräume für ein HQ₁₀₀ zu optimieren, also eine größtmögliche Scheitelreduktion unter Vermeidung eines Überlaufens zu erreichen.

Formel 13: Spezifisches Speichervolumen / spezifischer Stauraum

$$sV = V_S * A_E^{-1} * 10^{-3}$$

mit

sV = spezifisches Volumen [mm]

V_S = Gesamtvolumen aller Speicher im Einzugsgebiet [m³]

A_E^{-1} = Einzugsgebietsfläche oberhalb des Bezugspunktes [km²]

verändert nach (ATV-DVWK, 2001; Kreiter, 2007)

In der Literatur wird zur allgemeinen Vergleichbarkeit und Wirksamkeitsbeschreibung das spezifische Volumen von Speichern angegeben. Es errechnet sich aus dem Gebietsvolumen aller Rückhalteräume im betrachteten Einzugsgebiet im Verhältnis zum Einzugsgebiet und ist somit ein Maß für den Gebietsrückhalt (vgl. Formel 13). Für vorliegende Untersuchung werden das spezifische und das effektive spezifische Volumen angegeben. Letzteres beschreibt das tatsächlich genutzte Volumen eines Speichers für ein Bemessungsereignis. Sie werden in dieser Arbeit als spezifischer und effektiver spezifischer Stauraum bezeichnet.

Um den Wirkungsgrad und die Eigenschaften der lokalisierten und simulierten Hochwasserrückhaltebecken genauer charakterisieren zu können und um diese mit anderen Untersuchungen vergleichbar zu machen, wurden folgende Parameter entwickelt und für jeden Speicher angegeben (vgl. Tab. 21: S.152). Sie beziehen sich mit Ausnahme des potenziellen und spezifischen Stauraums immer auf ein simuliertes Bemessungshochwasser, berücksichtigen jedoch das Abflussvolumen, den Hochwasserscheitel und die Einzugsgebietsfläche.

Tab. 21: Charakterisierung des Wirkungsgrades von dezentralen, kleinen Hochwasserrückhalteräumen in Bezug zum Bemessungshochwasser	
<u>Parameter</u>	<u>Beschreibung</u>
potenzieller Stauraum [dam³]	potenzielles Volumen eines Speichers
effektiver Stauraum [dam³]	tatsächlich genutztes Volumen eines Speichers in Bezug auf ein Bemessungsereignis
Auslastungsgrad [%]	relative Volumenauslastung eines Speichers
spezifischer Stauraum (auch spezifisches Volumen) [mm]	Gebietsvolumen aller Rückhalteräume im betrachteten Einzugsgebiet im Verhältnis zum Einzugsgebiet als Maß für den Gebietsrückhalt (einzugsgebietsnormiertes potenzielles Speichervolumen)
effektiver spezifischer Stauraum (auch effektives spezifisches Volumen) [mm]	tatsächlich genutztes spezifisches Volumen eines Speichers in Bezug auf ein Bemessungsereignis
Höhe der prozentualen Scheitelreduktion pro 1 dam³ genutztem Speichervolumen [% /dam³]	Effektivitätsgrad der rel. Scheitelreduktion im Verhältnis zum genutzten Stauvolumen in Bezug auf ein Bemessungsereignis
genutztes Speichervolumen pro Prozentpunkt Scheitelreduktion [m³/%]	Effektivitätsgrad des Speicherverbrauchs im Verhältnis zur rel. Scheitelreduktion in Bezug auf ein Bemessungsereignis
genutztes Speichervolumen : Abflussvolumen	Speicherleistung über den gesamten Hochwasserlauf hinsichtlich des Gesamtabflussvolumens (von Bedeutung für lang anhaltende Hochwasser) in Bezug auf ein Bemessungsereignis
prozentuale Scheitelreduktion pro km² Einzugsgebietsfläche	flächennormierte relative Scheitelreduktion eines Bemessungsereignisses

4.4.3 Maßnahmenzenarien, räumliche Betrachtungsebenen, hydrologische Bezugspunkte und Schutzziele der Simulation

Auf Basis der angepassten Bemessungsniederschläge wurden zwei Abflussvarianten gerechnet und für unterschiedliche räumliche Ebenen dargestellt. Dies ist zum einen der Ausgangszustand für das HQ₁₀₀ (**Variante A1**). In der **Variante A2** werden die Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse für das HQ₁₀₀ simuliert, hier sind jedoch alle potenziellen Hochwasserrückhaltebecken und Teiche integriert und auf ein HQ₁₀₀ optimiert. Im Vordergrund der Variantenrechnung steht das Bemessungshochwasser HQ₁₀₀, weil dies das vom Land Sachsen ausgewiesene Schutzziel ist (SMUL, 2005a; SMUL, 2007). Ein wesentlicher Aspekt der Untersuchungen ist die Betrachtung der örtlichen und überörtlichen Wirkung der oben genannten dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen vom Oberlauf bis zur Mündung der Natzschung in die Flöha. Die Wirksamkeit der simulierten, dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen wird daher für die Varianten **A1 und A2** auf drei räumlichen Ebenen, also für Speicherstandorte, lokale Bezugspunkte und auf Einzugsgebietsebene betrachtet.

Tab. 22: Variantenrechnungen und Betrachtungsebenen für dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen

Variante	Simuliertes Bemessungshochwasser:	Hochwasserrückhaltebecken optimiert für Hochwasser:	Räumliche Betrachtungsebene:		
	HQ ₁₀₀	HQ ₁₀₀	Speicher	lokal	Einzugsgebiet
A1	Δ	*	Δ	Δ	Δ
A2	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
Δ = wurde in dieser Variante berücksichtigt			* = kein Bestandteil dieser Variante		

Auf der untersten Ebene wird die Leistungsfähigkeit der einzelnen Speicher direkt an deren Standort analysiert. Auf den nächst höheren räumlichen Ebenen werden nicht mehr die einzelnen Speicher betrachtet, sondern deren kumulative Wirkung an bestimmten Punkten entlang der Gewässer. Es wird hier unterschieden zwischen lokaler Ebene (LE) und Einzugsgebietsebene (EE). Auf lokaler oder auch örtlicher Ebene stehen die lokalen Ortschaften und Bebauungen in den oberen Einzugsgebieten im Vordergrund. Auf Einzugsgebietsebene steht die kumulative Wirkung aller Speicher am Unterlauf im Fokus. Diese bezieht sich insbesondere auf die Ortschaft Rothenthal bis zum Mündungsbereich in die Flöha und damit auch auf die Stadt Olbernhau.

Die beiden höheren Ebenen verorten sich an festgelegten hydrologischen Bezugspunkten, die im Ergebnisteil genauer benannt und charakterisiert werden. Es kann an diesen Gewässerpunkten eine Aussage über den dortigen Hochwasserverlauf und über mögliche Veränderungen durch oberhalb liegende Speicher getroffen werden.

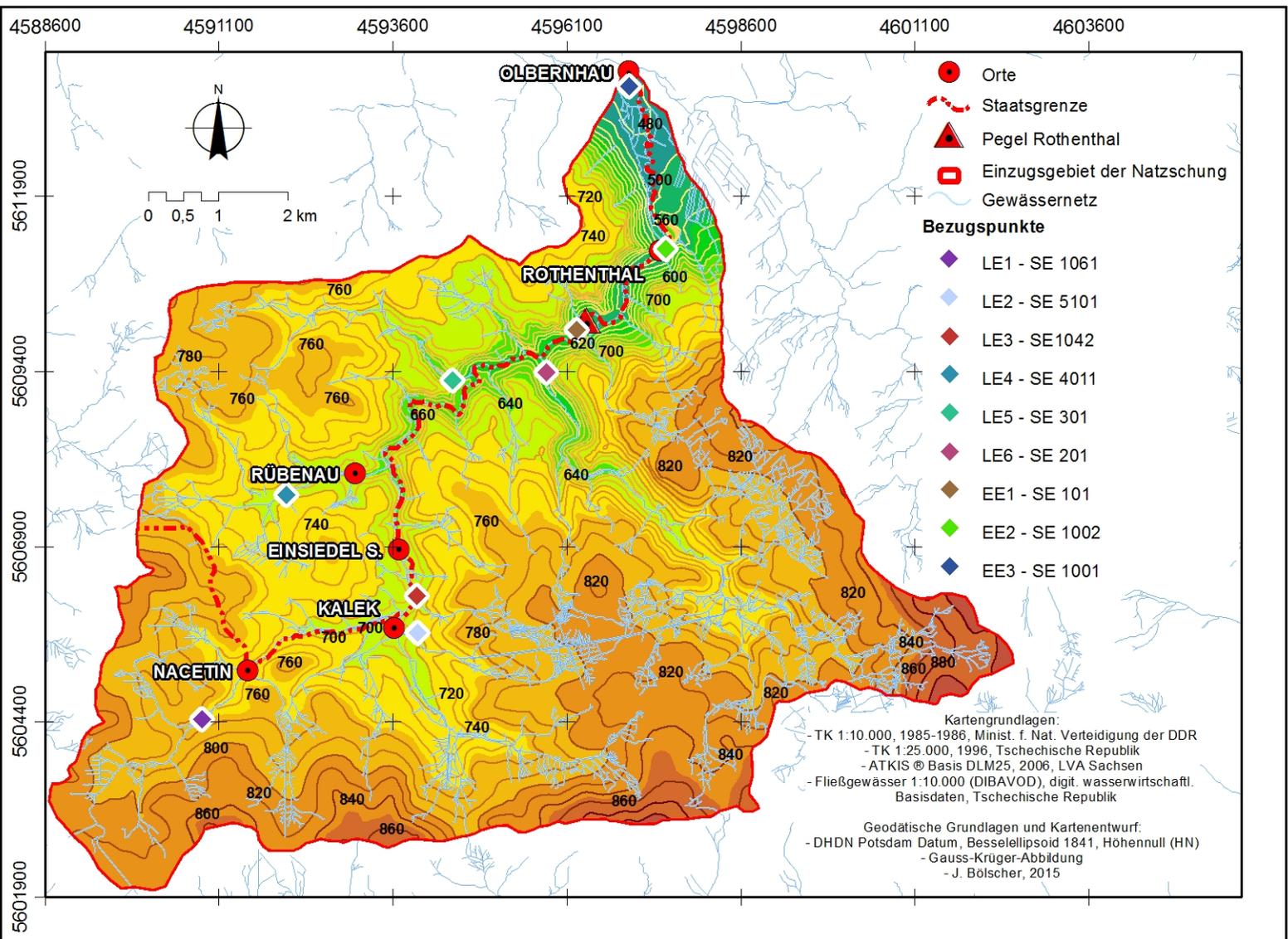


Abb. 31: Lage der potenziellen Schutzziele und Bezugspunkte für die Modellierung und Wirkungsabschätzung (Ortschaften und Bebauungen)

Die Bezugspunkte wurden nach zwei Gesichtspunkten ausgewählt. Sie orientieren sich an den im Einzugsgebiet existierenden Ortschaften bzw. Bebauungen (Schutzziele), die durch ihre unmittelbare Nähe zum Gewässer einem potenziellen Überschwemmungsrisiko ausgesetzt sind. Dies sind die Ortschaften Rothenthal (unterhalb des Bezugspegels gelegen), Rübenau, Einsiedel-Sensenhammer, Kalek und Načetín. Folgende Abbildung und Tabelle geben eine Übersicht über die Schutzziele und deren Lage (Abb. 31: S.154, Tab. 23:, S.155).

Tab. 23: Schutzziele im Einzugsgebiet der Natzschung		
Nr.	Ortschaften	Gewässer
1	Stadt Olbernhau	Flöha
2	Rothenthal (Ortsteil Stadt Olbernhau)	Unterlauf der Natzschung
3	Rübenau (Ortsteil Stadt Marienberg)	Rübenauer Bach
4	Einsiedel-Sensenhammer (Rübenau zugehörig)	Natzschung Mittellauf
5	Kalek (Ortsteil Gemeinde Kalek)	Bily Potok, Jindrichova, Luznice, Natzschung
6	Načetín (Ortsteil Gemeinde Kalek)	Natzschung Oberlauf

Grundsätzlich können für die unterschiedlichen Ebenen anhand der Bezugspunkte die Abflussganglinien durch verschiedene Parameter charakterisiert, eingeordnet und miteinander verglichen werden. Wesentlich sind die Abflussfülle, der zeitliche Verlauf der Abflussganglinie, die Dauer und der Scheitelabfluss des Hochwassers als auch der Bezug dieser Werte zur Einzugsgebietsgröße über die Abflusspende.

5 Modellierung des Untersuchungszeitraums 2002-2008

5.1 Einleitung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen zur Modellierung der Einzugsgebietshydrologie für den Zeitraum 2002-2008. In diesem Kapitel stehen die Fragen zur Qualität der hydro-meteorologischen Eingangsdatensätze, den daraus abgeleiteten hydro-meteorologischen Randbedingungen für die Modellierung und die Modellqualität im Vordergrund.

Es erfolgt eine Prüfung der wesentlichen Eingangsdaten Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss hinsichtlich Homogenität und Plausibilität. Es werden die meteorologischen Randbedingungen im Untersuchungszeitraum besprochen und den gemessenen Abflussganglinien bzw. aufgetretenen Hochwasserereignissen gegenübergestellt. Abschließend wird ein Vergleich zwischen den gemessenen und modellierten Abflussganglinien für den Gesamtzeitraum der Modellierung durchgeführt und anhand von abgeleiteten hydrologischen Kenngrößen und Einzelereignissen die Modellqualität geprüft.

5.2 Charakterisierung der Einzugsgebietshydrologie

Die folgenden Grafiken (Abb. 32: S.158 und Abb. 33: S.159) zeigen die modellrelevanten Zeitreihen für den Niederschlag (Stundenwerte, 7-Tage-Summe und das Tageswert-Monatsmaxima) und den Temperaturverlauf (stündlich) an der Klimastation Olbernhau (715 m. ü. HN). Die Station liegt am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes.

Die stündlichen Niederschlagswerte charakterisieren zusammen mit den Tageswert-Monatsmaxima die kurzzeitigen Impulse und Extremwerte, welche jedoch nicht zwangsläufig zum Abfluss bzw. Hochwasser führen müssen, da neben der Intensität die Dauer von Bedeutung ist. Die 7-Tage-Summe erlaubt hingegen eine Einordnung der für den Abfluss und die Verdunstung zur Verfügung stehenden Niederschlagsmengen (Dauer und Intensität). Hierdurch können Niederschlagsereignisse besser den Abflussspitzen und Hochwasserverläufen zugeordnet werden.

Weiterhin ist die aus Wasserstandsmessungen ermittelte Abflussganglinie für den Pegel Rothenthal an der Natzsung dargestellt. Zur Charakterisierung und Bilanzierung der hydrologischen Halbjahres und Jahresperiode wurden die kumulierten Werte für Niederschlag, Verdunstung (nach Haude) und Abfluss als Summenlinien dargestellt. Die Summenlinienverläufe erlauben darüber hinaus einen Einblick in den Verlauf und die Parallelität der Niederschlag-Abfluss-Reaktion und zeigen etwaige Datenlücken auf. Die Zeitreihen umfassen den Modellierungszeitraum 01. Mai 2002 bis 31. Oktober 2008.

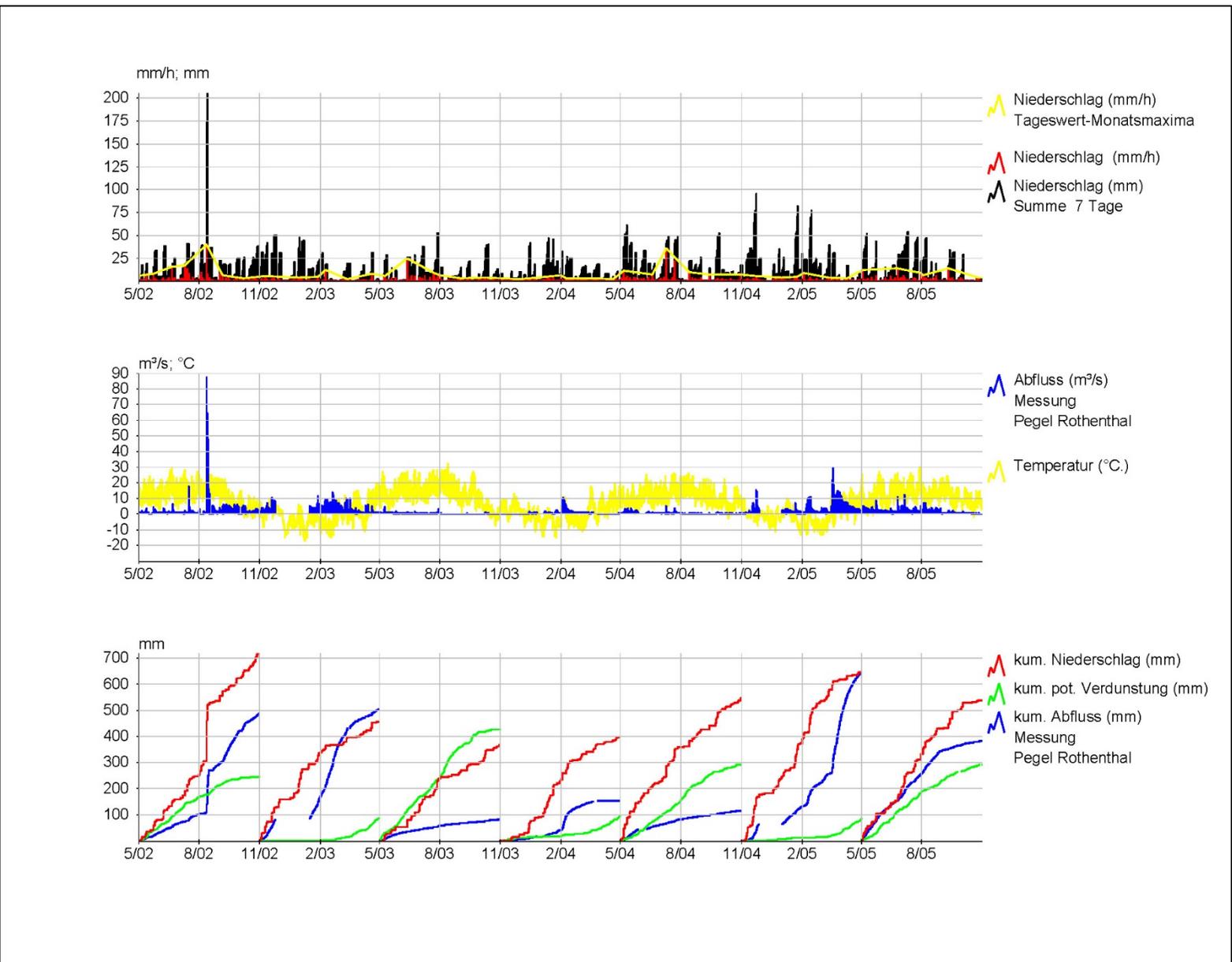


Abb. 32: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss (Messung) für die Klimastation Obbernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 05/2002 – 10/2005)

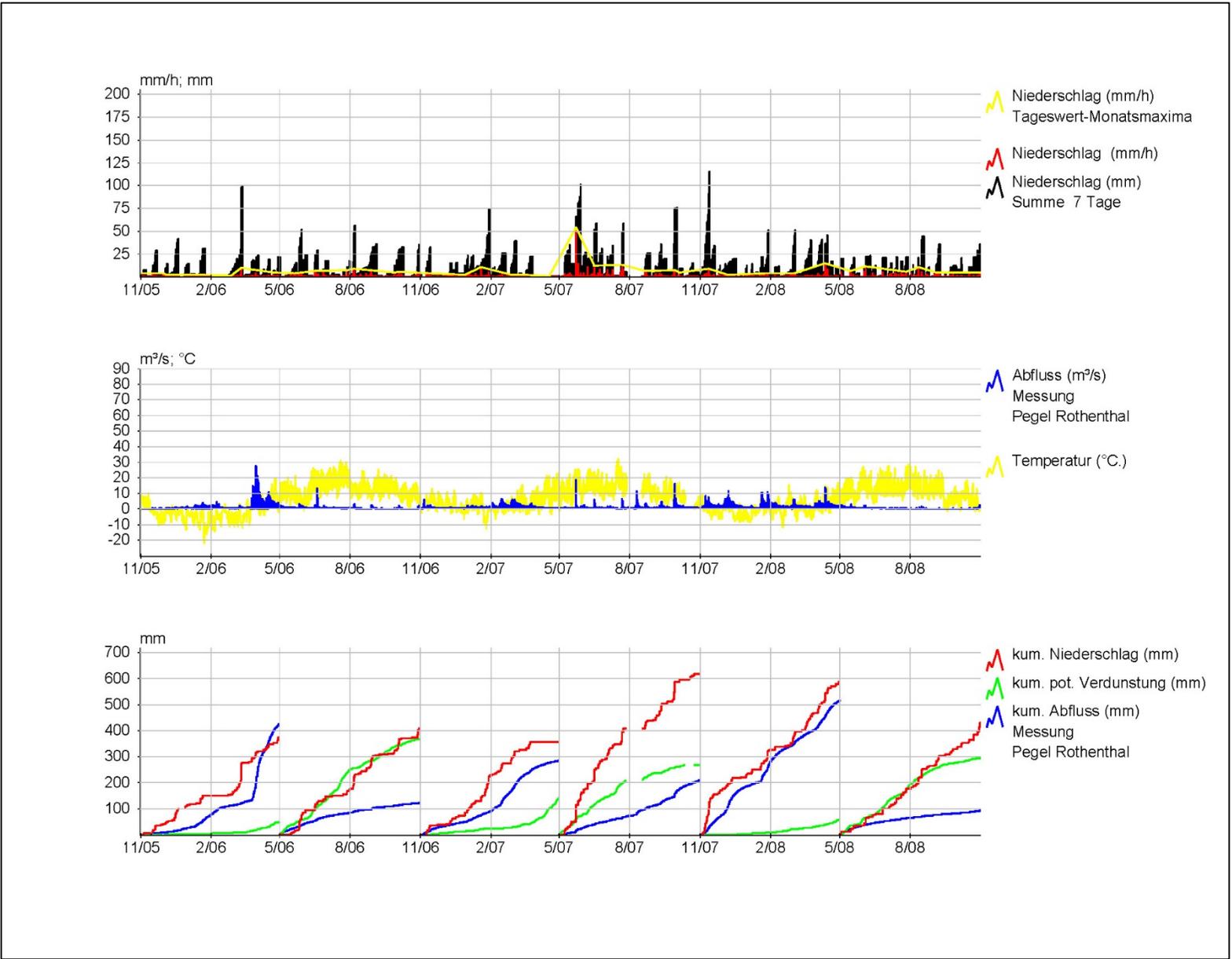


Abb. 33: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss (Messung) für die Klimastation Obernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 11/2005 – 10/2008)

5.2.1.1 Niederschlag

Die Niederschlagsdaten decken den Gesamtzeitraum mit über 98 % ab, es sind 10 größere Datenlücken für folgende Zeiträume bzw. Tage aufgetreten: 21.01.2003, 16.04.2003, 31.03.2004, 29.10.2005, 16.11.2005, 21.-28.12.2005, 01.-08.11.2006, 27.07-16.08.2007, 08.10.2008, 26.10.2008. Die überwiegenden Datenlücken befinden sich am Übergang zum bzw. im Winterhalbjahr und sind relevant für die Entwicklung von Schneedecken und das Abflussvolumen bei der Schneeschmelze. Damit konnten lediglich für zwei kleinere Hochwasser zwischen dem 04.-18.11.2006 bzw. dem 08-11.08.2007 keine Niederschlagsdaten aufgezeichnet und für die Simulation bereitgestellt werden.

Der mittlere Jahreswert des Niederschlages wurde mit 858 mm/a berechnet und liegt damit innerhalb des langjährigen Jahresdurchschnitts der Klimastationen Kühnhaide und Olbernhau (vgl. Tab. 9: S.102; Abb. 17: S.103). Der mittlere Monatswert des Niederschlages wurde mit 66 mm/m und der mittlere Tageswert des Niederschlages mit 7,5 mm/d berechnet. Das stündliche Maximum wurde am 22.05.2007 mit 53 mm/h aufgezeichnet und war damit auch das höchste Tageswert-Monatsmaximum. Weitere stündlichen Spitzen zwischen 25 und 50 mm/h wurden nur noch im August 2002, im Frühsommer 2003 und im Spätsommer 2004 erreicht. Hingegen lag das Maximum der 7-Tage-Summe bei 205 mm und wurde am 13.08.2002 um 0:00 aufgezeichnet. Davon entfielen alleine 180 mm Niederschlag auf den 12.08.2002, die restlichen 25 mm stellten den Vorregen der vorhergehenden 6 Tage im Zuge der aufgetretenen Vb-Wetterlage dar. Am 13.08 fielen innerhalb von 12 Stunden nochmals 25 mm Niederschlag. Und bis zum 06.08.2002 war ein erster Vorregen von 38 mm in 7 Tagen vorweggegangen. In der Summe sind damit zwischen dem 01.-13.08.2002 fast 270 Liter Niederschlag pro Quadratmeter gefallen, was ca. 30 % des langjährigen Jahresmittels entspricht. Ende November 2004, im Januar und Februar 2005, Mitte März 2006, Ende Mai 2007, Ende September 2007 und Mitte November 2007 wurden dazu im Vergleich 7-Tage-Summen zwischen 76 und 115 mm erreicht. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl an Zeiträumen, in denen die 7-Tage-Summe zwischen 25 und 75 mm liegt. Liegt in diesen Zeiträumen die Temperatur deutlich unter 0 Grad Celsius tragen die Niederschläge zum Schneedeckenaufbau bei und sind erst mit der Schneeschmelze abflusswirksam. Bei genauer Betrachtung der Daten fällt zudem auf, dass eine Fluktuation der Temperatur um die Null-Grad Grenze eine unmittelbare Abflussreaktion hervorruft. In allen anderen Fällen kommt es in der Regel zu einer deutlichen Abflussreaktion. Hierin zeigt sich jedoch auch, dass neben der Intensität die Dauer des Niederschlages, also die Bodenvorsättigung über einen mehrtägigen Zeitraum für eine stärkere Abflussreaktion sorgt. Als zweiter hochwasserwirksamer Mechanismus sind die Schneeschmelzen zu betrachten.

5.2.1.2 Temperatur

Die stündliche Temperaturzeitreihe ist mit Ausnahme folgender Bereiche als vollständig zu betrachten: 26.-29.09.2005, 28.10.2005, 30.11.2005, 01.-08.11.2006, 12.-23.10.2007. Die mittlere Temperatur liegt bei 5,8° Celsius, das Minimum wurde am 23.01.2006 mit -22 °C und das Maximum mit +32° C am 16.07.2007 gemessen. Die Temperaturwerte unterschreiten in der

Regel die Null-Grad-Grenze Ende Oktober und bleiben dann bis etwas Mitte März zum Teil deutlich darunter. Häufig werden im Winterhalbjahr Werte zwischen -10 und -20° Celsius erreicht. Im Sommer werden in der Regel Werte deutlich über 15° Celsius gemessen. Jedoch ist die Spannweite hier sehr breit angelegt, so dass es zu täglichen Schwankungen kommt, die bis nahe an den Gefrierpunkt heranreichen. Die Temperaturwerte liegen genauso wie ihr zeitlicher Verlauf in einem plausiblen Bereich ohne markante Besonderheiten und werden durch die Literatur bestätigt (vgl. Tab. 8: S.101 & Tab. 9: S.102). Unsicherheiten bestehen in der räumlichen Extrapolation der Daten hinsichtlich Höhenabhängigkeit und Exposition. Daraus resultieren aber auch sekundäre Unsicherheiten, da diese Daten als Grundlage zur Verdunstungsberechnung dienen.

5.2.1.3 Abfluss

Die gemessene Abflussganglinie deckt ca. 95 % des Gesamtzeitraumes ab. In Tab. 24: (S.162) sind die Zeiträume mit Messwertlücken und Beobachtungen zur Ursache der Ausfälle und Unregelmäßigkeiten dokumentiert, da sich diese direkt auf die Beurteilung der Modellgüte auswirken. Die überwiegenden Messlücken und Unregelmäßigkeiten traten im Winterhalbjahr während der Frostperiode auf. Sie sind damit vermutlich auf das Einfrieren des Pegels zurückzuführen. Es kommt neben den Ausfällen zu teilweise markanten Pegelsprüngen, die auf die Ausbildung und das Aufbrechen einer Eisdecke bzw. auf Eisschollen hinweisen. Markant sind aber vor allem die sehr untypisch verlaufende Abflussganglinie und der temporäre Pegelausfall auf dem absteigenden Hochwasserast im August 2002. Nach mündlichen Aussagen des örtlichen Wasserbaumeisters und nach einem Bericht des LFULG kam es mit dem Hochwasser zunächst zu massiver Ablagerung von Geschiebe im Bereich der Pegelanlage und darüber hinaus zu einem Uferabbruch (LFULG, 2009). Dies wird mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu einer Wasserstandserhöhung auf dem absteigenden Hochwasserast und die Freiräumung des Pegels durch Bagger zu einem abrupten Abfall geführt haben. Ein Uferabbruch während des Hochwassers würde hingegen einen kurzfristigen Pegelabfall bedeuten, der durch die Geschiebe zunächst kompensiert wird. Bis Anfang Oktober sind weitere Datenausfälle und Sprünge in der Abflussganglinie zu verzeichnen. Sie weisen darauf hin, dass weitere Sanierungsarbeiten im Gerinne durchgeführt wurden und die Pegeldata in diesem Zeitraum unsicher sind. Im weiteren Verlauf des Untersuchungszeitraumes sind mit Ausnahme der o.g. Winterereignisse keine markanten Ausfälle zu verzeichnen. Die Zeitreihe kann damit als Grundlage zur Modelleichung verwendet werden, jedoch müssen für den absteigenden Hochwasserast im August 2002 und für die winterlichen Frostperioden Unsicherheiten berücksichtigt werden, die sich negativ auf die Modellgüte auswirken können.

Tab. 24: Unregelmäßigkeiten in der Abflussganglinie am Pegel Rothenthal	
Zeiträume mit Messwertlücken	Beobachtung
Sommerhalbjahr	
13.08.-22.08.2002 (Unregelmäßigkeiten und Ausfall)	Starke Sedimentablagerungen und Uferabbruch
14.08.2002	abrupter Pegelsprung, Sedimentbeseitigung
16.08.-22.08.2002 (keine Werte)	abrupte Pegelsprünge, Pegelausfall, evtl. weitere Sedimentbeseitigung
05.09.-09.10.2002 (Unregelmäßigkeiten und Ausfall)	
30.09.-09.10.2002 (keine Werte)	
21.05.2003 (Unregelmäßigkeiten)	Über 2 Tage ein jeweils ca. einstündiger Messwertausfall zwischen 21:00 und 23:00
08.07.2003 (Unregelmäßigkeiten)	
28.05.-09.06.2004 (keine Werte)	Keine Beobachtung
17.07.-19.07.2005 (keine Werte)	
Winterhalbjahr	
02.11.-04.11.2002 (keine Werte)	Temperaturen z.T. deutlich unter dem Gefrierpunkt,
24.11.-15.01.2003 (keine Werte)	
14.03.-17.03.2003 (keine Werte)	
20.03.-26.03.2004 (keine Werte)	
26.11.-31.12.2004 (keine Werte)	
23.01.-08.02.2005 (sporadischer Ausfall)	
03.11.-31.12.2005 (sporadischer Ausfall)	
01.01.-02.02.2006 (sporadischer Ausfall)	
24.03.-16.04.2006 (sporadischer Ausfall)	

Die vorliegenden Pegeldaten wurden genutzt, um die hydrologische Situation für den Untersuchungszeitraum genauer beschreiben zu können. Zwischen 2002-2009 ergibt sich eine Mittelwasserführung von $1,47 \text{ m}^3/\text{s}$, die mittlere Niedrigwasserführung beträgt $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, während sich eine mittlere Hochwasserführung von $26 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Dieser Wert ist jedoch vor allem durch das Extremereignis von 2002 geprägt.

Der Vergleich der gewässerkundlichen Daten für die langjährige Periode zwischen 1929 und 2009 und der hierfür erweiterten Untersuchungsperiode bis zum 31.12.2008 zeigt, dass die mittleren Niedrigwasserabflüsse und Mittelwasserabflüsse für die Untersuchungsperiode in einem plausiblen Wertebereich liegen. Die mittleren Hochwasserabflüsse liegen hingegen zum Teil deutlich über den langjährigen Messwerten, was durch mehrere größere Hochwasserereignisse im Zeitraum 2002-2009 bedingt ist. Sowohl die Niedrigwasserabflüsse als auch der sommerliche Mittelwasserabfluss liegen leicht unterhalb der langjährigen Messwerte. Dies zeigt zum einen eine geringe Wasserverfügbarkeit durch geringere Niederschläge und höhere Verdunstungsanteile über das Jahr. Da die mittleren Werte beider Perioden insgesamt ähnliche Tendenzen haben, die mittleren Hochwasserabflusswerte erklärbar sind und die Werte innerhalb der Untersuchungsperiode zueinander ähnliche Verhältnisse aufweisen wie die Werte des langjährigen Betrachtungszeitraumes, werden aus dieser Sicht die Zeitreihen als robust genug erachtet für die Nutzung im Rahmen der Modellsimulation.

Tab. 25: Vergleich von gewässerkundlichen Hauptwerten auf Basis von Messungen zwischen 1929-2009 und 2002-2009 – Pegel Rothenthal

	Messung 1929-WH2009			Messung 2002-WH2009		
	Jahr	Sommer	Winter	Jahr	Sommer	Winter
MNQ	0,27	0,34	0,37	0,15	0,16	0,33
MQ	1,37	1,07	1,68	1,47	0,89	1,92
MHQ	15	11,8	10,9	26,02	18,15	13,71

Der Gesamtverlauf der Abflussganglinie ist durch insgesamt 11 Hochwasserereignisse geprägt, die im Scheitel mindestens einem HQ_2 entsprechen. 7 Ereignisse liegen deutlich oberhalb dieser Grenze von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 26: unten). 3 von 7 HQ 's liegen zum Teil deutlich oberhalb des von der LFUG berechneten mittleren Hochwasserabflusses von $15 \text{ m}^3/\text{s}$. 4 Ereignisse liegen unterhalb eines HQ_{10} , zwei unterhalb eines HQ_{20} , und das Augusthochwasser 2002 entspricht als HHQ einem HQ_{237} . 3 von 7 HQ 's zählen zu den 10 höchsten Abflüssen, die seit Beginn der Aufzeichnungen gemessen wurden. Ein HQ_{100} findet sich nicht in der Zeitreihe. 4 Ereignisse liegen im hydrologischen Sommerhalbjahr, die 3 weiteren Ereignisse befinden sich im hydrologischen Winterhalbjahr und wurden durch Schneeschmelzen ausgelöst. Sie lagen allesamt oberhalb des langjährigen mittleren Hochwasserabflusses von $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$ für das Winterhalbjahr. Alle Ereignisse verteilen sich auf die Jahre 2002, 2004, 2005, 2006 und 2007.

Im Vergleich zu den gemessenen Niederschlags- und Temperaturdaten zeigen die Abflusswerte eine insgesamt plausible Reaktion hinsichtlich des Eintritts, Anstiegs, der Höhe und dem Verlauf des Hochwassers. Unregelmäßigkeiten lassen sich durch Datenlücken und Frostperioden erklären.

Die Analyse der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen zeigt, dass für den Untersuchungszeitraum eine entsprechend große Anzahl an Hochwasserereignissen auftrat. Von besonderem Interesse für die Modellierung ist das Hochwasser vom August 2002. Als weitere markante Ereignisse traten im Frühjahr 2005 und 2006 zwei Schneeschmelzen auf, denen jeweils über das Jahr verteilt mehrere kleinere Hochwasserereignisse folgten. Die Beobachtungen haben zur Konsequenz, dass das hydrologische Modell unterschiedlichen auslösenden Prozessen der Hochwasserentstehung und einer sehr weiten Amplitude von Hochwasserereignissen Rechenschaft tragen muss.

Tab. 26: Hochwasserscheitelabflüsse oberhalb des MHQ (15 m³/s) im Untersuchungszeitraum 2002-2008 und deren Eintrittswahrscheinlichkeit

Datum	Hochwasserscheitelabflüsse (HQ)	Bereich der Eintrittswahrscheinlichkeiten (T)	Jahreszeit
16.07.2002	17,5	HQ ₂ – HQ ₁₀	Sommerhalbjahr
12.08.2002 (Höchstwert des hydrologischen Halbjahres)	88	HQ ₂₃₇ ; HHQ	Sommerhalbjahr
23.11.2004	15,3	HQ ₂ – HQ ₁₀	Winterhalbjahr (Niederschlag / Schneeschmelze)
18.03.2005 (Höchstwert des hydrologischen Halbjahres)	29,4	HQ ₁₀ - HQ ₂₀	Winterhalbjahr (Schneeschmelze)
31.03.2006	27,4	HQ ₁₀ - HQ ₂₀	Winterhalbjahr (Schneeschmelze)
22.05.2007 (Höchstwert des hydrologischen Halbjahres)	18,9	HQ ₂ – HQ ₁₀	Sommerhalbjahr
28.09.2007	16,1	HQ ₂ – HQ ₁₀	Sommerhalbjahr

Quelle: (LfUG, 2004b; LFULG, 2009; LFULG, 2010; LFULG, 2011c)

Damit können jedoch auch zwei Bezugszeiträume gewählt werden, um eine Kalibrierung durchzuführen und diese Ergebnisse auf einen Validierungszeitraum zu übertragen. Jedem Bezugszeitraum sollten mindestens ein größeres Schneeschmelzeereignis und ein größeres Regenereignis zugrunde liegen. Sowohl die Datenverfügbarkeit als auch die dargestellte hydrologische Amplitude erlauben es, den Zeitraum zwischen 2002 und 2008 als Grundlage für die Modellierung auszuwählen und einen Zeitraum von 7 Jahren zeitlich hochaufgelöst zu modellieren.

5.2.1.4 Summenkurven und Wasserbilanzen

Es wurden die Jahres- und Halbjahressummen für Niederschlag, Verdunstung, klimatische Wasserbilanz und Abfluss auf mögliche Differenzen und Fehlbeträge geprüft und abschließend mit langjährigen Pegeldaten und DWD-Daten verglichen. Die Jahressummen für Niederschlag, Verdunstung und Abfluss zeigen für die jeweiligen Jahresabschnitte folgende Werte auf, die in obigen Diagrammen (vgl. Abb. 32: S.158, Abb. 33: S.159) als Summenlinien aufgetragen und in Tab. 27: gegenübergestellt wurden. Aus den Niederschlags- und Verdunstungswerten wurde die klimatische Wasserbilanz ermittelt und dem gemessenen Abfluss nochmals gegenübergestellt. Die höchste Niederschlagssumme wurde im Jahre 2002 und die niedrigste für das Jahr 2003 erzielt.

Die halbjährlichen Niederschlagssummen erreichen im Sommer 2002 und 2007 und im Winter 2005 und 2007 ihre Maximalwerte zwischen 600 und 700 mm. Abrupte Sprünge zeigen im Sommer intensive und andauernde Niederschläge an. Im Winter deuten diese Sprünge in Kombination mit niedrigen Temperaturen und fehlenden Abflüssen auf den Aufbau von Schneedecken. Im Sommer zeigen die kumulierten Halbjahressummen für den Abfluss in ihrem Verlauf sehr deutlich die unmittelbare Reaktion auf intensivere Niederschlagsereignisse durch einen sprunghaften Anstieg an (bspw. 08/2002). Dies gilt noch weitaus stärker für die Überschreitung der Null-Grad-Grenze und der hierdurch ausgelösten Schneeschmelze (02/2004, 11/2004, 03/2005, 03/2006, 02/2007, ab 11/2007). Die Verdunstungssumme verläuft wie zu erwarten im Sommer sehr steil, verläuft zum Teil genau wie die Niederschlagskurve, knickt zum Herbst ab und steigt über den Winter nicht weiter an. Mit Überschreitung der Null-Grad-Grenze steigen die Verdunstungssummen im Frühjahr wieder an.

Im Sommer übertrifft die Verdunstung die Abflüsse, in 2003 und 2006 werden sogar die Niederschlagssummen erreicht. Entsprechend flach verläuft in diesen Jahren die Abflusskurve in den Sommermonaten. Insgesamt bleiben somit im Sommer die Abflusssummen unterhalb der potenziellen Verdunstung, was sich in den entsprechenden Niedrigwasserabflüssen bemerkbar macht. Ausnahmen finden sich im Sommer 2002 und 2005.

Weiterhin übersteigen die Niederschlagssummen in der Regel die potenziellen Verdunstungssummen und zeigen eine positive Wasserbilanz an. Der heiße Sommer 2003 und der Sommer 2006 bilden eine Ausnahme. Die Summe der potenziellen Verdunstung ist am Ende dieser beiden Perioden auf ähnlichem bzw. höherem Niveau. Geringe Niederschlagssummen im Wechselspiel mit hohen Temperaturen und der damit einhergehenden hohen potenziellen Verdunstung spiegeln sich im flachen Verlauf der Abflusssummenkurven.

Die Abflusssummen liegen erwartungsgemäß unterhalb der Niederschlagssummen. Insbesondere in den Sommerhalbjahren sind diese Differenzen zugunsten der potenziellen Verdunstung sehr deutlich ausgeprägt. Somit liegen in den Winterhalbjahren die Abflusssummen immer auch ähnlich hoch wie die Niederschlagssummen. In den Jahren 2003 und 2006 werden sie hingegen leicht überstiegen, was auf Ungenauigkeiten und Probleme bei der Niederschlagserfassung hindeutet. Im Sommer 2002 und 2005 bzw. im Winter 2003, 2005, 2006, 2007 und 2008 zeigen die Kurven von Niederschlag und Abfluss eine weitestgehend gute Übereinstimmung bzgl. einer Veränderung in den Kurvenverläufen. Die Summenkurven sind sowohl im jahreszeitlichen Verlauf als auch im Verhältnis zueinander als plausibel anzusehen. Sie zeigen anhand der Sprünge die Niederschlag-Abfluss-Reaktionen und den Aufbau und das Abschmelzen der Schneedecken auf. Sie können damit als Grundlage zum Vergleich mit Simulationsdaten herangezogen werden.

Tab. 27: Klimatische Wasserbilanz (KWB) im Vergleich zum gemessenen Abfluss am Pegel Rothenthal					
	N [mm]	V [mm] / [%]	KWB [mm]	Abfluss Q [mm]	Differenz
	Messung	Berechnung (nach Haude)	Berechnung KWB = N-V	Messung	Berechnung Q-KWB
05/2002-04/2003	1172	334 / 28%	838	990	152 * ¹
05/2003-04/2004	763	522 / 68%	241	235	-6 * ²
05/2004-04/2005	1192	374 / 31%	818	759	-59 * ²
05/2005-04/2006	912	342 / 37%	570	570	0
05/2006-04/2007	764	506 / 66%	258	381	123 * ¹
05/2007-04/2008	1204	325 / 27%	879	613	-266 * ²
05/2008-10/2008	497	295 / 60%	202	96	-106 * ²
* ¹ = Wert, um den die Niederschlagsmessung unterschätzt & die Verdunstungsberechnung überschätzt wird					
* ² = Wert, um den die Niederschlagsmessung überschätzt & Verdunstungsberechnung unterschätzt wird					

Abschließend werden zur genaueren Abschätzung von Volumenfehlern die Wasserbilanzen für die einzelnen Jahre dargestellt. Die Werte zum Vergleich zwischen der klimatischen Wasserbilanz und den gemessenen Abflusswerten (Tab. 27: oben) zeigen, dass in zwei Jahren die Niederschläge unterschätzt werden bzw. die Verdunstung zu hoch ausfällt. Für die Jahre 2003-2004 und 2005-2006 fallen die Differenzen sehr gering aus bzw. sind nicht vorhanden, was für die Qualität der Daten spricht. In den restlichen drei Jahren müssen hingegen die Niederschlagsmessungen als zu hoch angesehen und die Verdunstungswerte als zu niedrig betrachtet werden.

Die relativen Verdunstungswerte schwanken zwischen 27 und 68 % und nehmen damit eine große Bandbreite ein. Der Abfluss bewegt sich jährlich zwischen 235 und 990 mm (ohne 2008). Die KWB bewegt sich zwischen 241 und 879 mm (ohne 2008) in einem sehr ähnlichen Bereich, so auch die jährlichen Unterschiede. Die jährlichen Niederschlagssummen schwanken schlussendlich zwischen 763 und 1204 mm (ohne 2008). Die Ergebnisse decken sich im Vergleich mit den Literaturwerten aus Kapitel 3.6 (Klima). Die Jahre 2002, 2004 und 2007 können als feucht-kalt angesehen werden, sie sind gekennzeichnet durch niedriger Verdunstungswerte, hohe Niederschläge und Abflüsse. Die Jahre 2003 und 2006 müssen hingegen als trocken und warm angesehen werden. Sie sind durch sehr hohe Verdunstungswerte und niedrige Abflüsse gekennzeichnet. Das Jahr 2005 bewegt sich in einem mittleren Wertebereich, welcher sich am ehesten an die langjährigen klimatischen und hydrologischen Mittelwerte anlehnt.

In der Konsequenz bedeutet dies für die Modellkalibrierung, dass das Modell nur bedingt auf beide Extrembereiche (feucht-kalt & trocken-warm) angepasst werden kann, da sowohl Niederschlag als auch Verdunstung als steuernde Größen schon bei den Messungen über- und unterschätzt werden.

5.3 Modellqualität

Der Modellkalibrierung liegt eine Pegelzeitreihe von 2006 bis 2008 und der Modellvalidierung eine Zeitreihe von 2002-2005 für den Pegel Rothenthal zugrunde (vgl. Abb. 34: S.169 & Abb. 35: S.170). Kalibrierung und Validierung wurden in 60 Minuten Zeitschritten durchgeführt, um der Dynamik des Einzugsgebietes Rechnung tragen zu können. Der detaillierte Vergleich zwischen gemessener und modellierter Abflussganglinie gibt Aufschluss darüber, in welchen Zeitsegmenten gute und weniger gute Übereinstimmung herrscht. Hierzu wurden vorhergehende Grafiken (Abb. 32: S.158, Abb. 33: S.159) um die simulierten Abflussganglinien (orange) als Zeitreihe und als Summenkurven für die hydrologischen Halbjahre ergänzt. Zudem wurde der zeitliche Verlauf des modellierten Schneewassergehalts den Summenkurven hinzugefügt. Hierüber konnte geprüft werden, ob in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung und den Niederschlägen im Modell ein Schneedeckenaufbau stattfand. Erwartet wurde zudem, dass die Schneedeckenentwicklung während des Aufbaus einhergeht mit niedrigen Abflüssen und eine Verringerung des Schneewassergehaltes eine Abflussreaktion sowohl bei der gemessenen als auch bei der modellierten Ganglinie hervorruft.

Erwartet wurde auch, dass die zuvor besprochenen 7 Hochwasserereignisse vom Modell in ihrem Verlauf und in den Scheiteln plausibel abgebildet werden. Die Niedrigwasserabflüsse sind für die Zielsetzung der Arbeit nur von untergeordneter Bedeutung. Die Werte sind darüber hinaus durch Pegelausfälle im Winter mit Unsicherheiten behaftet. Auch zeigen die mittleren Niedrigwasserabflüsse im Vergleich zu den langjährigen Daten möglicherweise eine Unterschätzung an.

Für jedes hydrologische Halbjahr wurde zur generellen Bestimmung der Modellgüte der Nash-Sutcliffe-Effizienzgrad berechnet und als Linie für die jeweilige Periode der mittleren Grafik hinzugefügt.

Modellkalibrierung

Für den Zeitraum 2006-2008 werden die in Tab. 26: (S.164) dargestellten Hochwasserereignisse im Verlauf und auch in den Spitzen getroffen. Auch die kleineren Ereignisse werden in der Niederschlag-Abfluss-Reaktion erfasst, liegen aber in den Scheiteln zumeist zu niedrig (vgl. Abb. 35: S.170). Das Hochwasser am 19.06.2006 wurde mit einem Scheitel von 13 m³/s gemessen, jedoch im Modell nicht abgebildet. Für diesen Zeitraum lagen Niederschlagsdaten vor, sie betragen in der 7-Tage-Summe 29 mm, wovon schon 23 mm am 17.06.2006 abregneten und zu einem kleineren Abflusspeak führten. Die Restmenge fiel im Maximum erst am 19.06.2006 gegen 18:00. Der Hochwasserscheitel trat hingegen schon gegen 16:30 ein. Dies lässt den Schluss zu, dass die Klimastation entweder zu geringe Niederschlagsmengen aufgezeichnet hat oder das sich das Niederschlagszentrum weiter südlich im Einzugsgebiet befand und nicht von der Station erfasst werden konnte. Der Ganglinienverlauf ist sehr markant und stellvertretend für eine Reihe weiterer kleinerer Hochwasserverläufe. Es tritt weder ein Vorscheitel, noch ein zweiter Peak auf dem abfallenden Hochwasserast auf. Alles zusammen deutet auf sehr lokale, kurze aber intensive Ereignisse ohne Vorregen hin. Der Verlauf ist identisch mit dem größeren Hochwasser vom 22.05.2007 (in 2 Stunden 53 mm Niederschlag), welches hingegen sehr gut bzgl. des Verlaufes und des Scheitels simuliert werden konnte.

Das am 10.08.2007 gemessene Ereignis mit einem Hochwasserscheitel von 11 m³/s konnte ebenfalls aufgrund der fehlenden Niederschlagsmessung nicht im Modell abgebildet werden. Ein dazu im Verlauf identisches Hochwasser wurde jedoch berechnet. Dies fand am 28.09.2007 statt. Ein Vorregen mit 27 mm in 11 Stunden sorgte für eine erste Bodensättigung, einen hohen Direktabfluss und einem ersten kleineren Abflussscheitel. Im weiteren Verlauf fielen in den folgenden 7 Stunden nochmals 30 mm Niederschlag und verursachten einen Hochwasserscheitel von 16 m³/s, dem ein weiterer Scheitel von knapp 7 m³/s folgte.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Scheitel des Vorregens durch eine Kombination aus Oberflächenabfluss von versiegelten und unversiegelten Flächen verursacht wurde. Der Hauptscheitel ist insbesondere auf natürlichen Oberflächenabfluss, jedoch der folgende Peak durch einen starken Anstieg des Zwischenabflusses zurückzuführen.

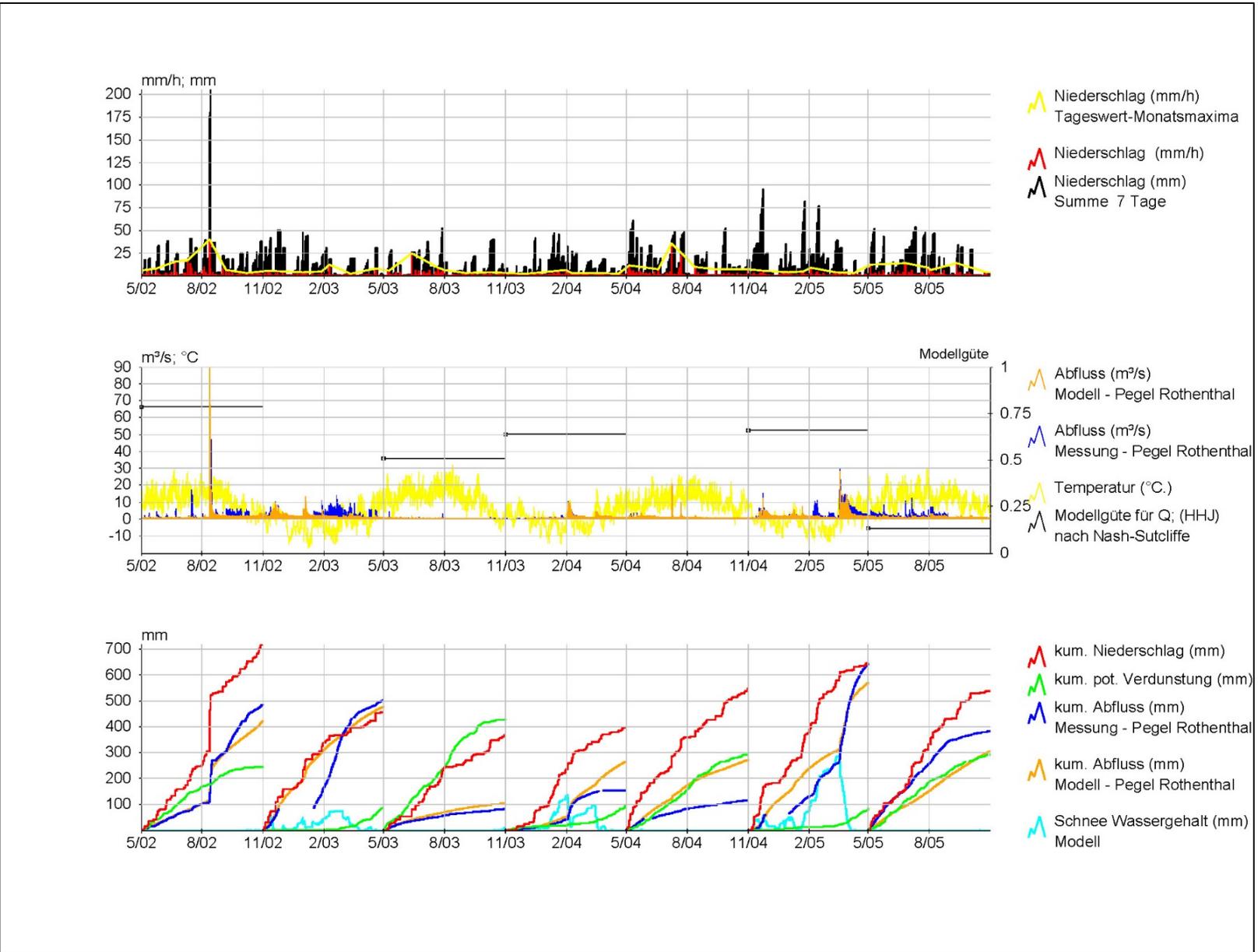


Abb. 34: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Wassergehalt Schnee und Abfluss (Modell und Messung) für die Klimastation Obernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 05/2002 – 10/2005)

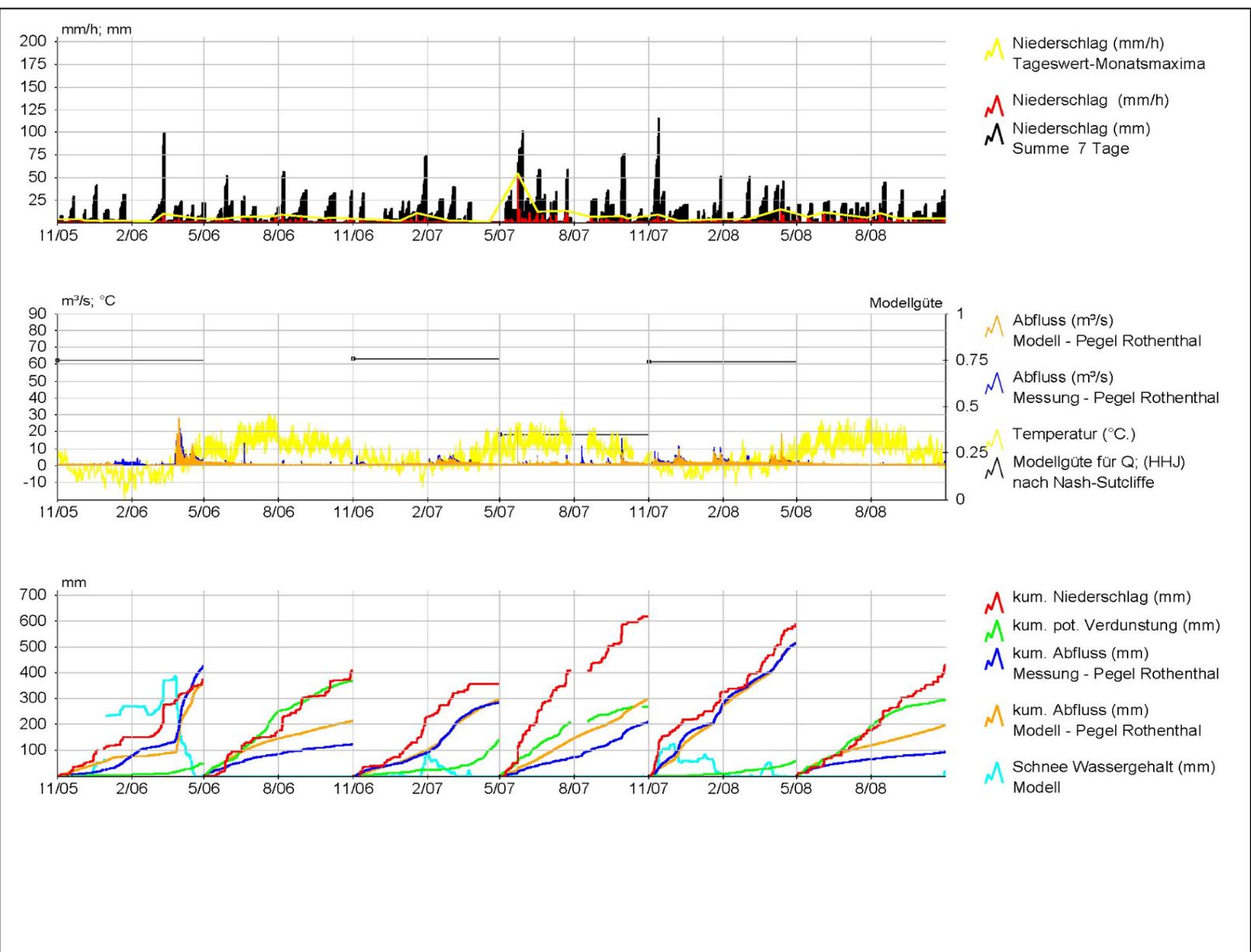


Abb. 35: Verlauf von Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Wassergehalt Schnee und Abfluss (Modell und Messung) für die Klimastation Obernhau und den Pegel Rothenthal (Zeitraum 11/2005 – 10/2008)

Der Verlauf, jedoch nicht die Höhe des Scheitels konnte im Modell dargestellt werden, was erneut darauf hindeutet, dass die Niederschlagssummen zu niedrig sind. Der folgende Basisabfluss ist jedoch als zu hoch einzustufen und zeigt an, dass zu viel Wasser in den Bodenkörper infiltriert und auch wieder exfiltriert, jedoch nicht als schneller Zwischenabfluss zur Verfügung steht.

Die Zeiträume 11/2005-04/2006, 11/2006-04/2007 und 11/07-04/2008 können hinsichtlich der Modellgüte mit einem NSE von knapp über 0,75 angegeben werden und erreichen damit einen sehr hohen Effizienzgrad. Hingegen kann das Modell die beiden Sommerhalbjahre 05/2006-10/2006 und 05/2008-10/2008 nicht erklären. Das Sommerhalbjahr 2007 kann mit einem NSE von 0,35 in nicht befriedigendem Maß vom Modell erklärt werden. Hingegen werden die Winterhalbjahre vergleichsweise gut dargestellt. Die Probleme der Modellanpassung in den Sommerhalbjahren sind auf eine unzureichende Abbildung des Basisabflusses, sowie auf fehlende oder zu geringe Niederschläge zurückzuführen, was sich vor allem bei sehr kleinen Ereignissen besonders stark bemerkbar macht. Die Abflussreaktionen werden im Modell in erster Linie durch einen starken Anstieg des Oberflächenabflusses hervorgerufen, bleibt dieser durch eine genügend große Infiltrationsrate, zu geringe Niederschlagsintensitäten über einen Mindestzeitraum und fehlende Bodenvorsättigung aus, reagiert das Modell nur sehr schwach auf die Niederschläge. Dies macht sich deutlich bemerkbar bei der Abbildung kleiner Abflussspitzen ($< 10 \text{ m}^3/\text{s}$) und führt zusammen mit Messlücken zu einem unzureichendem Gütemaß. Die kumulierten Abflüsse aus Messung und Modellierung zeigen für die Winterhalbjahre eine sehr gute Übereinstimmung in der Summe als auch im Verlauf. Die Abbildung der Schneeschmelzen verläuft im Kalibrierungszeitraum 2006-2008 insgesamt sehr gut. Die Anfangsbedingungen für die Schneehöhe im März 2006 konnten auf Basis eigener Beobachtungen und Vermessungen relativ genau angegeben und im Modell abgebildet werden, wodurch das Schneeschmelzereignis sowohl im Verlauf als auch in Volumina und Hochwasserspitze recht genau erfasst wird. Auch die weit aus kleineren Ereignisse Ende 2007 und Anfang 2008 werden durch das Modell gut dargestellt.

Die Hochwasserereignisse im Frühsommer bis Herbst 2006 und 2007 sind nur eingeschränkt abgebildet worden. Die Kurven zeigen in der Summe immer einen zu hohen Wert an, die schwachen Anstiege zeigen aber auch, dass die Abflüsse im Sommer durch Niedrig- und Mittelwasserführung dominiert werden und im Vergleich zum Winter kaum hochwasserbedingte Sprünge im Abflussvolumen auftreten. Hingegen sind die Verläufe und Anstiege zwischen Messung und Modell im Sommer insgesamt ähnlich, befinden sich jedoch auf unterschiedlichen Niveaus.

Die drei definierten Hochwasserereignisse für den Kalibrierungszeitraum 2006-2008 mit $Q > 15 \text{ m}^3/\text{s}$ wurden in der Simulation plausibel abgebildet und konnten darüber erklärt werden. Der Nash-Sutcliffe Effizienzgrad lag mit einem NSE zwischen 0,54 und 0,67 in einem befriedigenden bis guten Bereich.

Die abschließende Betrachtung des Gütemaßes für den Gesamtkalibrierungszeitraum (2006-2008) zeigt einen Effizienzgrad NSE von 0,73. Damit können 73 % der gemessenen Durchflusswerte durch das Modell erklärt werden können.

Modellvalidierung

Insgesamt konnte damit das Modell die wesentlichen Ziele erfüllen und wurde in einem zweiten Schritt anhand der Eingangsdaten für den Zeitraum 2002-2005 validiert (Abb. 34: S.169). Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Kalibrierungszeitraum. Sowohl das kleinere Schneeschmelzereignis Februar 2004 als auch die größere Flut im Februar 2005 konnten plausibel abgebildet werden (vgl. Tab. 26: S.164). Im Validierungszeitraum 2002 bis 2005 werden zunächst kleinere Hochwasserereignisse zwischen Mai und Juni 2002 nicht vom Modell abgebildet, was durch die kurze Vorlaufzeit des Modells begründet ist. 2003 traten keine nennenswerten Hochwasser auf. In 2004 zeigt das Modell im Juli eine starke Abflussreaktion, die jedoch nicht in der Höhe gemessen wurde (konvektiver, lokal begrenzter Regen, der aber nicht abflusswirksam wurde). In 2005 zeigt sich ein gegensätzliches Bild, kleinere Hochwasserereignisse zwischen Mai und September werden vom Modell ansatzweise abgebildet, jedoch entsprechen die Hochwasserscheitel und -volumina nicht den gemessenen Werten. Sehr realitätsnah wird demgegenüber das Augusthochwasser von 2002 vom Modell simuliert, sowohl die zeitliche Abflussreaktion als auch Hochwasserscheitel und -volumen werden gut erfasst. Lediglich im Bereich des abfallenden Hochwasserastes ergibt sich ein ungleicher Verlauf, der auf Veränderung der W-Q-Beziehung durch Geschiebesedimentation am Pegel zurückzuführen ist.

Die kumulierten Abflüsse aus Messung und Modellierung zeigen für die Winterhalbjahre der Validierungsperiode eine befriedigende bis gute Übereinstimmung in der Summe als auch im Verlauf. Datenlücken in der Abflussmessung bedingen Ende 2002 und 2004 Sprünge in den Kurven, weshalb also das Modell die Summen nicht überschätzt. Eine vollständige Datenreihe würde eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Modell bringen. Im Februar 2005 kann das Modell die Abflussganglinie nicht abbilden. Bei genauer Betrachtung der Messdaten zeigt sich jedoch, dass es sich hier um einen Messfehler handeln muss. Die Temperaturdaten liegen weit unter der Null-Grad-Grenze. Zudem verzeichnet der Pegel abrupte Sprünge. Beides spricht somit für ein Einfrieren des Pegels. Ähnlich verhält sich die Situation im Februar 2002. Daher können die Modelldaten als plausibel betrachtet werden. Allerdings wirkt sich dies direkt auf die Güteberechnung des Modells aus. Die Abbildung der Schneeschmelzen verläuft im Kalibrierungszeitraum 2002-2005 insgesamt sehr gut. Das Schneeschmelzereignis vom Frühjahr 2005 zeigt sehr deutlich den gegensätzlichen Verlauf zwischen Abnahme des Wassergehaltes im Schnee und der damit verbundenen sprunghaften Zunahme der Abflusssumme. Hier zeigen Modell und Messung eine besonders gute Übereinstimmung im Verlauf und in der Summe. Volumina und Hochwasserspitze werden recht genau erfasst. Auch die weitaus kleineren Ereignisse Ende 2007 und Anfang 2008 werden durch das Modell gut dargestellt.

Die kumulierten Abflüsse aus Modell und Messung sind für die Sommerhalbjahre 2002 und 2003 annähernd deckungsgleich in Summe und Verlauf. Besonders gut zeigt sich im August 2002 an Niederschlag und Abfluss der zeitgleiche und starke Ansprung aller Kurven. Im Sommer 2004 werden hingegen die Abflusssummen durch das Modell sehr stark überschätzt (vgl. Tab. 27: S.166), es scheint also zu viel Wasser im System zu sein. Im Folgesommer tritt das Gegenteil ein. Die schwachen Anstiege zeigen aber auch hier, dass die Abflüsse im Sommer durch Niedrig- und Mittelwasserführung dominiert werden und im Vergleich zum Winter kaum hochwasserbedingte

Sprünge im Abflussvolumen auftreten. Hingegen sind die Verläufe und Anstiege zwischen Messung und Modell im Sommer 2005 insgesamt ähnlich, befinden sich jedoch auf unterschiedlichen Niveau. Insgesamt liefert das Modell damit nachvollziehbare Abflusssummenkurven.

Drei der vier definierten Hochwasserereignisse für den Validierungszeitraum 2002-2005 mit einem $Q > 15 \text{ m}^3/\text{s}$, wurden in der Simulation plausibel abgebildet und konnten darüber erklärt werden. Für das Hochwasser vom August 2002 lag der Effizienzgrad bei 0,92 für den Zeitraum 10.08-13.08.2002. Das Hochwasser zwischen dem 11.11.2004 und dem 26.11.2004 wurde mit einem NSE von 0,51, und das Hochwasser vom Frühjahr 2005 (12.03-12.04.2005) mit einem NSE von 0,52 berechnet. Während die Schneeschmelzen in einem befriedigendem Bereich lagen, konnte das Extremereignis mit dem Modell sehr gut erklärt werden.

Ähnlich verhält es sich für den Gesamtvalidierungszeitraum (2002-2005). Hier beträgt das Nash-Sutcliffe-Gütemaß noch 0,69, d.h. 69% der gemessenen Durchflusswerte können durch das Modell erklärt werden.

Gesamtbetrachtung

Folgende Abbildungen (Abb. 36: S.174; Abb. 37: S.175) zeigen dazu in Ergänzung, dass das Modell sowohl für den Gesamtzeitraum (2002-2009) als auch für die einzelnen hydrologischen Jahre und Halbjahre (2002-2009) den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Vergleich zu den Messungen überschätzt. Im Winter liegt der Wert im Modell etwa doppelt so hoch und im Sommer dreimal so hoch, dies gilt ebenso für das hydrologische Jahr (Abb. 36: S.174). Betrachtet man die Jahre 2005, 2007, 2008 und 2009 im Detail (Abb. 37: S.175), dann fallen diese durch vergleichsweise große Unterschiede zwischen Modell und Messung auf.

Im Vergleich der modellierten Halbjahres- und Jahreswerte (2002-2009) zu den langjährigen berechneten Mitteln (1929-2009) fallen hingegen sowohl für den Sommer als auch über das Jahr die Unterschiede etwas kleiner aus (Abb. 36: S.174).

Das mittlere Niedrigwasser liegt hingegen sowohl im Modell als auch bei den Messungen im Winter immer höher als im Sommer.

Die Niedrigwasserführung wird insgesamt vom Modell deutlich überschätzt und kann im Sommer durch zu geringe potenzielle und tatsächliche Verdunstungswerte und zu hohe angenommene Niederschlagsmengen bedingt sein (fehlende räumliche Differenzierung des Niederschlages). Während der Haupteinflussfaktor für die potenzielle Verdunstung der Temperaturverlauf ist, werden die tatsächlichen Verdunstungswerte über die nutzbare Feldkapazität des Bodens und die Durchwurzelungstiefe der Vegetation gesteuert. Fallen diese Werte zu gering aus, dann wird das überschüssige Wasser als (zu hoher) Basisabfluss weitergeleitet. Eine zu hohe Exfiltration begünstigt diesen Prozess, setzt aber ein genügend großes Grobporenvolumen voraus. Die zu hohen Winterwerte des Modells können verursacht sein durch insgesamt zu hoch angenommene Niederschläge im Modell in Verbindung mit einem zu geringen Schneedeckenaufbau bzw. einem zu schnellen Abschmelzen der Schneedecke. Eine weitere Ursache ist durch Lücken und Fehler in den Messwerten zu suchen (Einfrieren des Pegels, Erfassung des Schnees als Niederschlag).

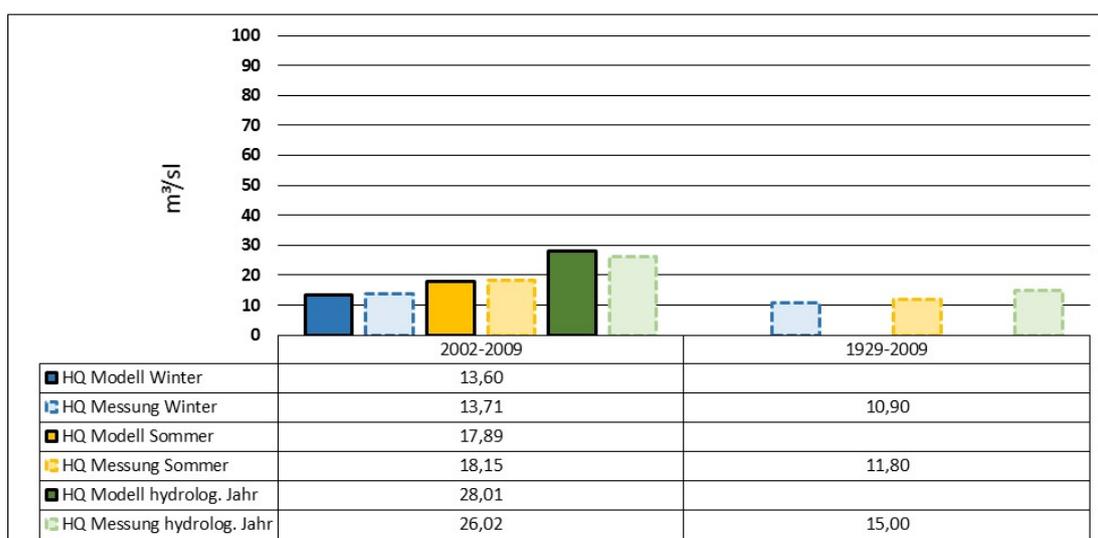
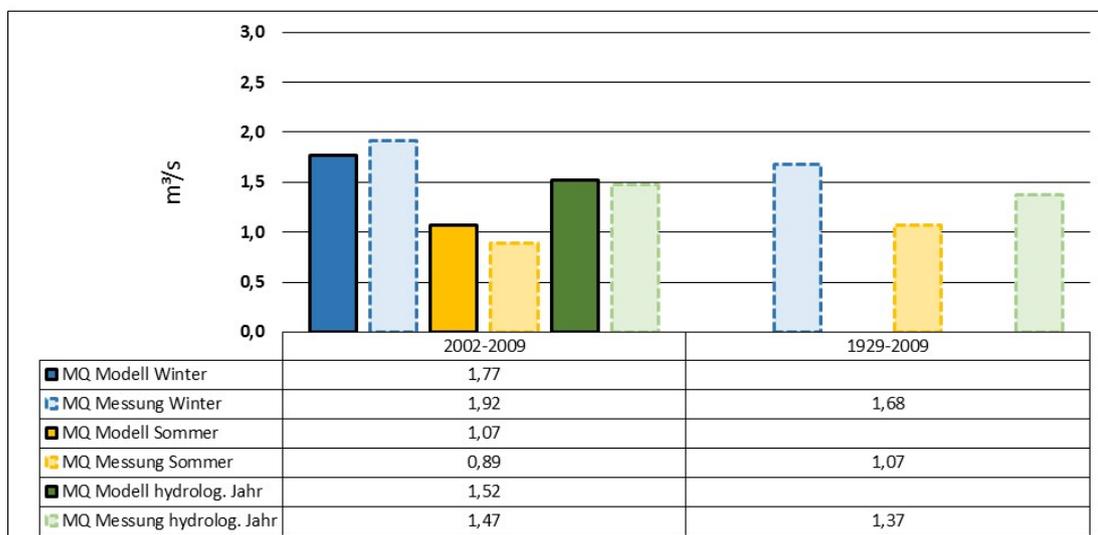
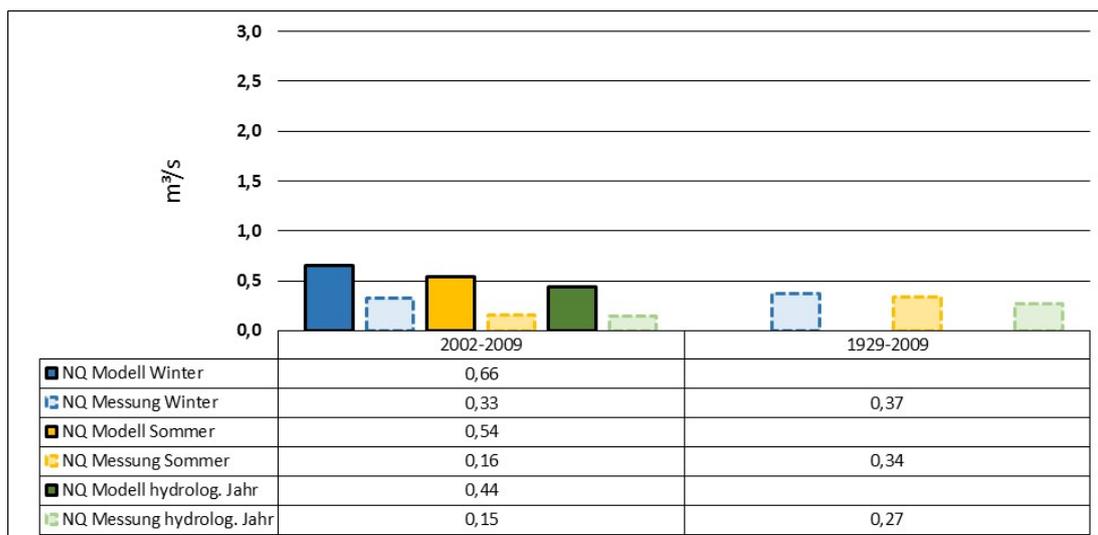


Abb. 36: Gewässerkundliche Hauptwerte (MNQ, MQ, MHQ; hydrologisches Jahr und Halbjahr) am Pegel Rothenthal für die Gesamtzeiträume 2002-2009 und 1929-2009 im Vergleich zu Modellergebnissen

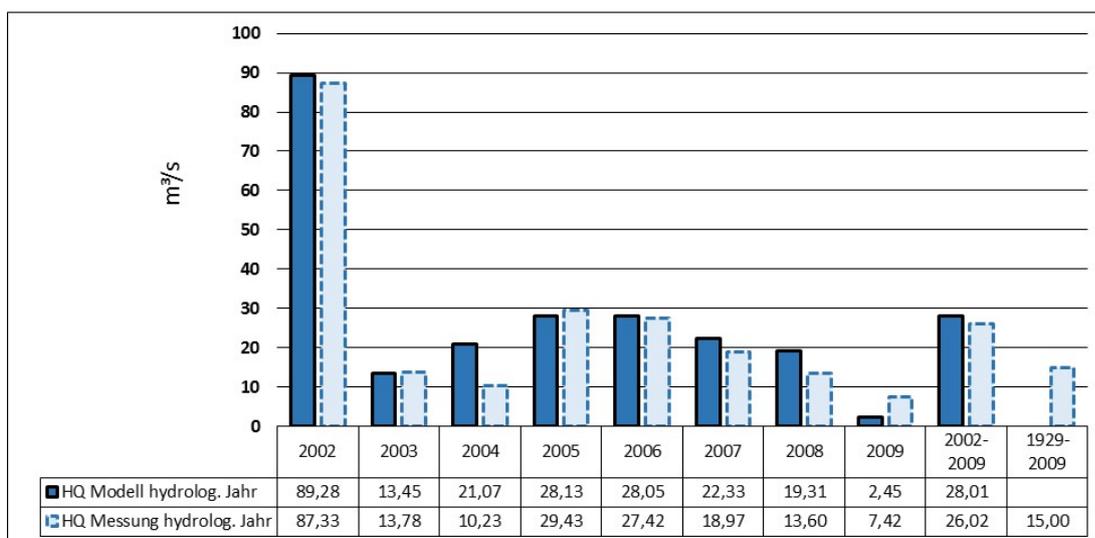
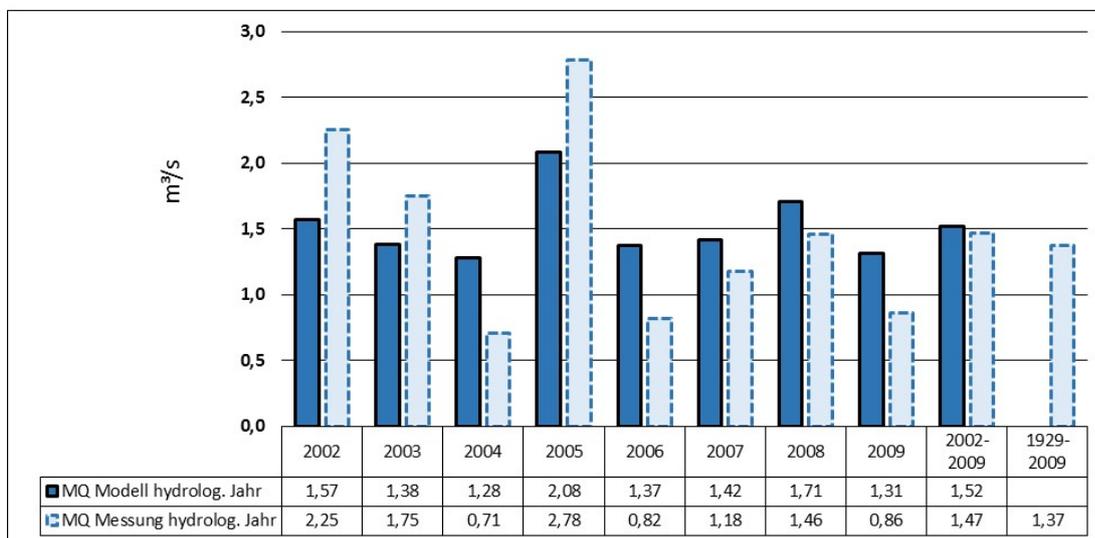
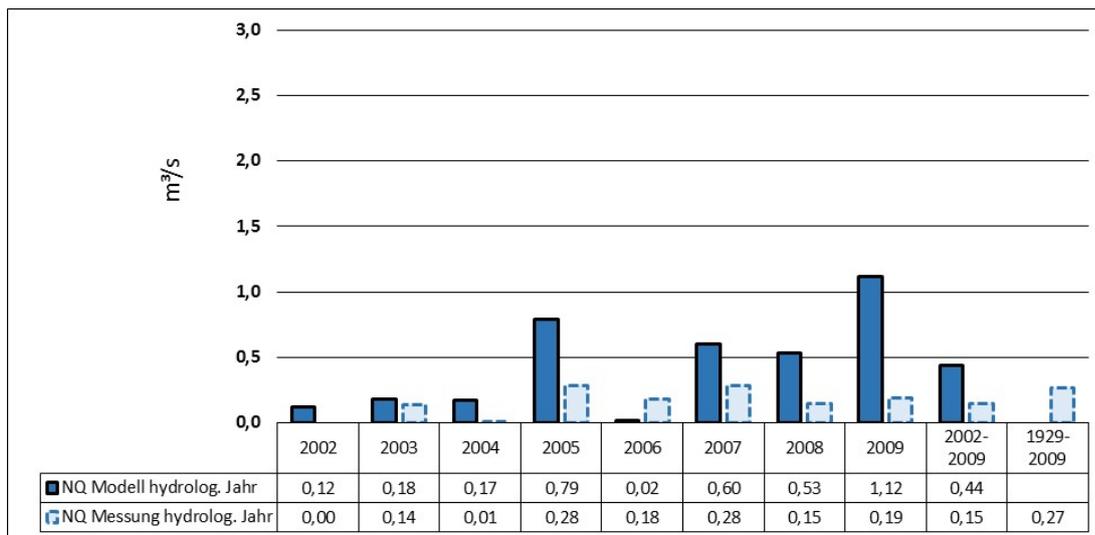


Abb. 37: Gewässerkundliche Hauptwerte (MNQ, MQ, MHQ) am Pegel Rothenthal für unterschiedliche Beobachtungszeiträume im Vergleich zu Modellergebnissen

Vor diesem Hintergrund und im Vergleich zu den langjährigen Reihen weist das Modell trotz zu hoher Werte die richtige Tendenz auf, zeigt jedoch eine deutliche Schwäche in der korrekten Abbildung der Niedrigwasserabflüsse.

Für die Mittelwasserführung (MQ) ist das Bild indifferent. Im Detail werden in den Jahren 2002-2003 und 2005 die MQ's vom Modell unterschätzt, in den Folgejahren überschätzt. Bemerkenswert ist daran jedoch, dass die Jahre 2002 und 2003 hinsichtlich der Niederschlagsmengen und Temperaturverläufe völlig gegensätzlich waren und die Berechnungen in Tab. 27: (S.166) für 2002 eine Unterschätzung der Niederschläge und Überschätzung der Verdunstung, jedoch für 2003 eine ausgeglichene Bilanz zeigen. Die Werte für 2005 liegen, bedingt durch die hohen Niederschläge und die Schneedeckenentwicklung für Messung und Modell, im Vergleich sehr hoch. Die Wasserbilanz ist ausgeglichen und zeigt, dass genügend Wasser im System vorhanden ist, dies aber in zu geringen Teilen zum Abfluss kommt. Dies bedeutet eine Überschätzung der potenziellen Verdunstung, welche in diesem Sommerhalbjahr in der Summe gleich hoch war wie die Niederschläge. Die überschätzten höheren Mittelwasserabflüsse im Modell ab 2006, sind in der Tendenz ähnlich wie die NQ's des Modells, so dass ähnliche Ursachen anzunehmen sind. Über das Jahr werden sowohl im aktuellen als auch im langjährigen Vergleich mit 1,3-1,5 m³/s ähnliche Wertebereiche erzielt. Die Mittelwasserführung liegt für Modell und Messung im Winter höher als im Sommer.

Im Winterhalbjahr unterschätzt das Modell die Mittelwasserabflüsse, im Sommer liegen die Modellwerte leicht höher. Für den Gesamtzeitraum 2002-2009 sind kaum noch Unterschiede zwischen Messung und Simulationsergebnis erkennbar. Vergleicht man die Modellergebnisse mit den langjährigen Messungen (Winter, Sommer, Jahr), dann werden diese vom Modell sehr gut nachgezeichnet. Dies zeigt die insgesamt korrekte Anpassung der Mittelwasserabflüsse durch das Modell.

Hinsichtlich der mittleren Hochwasserabflüsse für den Gesamtzeitraum liegen die Sommerwerte leicht über den Winterwerten. Modell und Messung weisen fast identische Werte auf. Im Vergleich zum langjährigen mittleren Hochwasserabfluss sind die Winterwerte auf einem vergleichbaren Niveau. Hingegen sind die Sommerwerte im Untersuchungszeitraum als auch die Jahreswerte deutlich höher, was in erster Linie auf das Augusthochwasser 2002 zurückzuführen ist. Betrachtet man die einzelnen Jahre, so sind mit Ausnahme von 2004 keine merklichen Unterschiede zwischen Simulationsergebnis und Messung feststellbar, was sowohl zeigt dass die Hochwasserspitzen im Modell nachvollziehbar abgebildet werden (vgl. Tab. 26: S.164), aber auch die kleineren Ereignisse erfasst werden. Es werden insbesondere die für die Modellierung besonders relevanten Hochwasserperioden 2002, 2005 und 2006 sehr gut abgebildet, welche allesamt den langjährigen mittleren Hochwasserabfluss von 15 m³/s übertreffen. Der Vergleich zwischen der gemessenen und der modellierten mittleren Hochwasserführung (MHQ) zeigt für den Gesamtzeitraum 2002-2009 mit 28 bzw. 26 m³/s annähernd übereinstimmende Werte. Im Vergleich zum langjährigen Mittel ist der Untersuchungszeitraum als eine ausgesprochene Hochwasserperiode anzusprechen.

Es zeigt sich eine insgesamt sehr gute Anpassung der mittleren Hochwasserabflüsse durch das Modell. Aus dieser Sicht kann das Modell als robust genug angenommen werden, um Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Auslösern, Mechanismen und Abflussspitzen abbilden zu können. Die für die hydrologischen Halbjahre und Einzelereignisse berechneten Gütemaße bestätigen dieses Bild. Der Verlauf der gemessenen Abflussganglinie kann insgesamt durch die Modellsimulation sowohl für den Validierungs- als auch für den Kalibrierungszeitraum plausibel dargestellt werden. Die Modelldaten gelten damit zumindest hinsichtlich der Zielsetzung zur Abbildung von unterschiedlichen Hochwasserereignissen als valide und können für weitere Szenariorechnungen benutzt werden.

5.3.1.1 Betrachtung der Abflussanteile

Als Erweiterung zu den bisherigen Ergebnissen wird anhand des Pegels Rothenthal (Messung und Modell) in folgender Abbildung (Abb. 38: S.178) dargestellt, wie sich für das Hochwasser vom August 2002 die gemessene und modellierte Abflussganglinien zueinander verhalten. Weiterhin wird die Verteilung der einzelnen Abflusskomponenten dargestellt. Es wird unterschieden zwischen natürlichem Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss.

In Ergänzung dazu enthält die Grafik Informationen über den Bodenwasserhaushalt zum Zeitpunkt des Hochwassers. Es sind neben den Niederschlägen und der Infiltrationsrate, die Veränderungen der Bodenfeuchte und des lokalen Zwischen- und Oberflächenabflusses dargestellt.

Die Werte wurden integriert für alle Elementarflächen des Systemelementes 310. Dieses Systemelement ist stellvertretend für das nördliche Einzugsgebiet der Natzsung. Es handelt sich hierbei um ein Teileinzugsgebiet nördlich des Rübener Baches im Kriegswald (vgl. Abb. 29: S.139). Die Vegetation besteht aus alten forstwirtschaftlich genutzten Fichtenbeständen. Nach Untersuchungen von Ramelow und Löhe verfügen die hier anstehenden Braunerden, die sich vermutlich aus einer periglazialen Deckschicht gebildet haben, über ein ausgeprägtes Makroporengefüge, welches die Infiltration dominiert. Entsprechend wurde in Bezug zu den Feld- und Laborbefunden, im Modell die Infiltrationskapazität dieses Bodens stark erhöht (Löhe, 2006; Ramelow, 2006).

Die Modellierungsergebnisse zeigen anhand des Beispiels vom August 2002 den Effekt der Vorsättigung des Bodens durch vorangegangene Niederschläge. Die Bodenfeuchte liegt mit 1.000 mm schon auf einem vergleichsweise hohen Niveau und ist seit Anfang August kontinuierlich angestiegen. Aus der Grafik sind die anfänglich hohe Infiltrationsrate des Waldbodens und die damit verbundene Aufnahme des ersten Niederschlagsmaximums (vermutlich durch Makroporen) ersichtlich. Weiterhin ist die folgende Aufsättigung des Bodens bzw. das Erreichen der minimalen Infiltrationsrate für den gesättigten Zustand erkennbar. Aufgrund der Aufsättigung und trotz der Abnahme der Niederschlagsintensität sind der schnelle und sehr deutliche Anstieg des Oberflächenabflusses und das verzögerte Ansteigen des Zwischenabflusses erkennbar. Erst mit Abnahme der Niederschläge sinkt der Oberflächen- und zeitverzögert auch der Zwischenabfluss wieder ab. Die Bodenfeuchte bleibt hingegen auf einem konstant hohen Niveau von 1100 mm.

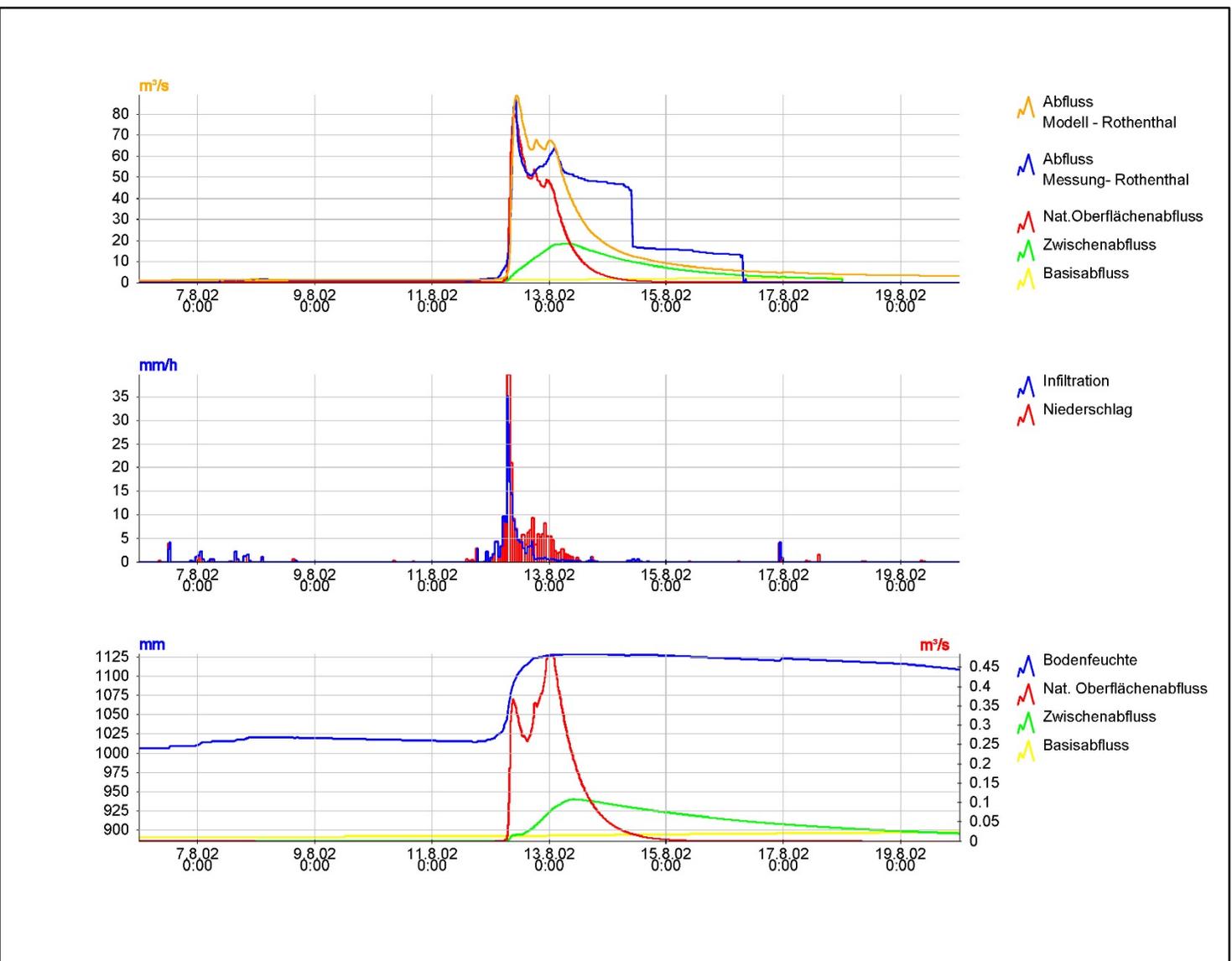


Abb. 38: Augusthochwasser 2002: Abflussganglinie am Pegel Rothenthal (Modell und Messung) und Änderung der Bodenfeuchte und Infiltration auf einem Waldstandort (Brauerde)

Die Abbildung (Abb. 38: S.178) zeigt, wie aus einer hohen Bodenvorsättigung heraus und bei ausreichend hohen Niederschlägen die Infiltrationskapazität des Bodens schnell erschöpft ist und mit dem zweiten Niederschlagmaximum zum verstärkten Zwischenabfluss führt. Mit Erreichen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und einer Ausfüllung des Gesamtporenvolumens geht die Infiltration gegen Null und es bildet sich ein sättigungsbedingter Oberflächenabfluss aus. Darüber hinaus zeigen die Modelldaten aber auch, dass es im August 2002 bedingt durch die hohe Vorsättigung und trotz einer hohen Infiltrationskapazität zur Ausbildung von Oberflächenabfluss auf diesem Waldstandort gekommen sein muss, der sich unterteilt in einen anfänglichen Horton'schen und einen späteren Sättigungsabfluss.

Die Darstellung der Abflussanteile am Pegel Rothenthal zeichnet dieses Bild nach und zeigt in der Kombination auch die Bedeutung des Oberflächenabflusses für die Abflussreaktion, insbesondere beim ansteigenden Hochwasser. Das Hochwassergeschehen wird dominiert vom Oberflächenabfluss, bedingt durch eine a.) schnelle Erschöpfung der Infiltrationskapazität und b.) Aufsättigung der Böden bzw. dem schnellen Erreichen eines Infiltrationsüberschusses. Hingegen ist die zweite Spitze der Abflussganglinie am Pegel Rothenthal dominiert durch eine Kombination aus Oberflächenabfluss (zweite Niederschlagsspitze) und ansteigendem Zwischenabfluss. Die gemessene und modellierte Abflussganglinie am Pegel Rothenthal zeigen zum ansteigenden Hochwasserast eine identische Reaktion. Sowohl der ansteigende Ast als auch der gemessene Hochwasserscheitel werden vom Modell in der Höhe und im Zeitpunkt sehr gut abgebildet. Hingegen wird das erste Hochwasserminimum durch das Modell überschätzt. Der zweite Hochwasserscheitel wird erneut gut durch das Modell dargestellt. Erst mit abfallendem Hochwasserast dividieren sich Messung und Modellergebnis sehr deutlich auseinander. Der zunächst noch sehr hohe Abfluss (bzw. Wasserstand) bis zum 14.08.02, ist nachgewiesenermaßen bedingt durch die Sedimentation von Geschiebe im Abflussquerschnitt. Ob hier eine Verklausung vorlag, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Der sich anschließende treppenförmige Abfall der Messwerte wurde durch ein Freiräumen des Gerinnes verursacht. Damit zeigen Messung und Modellierung für dieses Extremhochwasser eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung in den Abflussganglinien. Das Verhältnis der Abflussanteile zueinander und der Verlauf der Bodensättigung, Infiltration und des Oberflächen- und Zwischenabflusses untermauern die Plausibilität der Modellierungsergebnisse.

6 Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet

Es wurden sämtliche Zuflüsse im Einzugsgebiet der Natzschung bis zum Pegel Rothenthal auf verfügbare dezentrale Speicher bzw. potenzielle Speicherstandorte untersucht. Auf Basis der GIS-gestützten Interpretation topographischer Kartenwerke und einer sich anschließenden Feldbegehung zeigte die abschließende Analyse, dass für die Szenariorechnungen insgesamt 16 potenzielle Standorte für (trockene) Hochwasserrückhaltebecken sowie 3 weitere Standorte mit schon existierenden Teichen (im Sinne von teilgefüllten Hochwasserrückhaltebecken) berücksichtigen werden können. Alle Standorte (HRB) wurden abschließend geodätisch aufgenommen und im GIS verortet. Aus den Basisdaten wurden die Einzugsgebietsfläche, Eintauffläche, das Stauvolumen und die Einstauhöhe bzw. die Speicherinhaltslinie ermittelt.

Bedingt durch die Morphologie des Gebietes, verorten sich die Standorte überwiegend im südlichen Teil des Einzugsgebietes und liegen damit fast ausschließlich auf dem Staatsgebiet der Tschechischen Republik. Sie verteilen sich auf die Einzugsgebiete der oberen Natzschung, der Jindrichova, des Bily Potoks, des Rübenauer Bachs, des Steinbachs und des Telčsky Potoks. Die Teiche liegen im Einzugsgebiet des Telčsky Potoks und weisen bei aktueller Füllung noch ungenutzten Stauraum auf und wurden daher näher betrachtet.

Insgesamt können an 14 von 19 Standorten schon vorhandene natürliche oder künstliche Speicherstrukturen genutzt werden (Steinbach 1 und 2, Telčsky 2-5, Luznice, Rübenauer Bach 1-3, Natzschung 1-4). Die Speicherstandorte lassen sich in 3 Kategorien unterteilen, die auch in kombinierter Form auftreten können:

- I. Speicher unter Nutzung vorhandener Strukturen (wie Straßendämme, Absperrbauwerke)
- II. Teiche, die aktuell genutzt werden, die jedoch in modifizierter Form zusätzliches Stauvolumen besitzen würden
- III. Speicher unter Nutzung einer morphologisch günstigen Situation

Es befinden sich fünf Speicher im Einzugsgebiet des Telčsky Potok und zwei im Bereich des Steinbaches. In diesen Einzugsgebieten existieren im Gegensatz zu den folgenden Standorten keinerlei Bebauungen. Daher sind sie in Ihrer Wirkung im ausschließlichen Interesse für die Gemeinde Rothenthal am Unterlauf der Natzschung und für die Stadt Olbernhau an der Flöha. Bedingt durch die Lage von Olbernhau unterhalb des Zusammenflusses von Oberer Flöha, Schweinitz und Natzschung können für Olbernhau nur eingeschränkte Aussagen gemacht werden. Ergebnisse zu den Auswirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen auf die Stadt Olbernhau finden sich bei Reinhardt (2010). Es befinden sich in Ergänzung zu den erstgenannten sieben Lokalitäten drei weitere Standorte im Einzugsgebiet des Rübenauer Baches oberhalb der Ortschaft Rübenau.

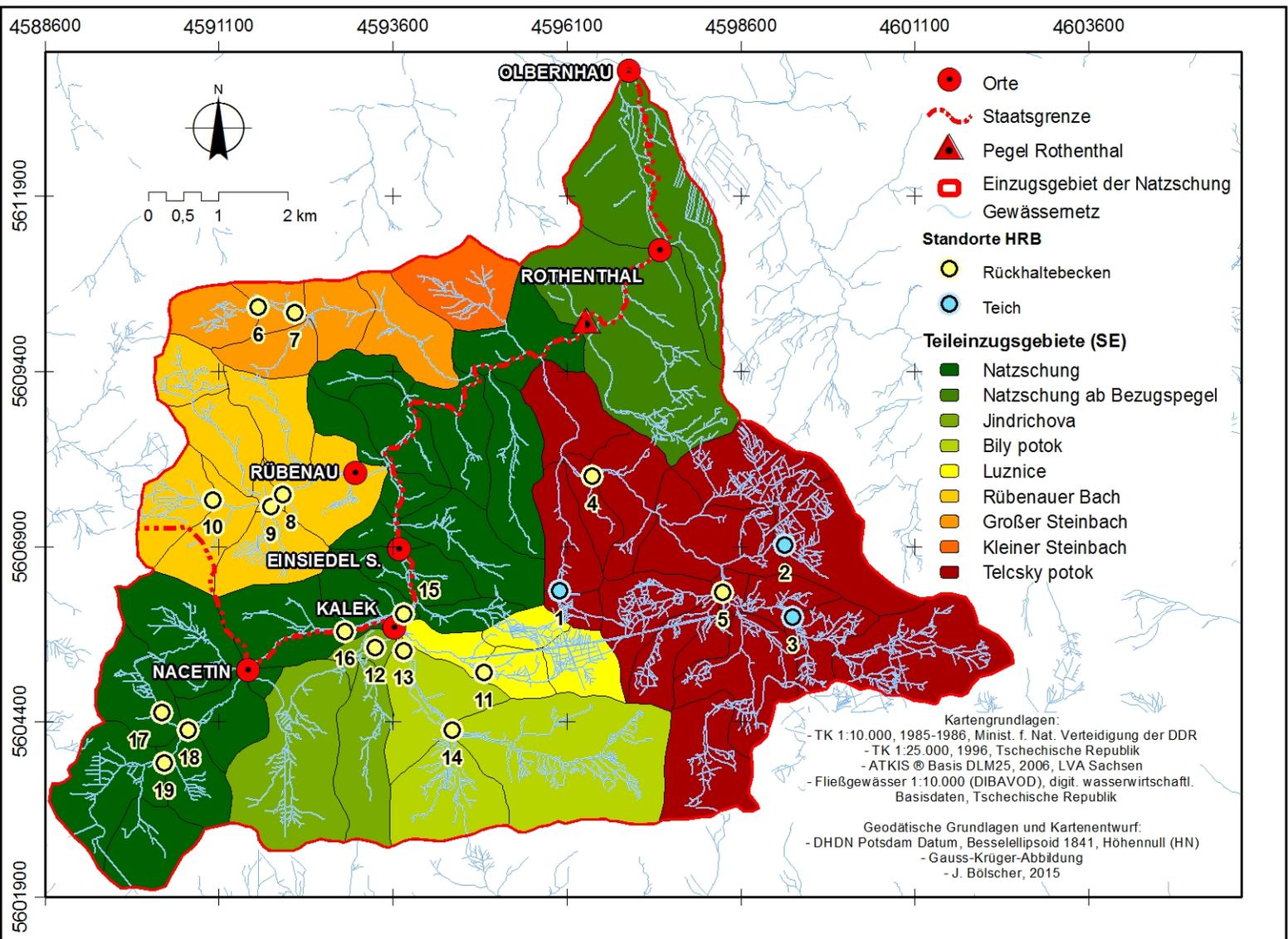


Abb. 39: Die Lage potenzieller Hochwasserspeicher (Teiche und trockene Rückhaltebecken) im Einzugsgebiet der Natzschung

Tab. 28: Hydrologische Kennwerte potenzieller Standorte für HRB

Nr.	Standort	Gewässer	Einzugsgebiet [km ²]	Pot. Einstauhöhe [m]	*1 Wasserstand über Basisfüllung	Pot. Stauvolumen [m ³]	Pot. überstaute Fläche [m ²]
N01	Telčský Teich 1	Telčský Potok	0,40	1,5 *1		50.576 Basisfüllung: 11 [dam ³]	35.201
N02	Telčský Teich 2	Telčský Potok	2,15	1,5 *1		32.174 Basisfüllung: 8.2 [dam ³]	25.157
N03	Telčský Teich 3	Telčský Potok	3,69	3,0 *1		23.500 Basisfüllung: 2.8 [dam ³]	12.868
N04	Telčský 1	Telčský Potok	18,28	4,5		14.135	7.495
N05	Telčský 2	Telčský Potok	10,94	4,5		56.298	31.236
N06	Steinbach 1	Großer Steinbach	0,96	3,5		12.462	7.682
N07	Steinbach 2	Großer Steinbach	1,52	3,5		22.787	14.037
N08	Rübenauer Bach 1	Rübenauer Bach	5,73	4,5		26.500	14.533
N09	Rübenauer Bach 2	Rübenauer Bach	1,31	3,6		17.608	14.980
N10	Rübenauer Bach 3	Rübenauer Bach	1,20	3,5		22.982	20.243
N11	Luznice 1	Luznice	1,51	4,5		10.721	5.451
N12	Jindrichova 1	Jindrichova	5,46	3,1		10.800	7.100
N13	Bílý 1	Bílý Potok	8,39	4,5		45.992	27.888
N14	Bílý 2	Bílý Potok	6,58	4,5		65.896	25.447
N15	Natzschung 1	Natzschung	28,06	4,1		17.011	16.000
N16	Natzschung 2	Natzschung	10,65	4,2		34.110	17.701
N17	Natzschung 3	Natzschung	1,33	2,2		14.103 Basisfüllung: 0 [dam ³]	12.295
N18	Natzschung 4	Natzschung	4,26	3,65		24.300	15.000
N19	Natzschung 5	Natzschung	3,25	4,3		24.462	16.005

Tab. 29: Wirksamkeit der potenziellen HRB für ausgewählte Schutzziele / Ortschaften im Einzugsgebiet der Natzschung									
Nr.	Standort	Gewässer	Načetín	Kalek	Einsiedel Sensen- hammer	Rübenau	Ortslage Rothenthal	Stadt Olbernhau	
N19	Natzschung 5	Natzschung	x		x		x	x	
N18	Natzschung 4	Natzschung	x		x		x	x	
N17	Natzschung 3	Natzschung	x		x		x	x	
N11	Luznice 1	Luznice		x	x		x	x	
N16	Natzschung 2	Natzschung			x		x	x	
N12	Jindrichova 1	Jindrichova			x		x	x	
N14	Bílý 2	Bílý Potok			x		x	x	
N13	Bílý 1	Bílý Potok			x		x	x	
N15	Natzschung 1	Natzschung			x		x	x	
N10	Rübenauer Bach 3	Rübenauer Bach				x	x	x	
N09	Rübenauer Bach 2	Rübenauer Bach				x	x	x	
N08	Rübenauer Bach 1	Rübenauer Bach				x	x	x	
N01	Telčský Teich 1	Telčský Potok					x	x	
N02	Telčský Teich 2	Telčský Potok					x	x	
N03	Telčský Teich 3	Telčský Potok					x	x	
N05	Telčský 2	Telčský Potok					x	x	
N04	Telčský 1	Telčský Potok					x	x	
N06	Steinbach 1	Großer Steinbach					x	x	
N07	Steinbach 2	Großer Steinbach					x	x	

Die restlichen 9 Standorte verteilen sich oberhalb der Ortschaften Kalek und Načetín entlang der Natzsung und ihrer Zuflüsse. Sie übernehmen sowohl eine Hochwasserschutzfunktion auf lokaler als auch auf Ebene des Einzugsgebietes.

Die einzelnen Standorte benötigen zwischen 5 und 35 Tsd. m² und im Mittel eine Fläche von 17 Tsd. m². Der Flächenverbrauch liegt unter Einbeziehung schon vorhandener Strukturen bei 33 ha. Die Einzugsgebietsgröße der Speicher variiert zwischen 0,4 und 28 km² und liegt im Mittel bei 6 km². Die mittlere Dammlänge der Absperrbauwerke beträgt inkl. schon vorhandener Bauwerke 134 Meter.

Die Kapazität aller 19 Standorte umfasst ein Gesamtspeichervolumen von 526 dam³. Die Speichergrößen variieren zwischen 10 und 65 dam³. Drei Standorte besitzen ein Volumen zwischen 50 und 65 dam³. Das durchschnittliche Speichervolumen aller Standorte beträgt 27 dam³.

Die individuelle Höhe der Dammkrone orientiert sich an einer vorab festgesetzten Maximalhöhe von 5 Metern und den örtlichen Gegebenheiten. Sie ergibt sich aus der maximalen Einstauhöhe plus 50 cm Freibord. Die Obergrenze von 5 Metern wird an 6 Standorten erreicht, während die mittlere Dammkronenhöhe bei 4,1 Metern liegt. Die durchschnittliche Einstauhöhe liegt damit bei 3,6 Metern und an 6 Standorten wird eine maximale Einstauhöhe von 4,5 Metern erreicht. Zwei der vermessenen Teiche weisen mit 1,5 Metern die kleinsten Einstauhöhen auf. Einige Anlagen verfügen bereits über Hochwasserentlastungsanlagen, die jedoch hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit gesondert überprüft werden müssen.

Die Retentionsbecken wurden für die Szenariorechnungen mit festen grundständigen Drosseln versehen, deren jeweiliger Durchmesser für ein HQ₁₀₀ optimiert wurde. Die Drosselkurven wurden von Jamitzky (2006) berechnet. Die Drosselöffnungen weisen je nach Abflussvolumen und Abflussspitze eine Spanne von 300 bis 2000 mm und einen mittleren Durchmesser von 705 mm bzw. 861 mm auf (vgl. Anhang Tab. 42: S.253).

Vor dem Hintergrund der DIN-Norm 19700-12 können 9 Standorte als sehr kleine Hochwasserrückhaltebecken bzw. Stauanlagen eingestuft werden. Die verbleibenden 10 Standorte besitzen entweder zu hohe Absperrbauwerke zwischen 4 und 5 Meter und/oder zu große Speicherkapazitäten, die an drei Stellen über 50 dam³ liegen (vgl. Abb. 7: S.49). Diese Standorte werden damit entsprechend der Norm als kleine Stauanlagen bzw. kleine Hochwasserrückhaltebecken eingestuft (DWA, 2013b).

7 Die hydrologische Wirksamkeit der Hochwasserrückhaltebecken

Das folgende Kapitel beinhaltet die Ergebnisse zur hydrologischen Wirksamkeit der 19 potenziellen dezentralen Hochwasserrückhaltebecken (Erläuterung vgl. Kapitel 6, S.181) auf lokaler Ebene (LE) und auf Einzugsgebietsebene (EE) (vgl. Tab. 30: S.187). Durch die Betrachtung dieser räumlichen Ebene kann aufgezeigt werden, welche Auswirkung die Maßnahmen schon innerhalb der Teileinzugsgebiete auf das örtliche Hochwassergeschehen haben. Die Hochwasserschutzmaßnahmen sind also nicht nur dezentral innerhalb des Einzugsgebietes verortet, sondern besitzen in der Regel auch eine dezentrale Wirkung. Diese lokale Ebene umfasst jeweils ausgewählte Bezugspunkte innerhalb des Einzugsgebietes, an denen die kumulative Wirkung aller flussaufwärts liegenden Speicher modelliert wurde. Die Bezugspunkte sind durch dort vorhandene Ortslagen benannt. An diesen Punkten wird die hydrologische Ausgangssituation (Szenario A1) mit den Abflussverhältnissen bei Anpassung der Hochwasserrückhaltemaßnahmen auf ein HQ₁₀₀ (Szenario A2) verglichen (vgl. Abb. 40: S.188).

Tab. 30: Räumliche Bezugsebenen zur Wirksamkeitsbetrachtung der Hochwasserrückhaltemaßnahmen

Lokale Ebene (LE)	
Es werden für die Ergebnisbetrachtung der HRB auf lokaler Ebene die Bezugspunkte und zugehörigen Einzugsgebiete flussabwärts in folgender Reihenfolge betrachtet:	
LE 1. Načetin:	Einzugsgebiet Oberlauf Natzschung
LE 2. Kalek:	Einzugsgebiet Luznice
LE 3. Einsiedel-Sensenhammer:	Einzugsgebiet Mittellauf Natzschung
LE 4. Rübenau:	Einzugsgebiet Rübenauer Bach
LE 5. Mündung Gr. Steinbach:	Einzugsgebiet Großer Steinbach
LE 6. Mündung Telčský Potok:	Einzugsgebiet Telčský Potok
Einzugsgebietsebene (EE)	
Die Gesamtwirkung aller Hochwasserrückhaltebecken auf Einzugsgebietsebene wird anhand folgender Bezugspunkte im Unterlauf der Natzschung analysiert:	
EE 1. Pegel Rothenthal:	Einzugsgebiet Natzschung
EE 2. Gemeinde Rothenthal:	Einzugsgebiet Natzschung
EE 3. Natzschung Mündung:	Einzugsgebiet Natzschung

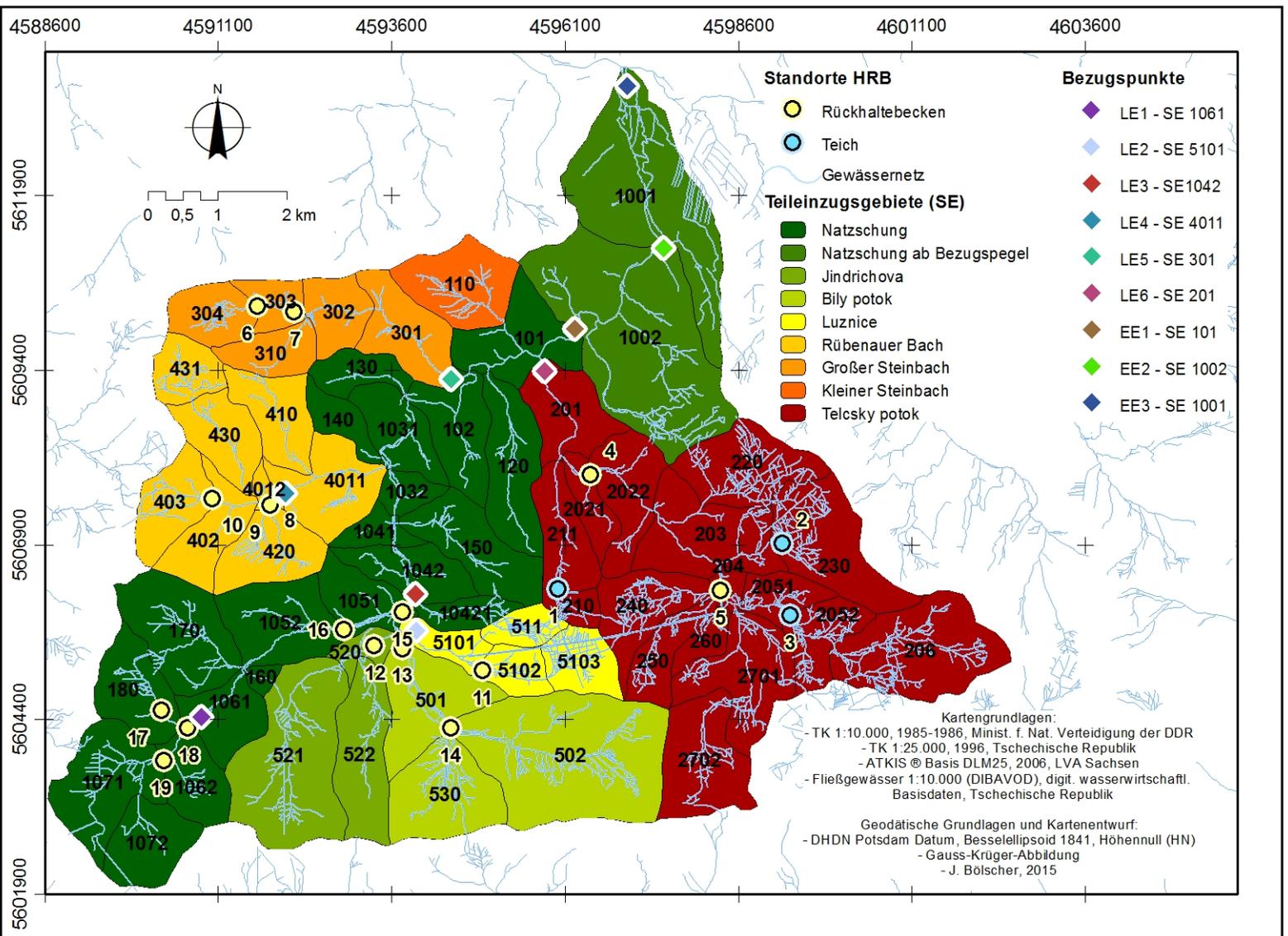


Abb. 40: Die Lage der Bezugspunkte in den Teileinzugsgebieten (mit einzelnen Systemelementen, SE-Nummern in schwarz) hinsichtlich der Wirksamkeitsbetrachtung der Hochwasserrückhalteräume auf lokaler Ebene (LE) und auf Einzugsgebietsebene (EE)

7.1 Hydrologische Wirksamkeit auf lokaler Ebene (LE)

7.1.1 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Načetin (LE 1)

Einzugsgebiet

Das hier dargestellte, 5,6 km² große Teileinzugsgebiet der oberen Natzschung, befindet sich im südwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes auf einer mittleren Höhe von rund 800 m. ü. HN zwischen den Erhebungen Čihadlo (842 m. ü. HN) im Norden und Jeleni Vrech (863 m. ü. HN) im Süden. Es wird von vier kleineren Bächen gespeist und erstreckt sich bis oberhalb der Ortschaft Načetin, welche sich über ca. 1,5 km entlang der Natzschung erstreckt. Der Quellbereich der Natzschung (Načetinský Potok) liegt innerhalb der Seeheide, einem ausgedehnten Hochmoorgebiet an der westlichen Flanke des Jeleni Vrech (Lindenkrenz, 2006).

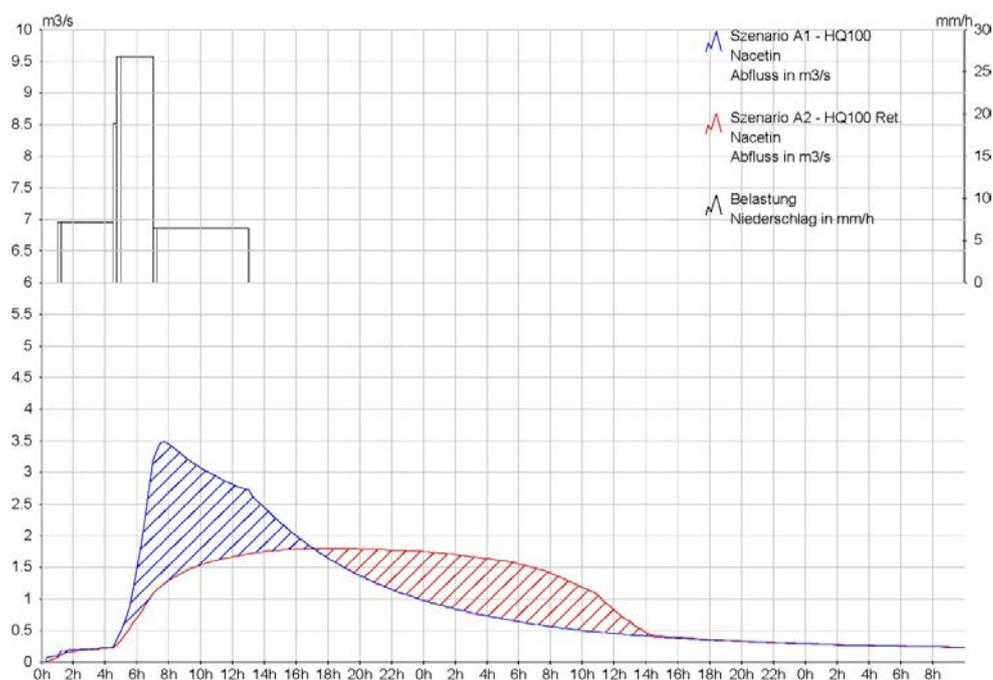


Abb. 41: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Načetin (LE 1)

Speicherstandorte

Es befinden sich oberhalb der Ortschaft drei potenzielle Speicherstandorte mit einem Gesamtstauvolumen von 62,8 dam³ und einer Fläche von 4,3 ha. Die Abflussganglinien für die simulierten Szenarien A1-A2 werden anhand des Bezugspunktes Načetin (LE 1) dargestellt (Zulauf Teilgebiet 1061), welcher direkt unterhalb der Speicher am Ortseingang von Načetin liegt.

Tab. 31: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Načetin LE 1	
Bezugspunkt	Načetin, LE 1
Lokales Schutzziel	Načetin
Anzahl und Nummer der Speicher	3, N17-N19
Gewässer und Einzugsgebiet	Oberlauf Natzschung
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Zulauf SE 1061
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	5,6
Max. Abflussspende [l/(s*km ²)]	625
Abflussvolumen [dam ³]	271
genutztes Stauvolumen [dam ³]	47
Mittlere Auslastung [%]	71
Mittlere Einstauhöhe [m]	3,04
Szenario A1 Q Max. [m ³]	3,5
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	1,8
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	49
Anmerkungen	keine

Modellrechnung IST-Zustand

Anhand der Modellrechnungen wird für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelabwasserabfluss von 0,1 m³/s ermittelt. Die max. Abflussspende für den Gesamtzeitraum beläuft sich auf 913 l/(s*km²). Der Abflussbeiwert beträgt 59 %. Der höchste Abfluss von 5,1 m³/s wird am 12.08.2002 erzielt.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Das generierte Abflussvolumen und die max. Abflussspende für das Szenario A1 und A2 liegen bei 271 dam³ bzw. 625 l/(s*km²). Die maximale Abflussspende ist im Vergleich zum Mündungsbereich der Natzschung in die Flöha 26 % niedriger und das Abflussvolumen in Načetin beträgt 6 % am Gesamtabflussvolumen des Einzugsgebietes. Der Abflussbeiwert liegt bei 40 %.

Im ungedrosselten Zustand (A1) wird für das HQ₁₀₀ oberhalb der Ortslage Načetin ein Hochwasserscheitel von 3,5 m³/s erreicht. Der Anstieg zum Hochwassermaximum erfolgt um 4:15 sprunghaft, annähernd linear und fast parallel zum einsetzenden Starkregen. Das Hochwassermaximum wird um 7:30, knapp 3 Stunden später erreicht. Der durchschnittliche Anstieg pro Stunde liegt damit bei über 1 m³/s. Der Hochwasserscheitel wird nur kurz gehalten. Im Vergleich zum

ansteigenden Ast, fällt der Abfluss in Szenario A1 in den 3 Stunden ab 07:30 um 0,2 m³/s pro Stunde auf 3 m³/s ab. Gegen 13:00 endet das Niederschlagsereignis und es kommt zu einem verstärkten Abfall der Abflussganglinie. Diese erreicht nach 48 Stunden wieder ihr Ausgangsniveau. Abflusswerte größer 1,7 m³/s werden für einen Zeitraum zwischen 6:15 und 17:30, also knapp über 11 Stunden erreicht.

Im gedrosselten Zustand (A2) erniedrigt sich der Hochwasserscheitel des HQ₁₀₀ von 3,5 m³/s auf 1,8 m³/s. Der Hochwasseranstieg erfolgt wie in Szenario A1 um 4:15, jedoch weniger rasch und die Abflussspitze wird erst um 18:15 erreicht. Dies entspricht einem durchschnittlichen Anstieg pro Stunde von 0,1 m³/s. Zwischen 12:45 und 2:00 des Folgetages wird ein Abflusswert von 1,7 m³/s überschritten. Es bildet sich über einen Zeitraum von mehr als 13 Stunden ein Plateau aus. Der abfallende Ast der Hochwasserwelle fällt danach erst langsam ab und erst am Folgetag ab 7:30 entleeren sich die Speicher deutlich schneller. Gegen 14:00 schneiden sich die Abflussganglinien aus Szenario A1 und A2 und haben danach einen identischen Verlauf. Ab diesem Zeitpunkt sind die Speicher entleert.

Vergleich Szenarien

Der Vergleich zwischen Szenario A1 und A2 zeigt, dass die Hochwasserspitze um 49 % abnimmt und zudem über 10 Stunden verzögert wird. Betrachtet man hingegen nur den Anstieg in A2 bis zur Ausbildung des Plateaus, dann beträgt die zeitliche Verzögerung immer noch mehr als 5 Stunden. Die Schnittstelle zwischen dem abfallenden Ast aus Szenario A1 und dem Plateau aus Szenario A2 markieren diesen zeitlichen Versatz deutlich.

Speicherauslastung

Die Speicher (N17-N19) werden im Mittel nur bis knapp über 3 Meter eingestaut und es wird effektiv 47 dam³ Stauraum benötigt. Die Absenkung und zeitliche Verzögerung des Hochwasserscheitels bedingt somit eine mittlere Auslastung der 3 Speicher von 71 %. Deren Auslastungsgrad bewegt sich zwischen 43 % und 96 % und der effektive spezifische Stauraum beläuft sich auf 8,4 mm. Die Differenz von 2,8 mm zwischen effektivem und dem insgesamt verfügbaren spezifische Stauraum von 11,2 mm, zeigt den noch vorhandenen Puffer in diesem Gebiet auf.

Der Grad der Effektivität der Hochwasserrückhaltebecken zeigt sich darüber hinaus an dem Verhältnis zwischen der Höhe der Scheitelreduktion und dem genutzten Stauvolumen. In Szenario A2 kann pro 1000 Kubikmeter genutztem Stauraum eine prozentuale Scheitelreduktion von 1 % erzielt werden. Pro Prozentpunkt Scheitelreduzierung werden 960 m³ Speichervolumen benötigt. Als ein weiteres Maß zur Beschreibung der Speicherauslastung, wird das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen verwendet. Im vorliegenden Fall beträgt das Verhältnis 1:5,8.

7.1.2 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Kalek (LE 2)

Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der Luznice ist, mit einer Fläche von knapp über 2,5 km², das kleinste der betrachteten Gebiete. Es befindet sich südöstlich der Ortschaft Kalek (Bezugspunkt LE 2) auf einer mittleren Höhe von rund 790 m. ü. HN. Der Bach entspringt einem stark drainierten Moor- gebiet auf der östlichen Wasserscheide, durchfließt aus südlicher Richtung nach einem steilen Hangabschnitt die Ortschaft Kalek und mündet dort östlich in den Bílý Potok. Der Bach reagiert schon bei kleineren Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelzen wie 2006 mit bordvollem Abfluss innerhalb der Ortslage Kalek.

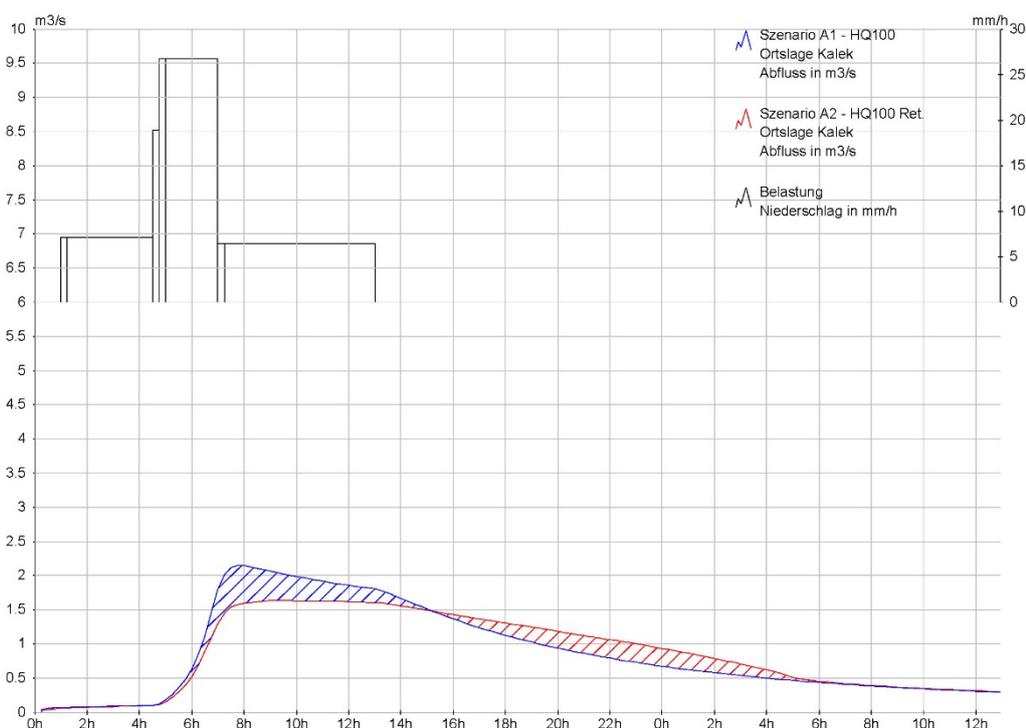


Abb. 42: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Kalek (LE 2)

Speicherstandorte

Es befindet sich 1 km oberhalb der Ortschaft Kalek ein möglicher Speicherstandort mit einem potenziellen Gesamtstauvolumen von 10,7 dam³ und einer Fläche von 0,54 ha. Das Einzugsgebiet umfasst bis zum Speicherstandort eine Fläche von 1,5 km². Unterhalb des Speicherstandortes mündet ein kleinerer Zufluss mit einem Einzugsgebiet von 0,5 km² in die Luznice. Bis zum Bezugspunkt Kalek vergrößert sich das Einzugsgebiet auf 2,5 km². Die Abflussganglinien für die

simulierten Szenarien A1-A2 werden anhand des Bezugspunktes Kalek dargestellt (Bezugspunkt LE 2; Abfluss Teilgebiet 5101), welcher an der Mündung der Luznice unterhalb der Ortschaft Kalek liegt.

Modellrechnung IST-Zustand

Es wird anhand der Modellrechnungen für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von 0,05 m³/s ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Luznice am Bezugspunkt Kalek beläuft sich auf 2,7 m³/s (12.08.2002), mit einer max. Abflussspende von 1.036 l/(s*km²) und einem Abflussbeiwert von 60 %.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Am Bezugspunkt Kalek liegen für die Szenarien A1-A2 das generierte Abflussvolumen und die Abflussspende bei 160 dam³ bzw. 823 l/(s*km²). Das Volumen von 90 dam³ hat sich unterhalb des Speichers durch den Zufluss aus dem drainierten Moorbereich der Moosbeerheide fast verdoppelt, ebenso ist die Abflussspende von 770 l/(s*km²) um über 50 Liter angestiegen. Der Abflussbeiwert liegt mit 49 % zwei Prozentpunkte höher als am Speicher N11. Im Vergleich zum Mündungsbereich der Natzschung in die Flöha ist die Abflussspende 2,4 % niedriger und das Abflussvolumen beträgt 3,3 % am Gesamtabflussvolumen.

Tab. 32: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Kalek LE 2	
Bezugspunkt	Kalek, LE 2
Lokales Schutzziel	Kalek
Anzahl und Nummer der Speicher	1, N11
Gewässer und Einzugsgebiet	Luznice
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass SE 5101
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	2,5
Max. Abflussspende [l/(s*km ²)]	823
Abflussvolumen [dam ³]	160
genutztes Stauvolumen [dam ³]	9,9
Mittlere Auslastung [%]	92
Mittlere Einstauhöhe [m]	4,25
Szenario A1 Q Max. [m ³]	2,1
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	1,6
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	24
Anmerkungen	keine

Im ungedrosselten Zustand (A1) wird für das HQ₁₀₀ am Bezugspunkt Kalek ein Hochwasserscheitel von 2,1 m³/s erreicht. Der Abfluss steigt in knapp über 3 Stunden von zunächst 0,1 m³/s auf das Maximum, dies entspricht einem durchschnittlichen Anstieg pro Stunde von 0,6 m³/s. Aus der Abbildung (Abb. 42: S.192) ist ersichtlich, dass nach dem zunächst raschen Anstieg bis zum Maximum in Szenario A1 ein zunächst nur schwacher, fast linearer Abfall der Abflussganglinie am Speicher erfolgt. Der Abfluss reagiert unmittelbar auf die Niederschläge im Einzugsgebiet. In den ersten drei Stunden nach dem Maximum fällt der Hochwasserast pro Stunde damit auch nur um 0,05 m³/s ab. Nach 13 Stunden verändert sich mit Beendigung der Niederschläge die Steigung des abfallenden Astes jedoch deutlich. Das Einzugsgebiet zeigt, bedingt durch seine Größe, eine unmittelbare Reaktion auf das Niederschlagsgeschehen.

In Szenario A2 steigt gegen 04:30, mit Erhöhung der Niederschlagsintensität, der Abfluss zunächst sprunghaft an und beschreibt einen ähnlichen Verlauf wie in Szenario A1. Während jedoch in Szenario A1 nach 3 Stunden ein Maximum von 2,1 m³/s erreicht wird, zeigt in Szenario A2 die Hochwasserretention eine deutliche Wirkung. Es wird hier nach 3 Stunden ein Abfluss von knapp über 1,5 m³/s erreicht. Dies entspricht einem Anstieg pro Stunde von 0,5 m³/s. Danach nimmt der Abfluss nur noch geringfügig zu und die Ganglinie beschreibt, bedingt durch die Retention von Speicher N11 und die Verringerung der Regenintensität, einen plateauförmigen Verlauf. Das Maximum von 1,6 m³/s wird erst gegen 09:30 erreicht. Um 14:30 wird in Szenario A2 dann der Abfluss von 1,5 m³/s unterschritten. Ab diesem Schnittpunkt zwischen Szenario A1 und A2 fällt dann der Abfluss deutlich, jedoch bedingt durch die Speicherentleerung langsamer als in Szenario A1, ab. Um 06:00 des Folgetages kreuzen sich beide Ganglinien erneut. Der Speicher ist vollständig entleert und steht knapp 26 Stunden nach Beginn des Hochwassers wieder zur Verfügung.

Vergleich Szenarien

Das simulierte HQ₁₀₀ (Szenario A1) erzeugt in Kalek einen Hochwasserscheitel von 2,1 m³/s. Dieser wird in Szenario A2, bedingt durch den zwischengeschalteten Stauraum und trotz des erhöhten Abflussvolumens unterhalb des Speichers, um 24 % auf 1,6 m³/s reduziert. Die Abflussspitze wird um 1,5 Stunden verzögert.

Speicherauslastung

Die potenzielle Einstauhöhe des Hochwasserrückhaltebeckens (N11) beträgt 4,5 Meter. Bei einem HQ₁₀₀ und entsprechend optimierter Drossel liegt die reale Einstauhöhe bei 4,25 Meter. Der Speicher wird damit zu 92 % ausgelastet. Effektiv werden 9,9 dam³ Stauraum benötigt. Der effektive spezifische Stauraum beträgt am Bezugspunkt Kalek 6,6 mm, der potenzielle spezifische Stauraum 7,7 mm. Die Differenz von 1,1 mm zeigt einen nur noch kleinen Puffer für diesen Speicher auf. In Szenario A2 kann pro 1.000 Kubikmeter genutztem Stauraum eine prozentuale Scheitelreduktion von 2,7 % am Speicherstandort und von noch 2,4 % für die Ortslage Kalek erzielt werden. Ein Prozentpunkt Scheitelreduktion benötigt am Bezugspunkt Kalek ca. 400 m³ Speichervolumen. Das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen liegt am Speicherstandort bei 1:9,1.

7.1.3 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3)

Einzugsgebiet

Der Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3, Auslass Speicher N15) liegt an der Natzschung unterhalb der Konfluenz mehrerer größerer Einzugsgebiet. Er umfasst eine Fläche von 28 km². Auf kurzer Distanz treffen hier die zunächst die Jindrichova, der Bílý Potok und die Luznice aufeinander und münden bei Kalek in die Natzschung.

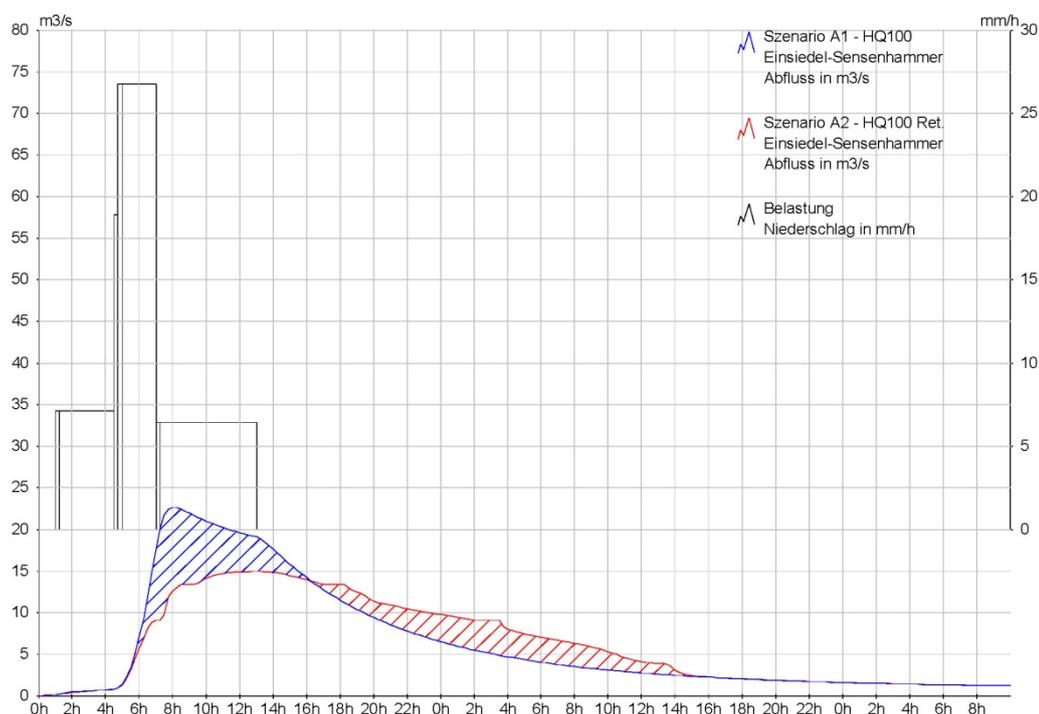


Abb. 43: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3)

Speicherstandorte

Alle oben genannten Einzugsgebiete verfügen über Potenziale für dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen. Die fünf Speicher an Bílý Potok (N13-N14), Jindrichova (N12) und Natzschung (N15, N16) dienen dem Schutz von Bebauungen in Einsiedel-Sensenhammer und insbesondere in weiter stromabwärts gelegenen Ansiedlungen und Ortschaften. Weitere vier Speicher im Oberlauf der Natzschung (N17-N19) und an der Luznice (N11) haben darüber hinaus eine lokale Schutzfunktion für Kalek und Načetin. Die insgesamt neun Hochwasserrückhaltebecken (N11-N19) umfassen eine Fläche von 14,26 ha und ein Gesamtstauvolumen von 247,1 dam³, dies entspricht ca. 47 % des Gesamtstauvolumens im Einzugsgebiet.

Tab. 33: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer LE 3	
Bezugspunkt	Einsiedel-Sensenhammer, LE 3
Lokales Schutzziel	Einsiedel-Sensenhammer
Anzahl und Nummer der Speicher	9, N11-N19
Gewässer und Einzugsgebiet	Oberlauf Natzschung, Bílý Potok, Jindrichova, Luznice
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass Speicher N15, oberhalb SE 1042
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	28
Max. Abflussspende [l/(s*km ²)]	796
Abflussvolumen [dam ³]	1.551
genutztes Stauvolumen [dam ³]	201
Mittlere Auslastung [%]	77
Mittlere Einstauhöhe [m]	3,57
Szenario A1 Q Max. [m ³]	22,4
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	14,9
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	34
Anmerkungen	keine

Modellrechnung IST-Zustand

Anhand der Modellrechnungen wird für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von 0,6 m³/s ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Natzschung am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (Zulauf SE 1042) beläuft sich auf 33 m³/s (12.08.2002), bei einer Abflussspende von 1.178 l/(s*km²) und einem Abflussbeiwert von 60 %.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Im ungedrosselten Zustand (A1) wird für das HQ₁₀₀ am Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer ein Hochwasserscheitel von 22,4 m³/s erreicht. Das Abflussvolumen und die max. Abflussspende für den Simulationszeitraum liegen für die Szenarien A1 und A2 bei 1.551 dam³ bzw. 796 l/(s*km²). Im Vergleich zum Mündungsbereich der Natzschung in die Flöha, ist die maximale Abflussspende 5,6 % niedriger und der Anteil des Abflussvolumens beträgt 32 % am Gesamtvolumen. Der Abflussbeiwert liegt bei 44 %.

In Szenario A1 kommt es 4,5 Stunden nach Simulationsbeginn zu einem Anschwellen des Abflusses. Von 04:30 bis 08:00 steigt der Abfluss pro Stunde mit 6 m³/s von 0,8 m³/s auf das

Maximum von 22,4 m³/s an. Das Maximum wird nur kurz gehalten und sinkt dann langsam bis 13:00 um 0,6 m³/s pro Stunde auf 19 m³/s ab. In den ersten 3 Stunden nach dem Maximum liegt der Abfall bei 0,7 m³/s pro Stunde. Mit dem Ende der Niederschläge um 13:00 fällt der Ast der Ganglinie dann steil ab, der Abfluss nimmt bis 16:15 um 1,6 m³/s pro Stunde ab und erreicht hier einen Wert von knapp unter 14 m³/s. An diesem Punkt schneiden sich erstmalig die Ganglinien aus den Szenarien A1 und A2. Danach beschreibt die Ganglinie in Szenario A1 einen gekrümmten Verlauf mit einer durchschnittlichen Abnahme des Abflusses von 0,5 m³/s pro Stunde. Sie erreicht mit abnehmender Steigung gegen 16:00 des Folgetages einen Wert von knapp über 2 m³/s. Innerhalb der 32 Stunden nach Hochwassermaximum fällt der Abfluss durchschnittlich pro Stunde um 0,6 m³/s ab.

Der Anstieg der Abflussganglinie für Szenario A2 verläuft während der ersten Stunde des Anstieges (04:30-05:30) ähnlich wie in Szenario A1. Es werden in beiden Szenarien Werte um die 3,5 m³/s erreicht. Bis zum Maximum um 08:00 in A1, wird in Szenario A2 nur noch ein Wert von 12,5 m³/s modelliert. Im Vergleich hat sich bis 08:00 der Anstieg pro Stunde damit annähernd halbiert. Zwischen Hochwasserbeginn und –maximum in A2 verläuft der Anstieg bis 13:00 mit 1,3 m³/s pro Stunde nochmals merklich langsamer. Während in Szenario A1 schon der erste Knickpunkt auf dem abfallenden Hochwasserast zu sehen ist, wird erst um 13:00 das Maximum von 14,9 m³/s erreicht.

Der gesamte Anstieg und Abfall in Szenario A2 verläuft treppenförmig. Die einzelnen Stufen markieren das Einsetzen bzw. das Ende der vollen Speicherwirkung der oberstromigen Speicher im Einzugsgebiet. Der glockenförmige Verlauf um das Maximum von 14,9 m³/s markiert die Füllung und Entleerung des untersten Speichers in der Kaskade. Gegen 16:00 schneiden sich die Ganglinien des abfallenden Hochwasserastes von A1 und A2 bei einem Wert von knapp unter 14 m³/s. Sie treffen 24 Stunden später erneut aufeinander. Innerhalb dieses Zeitraumes (rot schraffiert) führen die oberstromigen Speicher sukzessive das retardierte Wasservolumen ab. Zwischen Hochwassermaximum und dem Ende der Speicherentleerung (zweiter Schnittpunkt A1 /A2), fällt der Abfluss durchschnittlich pro Stunde um 0,5 m³/s ab.

Vergleich Szenarien

Der Hochwasserscheitel erniedrigt sich durch das Zusammenspiel der Maßnahmen in Szenario A2 von 22,4 m³/s um 33,5 % auf 14,9 m³/s. Die Abflussspitze wird in Szenario A2 um fünf Stunden verzögert und geht einher mit einem deutlich langsameren Anstieg und Abfall der Abflussganglinie.

Speicherauslastung

An der Luznice (LE 2, N11) wird ein Speicherraum von 9,9 dam³ genutzt und der Hochwasserscheitel an der Mündung zum Bílý Potok wird auf 1,6 m³/s reduziert. An der Jindrichova (N12) wird ein Stauraum von 7,9 dam³ benötigt, um die Abflussspitze von 6,3 auf 5,9 m³/s zu reduzieren. Für den Bílý Potok wurden 2 Speicher im Unterlauf modelliert (N13-N14), welche einen genutzten Raum von 97,6 dam³ aufweisen. Die Abflussspitze von 6,8 m³/s

kann so oberhalb der Zuflüsse von Luznice und Jindrichova um 45 % reduziert werden. Die Natzschung selbst verfügt bis unterhalb des Zusammenflusses mit dem Bílý Potok über 5 Speicher (N15-N19) mit einer Gesamtkapazität von 113,9 dam³, die zu 75 % ausgelastet werden.

Gemessen am Auslass des Speichers Natzschung 1 (N15), beträgt für die Speicher Natzschung (N15-19) der effektive spezifische Stauraum 3 mm und der potenzielle spezifische Stauraum 4 mm. Werden die weiteren vier Hochwasserrückhaltebecken hinzugerechnet, dann erhöhen sich, für die insgesamt 28 km² Einzugsgebiet, der effektive spezifische Stauraum auf 7 mm und der potenzielle spezifische Stauraum auf 9 mm.

Die 9 Speicher werden im Schnitt zu 77 % ausgelastet. Die Spannweite liegt zwischen 43 % und 96%. Annähernd 90% der Speicher werden zu über 70 % ausgelastet. Effektiv werden 200,9 dam³ Stauraum benötigt.

In Szenario A2 kann für den Bezugspunkt Einsiedel-Sensenhammer (LE 3) pro 1000 Kubikmeter genutztem Stauraum, eine prozentuale Scheitelreduktion von 0,17 % erzielt werden. Ein Prozentpunkt Scheitelreduktion benötigt ca. 6000 m³ Speichervolumen. Das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen beträgt im vorliegenden Fall 1:7,7 (Auslass Speicher N15).

Oberhalb von Einsiedel-Sensenhammer werden durch 34 % des Einzugsgebietes mehr als 30% der Abflussspitze an der Natzschungmündung generiert. Ab diesem Fließgewässerpunkt benötigen Hochwasserschutzmaßnahmen ein sprunghaft höheres Speichervolumen, sowohl bezüglich der Abflussspitze als auch hinsichtlich des Abflussvolumens.

7.1.4 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Rügenau (LE 4)

Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet des Rügenauer Baches umfasst bis zum Bezugspunkt Rügenau (LE 4, Auslass SE 4012) eine Fläche von 5,7 km². Er mündet, nach einer steilen Laufstrecke von 1,6 km, unterhalb von Einsiedel-Sensenhammer in die Natzschung. Ab diesem Zusammenfluss verändert die Natzschung sowohl ihre Fließrichtung als auch Talform und Gefälle.

Der Bezugspunkt Rügenau liegt oberhalb des langgestreckten Ortskerns der Gemeinde Rügenau. An dieser Stelle treffen die Einzugsgebiete vom Lehmheider, Rügenauer und Herrenheider Bach aufeinander. Der Konfluenzbereich umfasst eine Fläche von 0,2 km².

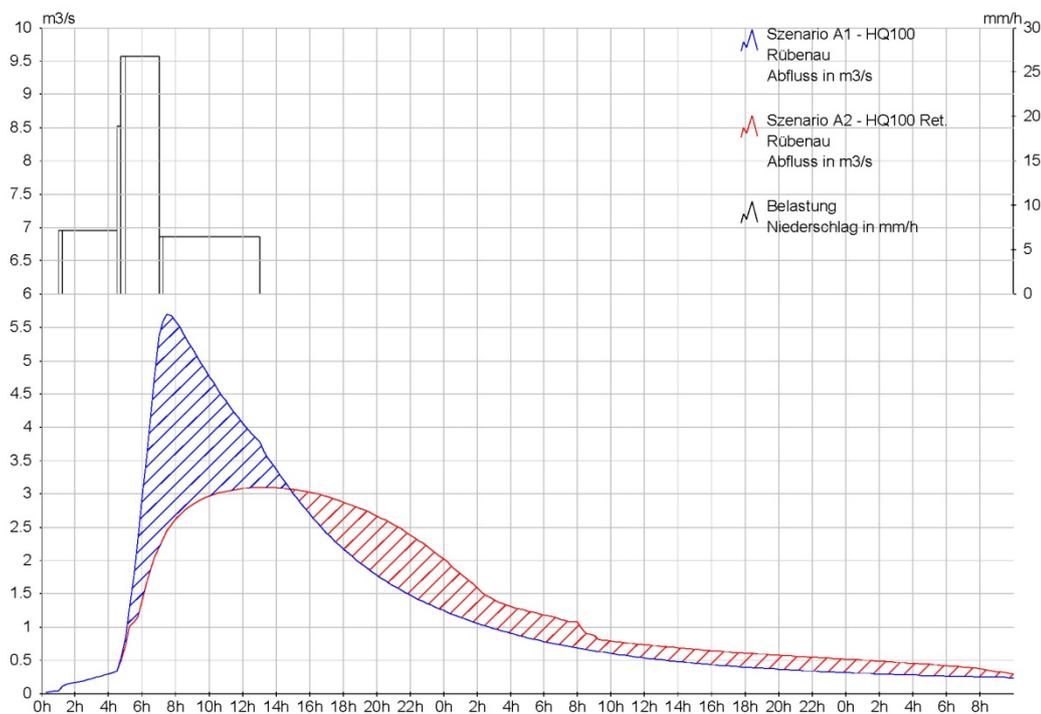


Abb. 44: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Rügenau (LE 4)

Der Steinhübel liegt nordwestlich der Gemeinde Rügenau. Er markiert mit 816,9 m. ü. HN die größte Erhebung im Kriegswald. Sie stellt den Eckpunkt zwischen nördlicher und westlicher Wasserscheide der Natzschung dar. Südöstlich der Erhebung entspringt in einem Moorgebiet des Kriegswaldes der Lehmheider Bach. Der Gewässerlauf umfasst bis zur Einmündung in den Rügenauer Bach eine Fläche von 1,9 km². Südwestlich des Lehmheider Baches schließt sich der Oberlauf des Rügenauer Baches mit einer Fläche von 2,3 km² an. Die Quelle des Rügenauer Baches entspringt in der „Hühnerheide“, einem Moorgebiet im westlichen Kriegswald. Die Hühnerheide entwässert die Südflanke des Steinhübels und die Nordflanke des Čihadlo. Aus südlicher Richtung mündet der Herrenheider Bach in den Rügenauer Bach, er umfasst ein

Einzugsgebiet von 1,3 km². Der Herrenheider Bach entwässert die landwirtschaftlich genutzte, westliche Flanke des Rübenauer Hügels (755 m. ü. HN) und die östliche, zum Teil bewaldete Abdachung des Čihadlo.

Speicherstandorte

Es befinden sich oberhalb der Ortschaft Rübenau drei potenzielle Speicherstandorte (N8-N10) mit einem Gesamtstauvolumen von 67 dam³ und einer Fläche von 4,96 ha. Die Abflussganglinien für die simulierten Szenarien A1-A2 werden anhand des Bezugspunktes Rübenau (Auslass SE 4012) dargestellt, welcher direkt unterhalb der Speicher am Ortseingang von Rübenau liegt.

Tab. 34: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Rübenau LE 4	
Bezugspunkt	Rübenau LE 4
Lokales Schutzziel	Rübenau
Anzahl und Nummer der Speicher	3, N8-N10
Gewässer und Einzugsgebiet	Rübenauer Bach, Herrenheider Bach, Lehmheider Bach
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass Speicher N 8, oberhalb SE 4011
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	5,7
Max. Abflussspende [l/(s*km ²)]	984
Abflussvolumen [dam ³]	332
genutztes Stauvolumen [dam ³]	57
Mittlere Auslastung [%]	82
Mittlere Einstauhöhe [m]	3,7
Szenario A1 Q Max. [m ³]	5,6
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	3,1
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	45
Anmerkungen	keine

Modellrechnung IST-Zustand

Es wird anhand der Modellrechnungen für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von 0,1 m³/s ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Natzsung am Bezugspunkt Rübenau beläuft sich auf 7,9 m³/s (12.08.2002). Die maximale Abflussspende beläuft sich für dieses Hochwasser auf 1.385 l/(s*km²) mit einem Abflussbeiwert von knapp über 60 %.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Die max. Abflussspende und das Abflussvolumen für die Szenarien A1 und A2 liegen unterhalb des Speichers Rübenaauer Bach 1 (N8) bei $984 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ bzw. 332 dam^3 . Im Vergleich zum Mündungsbereich der Natzsung in die Flöha ist die maximale Abflussspende 17 % höher und das Abflussvolumen beträgt 7 % am Gesamtvolumen. In Szenario A1 erzeugt das HQ_{100} an dieser Stelle einen Hochwasserscheitel von $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abflussbeiwert beläuft sich auf 50 %.

In Szenario A1 kommt es mit Beginn des Vorregens am Rübenaauer Bach zunächst zu einem leichten Anstieg des Abflusses auf $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Ab 04:30, zeitlich um ca. 15 Minuten versetzt zur Erhöhung der Niederschlagsintensität, reagiert der Abfluss mit einem schnellen Anstieg bis zum Maximum von $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ um 07:30. Dies entspricht einem Anstieg pro Stunde von $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abfluss fällt nach einer nur sehr kurzen Spitze deutlich langsamer, jedoch ebenso gradlinig ab. Zwischen 07:30 und 14:45 ist in Szenario A1 der Wert auf knapp über $3 \text{ m}^3/\text{s}$ gesunken. Dies entspricht einem durchschnittlichen Abfall von $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Stunde. In den ersten 3 Stunden nach dem Maximum, liegt dieser Wert mit $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ noch leicht höher. Um 14:45 schneiden sich die Abflussganglinien aus Szenario A1 und A2. Im weiteren Verlauf entleeren sich die Speicher in Szenario A1 zunächst noch rasch bis ca. 18:00, danach verflacht die Kurve immer stärker. In Szenario A1 wird erst 24 Stunden später mit $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, wieder ein Wert erreicht wie zu Beginn des Hochwassers.

In Szenario A2 kommt es zwischen 04:30 und 05:00, zunächst analog zu Szenario A1, zu einem schnellen Abflussanstieg. Danach setzt die Wirkung der Hochwasserrückhaltebecken sukzessive ein. Im Vergleich zu Szenario A1 verlangsamt sich hierdurch der Anstieg bis zum Maximum von $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ um 5 Stunden. Der durchschnittliche Anstieg pro Stunde liegt damit nur noch bei $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Während in Szenario A1 schon um 06:00 der Abfluss bei $3 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt, wird in Szenario A2 dieser Wert erst um 10:00, also 4 Stunden später, erreicht und erst gegen 16:00 wieder unterschritten. In diesem Bereich entfalten die drei Hochwasserrückhaltebecken ihre volle Wirkung. Infolgedessen bildet sich auch kein deutlich erkennbarer Hochwasserscheitel aus. Das Maximum ist vielmehr gekennzeichnet durch einen plateauförmigen Verlauf, welcher bei knapp über $3 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt. Die Abflussspitze wird förmlich gekappt. Erst nach weiteren 32 Stunden sind in Szenario A2 alle Speicher weitestgehend entleert und der Abfluss in Szenario A2 rangiert auf dem Niveau wie zu Beginn des Hochwassers. Damit stehen die Speicher nach 56 Stunden wieder als Hochwasserrückhaltebecken zur Verfügung. Zwischen den beiden Schnittstellen aus Szenario A1 und A2, wird in diesem Zeitraum für Szenario A2 jedoch ein weitaus größeres Wasservolumen abgeführt (rot schraffierter Bereich) und markiert die Retentionsleistung der Hochwasserrückhaltebecken.

Vergleich Szenarien

In Szenario A2 erniedrigt sich für die Ortslage Rübenaau der Hochwasserscheitel um 45 % auf $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abflussspitze wird im Vergleich zu Szenario A1 über 5 Stunden verzögert.

Speicherauslastung

Die 3 Speicher (N8-N10) oberhalb der Ortslage Rübenau werden zwischen 64 % und 93 % ausgelastet. Effektiv werden bei einer mittleren Einstauhöhe von 3,7 Meter 57 dam³ Stauraum in Anspruch genommen. Der effektive spezifische Stauraum beträgt 9 mm, der potenzielle spezifische Stauraum 11,7 mm, womit noch ein Puffer von 2,7 mm verbleibt.

Der Grad der Effektivität der Hochwasserrückhaltebecken zeigt sich darüber hinaus an dem Verhältnis zwischen der Höhe der Scheitelreduktion und dem genutzten Stauvolumen. In Szenario A2 kann pro 1.000 Kubikmeter genutztem Stauraum eine prozentuale Scheitelreduktion von 0,8 % erzielt werden. Pro Prozentpunkt Scheitelreduzierung werden 1.266 m³ Speichervolumen benötigt. Als ein weiteres Maß zur Beschreibung der Speicherauslastung wird das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen verwendet. Im vorliegenden Fall beträgt das Verhältnis 1:5,8.

7.1.5 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Gr. Steinbach (LE5)

Einzugsgebiet

Ein weiterer kleinerer Zufluss, der hinsichtlich der Nutzung dezentraler Hochwasserrückhaltepotenziale geprüft wurde, ist der große Steinbach. Er entspringt dem nördlichen Einzugsgebiet der Natzsung. Der Steinbach entwässert den Moorbereich der Achterheide im östlichen Bereich des Steinhübels. Die Achterheide bildet die nördliche Grenze des Einzugsgebietes der Natzsung. Nach einem zunächst östlichen Verlauf knickt der Steinbach in einem scharfen Winkel Richtung Südost ab, verändert die Form hin zu einem Kerbtal und fließt mit hohem Sohlgefälle Richtung Natzsung ab. Er umfasst ein Einzugsgebiet von 4,6 km², die maximale Abflussspende für ein HQ₁₀₀ beträgt 870 l/(s*km²), das Gesamtabflussvolumen beläuft sich auf 224 dam³. Das kantige, blockartige Sohlmaterial scheint für den Steinbach namensgebend zu sein. Unterhalb des Steinbaches folgt erst in Rothenthal die nächste Bebauung, womit potenzielle Hochwasserrückhaltebecken eine ausschließlich überörtliche Schutzfunktion für die Gemeinde Rothenthal und die Stadt Olbernhau haben.

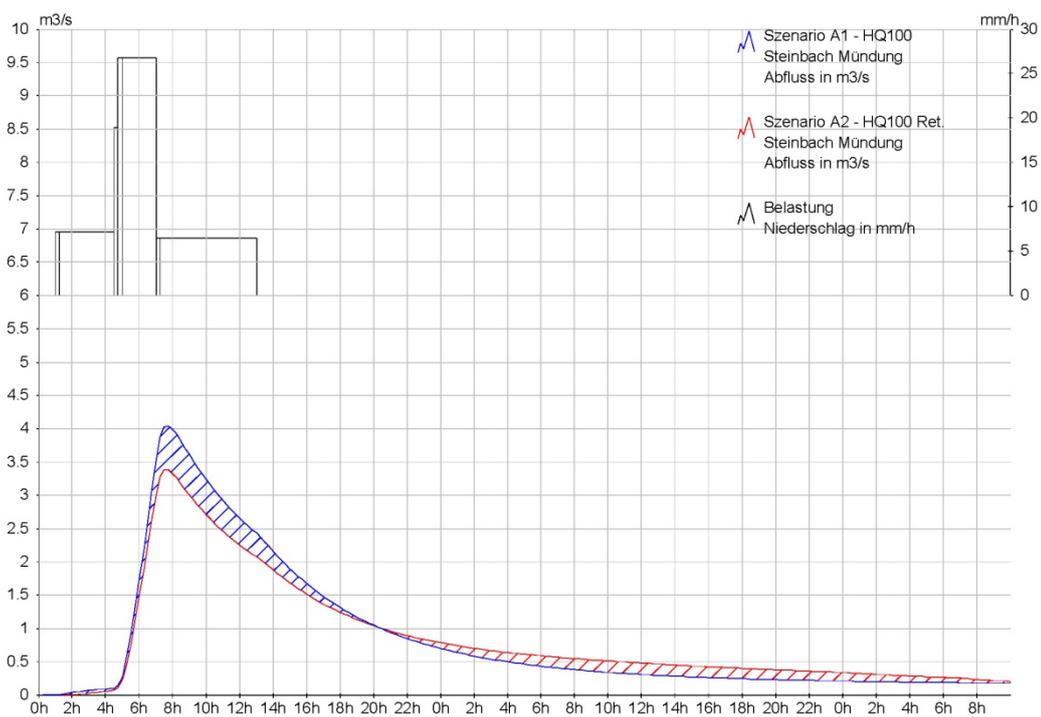


Abb. 45: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Großer Steinbach (Mündung, LE 5)

Speicherstandorte

Es befinden sich im Einzugsgebiet des Großen Steinbaches zwei potenzielle Speicherstandorte (N6, N7) mit einem Gesamtstauvolumen von 35 dam³ und einer Fläche von 2,16 ha. Die Abflussganglinien für die simulierten Szenarien A1-A2 werden anhand des Bezugspunktes Steinbach Mündung (LE 5, Auslass SE 301) dargestellt.

Tab. 35: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ ₁₀₀ am Bezugspunkt Großer Steinbach LE 5	
Bezugspunkt	Großer Steinbach LE 5
Lokales Schutzziel	Gemeinde Rothenthal
Anzahl und Nummer der Speicher	2, N6-N7
Gewässer und Einzugsgebiet	Großer Steinbach
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass SE 301, Mündung in die Natzsung
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	4,6
Max. Abflussspende [l/(s* km ²)]	870
Abflussvolumen [dam ³]	224 / 64* ¹
genutztes Stauvolumen [dam ³]	18,3
Mittlere Auslastung [%]	49
Mittlere Einstauhöhe [m]	2,5
Szenario A1 Q Max. [m ³]	4,0
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	3,4
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	15
Anmerkungen	*1: Wert bezieht sich auf Speicher N7

Modellrechnung IST-Zustand

Anhand der Modellrechnungen wird für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von 0,09 m³/s ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Natzsung am Bezugspunkt Steinbach (Auslass SE 301) beläuft sich auf 4,9 m³/s (12.08.2002). Die maximale Abflussspende beträgt für dieses Hochwasser 1.064 l/(s*km²) und der Abflussbeiwert liegt bei 61 %.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Das HQ₁₀₀ erzeugt unterhalb des Speichers Steinbach 2 einen Hochwasserscheitel von 0,85 m³/s, welcher bis zur Mündung in die Natzsung auf einen Wert von 4,0 m³/s ansteigt. Im Vergleich

zum Mündungsbereich der Natzsung in die Flöha, ist die maximale Abflusspende an der Steinbachmündung 3 % höher und das Abflussvolumen beträgt 4,5 % am Gesamtabflussvolumen. Der Abflussbeiwert liegt am Bezugspunkt bei 43 %.

Der Anstieg des Abflusses in Szenario A1 erfolgt an der Mündung zur Natzsung gegen 4:45. Nach einem steilen und linearen Anstieg wird das Maximum von 4,0 m³/s gegen 7:45, also 3 Stunden später, erreicht. Dies entspricht einem Anstieg von knapp 1,3 m³/s pro Stunde. Die Hochwasserspitze hält nur kurz an. Dazu fällt im Vergleich der absteigende Ast weitaus moderater ab. In den ersten drei Stunden nach dem Hochwassermaximum fällt dieser mit 0,4 m³/s pro Stunde auf 3 m³/s ab und beschreibt einen exponentiellen Verlauf. Der Abfluss halbiert sich innerhalb von 7 Stunden. Nach 24 Stunden liegt der Abfluss noch bei 0,7 m³/s und erreicht erst nach weiteren 12 Stunden ein Niveau von knapp über 0,3 m³/s.

Der Hochwasseranstieg verläuft in Szenario A1 und A2 annähernd identisch. Die Steigung ist in A2 mit 1 m³/s pro Stunde etwas geringer, jedoch wird der Hochwasserscheitel von 3,4 m³/s 15 Minuten früher erreicht. Wie schon in Szenario A1, hält der Scheitelabfluss nur kurz an, um danach exponentiell abzufallen. Der Abfall in den ersten 3 Stunden nach Maximum verläuft jedoch mit 0,3 m³/s pro Stunde merklich langsamer. Innerhalb von 7,5 Stunden hat sich der Abfluss halbiert. Nach 20 Stunden schneiden sich die Ganglinien beider Szenarien. Die Speicher am Großen Steinbach geben, im Vergleich zu allen bisher aufgeführten Bezugspunkten, das retardierte Wasservolumen mit einer stärkeren Verzögerung, jedoch sehr gleichmäßig ab. Die Speicher sind nach 60 Stunden wieder völlig entleert.

Vergleich Szenarien

Die zwei Speicher (N6, N7), mit einem Gesamtstauvolumen von 35,1 dam³ und einer Fläche von 21,6 Tsd. m², erniedrigen bei einem HQ₁₀₀ den Hochwasserscheitel am Auslass von Steinbach 2 (N7) um 65,4 % auf 292 Liter. Sie erzielen noch im Mündungsbereich eine Reduktion um 15 % auf 3,4 m³/s. Die Abflussspitze trifft 15 Minuten früher ein.

Speicherauslastung

Die Speicher werden zwischen 40 % und 58 % ausgelastet. Effektiv werden daher nur 18,3 dam³ Stauraum benötigt. Die potenzielle Einstauhöhe liegt im Mittel bei 3,25 Meter, die reelle Einstauhöhe beträgt im Mittel 2,5 Meter. Der effektive spezifische Stauraum - bezogen auf Speicher N7 - beträgt 14 mm, der potenzielle spezifische Stauraum beziffert sich auf 27 mm.

In Szenario A2 kann pro 1.000 Kubikmeter genutztem Stauraum eine prozentuale Scheitelreduktion von 0,8 % erzielt werden. Pro Prozentpunkt Scheitelreduzierung werden 1.220 m³ Speichervolumen benötigt. Als ein weiteres Maß zur Beschreibung der Speicherauslastung wird das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen verwendet. Im vorliegenden Fall beträgt am Speicherstandort N7 das Verhältnis 1:3,5.

7.1.6 Veränderung des Hochwasserabflusses am Bezugspunkt Telčský Potok (LE 6)

Einzugsgebiet

Der Telčský Potok umfasst ein Einzugsgebiet von 21,7 km² und entwässert den südöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes der Natzschung. Die Mündung liegt 700 Meter oberhalb des Pegel Rothenthal und schließt nördlich ein enges Kerbtal von über 4 Kilometern Länge ab. Im Unterlauf dieses Talbereiches mündet westlich, als größerer Zufluss, der Gabrielin Potok in den Telčský Potok (Speicher N1). Dieser entwässert den nördlichen Moorbereich der Moosbeerheide. Das sehr steile Kerbtal des Telčský Potok öffnet sich am südlichen Ende zu einer kesselartigen Struktur mit steilen Talflanken, welche über die Kammlagen zur Schweinitz, zum Egergraben und zum Bily Potok begrenzt wird. Im Übergangsbereich zum Kerbtal treffen mehrere kleinere Einzugsgebiete aufeinander, welche auf kurzer Distanz die Abflussverhältnisse stark verändern.

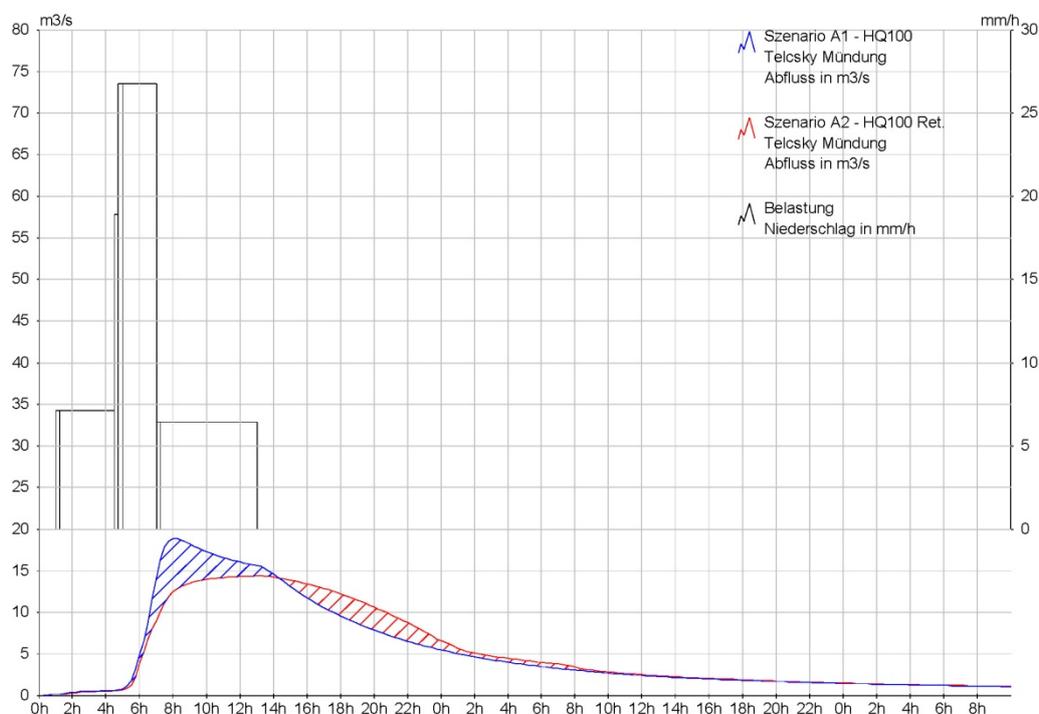


Abb. 46: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Telčský Potok (Mündung, LE 6)

Vom Mündungsbereich des Telčský Potok erstreckt sich auf einer Länge von mehr als acht Kilometer die Wasserscheide zur Schweinitz Richtung Südosten. Sie wird markiert durch einen Höhenzug zwischen dem Kameny Vrch (842 m. ü. HN) und dem Lesenská Pláň (842 m. ü. HN). Ein Kilometer südlich des Lesenská Pláň schließt sich die Ortschaft Lesna auf einer Höhe von knapp über 900 Meter ü. HN an. Von dieser Anhöhe aus ändert die Wasserscheide ihre Richtung gen Westen und grenzt auf einer Länge von ca. 4 km und auf einer Höhe von 850-860 m. ü. HN das Gebiet zur Steilabdachung in den Egergraben ab. Der westliche Teil des Einzugsgebietes wird über eine nordwestlich bis nördlich verlaufende Grenze markiert, die sich über den zentralen

und stark drainierten Moorbereich der Moosbeerheide und der Anhöhe des Stražce auf 825 Meter ü. HN bis zum Dulni Vrch (699 m. ü. HN) erstreckt. Nordöstlich mündet der geschiebeführende Telčský Potok auf einer Höhe von 580 Meter ü. HN in die Natzschung.

Die maximale Abflussspende des Telčský Potok beträgt für ein HQ_{100} $858 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, das Gesamtabflussvolumen beläuft sich auf 1326 dam^3 .

Wie schon am Großen Steinbach, existiert im Einzugsgebiet des Telčský Potok keinerlei Bebauung, womit potenzielle Hochwasserrückhaltebecken eine ausschließlich überörtliche Schutzfunktion für die Gemeinde Rothenthal und die Stadt Olbernhau haben.

Speicherstandorte

Es befinden sich im Einzugsgebiet des Telčský Potok fünf potenzielle Speicherstandorte (N1-N5) mit einem Gesamtstauvolumen von $176,4 \text{ dam}^3$ und einer Fläche von $11,17 \text{ ha}$. Es handelt sich bei den Speichern N1-N3 um gefüllte Teiche, welche noch über ein Restspeichervolumen verfügen. Die Abflussganglinien für die simulierten Szenarien A1-A2 werden anhand des Bezugspunktes Telčský Potok Mündung (LE 6, Auslass SE 201) dargestellt.

Tab. 36: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ_{100} am Bezugspunkt Telčský Potok LE 6	
Bezugspunkt	Telčský Potok LE 6
Lokales Schutzziel	Gemeinde Rothenthal
Anzahl und Nummer der Speicher	5, N1-N5*1
Gewässer und Einzugsgebiet	Telčský Potok
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass SE 201, Mündung in die Natzschung
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km^2]	21,7
Max. Abflussspende [$\text{l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$]	858
Abflussvolumen [dam^3]	1.326
genutztes Stauvolumen [dam^3]	113,6
Mittlere Auslastung [%]	67
Mittlere Einstauhöhe [m]	2,53
Szenario A1 Q Max. [m^3]	18,7
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m^3]	14,2
Szenario A2 Q Max. Scheitelreduktion [%]	24
Anmerkungen	*1 Nutzung von 3 Teichen

Modellrechnung IST-Zustand

Es wird anhand der Modellrechnungen für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Natzschung am Bezugspunkt Telčsky Potok (Mündung) (Auslass SE 201) beträgt $26 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.08.2002). Die maximale Abflussspende beläuft sich für dieses Hochwasser auf $1.189 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ mit einem Abflussbeiwert von 61 %.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Das HQ_{100} erzeugt an der Mündung zur Natzschung einen Hochwasserscheitel von $18,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Vergleich zum Mündungsbereich der Natzschung in die Flöha, ist die maximale Abflussspende an der Telčskymündung rund 2 % höher und das Abflussvolumen beträgt 27 % am Gesamtabflussvolumen. Der Abflussbeiwert beträgt 52 %.

Der Anstieg des Abflusses in Szenario A1 erfolgt an der Mündung zur Natzschung gegen 4:45 und erreicht in einem steilen und linearen Anstieg in knapp über 3 Stunden gegen 8:00 mit $18,7 \text{ m}^3/\text{s}$ das Maximum. Dies entspricht einem Anstieg von $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Stunde. Die Hochwasserspitze hält, wie schon am Steinbach, nur kurz an. Im Vergleich zur auflaufenden Hochwasserwelle fällt der absteigende Ast in den ersten drei Stunden nach dem Hochwassermaximum mit $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Stunde auf $16,6 \text{ m}^3/\text{s}$ weitaus moderater ab. Mit Ende der Niederschläge gegen 13:15 sinkt der Hochwasserast nochmals stärker ab und beschreibt danach eine exponentielle Abnahme. Der Abfluss halbiert sich innerhalb von 10 Stunden. Nach 24 Stunden liegt der Abfluss noch bei $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. nach 48 Stunden bei $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Ausgangsniveau wird erst nach 4 Tagen erreicht.

Der Hochwasseranstieg verläuft in Szenario A2 weniger steil als in Szenario A1. Bis 08:00 wird ein Wert von $8 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht und liegt zu diesem Zeitpunkt fast $10 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb der Abflussspitze in Szenario A1. In den ersten 3 Stunden beträgt die Steigung pro Stunde nur noch $3,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Danach flacht der ansteigende Ast zunehmend ab. Der Hochwasserscheitel von $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$ wird erst um 13:15, also 5 Stunden später als in Szenario A1 erreicht. Wie schon in Szenario A1 hält der Scheitelabfluss nur kurz an, fällt jedoch in den ersten 3 Stunden nur um $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Stunde auf $13,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ab. In diesem Zeitraum schneiden sich die Ganglinien beider Szenarien und das zuvor retardierte Abflussvolumen fließt zeitverzögert ab. Zehn Stunden nach Hochwasserscheitel hat sich der Abfluss halbiert. Nach 24 Stunden sind die Speicher weitestgehend und nach 48 Stunden vollständig entleert.

Vergleich Szenarien

Die fünf Speicher (N1-N5) mit einem Gesamtstauvolumen von $176,4 \text{ dam}^3$ und einer Fläche von $11,17 \text{ ha}$, erniedrigen bei einem HQ_{100} den Hochwasserscheitel im Mündungsbereich zur Natzschung um 24 % auf $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Hochwasserscheitel wird in Vergleich zu Szenario A1 erst 5 Stunden später erreicht.

Speicherauslastung

Die Speicher werden zwischen 37 % und 81 % ausgelastet. Effektiv werden daher nur 114 dam³ Stauraum benötigt. Die potenzielle Einstauhöhe liegt im Mittel bei 3,0 Meter, die reelle Einstauhöhe beträgt im Mittel 2,5 Meter. In Bezug auf die Speicher N2-N5 beläuft sich der effektive spezifische Stauraum auf 5,2 mm, der potenzielle spezifische Stauraum beträgt 6,9 mm. Der Speicher N1 muss aufgrund seiner isolierten Lage eigenständig beziffert werden. Für diesen gilt ein effektiver spezifischer Stauraum von 46,5 mm, bzw. ein potenzieller spezifischer Stauraum von 126 mm.

Gemessen am Mündungsbereich in die Natzsung kann in Szenario A2 pro 1.000 Kubikmeter genutztem Stauraum eine prozentuale Scheitelreduktion von 0,2 % erzielt werden. Pro Prozentpunkt Scheitelreduzierung werden 4.733 m³ Speichervolumen benötigt. Als ein weiteres Maß zur Beschreibung der Speicherauslastung wird das Verhältnis zwischen genutztem Speichervolumen und dem über die Zeit zwischengespeicherten Abflussvolumen verwendet. Im vorliegenden Fall beträgt im Mündungsbereich zur Natzsung das Verhältnis 1:11,7.

7.1.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurden in Szenario A1 und A2 insgesamt sechs Einzugsgebiete bzgl. der Wirkung dezentraler Hochwasserrückhaltebecken auf den Hochwasserabfluss bei einem HQ₁₀₀ betrachtet. Diese umfassen Flächen zwischen 2,5 und 28 km² und weisen maximale Abflussspenden zwischen 625 und 984 l/(s*km²) auf. Die Abflussvolumina schwanken je nach Abflussbereitschaft und Größe des Gebietes zwischen 160 und 1.551 dam³. Die maximalen Abflüsse variieren in Szenario A1 zwischen 2,1 und 22,4 m³/s. Die Abflussbeiwerte liegen in der Regel zwischen 59-61 % und nehmen in Szenario A2 auf 40-52 % ab.

Die Reaktionszeiten des ansteigenden Hochwasserastes sind in allen Gebieten sehr kurz. In der Regel wird der Hochwasserscheitel 3 Stunden nach Anstiegsbeginn erreicht. Der Anstieg erfolgt fast linear. In den kleineren Einzugsgebieten steigt der Abfluss pro Stunde zwischen 0,6 und 1,8 m³/s an. In den großen Gebieten liegen die Werte pro Stunde zwischen 5,5 und 6 m³/s.

Je nach Anzahl und Lage der 19 dezentralen Hochwasserrückhaltebecken reduzieren diese in Szenario A2 die Hochwasserscheitel an den Bezugspunkten zwischen 15 und 49 %. Damit gehen lokale Scheitelverzögerungen einher, welche zwischen 10 und 1,5 Stunden liegen. Die Speicher werden auf Ebene der Bezugspunkte LE 1- LE 6 im Mittel zwischen 49 und 92 % ausgelastet (vgl. Tab. 37: S.210).

Das Einzugsgebiet des Großen Steinbaches (LE 5) weist mit zwei Speichern sowohl mit 15 % die geringste Scheitelreduzierung und mit +15 Minuten eine geringfügige Verkürzung der Scheitellaufzeit auf. Die Bezugspunkte LE 1 und LE 4 besitzen identisch große Einzugsgebiete von 5,6 bzw. 5,7 km² Fläche, jedoch unterschiedliche Spitzenabflüsse von 3,5 bzw. 5,6 m³/s und weisen bei jeweils 3 Speichern mit 49 bzw. 45 % die höchsten Scheitelabminderungen auf. Im Oberlauf der Natzsung (Bezugspunkt LE 1) kann neben der größten Scheitelabminderung auch mit 10 Stunden die größte Laufzeitverlängerung des Hochwasserscheitels festgestellt werden.

Tab. 37: Übersicht über die hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ₁₀₀ an den Bezugspunkten LE 1 - LE 6

Bezugspunkt	Anzahl an Speichern	EZG [km ²]	HQ ₁₀₀ Szenario A1 [m ³ /s]	HQ ₁₀₀ Szenario A2 [m ³ /s]	Scheitelreduktion Szenario A2 [%]	Scheitelverzögerung [hh; mm]
LE 1 Načetin	3	5,6	3,5	1,8	49	-10
LE 2 Kalek	1	2,5	2,1	1,6	24	-1,5
LE 3 Einsiedel	9	28	22,4	14,9	34	-5
LE 4 Rübenau	3	5,7	5,6	3,1	45	-5
LE 5 Steinbach	2	4,6	4,0	3,4	15	+ 0,15
LE 6 Telčský P.	5	21,7	18,7	14,2	24	-5

Am Bezugspunkt Kalek (LE 2) kann mit einem Speicher oberhalb der Ortschaft eine Scheitelreduzierung von 24 % erreicht werden. Im Vergleich zu allen anderen Bezugspunkten fällt hier allerdings der Hochwasserscheitel für Szenario A2 mit 2,1 m³/s am kleinsten aus. Die Scheitelverzögerung liegt mit 1,5 Stunden am niedrigsten. Die beiden größten Einzugsgebiete LE 3 und LE 6 weisen mit 22,4 und 18,7 m³/s ähnlich hohe Abflussspitzen auf, die in beiden Fällen durch 9 bzw. 5 Hochwasserrückhaltebecken auf 14 m³/s reduziert werden können. Die prozentuale Verringerung liegt damit bei 34 bzw. 24 %. An beiden Bezugspunkten wird der Hochwasserscheitel um 5 Stunden verzögert.

Betrachtet man zusätzlich die einzelnen Speicher, dann liegt die Spanne der Abflussspitzen zwischen 0,5 und 22,4 m³/s und deren Durchschnitt bei 5 m³/s. Die einzelnen Speicher werden im Schnitt zu 72 %, minimal zu 37 % und maximal zu 96 % ausgelastet. Damit wird in Szenario A2 effektiv ein Stauraum von 390 dam³ genutzt. Hierüber reduzieren die dezentralen Hochwasserrückhaltebecken lokal den Hochwasserscheitel zwischen 6 und 75 %. Der Durchschnitt liegt damit auf lokaler Ebene bei einer 40-prozentigen Scheitelreduktion. Für die drei höchsten Abflusswerte von 22, 16 bzw. 11 m³/s werden Scheitelminderungen von 34, 22 und 17 % gerechnet.

Folgende Tabelle (Tab. 38: S.211) gibt eine Übersicht über Kennwerte, die zur Beurteilung des Wirkungsgrades und der hydrologischen Eigenschaften von Speichern entwickelt wurden

(vgl. Tab. 21: S.152). Die Kennwerte charakterisieren die Speicher nicht allein auf den gängigen Angaben zum effektiven spezifischen Stauvolumen und der relativen Scheitelreduktion, sondern auch vor dem Hintergrund der Abflussbereitschaft und des potenziellen Abflussvolumens eines Einzugsgebietes. Der effektive spezifische Stauraum schwankt auf Ebene der Bezugspunkte zwischen 5,2 und 14 mm. Die prozentual größten Scheitelreduktionen werden in Bezug zur Einzugsgebietsgröße in den kleinsten Gebieten mit 7,9 bis 9,6 % erzielt. An den Bezugspunkten LE3 und LE6 werden über 4.000 m³ Speicher pro Prozent Scheitelreduktion benötigt, jedoch weisen diese Standorte auch sehr hohe Abflussvolumina auf, sie sind 5,8 bis 11,7 mal höher als die Stauvolumina. Pro 1.000 m³ Stauvolumen wird eine Scheitelabminderung zwischen 0,2 und 0,17 % erzielt. Äußerst effektiv scheint der Speicher oberhalb von Bezugspunkt LE2 zu sein. Er ist mit 92 % sehr gut ausgelastet, benötigt im Verhältnis zur Scheitelreduktion von 49 % nur wenig Stauraum von 400 m³ pro Prozentpunkt Scheitelreduktion und weist mit dem Faktor 9,6 auch ein gutes Verhältnis von prozentualer Scheitelreduktion zur Gebietsfläche auf. Der effektive spezifische Stauraum von 6 mm ist dahingehend eher als niedrig einzustufen.

Tab. 38: Übersicht über den Wirkungsgrad und die hydrologischen Eigenschaften der Speicher bei einem HQ₁₀₀ an den Bezugspunkten LE 1- LE 6

Bezugspunkt	Mittlere Auslastung der Speicher [%]	Prozentuale Scheitelreduktion pro 1 dam ³ genutztem Stauvolumen [%/dam ³]	Genutztes Speichervolumen pro Prozentpunkt Scheitelreduktion [m ³ /%]	Genutztes Speichervolumen : Abflussvolumen	Scheitelreduktion pro km ² Einzugsgebietsfläche [%]	effektiver spezifischer Stauraum [mm]
LE 1 Načetin	71	1	960	1:5,8	8,8	8,4
LE 2 Kalek	92	2,7	400	1:9,1	9,6	6,6
LE 3 Einsiedel	77	0,17	6000	1:7,7	1,2	7
LE 4 Rübenau	82	0,8	1266	1:5,8	7,9	9
LE 5 Steinbach	49	0,8	1220	1:3,5	3,3	14
LE 6 Telčsky	67	0,2	4733	1:11,7	1,1	5,2

7.2 Hydrologische Wirksamkeit auf Einzugsgebietsebene (EE 1-3)

Einleitung

Im vorhergehenden Kapitel konnte die hydrologische Wirksamkeit der dezentral angeordneten Hochwasserrückhaltebecken für ein HQ_{100} gezeigt werden, sowohl auf Ebene der einzelnen Speicher (N1-N19) als auch in Kombination auf Ebene der sechs lokalen Bezugspunkte innerhalb des Einzugsgebietes der Natzschung (LE 1-LE 6) mit Flächengrößen zwischen 2,5 und 28 km². An allen Bezugspunkten konnten die Hochwasserscheitel für ein HQ_{100} deutlich gesenkt und zeitlich verzögert werden können (Szenario A2).

Es wird in folgendem Kapitel die Wirkung der dezentralen Hochwasserrückhaltebecken auf Einzugsgebietsebene, anhand von drei Bezugspunkten am Unterlauf der Natzschung, betrachtet. Dies ist zum einen der Pegel Rothenthal (EE 1) als Standort zur Modellkalibrierung, als Übergabepunkt zum hydrologischen Modell der oberen Flöha und als Bezugspunkt für Bemessungshochwasserereignisse. Als zweiter Bezugspunkt dient, durch die unmittelbare Lage an der Natzschung, die Ortslage Rothenthal (EE 2). Der dritte Bezugspunkt (EE 3) ist die Einmündung der Natzschung in die Flöha bzgl. der überörtlichen Wirkung der dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen auf die Stadt Olbernhau respektive den Ortsteil Grünthal.

Es werden die Szenarien A1 und A2 an den Bezugspunkten miteinander verglichen. Darüber hinaus werden Varianten bzw. Maßnahmenkombinationen des Szenarios A2 gegenübergestellt und bzgl. ihrer Wirksamkeit in eine Rangfolge gesetzt. Die Varianten sind unterschiedliche Kombinationen einzelner oder mehrerer Hochwasserrückhaltebecken aus wechselnden Einzugsgebieten.

Einzugsgebiet, Speicherstandorte und Speicherauslastung

Die Fläche des Einzugsgebietes umfasst bis zum Pegel Rothenthal 75 km², bis zur Ortslage Rothenthal 81 km² und bis zur Mündung der Natzschung in die Flöha 85 km². Zwischen dem Pegel Rothenthal und dem Beginn der Ortslage Rothenthal, respektive der Einmündung in die Flöha, besitzt die Natzschung noch eine Laufstrecke von 2,2 bzw. 5 km. Die wichtigsten Teileinzugsgebiete der Natzschung ergeben sich aus den zuvor aufgeführten Bezugspunkten LE 1 – LE 6.

Es befinden sich im Einzugsgebiet der Natzschung bis zur Einmündung in die Flöha min. 19 potenzielle Standorte für dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen in Form von Hochwasserrückhaltebecken und Teichen. Neun Standorte liegen oberhalb des Bezugspunktes Einsiedel-Sensenhammer und konzentrieren sich somit auf das südwestliche Einzugsgebiet. Drei weitere Standorte befinden sich im Einzugsgebiet des Rübenaues oberhalb der Ortslage Rübenaue und wirken auf den Hochwasserabfluss aus dem zentralen, westlichen und nordwestlichen Bereich des Natzschung-Einzugsgebietes. Schon unterhalb der Ortschaft Kalek, jedoch spätestens nach Einmündung des Rübenaues verändert die Natzschung Talform, Gefälle und Abfluss. Ab hier bis kurz vor der Mündung in die Flöha, lässt der tief eingeschnittene, eng gewundene und von äußerst steilen Flanken begleitete Talverlauf keine weiteren Standorte

für dezentrale Hochwasserrückhaltebecken zu. Hingegen bieten der Oberlauf des Steinbaches mit zwei Standorten für Hochwasserrückhaltebecken und der Oberlauf des Telčský Potok mit weiteren fünf Lokalitäten zusätzliche Potenziale.

Die zuvor berechnete Speicherauslastung weist für die einzelnen Speicher eine Spanne von 37-96 % auf. Die max. Verweilzeit des gestauten Wassers in den HRB beträgt bei Vollstau 1-2 Tage. Effektiv werden bei einer durchschnittlichen Einstauhöhe von 3,6 Meter 390 dam³ Stauraum benötigt, d.h. die Auslastung für ein HQ₁₀₀ liegt im Mittel bei 72 %. Gemessen an der Natzschungmündung in die Flöha, beträgt der effektive spezifische Stauraum 4,5 mm, der potenzielle spezifische Stauraum hingegen 6,1 mm.

Modellrechnung IST-Zustand

Für den Bezugspunkt EE1 (Pegel Rothenthal) wurde anhand der Modellrechnungen für den Zeitraum 2002 bis 2008 ein Mittelwasserabfluss von 1,5 m³/s ermittelt. Der höchste modellierte Abfluss der Natzschung am Bezugspunkt Pegel Rothenthal (Auslass SE 101) beläuft sich auf 89 m³/s (12.08.2002). Die maximale Abflussspende beträgt für dieses Hochwasser 1.185 l/(s*km²) mit einem Abflussbeiwert von 61 %.

Am Bezugspunkt EE 2 (Gemeinde Rothenthal) liegt für diesen Zeitraum der Mittelwasserabfluss bei 1,6 m³/s. Der maximale Abfluss der Natzschung steigt am Bezugspunkt Ortslage Rothenthal (EE2, Auslass SE 1002) auf 94 m³/s an (12.08.2002). Die maximale Abflussspende sinkt leicht ab auf 1162 l/(s*km²). Der Abflussbeiwert bleibt mit 61 % konstant.

An der Mündung in die Flöha (EE 3) steigt der Mittelwasserabfluss der Natzschung nochmals um 100 Liter auf 1,7 m³/s an. Der maximale Abfluss ist am Bezugspunkt Natzschung Mündung (EE 3, Auslass SE 1001) nochmals auf 101 m³/s angestiegen (12.08.2002). Die maximale Abflussspende steigt wieder an und beläuft sich an diesem Punkt auf 1.194 l/(s*km²). Hingegen bleibt der Abflussbeiwert unverändert.

Modellrechnung Szenario A1 und A2

Für das HQ₁₀₀ wird für den Mündungsbereich zur Flöha ein Abflussvolumen von 4.875 dam³ und eine maximale Abflussspende von 843 l/(s*km²) berechnet. Das HQ₁₀₀ erzeugt am Pegel Rothenthal einen Hochwasserscheitel von 63,4 m³/s, dieser liegt mit knapp 4 m³/s niedriger als oberhalb der Ortslage Rothenthal (67 m³/s). An der Mündung zur Flöha wird ein Wert von 72 m³/s erreicht. Es wird in den 10 km² Einzugsgebiet unterhalb des Pegel Rothenthal nochmal über 8 m³/s zusätzlicher Spitzenabfluss generiert.

Nach Ende des Vorregens (gegen 04:45 Simulationszeit) setzt mit Erhöhung der Niederschlagsintensität eine unmittelbare Abflussreaktion an allen Bezugspunkten innerhalb des Einzugsgebietes (LE1-LE6) ein. An den Bezugspunkten am Unterlauf der Natzschung steigt der Abfluss leicht zeitversetzt gegen 05:00, aber genauso sprunghaft an. Gegen 07:00 nehmen die Niederschläge wieder ab. Zwischen 7:30 und 8:00 werden an den lokalen Bezugspunkten LE1-LE6 die Hochwasserscheitel erreicht. Am Unterlauf der Natzschung wird an den hier betrachteten

Bezugspunkten EE1-EE3 der Hochwasserscheitel ebenso zeitversetzt erreicht (sukzessive um 08:30, 8:45 und schließlich an der Mündung um 09:00). Der Anstieg erfolgt damit äußerst rasch und annähernd linear.

Am Pegel Rothenthal (EE1) verbleiben zwischen der sprunghaften Abflusserhöhung von 3 m³/s um 05:00, ca. 3,5 Stunden bis zum Erreichen des Maximums von knapp unter 64 m³/s. Der Abfluss verzwanzigfacht sich! Am Bezugspunkt EE 2 (Gemeinde Rothenthal) wird der Hochwasserscheitel ca. 15 Minuten später erreicht und ist, bedingt durch die weiteren Zuflüsse, auf 67 m³/s angestiegen. Nach einer Laufstrecke von 5 Kilometern wird an der Mündung in die Flöha der Hochwasserscheitel um 09:00 erreicht und hat sich mit 72 m³/s um 12 m³/s erhöht. Die Laufzeit des Hochwasserscheitels zwischen dem Pegel Rothenthal (EE1) und der Mündung liegt damit bei ungefähr 10 km/h bzw. 2,7 m/s. Jedoch werden die Hochwasserscheitel am Unterlauf erst anderthalb bis zwei Stunden nach Abnahme der hohen Niederschlagsintensität erreicht.

Bedingt durch den raschen Anstieg und zunächst schnellen Abfall des Abflusses sind die dargestellten Hochwasserscheitel im Unterlauf zunächst spitz zulaufend und verbleiben nur kurz im Maximum. Der abfallende nimmt im Vergleich zum ansteigenden Hochwasserast deutlich langsamer, jedoch zunächst annähernd linear ab. Gegen 13:00 enden die Niederschläge und wiederum zueinander um dreißig bis fünfundvierzig Minuten zeitversetzt, zeigen nun alle Abflussganglinien einen deutlich rascheren Abfall. Die Hochwasseräste der Bezugspunkte EE1-EE3 beschreiben bis zum Erreichen eines Normalzustandes eine exponentielle Abnahme. An den Bezugspunkten halbiert sich der Abfluss in knapp 9 Stunden.

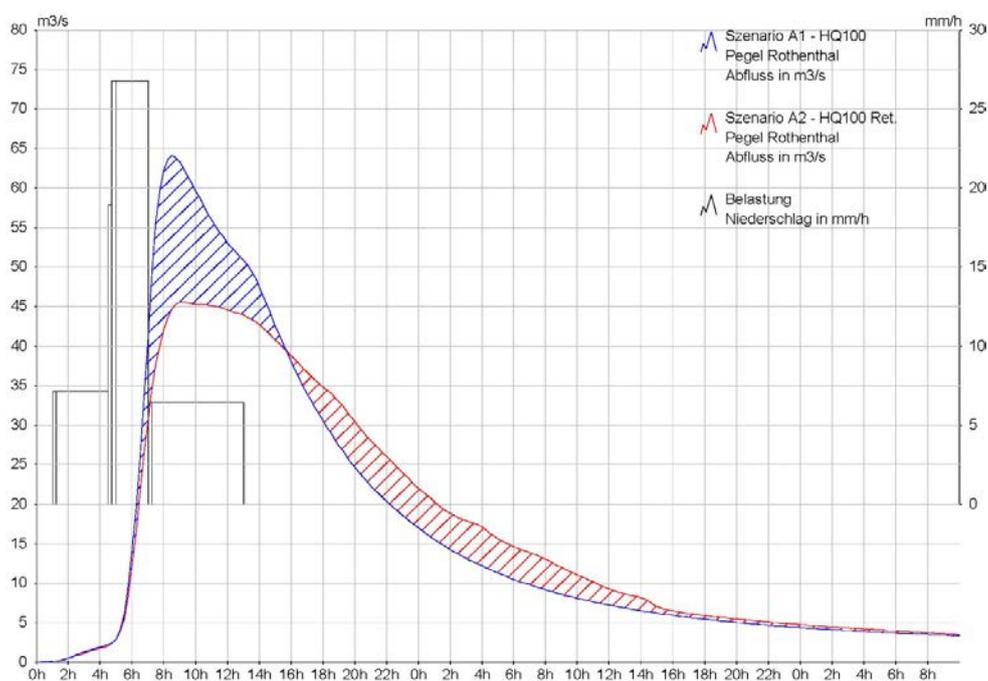


Abb. 47: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Pegel Rothenthal (EE 1)

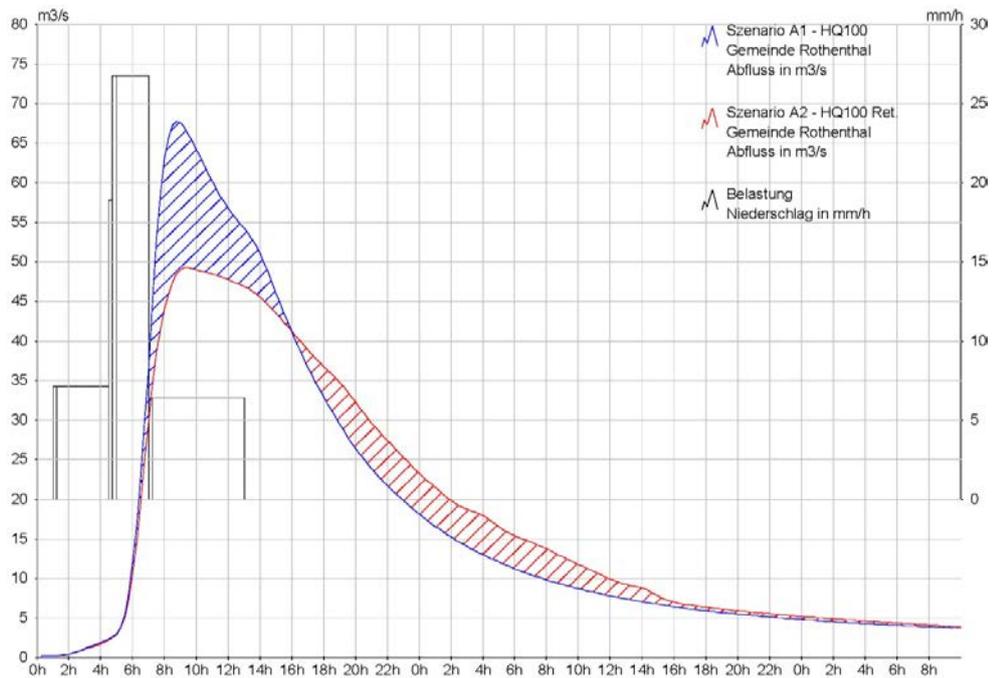


Abb. 48: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Gemeinde Rothenthal (EE 2)

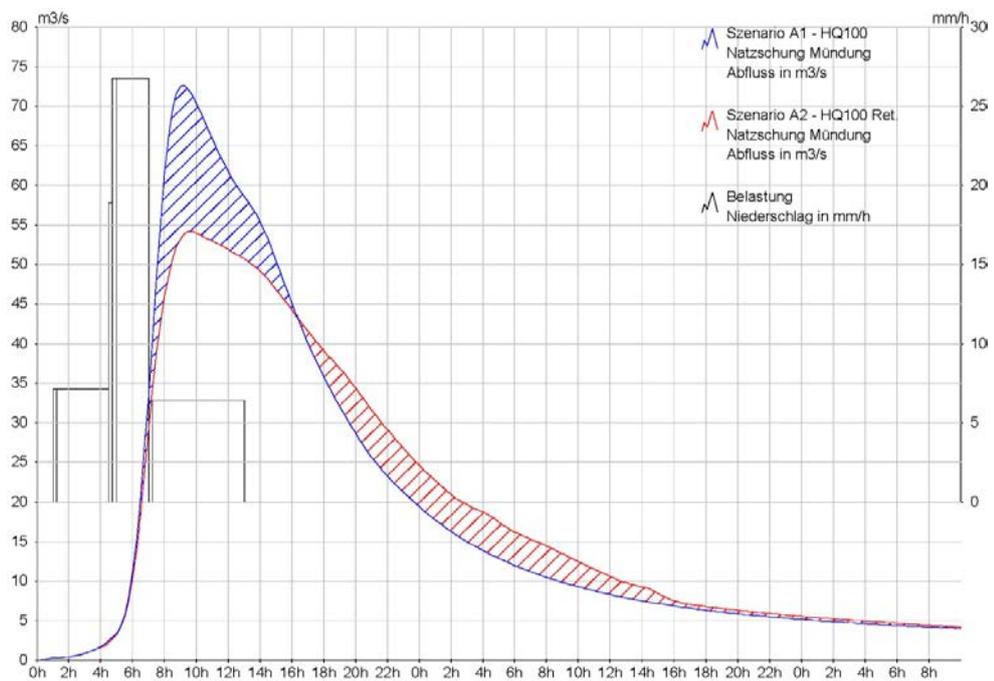


Abb. 49: Hochwasserabfluss am Bezugspunkt Natzschung Mündung (EE 3)

Vergleich Szenarien

Werden alle oben genannten Maßnahmen für den dezentralen Hochwasserschutz genutzt, wird bei einem simulierten HQ₁₀₀ am Pegel Rothenthal eine Scheitelreduktion von 28,7 % auf 45,2 m³/s und eine Wasserstandsänderung um 35cm (von 204 cm auf 169 cm) erreicht. Damit geht eine Verzögerung der Abflussspitze um 45 Minuten einher. Die Ergebnisse zeigen für die Ortslage Rothenthal, dass unter Nutzung aller Potenziale eine Reduktion des Scheitels um 27,2 % auf 48,8 m³/s erreicht werden kann. Die zeitliche Verzögerung der Abflussspitze liegt ebenfalls bei 45 Minuten. Für den Mündungsbereich zur Flöha liegt die Reduktion des Abflusses auf einen Wert von 53,7 m³/s immer noch bei 25,4 %.

In Szenario A2 zeigt sich die Retentionswirkung der Hochwasserrückhaltebecken schon unmittelbar nach Anstieg der Abflussganglinie. An allen drei Bezugspunkten verläuft der Anstieg deutlich langsamer. Der Effekt der einzelnen Maßnahmen basiert am Unterlauf der Natzsung in erster Linie auf einer Verlagerung und zeitlichen Streckung des Abflussvolumens vom Maximum der Hochwasserwelle auf den absteigenden Ast. Der Anstieg als direkte Reaktion auf die Niederschläge bleibt in seiner Form erhalten, jedoch wird die ursprüngliche Spitze nicht mehr erreicht, wie auch der obere Ast der Ganglinie eine markante Änderung der Steigung aufweist. Der Hochwasserscheitel verliert seine Spitzigkeit und deutet die Form eines Plateaus an. Der abfallende Ast weist in der Konsequenz einen flacheren und weitaus weniger konkaven Verlauf auf. 15 Stunden nach Einsetzen des Hochwassers schneiden sich die Ganglinie für die Szenarien mit und ohne Retentionsmaßnahmen. Ab diesem Zeitpunkt zeigt sich das durch die Retentionsmaßnahmen generierte Abflussvolumen sehr deutlich. Nach 36 Stunden nähern sich die Ganglinien wieder an. Zu diesem Zeitpunkt sind die Speicher weitestgehend entleert. Die Gesamtabflussfülle ist für beide Ganglinien identisch.

Die Wellenlaufzeit zwischen EE1 und EE3 beträgt in Szenario A1 30 Minuten und bleibt auch in Szenario A2 unverändert. An allen drei Bezugspunkten trifft der Hochwasserscheitel 45 Minuten später ein.

Die Scheitelreduktion für den Pegel und die Ortslage Rothenthal entspricht damit einer Senkung des Hochwasserscheitels unter das Niveau eines HQ₅₀. Die dezentral angelegten Hochwasserrückhalteräume würden damit das Überschwemmungsrisiko am Unterlauf der Natzsung deutlich reduzieren.

In Kombination mit der inzwischen angelegten Hochwasserschutzmauer zwischen Rothenthal und Einmündung in die Flöha, welche auf das Bemessungsziel eines HQ₁₀₀ ausgelegt ist, würde zudem ein Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall eines HQ₂₀₀ schadlos abfließen können. In dieser Arbeit nicht aufgeführte Simulationsergebnisse zeigen, dass die auf ein HQ₁₀₀ optimierten Hochwasserrückhalteräume ein solches Extremereignis noch zwischenspeichern könnten und den Scheitel am Pegel Rothenthal von einem HQ₂₀₀ auf ein HQ₁₀₀ reduzieren würden (Bölscher et al., 2013). Das entsprechende Retentionsvolumen ist vorhanden, jedoch würden die Kapazitäten voll ausgeschöpft werden müssen.

Tab. 39: Hydrologische Gesamtwirkung der Speicher bei einem HQ100 auf Einzugsgebietsebene (EE1-EE3)			
Bezugspunkte	Pegel Rothenthal EE 1	Gemeinde Rothenthal EE 2	Natzschung Mündung EE 3
Lokales Schutzziel	Gemeinde Rothenthal		
Überörtliches Schutzziel	Stadt Olbernhau		
Anzahl und Nummer der Speicher	19, N1-N19*1		
Gewässer und Einzugsgebiet	Natzschung		
Systemelement im Modell für Ergebnisoutput	Auslass Teilgebiet 101 Pegel Rothenthal	Auslass Teilgebiet 1002 oberhalb Ortslage Rothenthal	Auslass Teilgebiet 1001 Mündung in die Flöha
Einzugsgebiet bis Bezugspunkt [km ²]	75,6	81	85
Max. Abflussspende [l/(s*km ²)] *2	839	826	843
Abflussvolumen [dam ³] *2	4.233	4.559	4.875
Genutztes Stauvolumen [dam ³]	390		
Mittlere Auslastung [%]	72		
Mittlere Einstauhöhe [m]	3,2		
Szenario A1 Q Max. [m ³]	63,4	67,1	72,0
Szenario A2 Q Max. gedrosselt [m ³]	45,2	48,8	53,7
Q Max. Scheitelreduktion [%]	28,7	27,2	25,4
Anmerkungen	*1 Nutzung von 3 Teichen; *2 Szenario A1		

7.3 Variantenkombination von Speicherkaskaden

Die folgende Tabelle (Tab. 40: S.220) zeigt die Simulationsergebnisse für ein HQ₁₀₀ und die Retentionsleistung unterschiedlicher Variantenkombinationen von Speichern, welche in ihrer Leistung auf ein HQ₁₀₀ optimiert wurden. In der ersten Spalte sind die Kombinationen aus Speichervarianten der Spalte 6-10 aufgeführt und in Spalte 2 der daraus resultierende Rang bzgl. der Höhe der Scheitelreduktion. Es folgt in Spalte 3 die jeweilige Anzahl von Hochwasserrückhaltebecken als Summe aus den Speichervarianten. Die Spalten 4-5 zeigen den Anteil an noch vorhandenen und den Anteil an neu zu konstruierenden Strukturen, bspw. in Form von Absperrbauwerken, Straßendämmen und Teichen.

Die Variantenkombination 12345 ist identisch mit dem zuvor vorgestellten Szenario A2. Sie steht mit der hier höchstmöglichen Scheitelabminderung von 29% und einer Scheitelverzögerung von 45 Minuten an erster Stelle der Rangliste. Die Herausnahme der letzten Speichervariante 2 zeigt eine nur marginale Veränderung des Hochwasserscheitels, aber eine Abnahme der zeitlichen Verzögerung von 15 Minuten an. Die Variante 2 wird für alle weiteren Kombinationen daher nicht mehr berücksichtigt.

Erst die Herausnahme der Speichervariante 3 (Rübenauer Bach) oder alternativ der Variante 5 aus der Gesamtkombination, zeigt mit 23 bzw. 22 % Scheitelminderung einen deutlichen Effekt an. Alle 3er-Kombinationen wie 145 oder 345 erzielen Scheitelminderungen von 19-23 %. Die Beibehaltung von Speichervariante 4 in der Variantenkombination 134 erzeugt im Gegensatz zu allen anderen Kombinationen die größte Laufzeitverlängerung von 60 Minuten, bei einer Scheitelabminderung von 22 %. In dieser Kombination werden maximal 12 Speicher benötigt, davon sind 6 schon vorhanden. Bei den folgenden 2er-Kombinationen erzielt die Kombination 14 mit einer Scheitelreduktion von 16 % und einer Laufzeitverzögerung von 15 Minuten den größten Effekt. Sie wird damit auf Rang 7 eingestuft. Es werden insgesamt 9 Standorte benötigt.

Die letzten 4 der 17 Plätze nehmen die einzelnen Speichervarianten ein. Die Scheitelreduktion liegt durchgehend unter 10 %. Den größten Effekt mit 8 % erzielen die fünf Speicher N1-N5 am Telčský Potok, gefolgt von den Speicher N11-N14 am Bily Potok, Jindrichova und Luznice. Die Speicher N6-N7 am Großen Steinbach erzielen keinen nennbaren Effekt.

Tab. 40: Wirksamkeitsbetrachtung von Hochwasserrückhaltebecken für ein HQ100 bei Kombination verschiedener Einzugsgebiete

Bemessungs- grundlage HQ100	Anzahl und Strukturen	HRB-Strang					Hochwasserscheitel								
		Hochwasserrückhaltebecken / Teiche			1	2	3	4	5	A: HQ100 ohne Retention		B: HQ100 mit Retention		Veränderung A:B	
Kombination HRB-Stränge	Rangliste Scheitel- reduktion	Summe der Einzel- maßnahmen	Bestehende Strukturen	Neu zu schaffende Strukturen	HRB Telčsky potok (LE6)	HRB Steinbach (LE5)	HRB Rübenauer Bach (LE4)	HRB Bily potok, Luznice, Jindrichova (LE3 ohne LE1++)	HRB Oberlauf Natzschung ohne Zuflüsse (LE1++)	Q [m³/s]	Zeitpunkt [t]	Q [m³/s]	Zeitpunkt [t]	Q [m³/s]	Zeitpunkt [t]
12345	1	19	11	8	x	x	x	x	x	63.41	08:30	45.2	09:15	-28.7	00:45
1345	2	17	9	8	x		x	x	x	63.41	08:30	46.2	09:00	-27.1	00:30
145	3	14	8	6	x			x	x	63.41	08:30	48.9	09:00	-23.0	00:30
134	4	12	6	6	x		x	x		63.41	08:30	49.4	09:30	-22.1	01:00
135	5	13	9	4	x		x		x	63.41	08:30	51.4	09:00	-18.9	00:30
345	6	12	5	7			x	x	x	63.41	08:30	51.4	08:45	-18.9	00:15
14	7	9	5	4	x			x		63.41	08:30	53.2	08:45	-16.1	00:15
15	8	10	7	3	x				x	63.41	08:30	54.1	08:45	-14.7	00:15
45	9	9	4	5				x	x	63.41	08:30	54.2	08:30	-14.5	00:00
13	10	8	5	3	x		x			63.41	08:30	55.7	08:45	-12.1	00:15
34	11	7	2	5			x	x		63.41	08:30	55.9	08:30	-11.8	00:00
35	12	8	4	4			x		x	63.41	08:30	56.8	08:30	-10.5	00:00
1	13	5	4	1	x					63.41	08:30	58.6	08:45	-7.6	00:15
4	14	4	1	3				x		63.41	08:30	58.9	08:30	-7.2	00:00
5	15	5	3	2					x	63.41	08:30	59.7	08:30	-5.8	00:00
3	16	3	1	2			x			63.41	08:30	61.4	08:30	-3.2	00:00
2	17	2	2	0		x				63.41	08:30	63.7	08:30	0.4	00:00

8 Diskussion

8.1 Einleitung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden in den folgenden Abschnitten dahingehend betrachtet, ob und in welchem Umfang die gesetzte Zielstellung erreicht und gestellte Fragen beantwortet werden konnten. Ziel der Arbeit war die Analyse des dezentralen Hochwasserschutzpotenzials im Einzugsgebiet der Natzschung anhand des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM.

Während der erste Aspekt der Diskussion eine kritische Modellbetrachtung umfasst, behandelt der zweite Aspekt die Möglichkeiten des dezentralen Hochwasserschutzes im Mittleren Erzgebirge am Beispiel des Untersuchungsgebietes der Natzschung. Der dritte Aspekt setzt die Ergebnisse der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext vergleichbarer Arbeiten aus dem deutschen Mittelgebirgsraum.

Die Modellierung des Einzugsgebietes der Natzschung machte es erforderlich, einerseits alle wesentlichen Modelleingangsparameter in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung in ein hydrologisches Modellsystem implementieren zu können, um die Heterogenität und schnelle Abflussreaktion eines solchen Mittelgebirgsraumes abzubilden. Andererseits sind viele grundlegende Systemeigenschaften und Prozesse messtechnisch und physikalisch-mathematisch nur schwer erfassbar und müssen für eine Modellierung abstrahiert bzw. vereinfacht werden. Eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung verbietet sich dann zumeist schon aus Mangel an Daten.

Das Modellsystems NASIM wurde zur Erreichung der Zielsetzung der Untersuchungen ausgewählt, da es die wesentlichen hydrologischen Prozesse zeitlich sehr hoch und über einen langen Zeitraum abzubilden erlaubt, ohne auf eine hohe räumliche Auflösung verzichten zu müssen. Die hierfür notwendigen Eingangsdatensätze sind spezifisch genug, jedoch noch so allgemein gehalten, so dass sie in der Regel gut verfügbar und bei Bedarf an die Gegebenheiten eines Einzugsgebietes adaptierbar sind. Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel zunächst die (auch) aus dem Modellansatz resultierenden Unsicherheiten diskutiert.

8.2 Betrachtung der Modellqualität

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass eine Abbildung der hydrologischen Verhältnisse für das Einzugsgebiet der Natzschung mit Hilfe des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM grundsätzlich möglich ist. Im Rahmen der Ergebnisbeschreibung wurde gezeigt, dass die Modellqualität ausreichend hoch ist, um Hochwasserereignisse unterschiedlicher Art, Dauer und Höhe in einem zeitlich hochaufgelösten Modell über den Gesamtzeitraum von 2002-2008 vollständig abzubilden. Damit ist auch die Grundlage zur Simulation klein- bis mesoskaliger dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen der Modellunsicherheit gegeben.

Eine Modellunsicherheit besteht in der Überschätzung der Niedrigwasserabflüsse, der Mittelwasserabflüsse im Zeitraum 2006-2008 und in der Darstellung von Hochwasserereignissen bis etwa zu einem HQ_2 . Insbesondere die sommerlichen Niedrig- und Mittelwasserabflüsse werden vom Modell stärker überschätzt als die kleinen winterlichen Ereignisse.

Die Niedrigwasserführung fällt im Modell deutlich zu hoch aus und kann im Sommer durch zu geringe potenzielle und tatsächliche Verdunstungswerte bedingt sein. Während der Haupteinflussfaktor für die potenzielle Verdunstung der Temperaturverlauf ist, werden die tatsächlichen Verdunstungswerte über die nutzbare Feldkapazität des Bodens und die Durchwurzelungstiefe der Vegetation gesteuert. Fallen diese Werte zu gering aus, dann wird das überschüssige Wasser als (zu hoher) Basisabfluss weitergeleitet. Die zu hohen Winterwerte des Modells können verursacht sein durch einen zu geringen Schneedeckenaufbau bzw. einem zu schnellen Abschmelzen der Schneedecke. Eine weitere Ursache ist durch Lücken und Fehler in den Messwerten zu suchen (Einfrieren des Pegels). Vor diesem Hintergrund und im Vergleich zu den langjährigen Reihen weist das Modell trotz zu hoher Werte die richtige Tendenz auf, zeigt jedoch eine deutliche Schwäche in der Abbildung der Niedrigwasserabflüsse.

Diese Überschätzung begründet sich zudem durch eine fehlende Modellunterscheidung zwischen Matrixinfiltration und Makroporeninfiltration. Löhe (2006) konnte mit ihren Untersuchungen im Einzugsgebiet der Natzschung zeigen, dass beide Systeme insbesondere auf Forststandorten eine wesentliche Rolle spielen und zwei verschiedene Infiltrationsmechanismen vorliegen. Sie konnte zum einen ein Primärporensystem, welches durch eine substratspezifische Verteilung von Fein-, Mittel- und Grobporen bestimmt wird, für den langsamen matrixbestimmten Infiltrationsvorgang identifizieren. Dieser beruht ausschließlich auf den substratspezifischen k_f -Klassen des Oberbodens (Bronstert, 1994; Horn et al., 2010). Zum anderen wurde im Boden ein sekundäres Makroporensystem nachgewiesen. Der Wasserfluss in solchen gefügebedingten Makroporen ($> 50 \mu\text{m}$) kann bis zu 400mal schneller erfolgen als in dem Primärporensystem der Bodenmatrix und ist die Voraussetzung für eine schnelle Makroporeninfiltration (Löhe, 2006). Diesen sekundären, makroporenbestimmten Infiltrationsmechanismus konnte sie ebenfalls über Doppelring-Infiltrationsversuche für alle untersuchten Hochwald-Standorte sowie für dicht bestandene, naturnahe Aufforstungsflächen identifizieren. Für die Makroporeninfiltration wurde eine minimale Infiltrationsrate zwischen 186 und 723 mm/h gemessen. Der Infiltrationsvorgang im Sekundär- oder Makroporensystem setzt ein, sobald sich infolge eines Infiltrationsüberschusses der primären Bodenmatrix eine stauende Wasserschicht auf der Bodenoberfläche ausgebildet hat (Baumgartner & Liebscher, 1996).

Ziel der Arbeit war es, Hochwasserereignisse unterschiedlicher Dauer und Intensität darstellen zu können. Erste Kalibrierungsversuche des Modells zeigten, dass die Infiltrationseigenschaften stark unterschätzt wurden und zu extrem hohen Hochwasserscheiteln führten. Die im linearen Berechnungsansatz des Modells erforderlichen k_f -Werte für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurden entsprechend der Ergebnisse von Löhe auf die Landnutzungsformen und Böden angepasst und es wurde mit Infiltrationsraten für den vertikalen Makroporenfluss gerechnet. Erst damit konnte die Hochwasserganglinie größerer Ereignisse nachgebildet werden.

Dies hat jedoch zur Folge, dass die primäre Matrixinfiltration als zu hoch angesetzt wird. Niederschläge geringer Dauer und Intensität werden vollständig infiltriert und gelangen maximal als Zwischenabfluss und in der Regel als zu hoher Basisabfluss der Elementarflächen in den Vorfluter.

In der Konsequenz ist das vorliegende Modell in der Lage Hochwasserereignisse gut abzubilden, jedoch werden damit die Basisabflüsse der Elementarflächen oder HRU's überschätzt und es wird ein zu hoher Niedrigwasserabfluss generiert. Insbesondere in den Sommermonaten und bei geringer Bodenvorsättigung induzieren Niederschläge kurzer Dauer und Intensität keinen Oberflächenabfluss. Damit erklärt sich auch als Folge der unzureichende Nash-Sutcliffe-Effizienzgrad für einzelne hydrologische Halbjahre und Abflussereignisse.

Als kritisch ist auch die Erfassung der Vegetation hinsichtlich der Niedrig- und Mittelwasserführung anzusehen. In Abhängigkeit von Artenzusammensetzung, Alter, Kronenumfang und -dichte kann die Verdunstung der Pflanzen an einem Standort stark variieren und sich über die Zeit verändern (Mendel, 2000). Die Ausweisung und Parametrisierung der Vegetation erfolgt jedoch anhand von Landnutzungsklassen. Diese geben Aufschluss über die Landnutzungsform, jedoch nicht über die Vegetation selbst. Eine genaue Bezifferung der für das Modell notwendigen Durchwurzelungstiefe kann damit nur näherungsweise erfolgen, zumal pflanzenspezifisch unterschiedlichste Wurzelformen existieren. Selbiges gilt für den Kronenaufbau von Gehölzen. Dieser fließt über die Angabe eines Interzeptionsspeichers in das Modell ein und kann ebenfalls nur abgeschätzt werden und birgt damit eine Modellunsicherheit hinsichtlich des Bestandsniederschlags bei kleinen Ereignissen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Landnutzungsform „Wald-Strauch-Übergangs-Stadium“ eine Mischung unterschiedlichster Nadel- und Laubgehölze darstellt, zum Teil eine mosaikartige Struktur aufweist, deren Lücken durch dicht wachsende Gräser aufgefüllt werden und -wie auch alle anderen Waldbestände- einen mehrgliedrigen Stockwerkaufbau besitzt. Damit ist insgesamt die Erfassung eines korrekten Interzeptionsspeichers erschwert. Weiterhin liegen unterschiedlichste Durchwurzelungstypen bzw. -tiefen auf engen Raum dicht beieinander. Eine Unterschätzung des Interzeptionsspeichers sorgt im Sommer für eine geringere direkte Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher und höhere Bestandsniederschläge. Ist die Infiltrationskapazität des Bodens groß genug, dann führt dies zu einer höheren Bodenfeuchte und verstärkt ggf. den Basisabfluss. Eine Unterschätzung der Durchwurzelungstiefe wirkt sich gleichermaßen positiv auf die Bodenfeuchte und den Basisabfluss aus, da dem Boden insgesamt weniger Wasser über die Verdunstung entzogen werden kann.

Eine weitere Modellunsicherheit besteht im Fehlen vergleichbarer Klimastationen im näheren Umfeld des Untersuchungsgebietes. Unterschiedliche Beregnungszeitpunkte und die räumliche Variabilität aller Klimaparameter über die Zeit bergen damit Unsicherheiten, denen jedoch hier kaum begegnet werden kann. Für zukünftige Modellierung sollte daher die Nutzung von Zeitreihen aus Wetterradardaten in Betracht gezogen werden. Die Prüfung der Daten hat andererseits gezeigt, dass diese bzgl. der Abflussgenerierung und der Niederschlag-Abflussreaktion als plausibel gelten können. Die Niederschläge mussten bei der Modelleichung

zwar um 6 % nach oben angepasst werden, dies liegt jedoch in einem erklärbaren Bereich (vgl. Scherzer (2004)). So ist die korrekte Erfassung der Niederschläge in Form von Regen und Schnee durch Windverdriftung bekanntermaßen problembehaftet. Totalisatoren bringen einen Zugewinn an Erkenntnis über die Tagessummenwerte, welche jedoch für eine zeitlich höhere Auflösung anhand bestehender Zeitreihen disaggregiert werden müssen. Damit können räumliche Variationen in der Niederschlagshöhe, jedoch nicht die zeitlichen Unterschiede in den Niederschlagsverläufen erfasst werden.

Eine für die Verdunstungsberechnung entscheidende Größe ist die räumliche Verteilung der Temperatur. Die Werte werden gebietspezifisch höhenkorrigiert. Sie liegen als Freilandmessung vor und berücksichtigt damit nicht die Temperaturunterschiede zu Waldbeständen. Weiterhin werden im Modell die Temperaturkorrekturen auf die mittlere Gebietshöhe bezogen. Ein Teileinzugsgebiet mit starken Reliefunterschieden besitzt jedoch eine viel größere Spannweite in der Höhe als ein flaches Areal. Temperaturdifferenzen nehmen damit in einem Systemelement oder auch Teileinzugsgebiet zu. Weiterhin wird die Einzugsgebietsexposition nicht grundsätzlich im Modellaufbau berücksichtigt. Eine Nordabdachung in steilen Tälern wird damit genauso gewertet wie Südhänge einer größeren Erhebung oder eines schwach geneigten Hanges. Ein nördlich verlaufendes Tal hat auf seiner Westseite dieselben Temperaturwerte wie auf seiner Ostseite. Die Temperatur fließt indirekt über die potenzielle Verdunstung und direkt über die Berechnung der Schneedeckenhöhe und des Schneewassergehaltes in das Modell ein. Einzugsgebiete in Mittelgebirgslagen weisen sowohl ausgesprochenen Expositionsunterschiede als auch große Höhenunterschiede auf kleinem Raum auf. Unsicherheiten in der raum-zeitlichen Verteilung der Temperatur wirken sich daher über die potenzielle und tatsächliche Evapotranspiration auf die Bodenwassersättigung, als eine wichtige Kenngröße zur Hochwasserentwicklung, aus.

Der Aufbau und das Abschmelzen von Schneedecken verhalten sich temperatur- und strahlungsbedingt ebenfalls räumlich heterogen. Expositionsbedingte Unterschiede werden jedoch im Modell nicht explizit abgebildet. Innerhalb von Teilgebieten kann dem Höhenunterschied, der individuellen Hangsteilheit und der Abschattung und damit auch dem Höhengradienten der Temperatur nur auf Umwegen Rechnung getragen werden. Schneedecken werden im Modell durch zu hohe Temperaturen nicht aufgebaut oder schmelzen zu schnell und zu früh ab. Damit wird bei einer späteren Schneeschmelze das Abflussvolumen als auch der Abflussscheitel eines Hochwassers unterschätzt. Liegen die Temperaturen bei der Schneeschmelze hingegen zu niedrig, dann wird diese stark verzögert, die Hochwasserscheitel werden im Modell nicht oder zu spät erreicht und das Abflussvolumen bzw. die Abflussganglinie wird zeitlich gestreckt. Im Extremfall erfolgt das Abschmelzen so langsam, dass es kaum noch hochwasserwirksam ist und stattdessen zu einer langsamen Erhöhung des Gebietsabflusses führt. Weitere Modellunsicherheiten bestehen -neben der meteorologischen Erfassung der Temperatur und des Schneefalls- in der Bestimmung des Schneewassergehaltes, der Schneehöhe und Schneedichte als Grundlage für die Abschmelzintensität.

Insgesamt zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen modellierter und gemessener Abflussganglinie begründet sind durch:

- I. fehlende, fehlerhafte und unzureichende Eingangsparameter (Vegetationstypen und Durchwurzelung, Böden) und Messwerte (Niederschlag, Temperatur, Wasserstand, Abfluss)
- II. zeitliche und räumliche Unsicherheiten in der Niederschlags- und Temperaturverteilung
- III. eine fehlende parallele Modelldarstellung des Primär- und Sekundärporensystems der Böden
- IV. eine eingeschränkte Parametrisierung der Höhengradienten und der Geländeexposition im Modell

Die Modellunsicherheiten wirken sich insbesondere auf die Niedrig- und Mittelwasserabflüsse aus. Hingegen zeigt das Modell für die Abbildung von Hochwasserereignissen eine insgesamt ausreichend hohe Güte in der Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abflussganglinien für den Gesamtzeitraum, die hydrologischen Halbjahre und für die relevanten Einzelereignisse auf.

8.3 Möglichkeiten des dezentralen Hochwasserschutzes

Ein Vergleich der Abflussspitzen der betrachteten Bezugspunkte zeigt die große Spanne innerhalb derer sich die einzelnen Hochwasserschutzmaßnahmen einordnen lassen müssen. So ist der Abfluss in der Ortslage Rothenthal mehr als 10-mal höher als in Rübenu und 3-mal höher als oberhalb von Einsiedel-Sensenhammer. Zwischen Quell- und Mündungsbereich (Načetin versus Rothenthal) verzwanzigfacht er sich auf einer Lauflänge von etwa 11 km. Pro Kilometer wird durchschnittlich über 5 m³/s zusätzlicher Abfluss generiert. Dieser Vergleich zeigt die außergewöhnliche Dynamik dieses kleinen Mittelgebirgsflusses an.

Die wichtigsten Zuflüsse zur Natzschung mit vorhandenem Retentionspotenzial sind der Bily Potok mit einer Fläche von 8,3 km² und einem Abflussmaximum beim HQ₁₀₀ von 6,8 m³/s, der Rübenuer Bach (8,4 km², 9,7 m³/s) und der Telčsky Potok mit einem Einzugsgebiet von 21,7 km² und einem Abflussmaximum für das HQ₁₀₀ von 18,66 m³/s an der Mündung zur Natzschung. Der Telčsky Potok trägt mit einem Frachtanteil von 28 % am Gesamtabflussvolumen von 4,5 Millionen m³ deutlich zur Hochwassergenerierung an der Natzschung bei. Alleine diese drei Zuflüsse umfassen ein Gesamtgebiet von 38,4 km² (45% der Gesamtfläche) und generieren 55 % der Abflussspitze am Pegel Rothenthal bzw. 48,7 % an der Natzschungmündung. Der Anteil am Gesamtabflussvolumen liegt mit 2.296 dam³ bei 47 %. Betrachtet man die maximale Abflussspende des HQ₁₀₀, so liegt der Rübenuer Bach mit 984 l/(s*km²) 120 Liter über den Werten der vergleichbaren Einzugsgebiete, zeigt also eine durchaus höhere Abflussbereitschaft. Der Oberlauf der Natzschung oberhalb der Mündung von Jindrichova, Luznice und Bily Potok umfasst weitere 11,6 km² Einzugsgebiet mit einem Gesamtabflussvolumen von 544,6 dam³ (11 %), einer Abflussspende von 618 l/(s*km²) und einer Scheitelspitze von 7,19 m³/s bei einem HQ₁₀₀. Zusammen umfassen alle genannten Gebiete (Oberlauf Natzschung, Bily Potok,

Rübenauer Bach, Telčský Potok) eine Fläche von 50 km², d.h. 58% der Gesamteinzugsgebietsfläche. Sie tragen mit 66 % zur Abflussspitze am Pegel Rothenthal bei (58,7 % an der Natzsungmündung). Das in diesen Gebieten generierte Abflussvolumen beträgt 2.841 dam³ und entspricht 58 % des Abflussvolumens an der Mündung in die Flöha.

Bedingt durch die morphologische Situation des Einzugsgebietes verorten sich die 19 lokalisierten dezentralen Standorte für Hochwasserrückhaltebecken überwiegend in den oben genannten Teilgebieten. Sie liegen vor allem im südlichen Bereich der Natzsung und damit fast ausschließlich auf dem Staatsgebiet der Tschechischen Republik.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine optimale Auslastung der Speicher erst durch eine kaskadenförmige Anordnung erreicht werden kann. Andere Varianten hätten bei gesetzten Dammhöhen und den auf ein HQ₁₀₀ optimierten Drosseln eine Überlastung zur Folge gehabt. Diese Maximalvariante wurde gezielt gewählt, um die möglichen Potenziale aufzuzeigen. Die planerische, wirtschaftliche und technische Umsetzbarkeit und Tragfähigkeit wurde daher vollständig ausgeblendet.

Die einzelnen Speicher werden im Schnitt zu 72 %, minimal zu 37 % und maximal zu 96 % ausgelastet. Damit wird in Szenario A2 effektiv ein Stauraum von 390 dam³ genutzt. Ein ungenutztes Volumen von 136 dam³ bietet damit die Möglichkeit einer Speicherreserve für größere Bemessungsereignisse oder kann alternativ zur Verringerung der Dammhöhen und damit der Baukosten verwendet werden.

Über das effektiv genutzte Volumen reduzieren die dezentralen Hochwasserrückhaltebecken lokal, unterhalb der einzelnen Speicher, den Hochwasserscheitel zwischen 6 und 75 %. Der Durchschnitt liegt damit auf der untersten räumlichen (lokalen) Ebene bei einer 40-prozentigen Scheitelreduktion. Für die drei höchsten Abflusswerte von 22, 16 bzw. 11 m³/s werden an den Speichern Scheitelminderungen von 34, 22 und 17 % simuliert.

Die Abflussspitzen an den Bezugspunkten (LE1-LE5, EE1-3) werden auf Werte zwischen 1,8 bis 53 m³/s reduziert. Die niedrigste Scheitelreduktion nimmt mit 23,8 % Kalek ein, die größte Minderung konnte mit annähernd 48 % für Načetin erzielt werden. Ebenso konnte für die Ortschaft Rübenau mit 45 % eine deutliche Scheitelminderung realisiert werden. Obwohl sich die Ortslage Rothenthal schon im Unterlauf der Natzsung befindet, erfolgt auch hier eine deutlich spürbare Reduzierung von über 27 %. Die neun Hochwasserrückhaltebecken oberhalb von Einsiedel-Sensenhammer zeigen mit einem effektiv genutzten Stauraum von 200,9 dam³ und einer Absenkung des Hochwasserscheitels von 33 % ebenfalls eine deutliche Wirkung.

Betrachtet man abschließend den Zeitpunkt des Hochwassermaximums für alle Standorte, so zeigt sich eine Verzögerung, die zwischen 45 Minuten in Rothenthal und über 10 Stunden in Načetin liegt. Bedingt durch die Einzugsgebietsmorphologie verfügt die Natzsung über eine schnelle Niederschlag-Abfluss-Reaktion, welche durch die dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen wirkungsvoll verzögert werden kann.

Zur überschlägigen Beurteilung der Schutzwirkung wird in der Literatur als Maß das spezifische Volumen (Rückhaltevolumen pro km² Einzugsgebiet) angegeben (Rieger, 2012). Es wird davon

ausgegangen, dass in den deutschen Mittelgebirgslagen im Allgemeinen mit einem spezifischen Volumen von <10 mm kaum eine effiziente örtliche Scheitelminderung erreicht werden kann (ATV-DVWK, 2001). Unberücksichtigt bleibt bei diesem Ansatz jedoch die Abflussbereitschaft des Einzugsgebietes als auch das Abflussvolumen. Weiterhin spielt die Distanz zwischen Schutzobjekt und Schutzmaßnahme eine wesentliche Rolle, da sich hierüber der Einfluss der nicht retardierten Gebiete bemerkbar macht.

Tab. 41: Effektiver Stauraum (HQ₁₀₀) und effektiver spezifischer Stauraum

Nr. HRB	Speicher	Effektiver Stauraum HQ₁₀₀ [dam³]	Einzugs- gebiet [km²]	Effektiver spezifischer Stauraum [mm]
N01	Telčský Teich 1	18,6	0,4	4,6
N02	Telčský Teich 2	26,1	2,1	12,4
N03	Telčský Teich 3	16,8	3,6	4,6
N04	Telčský 1	9,8	18,2	0,5
N05	Telčský 2	42,3	10,9	3,9
N06	Steinbach 1	4,9	0,9	5,1
N07	Steinbach 2	13,4	1,3	10
N08	Rübenauer Bach 1	24,6	5,7	4,3
N09	Rübenauer Bach 2	11,3	1,3	8,6
N10	Rübenauer Bach 3	20,7	1,1	18,8
N11	Luznice 1	9,9	1,5	6,6
N12	Jindřichova 1	7,9	5,4	1,4
N13	Bily 1	35,9	8,3	4,3
N14	Bily 2	61,7	6,5	9,4
N15	Natzschung 1	12,2	28,0	0,4
N16	Natzschung 2	26,0	10,6	2,4
N17	Natzschung 3	6,0	1,3	4,6
N18	Natzschung 4	23,4	4,2	5,5
N19	Natzschung 5	17,9	3,2	5,5

Die Wirkungsweise der Speicher wird hier zur Vergleichbarkeit über das Verhältnis zwischen effektivem Stauraum (dem bei einem HQ_{100} tatsächlich genutztem Volumen) und der Einzugsgebietsfläche wiedergegeben (vgl. Tab. 41: S.227). Der effektive spezifische Stauraum bzw. das effektive spezifische Volumen aller 19 Maßnahmen beträgt am Pegel Rothenthal 6,6 mm. Mit Ausnahme der Standorte N10 und N02 verfügen alle simulierten Speicher über einen effektiven spezifischen Stauraum, der kleiner als 10 mm ist. Die Werte für N04 und N15 liegen sogar unter 1 mm. Der effektive spezifische Stauraum schwankt auf Ebene der Bezugspunkte zwischen 5,2 und 14 mm. Dieser Wert hat damit hinsichtlich der Retentionsfunktion nur eine begrenzte Aussagekraft, da für alle genannten Schutzziele und räumlichen Bezugsebenen eine deutliche absolute und prozentuale Scheitelminderung zu verzeichnen ist.

8.4 Die Ergebnisse im Kontext bisheriger Forschungsarbeiten

Mendel & Liebscher (2010) zeigten vor nunmehr über fünf Jahren, dass es bei dem Umgang mit Hochwasser im dezentralen Maßstab sowohl international als auch national nach wie vor Umsetzungsdefizite gibt, aufgrund der großen Hochwasserschäden dezentraler Art existiert hier Handlungsbedarf. Alleine die Hochwasserereignisse der letzten 15 Jahre in Europa unterstreichen dies sehr deutlich und zeigen auch, dass die Hochwasserschutzmaßnahmen nicht ausschließlich auf die großen Flüsse wie Elbe, Rhein und Donau beschränkt sein dürfen. Hochwasserschutz muss lokal und schon in den obersten Einzugsgebieten ansetzen (Mendel & Liebscher, 2010; Reinhardt, 2010; Schulte et al., 2007). Hierzu ist alleine in den letzten Jahren in Deutschland eine Vielzahl von Arbeiten erschienen (Reinhardt et al., 2011; Schulte et al., 2007). Diese Arbeiten wurden ausführlich in Kapitel 2.2, S.34 ff besprochen und waren Bestandteil mehrerer Publikationen der DWA (DWA, 2006; DWA, 2013a). Sie fassen die Forschungsaktivitäten im deutschsprachigen Raum für verschiedene Felder zusammen und geben eine Übersicht über die unterschiedlichen Wirkungsweisen und Anwendungsbereiche, darunter auch zur Wirkung von dezentral angelegten Hochwasserrückhaltebecken. Die Simulationsrechnungen, die mit sehr unterschiedlichen Modellen durchgeführt wurden (WaSim-ETH, NASIM, HBV, etc.), ergaben Hochwasserscheitelsenkungen von 15 % (Wiederbewaldung von Talauen, Änderung der fortwirtschaftlichen Nutzung) bis zu 46 % (angepasstes Landmanagement, Anlage und Nutzung kleiner Regen- und Hochwasserrückhaltebecken) (Mendel & Liebscher, 2010).

In diesem Kontext konnte Rieger für die Windach zeigen, dass durch 17 ungesteuerte, dezentrale Hochwasserrückhaltebecken der Hochwasserscheitel eines HQ_{100} um knapp 10 % effektiv verringert wird (Rieger, 2012).

Röttcher & Tönsmann prüften an der Bauna (50 km²) die Retentionswirkung von 28 Rückhalteräumen mit einem Gesamtvolumen von 338.000 m³. Die Einzelmaßnahmen umfassen ein Volumen zwischen 1.500-50.000 m³ und können ein HQ_{100} (114 m³/s) um rund 20% reduzieren (Röttcher & Tönsmann, 2001; Tönsmann, 1995).

Assmann lokalisierte für das 75 km² große Einzugsgebiet der oberen Elsenz 35 dezentral über das Gebiet verteilte Retentionsareale mit einem Stauvolumen von ca. 520.000 m³. Er konnte zeigen,

dass ein solches Maßnahmenzenario einen 100jährigen Hochwasserschutz für die am Ausgang des Untersuchungsgebietes liegende Stadt Eppingen gewährleisten würde (Assmann, 1999; Assmann & Gündra, 1999).

Die Simulation eines HQ_{100} ergab an der oberen Blies für eine drosseloptimierte Variante eine Scheitelreduzierung unterhalb des letzten Speichers von bis zu 48 %, am Thalfanger Bach lag diese bei bis zu 28 %. In Abhängigkeit vom Stauvolumen konnten lokal Scheitelabminderungen zwischen <1 und bis zu über 60 % erzielt werden (Kreiter, 2007; Ley, 2006).

Reinhardt untersuchte die überörtliche Wirkung dezentraler Hochwasserrückhaltebecken entlang der Oberen Flöha sowie im Stadtgebiet von Olbernhau. Er konnte für ein HQ_{100} zwar lokal Scheitelminderungen von bis zu 28 % in Seiffen feststellen, jedoch wurde, bedingt durch den Zufluss von Schweinitz und Natzschung, lediglich eine Scheitelreduktion von 4 % in Olbernhau berechnet (Reinhardt, 2010).

Da auch schon sehr kleine Rückhaltmaßnahmen nach DIN 19700 als Hochwasserrückhaltebecken einzustufen sind und damit die Sicherheitsanforderungen an das Bauwerk steigen, können diese nach Ansicht von Tönsmann und Röttcher nicht als kostengünstige Alternative zu größeren Hochwasserschutzbecken realisiert werden. Genaue Kosten wurden in einer Studie zum Hochwasserschutz an der Bauna von Tönsmann (1995) kalkuliert. Für Becken ab einer Größe von 100.000 m³ werden nach Röttcher & Tönsmann (2001) zweiundzwanzig bis sechsunddreißig Euro pro Kubikmeter Stauraum an Kosten veranschlagt. Erhebliche Kosteneinsparungen können jedoch durch eine hydrologische Optimierung (in Form einer Verbesserung der Niederschlags-Abfluss-Beziehung) erreicht werden, da die Fülle der Hochwasserwelle über das notwendige Rückhaltvolumen entscheidet (Röttcher & Tönsmann, 2001). Um Wartungskosten und baulichen Aufwand bei kleinen Rückhaltebecken gering zu halten, werden häufig feste Drosseln verwendet und z.B. mit einem Mönchsüberfall kombiniert (Röttcher & Tönsmann, 2001; Wegner, 1992). So zeigen Röttcher und Tönsmann, dass für einen vorgegebenen Abflusswert bei Verwendung von festen Drosseln 13.000 m³ Rückhalt, jedoch bei Nutzung von gesteuerten Drosseln nur 5.000 m³ Volumen benötigt werden. Dadurch ließen sich die Investitionskosten für das Retentionsvolumen reduzieren und kleinere Volumina könnten effektiver genutzt werden (Röttcher & Tönsmann, 2001). Gesteuerte Bauwerke erfordern allerdings einen höheren Arbeits- und damit auch Kostenaufwand, zumal wenn es sich um mehrere aufeinander abzustimmende Becken handelt. Darüber hinaus muss bei der Neuanlage von Speichern und der Nutzung vorhandener Strukturen genau geprüft werden, ob diese den technischen Anforderungen entsprechen und welche Nutzungsrestriktionen vorliegen.

Die obigen Modellergebnisse zeigen in der Regel die Wirkungsabnahme dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen mit Zunahme von Niederschlagsintensität, -dauer und Gebietsgröße. Kleinstrückhalte können nach den Ergebnissen von Ley (2006) und Kreiter (2007) zum lokalen Hochwasserschutz beitragen, insbesondere in Gebieten bis 500 km² Fläche, jedoch vermindert sich ihre Wirkung bei größeren Einzugsgebieten deutlich. Eine überregionale Wirkung auf Flussgebietsebene ist nicht gegeben (Kreiter, 2007; Ley, 2006; Reinhardt, 2010). Diese Ergebnisse können auch durch die eigenen Untersuchungen bestätigt werden. Sie gelten

jedoch prinzipiell für alle Arten des Hochwasserschutzes und sind nicht auf dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen beschränkt. Die Wirkung einer Maßnahme kann daher immer nur in Relation zur räumlichen Lage des Schutzziels betrachtet und beurteilt werden. Daher stellt sich nicht die Frage nach der Sinnhaftigkeit dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, weil ihre Wirkung zwar mit zunehmender Einzugsgebietsgröße schwindet, ihre örtliche Wirkung jedoch eindeutig nachweisbar ist. Vielmehr stellt sich die Frage, welches die Schutzziele und örtlichen Risiken sind. Diese orientieren sich, wie man 2002 an den Überschwemmungen und Schäden im Erzgebirge allerorts sehen konnte, an den vielen Ortschaften, die sich in den zum Teil sehr engen Tallagen befinden und bei Eintritt von Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen einem hohen Risiko ausgesetzt sind.

Wie sich am Beispiel von Olbernhau und Rothenthal zeigen lässt, sind die möglichen Schutzmaßnahmen vor Ort häufig eingeschränkt (LTV, 2004). Bis zur Fertigstellung einer 2,1 km langen Hochwasserschutzmauer und eines 1,4 km langen Deiches in 2007, konnte für den Bereich Rothenthal bis zur Mündung in die Flöha nur ein Hochwasserschutz bis zu einem HQ_{20} gewährleistet werden, welcher nun auf ein HQ_{100} ausgedehnt werden konnte. Hochwasserereignisse ab einem HQ_{20} bergen jedoch nach wie vor die Gefahr von Geschiebeablagerungen im Hauptgerinne (RMD, 2005). Ab einem HQ_{100} steigt das Risiko an, wie sich aus folgender Ausführung eines Gutachtens zur Hochwassergefahr an der unteren Natzsung zeigt: „[Durch den Bau bzw. Instandsetzung der Ufermauer an der Natzsung lässt sich] ... die Gefährdung durch Überschwemmung so weit reduzieren, dass bei einem HQ_{100} keine Überschwemmungen mehr auftreten dürften. Ausgeschlossen werden können sie jedoch nicht, da die Festlegung der Oberkante der Mauern ohne Berücksichtigung von Geschiebeablagerungen erfolgte. Diese Ablagerungen können den Wasserspiegel unter Umständen so weit anheben, dass die neuen Ufermauern trotzdem überflutet werden. Bis zur Umsetzung der geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen lässt sich in den Ortslagen Rothenthal und Grünthal kein durchgehender Hochwasserschutz erreichen. Die Errichtung eines Rückhaltebeckens wurde im Rahmen der Vorplanung untersucht und für nicht realisierbar eingestuft.“ (RMD, 2005).

Das Gutachten zeigt, wie auch schon die allgemeinen obigen Ausführungen von Mendel & Liebscher, dass Extremereignisse wie 2002 allein mit der oben erläuterten Maßnahme nicht zu bewältigen sind. Ein solcher Schutz kann jedoch auch gesellschaftlich nicht per se geleistet werden. Allein die oben genannte Hochwasserschutzmauer und der Deich verursachten Kosten in Höhe von rund 5,3 Millionen Euro. Daher stellt der Schutz vor einem HQ_{100} gewissermaßen einen gesellschaftlichen Konsens dar und eine Obergrenze zur Risiko- und Schadensminimierung. Es sei an dieser Stelle aber auch betont, dass es beim Hochwasserschutz nicht allein um die Abwendung materieller Beeinträchtigungen geht, sondern auch um die Verhinderung existentieller Schäden, die physischer und psychischer Natur sein können. Es bedarf dazu neben dem technischen Schutz einer entsprechenden Vorsorge im Sinne des Hochwasserrisikomanagements (Patt & Jüpner, 2013). Darüber hinaus zeigt sich auch, dass man zur Minderung des Risikos über geeignete dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen in den obersten Einzugsgebieten nachdenken muss. Dezentral angelegte Maßnahmen können nach den

Ergebnissen dieser Untersuchung ganz eindeutig eine überörtliche Schutzwirkung haben. Dies wird dann von Interesse, wenn es im Unterlauf an ausreichenden Schutzmöglichkeiten fehlt.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen auf, dass es im Einzugsgebiet der Natzschung entsprechende Potenziale gibt und der Untersuchungsansatz auf andere Räume übertragbar ist. Diese Potenziale zeigen (in Kombination einer Anzahl von Hochwasserrückhaltebecken) für das Bemessungshochwasser eines HQ_{100} deutliche Effekte auf Einzugsgebietsebene. Darüber hinaus wirken sie aber auch auf lokaler Ebene und bieten damit einen Schutz auf verschiedenen räumlichen Ebenen. Sie setzen an den Bezugspunkten im Unterlauf der Natzschung den Hochwasserscheitel eines HQ_{100} unter das Niveau eines HQ_{50} herab und würden bezüglich der Hochwasserschutzmauer in Rothenthal auf zweierlei Weise wirken. Erstens würde die Überschwemmungsgefahr bei einem HQ_{100} durch Geschiebeablagerungen reduziert werden. Zweitens würde durch geringere Abflüsse entlang der steilen Fließstrecke zwischen Einmündung des Rübenaues Baches und Rothenthal die Sohlschubspannung vermindert und damit das Risiko einer Sedimentmobilisierung herabgesetzt werden.

In einer vorhergehenden Studie wurden zudem neben dem HQ_{100} größere und kleinere Wiederkehrintervalle dahingehend untersucht, welche Schutzspanne Maßnahmen bieten, die auf ein HQ_{100} ausgelegt sind (Bölscher et al., 2013). Diese Untersuchungen zeigen, dass durch die Maßnahmenkombination noch genügend Potenzial vorhanden ist, um auch die Scheitel größerer Hochwasserereignisse abzumildern. Die Scheitel eines HQ_{150} bzw. ein HQ_{200} würden ohne Änderung der Drosseleinstellungen auf das Niveau eines HQ_{50} bzw. eines HQ_{100} gesenkt werden können (Bölscher et al., 2013). Damit könnte in Kombination mit der inzwischen vorhandenen Hochwasserschutzanlage in Rothenthal auch für Extremereignisse größerer Jährlichkeit das Schutzziel eines HQ_{100} erreicht werden.

Eine Kombination einer geringeren Anzahl an Standorten würde für ein HQ_{100} im Durchschnitt noch eine Scheitelreduktion von knapp über 13 % bedeuten (vgl. Tab. 40: S.220). Die dort aufgeführten zusätzlichen 16 Kombinationen, bestehend aus wechselnden Teileinzugsgebieten der Natzschung, umfassen zwischen 2 und 17 Einzelmaßnahmen mit einer Spannbreite in der Scheitelreduktion von 0-27 %. Diese Kombinationen würden je nach Auswahl immer noch eine deutliche lokale und einzugsgebietsbezogene Wirkung haben. Die sinnvollste Kombination stellt die Variante 134 dar. Es werden örtliche Schutzziele in Rübenaue und Kalek erreicht und es lassen sich bei 6 von 12 Standorten vorhandene bauliche Strukturen in ein Hochwasserschutzkonzept einbinden. Darüber hinaus ist am Pegel Rothenthal mit einer Scheitelabminderung von 22 % und einer Laufzeitverzögerung von 60 Minuten ein immer noch deutlicher Effekt auszumachen. Da alle drei Speichervarianten in den Oberläufen stark drainierte Mooregebiete besitzen, könnten diese Maßnahmen über den Verschluss der Drainagesysteme zusätzlich aufgewertet werden. Hierzu könnte bspw. über den Einsatz von Totholz nachgedacht werden (vgl. Wenzel et al. (2014)).

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die katastrophalen Hochwasserschäden vom August 2002 im Erzgebirge haben gezeigt, dass Hochwasserschutz schon in den Quellgebieten ansetzen sollte. Hierfür bietet das Konzept des dezentralen Hochwasserschutzes ergänzende Maßnahmen zu konventionellen Vorgehensweisen an.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass für die Natzschung ein belastbares, hydrologisches Modell aufgebaut werden konnte, welches sich für eine zeitlich hochaufgelöste Langzeit-Hochwassersimulation eines reaktionsschnellen Mittelgebirgsraumes eignet. Jedoch zeigen sich für die Simulation der Niedrig- und Mittelwasserabflüsse deutliche Defizite im Modellierungsansatz. Diese sind u.a. auf eine eingeschränkte, parallele Abbildbarkeit der Matrix- und Makroporeninfiltration zurückzuführen. Zukünftige Modellansätze sollten darüber hinaus expositions- und reliefbedingte Temperaturunterschiede stärker berücksichtigen.

Weiterhin machen die Ergebnisse deutlich, dass schon in den obersten Lagen des Untersuchungsgebietes eine genügend große Anzahl an Standorten für dezentrale Hochwasserrückhaltebecken vorhanden ist. Damit kann der Hochwasserschutz schon in den Quellgebieten ansetzen. Insbesondere dann, wenn sich flussabwärts nur noch eingeschränkte Hochwasserschutzpotenziale bieten. Diese Standorte beherbergen ein genügend großes Retentionspotenzial, um die Hochwasserscheitel eines HQ_{100} lokal sehr deutlich zu senken und auch zeitlich zu verzögern.

Entsprechend der durchgeführten Simulationen ist davon auszugehen, dass diese Potenziale auch noch auf Einzugsgebietsebene der Natzschung so deutlich wirken, dass im Unterlauf das HQ_{100} unter das Niveau eines HQ_{50} abgesenkt werden kann. Es kann nicht nur der Hochwasserscheitel, sondern auch das Versagensrisiko der dort neu gebauten Hochwasserschutzanlage reduziert werden. Die Situation in der Ortslage Rothenthal könnte dadurch weiter entschärft werden. Hierfür reicht es aus, nur einen Teil der Hochwasserrückhaltepotenziale im Einzugsgebiet zu nutzen. Weiterhin bringt dies eine deutliche Entlastung für den Mündungsbereich der Natzschung in die Flöha mit sich, da der Scheitel eines HQ_{100} immer noch um 25 % auf $53 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert werden kann. Eine volle Ausschöpfung aller vorhandenen Potenziale würde auch noch einen Hochwasserschutz für Bemessungsereignisse höherer Jährlichkeit mit sich bringen. Hierzu bedarf es jedoch noch einer Ausweitung des Modellansatzes hinsichtlich einer Wirksamkeitsbetrachtung für das Augusthochwassers 2002 und für zeitlich und räumlich variierende Niederschlagsfelder hoher und mehrfacher Intensität.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeitsbetrachtung des dezentralen Hochwasserschutzes immer im Kontext des räumlichen Schutzziels und vor dem Hintergrund möglicher Alternativen und der Einzugsgebietseigenschaften gesehen werden sollte. Es bedarf jedoch in diesem Falle einer grenzüberschreitenden Kooperation, um die Hochwassergefahr in den deutschen und tschechischen Ortslagen des Einzugsgebietes der Natzschung maßgeblich zu verringern. Weiterführendes Ziel kann die Prüfung weiterer dezentraler Hochwasserschutzaspekte und die Entwicklung einer sinnvollen und umsetzbaren Maßnahmenkombination unter Einbeziehung von Hochwasserereignissen mit höherer Jährlichkeit und anderen Abflussganglinienmustern sein.

10 Zusammenfassung

In weiten Teilen des Einzugsgebietes der Elbe traten im Zuge einer Vb-Wetterlage zwischen dem 10.-13. August 2002 extreme Regenfälle auf. Dem war Anfang des Monats eine intensive Vorregenphase vorausgegangen und führte zu einer starken Aufsättigung der Böden. Die Starkniederschläge verursachten schwere Überschwemmungen und Schäden, sowohl an den großen Flussläufen wie Moldau, Elbe und Mulde als auch in den obersten Einzugsgebieten im Erzgebirge wie an der Flöha und Müglitz. Das Gebiet um Zinnwald-Georgenfeld im Osterzgebirge erhielt in der Zeit zwischen dem 12.08.2002 (4:00 MEZ) und dem 13.08.2002 (4:00 MEZ) über 350 mm Niederschlag (LFULG, 2009). Ähnlich war die Situation in der Stadt Olbernhau im Mittleren Erzgebirge (LFULG, 2009).

Oberhalb und in der Stadt Olbernhau traten Flöha, Natzschung und Schweinitz über die Ufer und führten zu schwersten Schäden im deutschen und tschechischen Teil des Mittleren Erzgebirges (Schulte et al., 2007). Annähernd 3 Stunden nach dem ersten Niederschlagsmaximum an der Waldklimastation Olbernhau wurde am Pegel Rothenthal (Natzschung) der Maximalabfluss mit einem Hochwasserscheitel von 89 m³/s registriert. Dieser Abfluss war dreiundsechzigmal höher als der mittlere Abfluss über das Jahr und doppelt so hoch wie das bisherige HHQ vom 24. Juni 1975 (LFULG, 2011c). Die Natzschung trug an der Mündung zur Flöha mit fast 100 m³/s zum Gesamtabfluss von 315 m³/s in Olbernhau bei.

Ein grundsätzliches Problem für die Einzugsgebiete im Erzgebirge ist deren morphologische und topographische Situation. Die Auslässe solcher Gebiete sind oft durch Kerbtäler geprägt, die sowohl eine starke Hangneigung als auch ein starkes Sohlgefälle aufweisen. Diese Situation birgt in Kombination mit Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen die Gefahr hoher Abflüsse und des schnellen Anstiegs von Hochwasserwellen. Gleichzeitig ist bedingt durch die Topographie dieser Täler kein ausreichendes Stauvolumen vorhanden, um Hochwasserschutz zu betreiben. Ortschaften wie Olbernhau liegen unterhalb der Mündung solcher Kerbtalbereiche. Sie sind daher einem besonderen Hochwasserrisiko ausgesetzt.

Vor diesem Hintergrund sollte untersucht werden, ob es geeignete Möglichkeiten zur dezentralen Hochwasserretention im Einzugsgebiet der Natzschung gibt und welche Wirkung implementierte Maßnahmen in Bezug auf das Bemessungshochwasser eines HQ₁₀₀ am Pegel Rothenthal haben. Mögliche Maßnahmen sollten im Sinne von Assmann (1999) dezentraler Natur sein, einen lokalen Retentionseffekt für Orte in den obersten Einzugsgebieten aufweisen und darüber hinaus auch eine überörtliche Wirkung auf Einzugsgebietsebene zeigen.

Aufbauend auf der Problemstellung, Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchung wird zunächst die Entwicklung des Hochwasserschutzgedankens im Zuge der letzten zwei Jahrzehnte in der Bundesrepublik Deutschland skizziert und der Stand der Forschung zum dezentralen Hochwasserschutz aufbereitet. Es schließt sich eine Beschreibung des Untersuchungsgebietes an, um die Randbedingungen der Modellierung aufzuzeigen. Im Kapitel Methodik werden Prinzipien und Strukturen des verwendeten Niederschlag-Abfluss-Modells behandelt und es wird erläutert, welche Datengrundlagen in welcher Form im Modell Verwendung gefunden haben.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass für die Natzschung ein belastbares hydrologisches Modell aufgebaut werden konnte, welches sich für eine zeitlich hochaufgelöste Langzeit-Hochwassersimulation eines reaktionsschnellen Mittelgebirgsraumes eignet.

Weiterhin verdeutlichen die Ergebnisse, dass schon in den obersten Lagen des Untersuchungsgebietes eine genügend große Anzahl an Standorten für dezentrale Hochwasserrückhaltebecken vorhanden ist. Damit kann der Hochwasserschutz schon in den Quellgebieten ansetzen, insbesondere wenn sich flussabwärts nur noch eingeschränkte Hochwasserschutzpotenziale bieten.

Der abschließende Teil der Ergebnisse belegt, dass diese Standorte ein genügend großes Retentionspotenzial beherbergen, um die Hochwasserscheitel eines HQ_{100} lokal sehr deutlich zu senken. Darüber hinaus wirken diese Potenziale auch noch auf Einzugsgebietsebene der Natzschung so eindeutig, dass im Unterlauf des Gewässers der Hochwasserscheitel eines HQ_{100} unterhalb des Niveaus eines HQ_{50} abgesenkt werden kann.

Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Maßnahmenkombination noch genügend Potenzial vorhanden ist, um auch die Scheitel größerer Hochwasserereignisse herabzusetzen. Ein HQ_{150} bzw. ein HQ_{200} würden ohne Änderung der Drosselstellungen auf das Niveau eines HQ_{50} bzw. eines HQ_{100} gesenkt werden können. Damit könnte in Kombination mit einer bereits vorhandenen Hochwasserschutzanlage in Rothenthal auch für Extremereignisse das Schutzziel eines HQ_{100} erreicht werden.

Eine Kombination einer geringeren Anzahl an Standorten würde für ein HQ_{100} im Durchschnitt noch eine Scheitelreduktion von knapp über 13 % erbringen. Damit könnte nicht nur der Hochwasserscheitel, sondern auch das Versagensrisiko neu gebauter Hochwasserschutzanlagen reduziert werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wirksamkeitsbetrachtung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen immer im Kontext des räumlichen Schutzziels und vor dem Hintergrund möglicher Alternativen und der Einzugsgebietseigenschaften gesehen werden sollte.

11 Summary

The concept of decentralised flood protection (or water retention) is based on localising and using the natural capability of a catchment to retard run off as early as possible, and at several places at the same time, by means of a combination of different small-scale technical and non-technical measures (Assmann, 1999; DWA, 2006; DWA, 2013a; Schulte et al., 2007).

Intense rainfall and heavy floods in August 2002, which caused extraordinarily high levels of inundation and damage, affected the Ore Mountains, a low range mountain region in eastern Germany. Against this background, the objective of this investigation has been developed to analyse the capability of headwater areas to mitigate floods for downstream locations at different spatial scales. Based on this idea, the hydrological effect of selected small, well-placed retention facilities was analysed for the Natzschung catchment.

The above-mentioned concept is well established in German literature and recent studies have been reviewed, but it is also well known in the international context (Liaw et al., 2006; Mendel & Liebscher, 2010; Poulard et al., 2010; Scholz & Yang, 2010). Over recent years, several approaches and investigations have analysed the performance of these measures in terms of retention or detention ponds and other techniques (Reinhardt et al., 2011; Rieger, 2012). The discussion of pros and cons is still in progress, but the lack of data clearly remains an issue, especially concerning the capability and the effect of retention facilities at different spatial scales and for varying flood return periods (McMinn et al., 2010; Mendel & Liebscher, 2010).

The analysis of the Natzschung catchment offered the potential for uncontrolled retention facilities at 19 locations, in the upper and middle basin. They include already existing small retention and detention ponds, and areas with valley-crossing street embankments with an ambiguous purpose. These facilities were implemented in a distributed hydrological model (NASIM) to simulate local and regional flood retarding effects with regard to a 100-year flood recurrence interval. The total storage capacity is over 500.000 m³ at a mean storage level of 3.6 m, and encompasses an area of more than 50 km². At all retention facilities, the discharge at the outlets is curbed and reduced by between 6 % and 75 %, with a mean of 40 %. More than 390.000 m³ of the retention capacity is used (72 %).

This scenario induced a decrease in peak discharge from a level of 63.4 m³/s to a value of 45.2 m³/s (-28.7 %) at the gauging station Rothenthal (total area of 75 km²). At the catchment outlet 5 km downstream, the peak discharge remains lowered, at a level of 53.7 m³/s (-25.4 %). At both locations, the peak arrived forty-five minutes later.

For all analysed locations in the catchment, a distinct effect concerning the peak reduction and the temporal shift of the peak could be observed. At the gauging station the HQ₁₀₀ could be attenuated to a discharge comparable to a return period under a 50 year flood event (<HQ₅₀). This is not only important for the main objective of flood protection, as a reduction in discharge also means a decrease in stream power, erosion and the sediment transport capacity of fluvial systems (Borga et al., 2011). After the August flood in 2002, several streams along the Ore Mountains were affected by sediment deposition dominated by boulders and cobbles. The sediments reduced

the hydraulic cross section of the rivers and caused severe damage along the banks (IKSE, 2004; LFULG, 2009; LTV, 2004; RMD, 2005). The results have also shown that the total storage capacity is sufficient, but a redesign or a flexible control system of the outlets and the storage level of the basins could lower the costs and also improve the performance for larger flood events. However, the detection, survey and implementation of these kinds of retention facilities are labour and cost-intensive and need to be improved.

This flood retention concept considers regional and local flood protection targets and the specific hydrological conditions and capabilities of a catchment. The implementation of these kind of measures in stream headwaters could be a feasible way to establish an effective and additional flood protection for the local and downstream settlements of the Ore Mountains, and for other low range mountain systems.

Literaturverzeichnis

- Ashley, S.T., Ashley, W.S., (2008): Flood Fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 47. (3). S. 805-818.
- Assmann, A., (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen - mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. 7. 99 Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg. Kornwestheim. S. 1-139.
- Assmann, A., Gündra, H., (1999): Die Bedeutung integrierter Planungsverfahren für die Umsetzung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 43 (Heft 4). S. 160-164.
- ATV-DVWK, (2001): Hochwasserrückhaltebecken: Probleme und Anforderungen aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht. In: ATV-DVWK (Ed.). ATV-DVWK-Schriftenreihe. Band 26. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef. S. 1-130.
- Barredo, J., (2007): Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*. 42. (1). S. 125-148.
- Baumgartner, A., Liebscher, H.-J., (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie Band 1. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 670 Seiten.
- Bernhardt, A., Röder, M., (2008): Westerzgebirge. In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U. (Eds.). *Naturräume in Sachsen*. Band 257. Deutsche Akademie für Landeskunde. Leipzig. S. 288.
- Beven, K.J., (2012): *Rainfall-runoff modelling: the primer*. - 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 449 Seiten.
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2009): Auenzustandsbericht. Flussauen in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin. 35 Seiten.
- Bittner, R., Merz, B., Günther, K., (2010): Schlussbericht zum Koordinierungsvorhaben der BMBF-Förderaktivität „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse – RIMAX“. Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ). Potsdam. 26 Seiten.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., (1995): Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*. 9. (3-4). S. 251-290.
- BMF, (2013): Pressemitteilungen Hochwasser 2013: Deutschland stellt Antrag auf Hilfen aus dem Europäischen Solidaritätsfonds. Bundesministerium der Finanzen der Bundesrepublik Deutschland
<http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2013/07/2013-07-25-PM58.html>. (Aufruf: 28.11. 2013).
- Boden, A.-h.-A. (Ed.), (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. Hannover.

- Böhm, A.K., (2006): Hochmoore im Erzgebirge - Untersuchungen zum Zustand und Stoffaustragsverhalten unterschiedlich degradierter Flächen. Dissertation. Technische Universität Dresden. Dresden. 198 Seiten.
- Bollrich, G., (2000): Technische Hydromechanik. Grundlagen. Technische Hydromechanik, Band 1. Verlag Bauwesen, Berlin, 452 Seiten.
- Bölscher, J., Schulte, A., (2007): Hydrological modelling of decentralised flood protection measures in transnational headwater areas of the Natzschung catchment / Mittleres Erzgebirge. In: Gellweiler, I., Seeling, S., Hefczyk, A., Hill, J. (Eds.): Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated Catchment Management for Hazard Mitigation. September 24 - 26, 2007. Trier, Germany. 170 Seiten.
- Bölscher, J., Schulte, A., Reinhardt, C., Wenzel, R., (2013): Flash flood retention in headwater areas of the Natzschung River using small retarding basins. In: Chavoshian, A., Takeuchi, K. (Eds.), Floods: From Risk to Opportunity. IAHS, Tokyo, S. 153-165.
- Borga, M., Anagnostou, E.N., Blöschl, G., Creutin, J.D., (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. Environmental Science & Policy. 14. S. 834-844.
- Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J., (2000): CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. European Environment Agency Copenhagen.
- Brakenridge, G.R., (2013): Global Active Archive of Large Flood Events. <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>. (Aufruf 28.11.2013).
- Bröker, S., (2012): Sachsen - zehn Jahre nach der Jahrhundertflut - Mehr Raum für Gewässer und bessere Information. Korrespondenz Wasserwirtschaft. 9. (12). S. 2.
- Bronstert, A., (1994): Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Dissertation. Universität Karlsruhe. Karlsruhe. 252 Seiten.
- Büdel, J., (1981): Klima-Geomorphologie, Berlin, 304 Seiten.
- Büttner, U., Fügner, D., Winkler, U., (2001): Das Hochwasser am 5./6. Juli 1999 im Raum Marienberg im Erzgebirge. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 45. (3). S. 102-112.
- Castro, D., Einfalt, T., Frerichs, S., Friedeheim, K., Hatzfeld, F., Kubik, A., Mittelstädt, R., Müller, M., Seltmann, J., Wagner, A., (2008): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Bundesministerium für Bildung und Forschung. 395 Seiten.
- Chavoshian, A., Takeuchi, K., (2013): Preface. In: Chavoshian, A., Takeuchi, K. (Eds.), Floods: From Risk to Opportunity. 5th International Conference on Flood Management (ICFM5). 27-29 September 2011. IAHS, Tokyo, S. 461.
- Chen, C.-N., Tsai, C.-H., Tsai, C.-T., (2007): Reduction of discharge hydrograph and flood stage resulted from upstream detention ponds. Hydrological Processes. 21. (25). S. 3492-3506.
- Choryński, A., Kundzewicz, Z.W., (2012): Changes in flood risk in Europe, 10, 27 Seiten.
- Chow, V.T., (1959): Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Classic Textbook Reissue Series. McGraw Hill Book Co., New York, 669 Seiten.

- Damodaram, C., Giacomoni, M.H., Prakash Khedun, C., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., Zechman, E.M., (2010): Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management I. Journal of the American Water Resources Association. 46. (5). S. 907-918.
- Deutsche Bundesregierung (2002): 5-Punkte Programm: Arbeitsschritte zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes. Deutsche Bundesregierung. Berlin.
- Deutscher Bundestag (2005): Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes vom 03.Mai 2005. Bundesgesetzblatt Teil I Nr.26, S. 1224ff. Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln <http://www.bgbl.de>.
- Deutscher Bundestag (2009): Wasserhaushaltsgesetz der Bundesrepublik Deutschland vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585). Zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 21. Januar 2013 (BGBl. I S.95) geändert. Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln <http://www.bgbl.de>.
- Deutscher Bundestag (2013): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2013. Drucksache 168/208 vom 16.12.2013. Deutscher Bundestag. Berlin.
- Deutscher Bundestag (2014): Hochwasser 2013 stärker als 2002. Deutscher Bundestag: Presse und Kommunikation, Referat Online-Dienste, Parlamentsfernsehen (PuK 4); http://www.bundestag.de/presse/hib/2014_01/07/261026 (Aufruf 25.06.2014). Berlin.
- DIN, (2004a): DIN-Norm 19700-10:2004-07 Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen (Dam plants - Part 10: General specifications). Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin o.A. Seiten.
- DIN, (2004b): DIN-Norm 19700-11:2004-07 Stauanlagen - Teil 11: Talsperren (Dam plants - Part 11: Dams). Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin o.A. Seiten.
- DIN, (2004c): DIN-Norm 19700-12:2004-07 Stauanlagen - Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken (Dam plants - Part 12: Flood retarding basins). Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin o.A. Seiten.
- Dittrich, K., Schmieder, B., (2001): Buchenbewirtschaftung, Waldumbau und forstliches Umweltmonitoring im Forstam Olbernhau. Forst und Holz. 17. (56. Jahrgang). S. o.A.
- DVWK, (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. I. Bestimmung von Rauheiten. II. Äquivalente Sandrauheiten und Stricklerbeiwerte fester und beweglicher Strömungsberandungen. In: e.V.), D.V.f.W.u.K. (Ed.). DVWK-Schriften. Heft 92. Paul Parey Verlag. Hamburg, Berlin. S. 303.
- DWA, (2006): DWA-Themen - Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A.u.A.e.V. (109).
- DWA, (2013a): Merkblatt DWA-M 550. Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung (Entwurf vom Oktober 2013). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A.u.A.e.V.
- DWA, (2013b): Merkblatt DWA-M 552. Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken (Entwurf 2013). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A.u.A.e.V.

- DWD, (2006): KOSTRA-DWD 2000. Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. o.A. Seiten.
- DWD, (2011): Klimadaten Deutschland - Langjährige Mittelwerte 1961-1990. Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de>. (Aufruf: 06.10.2011).
- EEA, (2000): Corine Land Cover 2000 seamless vector data. Data set of land cover for Europe. European Union programme CORINE (Coordination of Information on the Environment). European Environmental Agency, Copenhagen.
- Eisenbies, M.H., Aust, W.M., Burger, J.A., Adams, M.B., (2007): Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians-A review. *Forest Ecology and Management*. 242. (2-3). S. 77-98.
- Ellenberg, H., (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Ulmer, Stuttgart, 1096 Seiten.
- Emerson, C.H., Welty, C., Traver, R.G., (2005): Watershed-Scale Evaluation of a System of Storm Water Detention Basins. *Journal of Hydrologic Engineering*. 10. (3). S. 237-242.
- Europäische Union (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23.Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie; HWRM_RL). In: ABI. der EU L 288/27 vom 06.11.2007.
- Evrard, O., Vandaele, K., van Wesemael, B., Bielders, C.L., (2008): A grassed waterway and earthen dams to control muddy floods from a cultivated catchment of the Belgian loess belt. *Geomorphology*. 100. (3-4). S. 419-428.
- Francés, F. et al., (2008): Efficiency of non-structural flood mitigation measures: "room for the river" and "retaining water in the landscape". London. 221 Seiten.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaskovicová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A., (2009): A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*. 367. (1-2). S. 70-78.
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.P., (2004): Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*. 286. (1-4). S. 135-154.
- Hancock, G.S., Holley, J.W., Chambers, R.M., (2010): A Field-Based Evaluation of Wet Retention Ponds: How Effective Are Ponds at Water Quantity Control? *Journal of the American Water Resources Association*. 46. (6). S. 1145-1158.
- Heller, K., Kleber, A., (2011): Einfluss periglazialer Deckschichten auf die oberflächennahen Fließwege am Hang - eine experimentelle Prozessstudie im Osterzgebirge, Sachsen. In: Blöschl, G., Merz, R. (Eds.): *Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis*. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien. Wien. 30.11. S. 50-56.
- Hendl, M., (1995): Klima. In: Liedtke, H., Marcinek, J. (Eds.), *Physische Geographie Deutschlands*. Justus Perthes Verlag, Gotha S. 786.

- Henningsen, D., Katzung, G., (2002): Einführung in die Geologie Deutschlands. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 224 Seiten.
- HLUG, (2010): Retentionskataster Hessen (RKH). Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. <http://www.hlug.de/?id=7246>. (Aufruf: 09.01.2015 2015).
- Horn, R., Brümmer, G.W., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Springer-Verlag, 570 Seiten.
- Hydrotec, (2009): Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM - Dokumentation NASIM 3.7.0. Hydrotec Aachen, Aachen, 619 Seiten.
- IKSE, (2004): Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe (Documentation of the August 2002 flood event at the Elbe basin). IKSE - Internationale Kommission zum Schutz der Elbe. Magdeburg. 212 Seiten.
- Jaesche, P., (1999): Bodenfrost und Solifluktdynamik in einem alpinen Periglazialgebiet (Hohe Tauern, Osttirol). Bayreuther Geowissenschaftliche Arbeiten. 20. Naturwissenschaftliche Gesellschaft Bayreuth e.V. Bayreuth. S. 1-136.
- Jamitzky, T., (2006): Hochwasser im Erzgebirge - Dimensionierung dezentraler Rückhaltmaßnahmen. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung für das Amt des Lehrers (unveröffentlicht). Freie Universität Berlin. 112 Seiten.
- LFULG (2010): Gemeinsamer polnisch-deutsch-tschechischer Bericht zum Hochwasser vom 07. bis 10. August 2010 an der Lausitzer Neiße als Bestandteil der vorläufigen Risikobewertung gemäß Artikel 4 der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (2007/60/EG). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Referat 45: Landeshochwasserzentrum, Gewässerkunde. Wrocław, Dresden, Prag. 50 Seiten.
- Jeniček, M., (2008): Modelling the effect of small reservoirs on flood regime in the Chomutovka river basin. In Brilly, M and Šraj, M. (Eds.): XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 2.-4.June 2008 [CD-ROM]. Ljubljana. ISBN 978-961-91090-2-1. S. 7.
- Kaulfuß, W., Kramer, M., (2000): Naturlandschaft und Nutzungspotential Sachsens. In: Kowalke, H. (Ed.), Sachsen. Perthes Länderprofile. Klett-Perthes, Gotha, Stuttgart, S. 71-73.
- Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K., Maidment, D.R., (2005): Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. Journal of Environmental Management. 75. (4). S. 325-336.
- Koehler, G., (2006): Dezentraler Hochwasserschutz - Einführung und Grundlagen. In: Röttcher, K., Koehler, G., Kleeberg, H.-B. (Eds.). Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. 17.06. DWA. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Koblenz. S. 5-17.
- Konjevic, D., (2008): GIS-gestützte Bestimmung des Retentionsvermögens dezentraler Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet der Windach. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr. München. 166 Seiten.

- Kreiter, T., (2007): Dezentrale und naturnahe Retentionsmaßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz in mesoskaligen Einzugsgebieten der Mittelgebirge. Dissertation am FB VI der Universität Trier, Trier, 301 Seiten.
- Kron, W., (2005): Hochwasser. Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? PG Verlag, München, 263 Seiten.
- Kundzewicz, Z.W., Pińskwar, I., Brakenridge, G.R., (2012): Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrological Sciences Journal*. 58. (1). S. 1-7.
- Lang, T., Tönsmann, F., (2002): Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn,- Kasseler Wasserbau-Forschungsberichte und Materialien 17/2002. Herkules Verlag. Kassel. 278 Seiten.
- Lange, G., Lecher, K. (Eds.), (1993): Gewässerregelung Gewässerpflege - Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. Paul Parey. Hamburg, Berlin. 335 Seiten.
- LAWA, (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). 24 Seiten.
- LAWA, (2004): Instrumente und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Auftrag der Umweltministerkonferenz der Bundesrepublik Deutschland. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. 35 Seiten.
- LAWA, (2008): Strategie zur Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie in Deutschland Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, ad-hoc-Ausschuss „Hochwasser“. 15 Seiten.
- LAWA, (2010): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Dresden. 53 Seiten.
- LAWA, (2014): Nationales Hochwasserschutzprogramm. Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes. Beschlossen auf der Umweltministerkonferenz am 24. Oktober 2014 in Heidelberg. Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Kiel. 9 Seiten.
- Lee, J.S., Li, M.H., (2009): The impact of detention basin design on residential property value: Case studies using GIS in the hedonic price modeling. *Landscape and Urban Planning*. 89. (1-2). S. 7-16.
- Ley, R., (2006): Der Einfluss kleiner naturnaher Retentionsmaßnahmen in der Fläche auf den Hochwasserabfluss - Kleinrückhaltebecken. - Diplomarbeit an der Universität Trier, Fachbereich Physische Geographie: 1-137., Trier.
- LfUBW, (2004): Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 2 - Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. In: Baden-Württemberg, L.f.U. (Ed.). *Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie*. 75. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe. S. 209.

- LFUG, (1995): Geologische Karte Vogtland/Erzgebirge 1:100.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- LFUG, (2004a): Analysis of the August 2002 flood event at the rivers of the eastern Ohre Mountains (in German). Saxon State Office for the Environment and Geology. Dresden. 182 Seiten.
- LFUG, (2004b): Statistische Hochwasserabflüsse und Wasserstands-Abfluss-Beziehungen Pegel Rothenthal/Natzschung. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Referat 35 Landeshochwasserzentrum, Gewässerkunde. mündliche Mitteilung H. Mitzschke.
- LFUG (2006): Meteorologische und hydrologische Analyse des Frühjahrshochwassers 2006 in den sächsischen Fließgewässern. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden. 28 Seiten.
- LFUG, (2009): Wasserstandsdaten 2002-2008 Pegel Rothenthal/Natzschung. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Referat 35 Landeshochwasserzentrum, Gewässerkunde mündliche Mitteilung H. Mitzschke.
- LFULG, (2009): Hochwasser im Muldegebiet. Das August-Hochwasser 2002 im Muldegebiet - eine meteorologisch-hydrologische Analyse-. Schriftenreihe des LFULG. 32. Heft 32/2009. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden. S. 1-172.
- LFULG (2010): Hydrologisches Handbuch - Materialien zur Wasserwirtschaft Teil 0-6. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.
- LFULG (2011a): Ereignisanalyse Hochwasser im August und September 2010 und im Januar 2011 in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Referat 45: Landeshochwasserzentrum, Gewässerkunde. Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. Dresden. 292 Seiten.
- LFULG, (2011b): Jahreslisten der Durchflüsse ausgewählter Pegel für alle Flussgebiete in Sachsen - Flussgebiet Mulde - Jahresliste 2009 Pockau 1. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/568140_Q2009.pdf. (Aufruf: 13.10.2011 2011).
- LFULG, (2011c): Jahreslisten der Durchflüsse ausgewählter Pegel für alle Flussgebiete in Sachsen - Flussgebiet Mulde - Jahresliste 2009 Rothenthal / Natzschung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/568350_Q2009.pdf. (Aufruf: 13.10.2011 2011).
- Liaw, C.-H., Tsai, Y.-L., Cheng, M.-S., (2006): Assessing flood mitigation alternatives in Shijr area in metropolitan Taipei. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 42. (2). S. 311-322.
- Lindenkrenz, J., (2006): Charakterisierung der Moore im Einzugsgebiet der Natzschung im Hinblick auf ihren Beitrag zur Hochwassergenerierung. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Freie Universität Berlin. 107 Seiten.
- Löhe, A., (2006): Die bodenphysikalische Charakterisierung von Flächen unterschiedlicher Nutzung hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der

- Natzschung – eine Untersuchung im Mittleren Erzgebirge. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Freie Universität Berlin. 146 Seiten.
- LTV, (2004): Hochwasserschutzkonzept Mulden und Weiße Elster im Regierungsbezirk Chemnitz: Los 8 – Flöha bis Pegel Borstendorf mit Schweinitz und Schwarzer Pockau – Endbericht. . LTV - Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. Lengefeld. 197 Seiten.
- Maniak, U., (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 6., neu bearbeitete Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 679 Seiten.
- Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U., (2008): Naturräume in Sachsen, 257. Deutsche Akademie für Landeskunde, Leipzig, 288 Seiten.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E., (2010): Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. Journal of Hydrology. 394. (1-2). S. 118-133.
- Marenbach, B., (2002): Der Beitrag naturnaher Retentionsmassnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung. Schriftenreihe des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft, Band 13, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 183 Seiten.
- Marenbach, B., Koehler, G., (2003): Örtliche und überörtliche Wirkung zentraler und dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Wasser & Boden. 55/7+8. S. 22-26.
- Matschullat, J., Richert, E., Bianchin, S., Seidler, C., Merta, M., Hammer, G., Lenz, U., (2007): Endbericht Hochwasser und Naturschutz im Weißeritzkreis (HochNatur). - 1-142. S.
- McMinn, W.R., Yang, Q., Scholz, M., (2010): Classification and assessment of water bodies as adaptive structural measures for flood risk management planning. Journal of Environmental Management. 91. (9). S. 1855-1863.
- Mendel, H., (2000): Elemente des Wasserkreislaufs - Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. Analytica., Berlin, 244 Seiten.
- Mendel, H., Liebscher, H.-J., (2010): Vom empirischen Modellansatz zum komplexen hydrologischen Flussgebietsmodell – Rückblick und Perspektiven –. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 87 Seiten.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T., (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. Asabe. 50. (3). S. 885-900.
- Morss, R.E., Demuth, J.L., Bostrom, A., Lazo, J.K., Lazrus, H., (2015): Flash Flood Risks and Warning Decisions: A Mental Models Study of Forecasters, Public Officials, and Media Broadcasters in Boulder, Colorado. Risk Analysis. S. 1-20.
- Nix, S.J., Durrans, S.R., (1996): Off-line stormwater detention systems. Journal of the American Water Resources Association. 32. (6). S. 1329-1340.
- NWS, (2010): Definitions of flood and flash flood. National Weather Service, Morristown, TN Weather Forecast Office. <http://www.srh.noaa.gov/mrx/hydro/flooddef.php>. (Aufruf: 02.08 2011).

- Pälchen, W., Walter, H., (2008): Geologie von Sachsen - Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 537 Seiten.
- Patt, H., Jüpner, R., (2013): Hochwasser-Handbuch. Springer, Berlin, Heidelberg 696 Seiten.
- Patt, H., Jüring, P., Kraus, W. (Eds.), (2010): Naturnaher Wasserbau - Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Springer. Berlin [u.a.]. 466 Seiten.
- Petrow, T., Merz, B., Lindenschmidt, K.E., Thielen, A.H., (2007): Aspects of seasonality and flood generating circulation patterns in a mountainous catchment in south-eastern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11. (4). S. 1455-1468.
- Poulard, C., Lafont, M., Lenar-Matyas, A., Lapuszek, M., (2010): Flood mitigation designs with respect to river ecosystem functions--A problem oriented conceptual approach. *Ecological Engineering*. 36. (1). S. 69-77.
- Poulard, C., Szczesny, J., Witkowska, H., Radzicki, K., (2005): Dynamic slowdown: A flood mitigation strategy complying with the integrated management concept – implementation in a small mountainous catchment. *International Journal of River Basin Management*. 3. (2). S. 75-85.
- Ramelow, M., (2006): Erstellung einer digitalen Bodenkarte für das Einzugsgebiet der Natzschung im Mittleren Erzgebirge. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Freie Universität Berlin. 130 Seiten.
- Reinhardt, C., (2010): Dezentraler Hochwasserrückhalt im Einzugsgebiet der Oberen Flöha (Mittleres Erzgebirge). Dissertation. Freie Universität Berlin. Shaker Verlag, Aachen, 192 Seiten.
- Reinhardt, C., Bölscher, J., Schulte, A., Wenzel, R., (2011): Decentralised water retention along the river channels in a mesoscale catchment in south-eastern Germany. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 36. (7-8). S. 309-318.
- Richter, H., (1995): Die Mittelgebirge zwischen Weißer Elster und Görlitzer Neiße. In: Liedtke, H., Marcinek, J. (Eds.), *Physische Geographie Deutschlands*. Justus Perthes Verlag, Gotha.
- Rieger, W., (2012): Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. In: Disse, M., Günthert, W., Malcherek, A. (Eds.). *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München*. 116. Shaker Verlag, Aachen. S. 1-303.
- RMD, (2005): Hochwasserschadensbeseitigung Rothenthal. Gefahrenkarten – Gefahr durch Überschwemmung. Erläuterungsbericht RMD Consult GmbH, München. Im Auftrag der LTV Sachsen. Talsperrenmeisterei Freiburger Mulde / Zschopau. München. 24 Seiten.
- Robinson, M., Scholz, M., Bastien, N., Carfrae, J., (2010): Classification of different sustainable flood retention basin types. *Journal of Environmental Sciences*. 22. (6). S. 898-903.
- Röder, M., Bernhardt, A., Richter, H., (2008): Erzgebirge. In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U. (Eds.), *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde*. Deutsche Akademie für Landeskunde, Leipzig, S. 202ff.

- Röder, M., Richter, H., (2008): Sächsisches Bergland und Mittelgebirge. In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U. (Eds.), *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde*. Deutsche Akademie für Landeskunde, Leipzig, S. 288.
- Röttcher, K., (2005): Dezentrale und zentrale Rückhalte für den Hochwasserschutz - Untersuchungen am Beispiel der Erpe. *Wasser und Abfall*. 5. S. o.A.
- Röttcher, K., Tönsmann, F., (2001): Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes im Mittelgebirge am Beispiel der Bauna. *Wasser & Boden*. 53. (10). S. 29-34.
- Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., Price, C., (2010): Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*. 394. (1-2). S. 245-255.
- Samuels, P. (Ed.), (2013): The importance of managing flood risk. *Science for Environment Policy. Thematic issue: Flooding*. 40. Bristol.
- Schanze, J., Hutter, G., Penning-Rowsell, E., Nachtnebel, H.-P., Meyer, V., Werrity, A., Harries, T., Holzmann, H., Jessel, B., Koeniger, P., Kuhlicke, C., Neuhold, C., Olfert, A., Parker, D., Schildt, A., (2008): Systematisation, evaluation and context conditions of structural and non-structural measures for flood risk reduction. *Flood-ERA Joint Report. ERA-NET CRUE*.
- Scherzer, J., (2004): Berechnung von FAO-Referenzverdunstung, klimatischer Wasserbilanz, FK, nFK, PWP sowie tiefen- und vegetationstypendifferenzierten Wasserstressindikatoren für acht forstliche Intensivmessflächen des Landesforstpräsidiums Sachsen im Zeitraum 1997-2003 - Kurzdokumentation. In: Scherzer, J. (Ed.). *Freistaat Sachsen, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Landesforstpräsidium Graupa. UDATA - Umweltschutz und Datenanalyse, Ransbachhof* 51 Seiten.
- Schmidt, M., (1993): Hydraulik. In: Bretschneider, H., Lecher, K., Schmidt, M. (Eds.), *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. Parey, Hamburg und Berlin, S. 999.
- Schmidt, P.A., Hempel, W., Denner, M., Döring, N., Gnüchtel, A., Walter, B., Wendel, D., (2003): *Digitale Fachdaten zur Potentiellen Natürlichen Vegetation Sachsens mit Karte 1:200 000. Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege 2002*. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- Schmitt, T.G., (2015): Starkregen -(k)ein neues Phänomen? . *Korrespondenz Wasserwirtschaft*. 2. S. 65-73.
- Scholz, M., Sadowski, A.J., (2009): Conceptual classification model for Sustainable Flood Retention Basins. *Journal of Environmental Management*. 90. (1). S. 624-633.
- Scholz, M., Yang, Q., (2010): Guidance on variables characterising water bodies including sustainable flood retention basins. *Landscape and Urban Planning*. 98. (3-4). S. 190-199.
- Schüler, G., (2007): Das INTERREG IIIB NWE Projekt WaReLa - Verminderung der Hochwassergefahr durch Landnutzung. In: Schüler, G., Gellweiler, I., Seeling, S. (Eds.). *Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 64/07*. 7.

64. Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz. Trippstadt. S. 1-344.
- Schulte, A., Bölscher, J., Reinhardt, C., Ramelow, M., Wenzel, R., (2009): Potenziale des dezentralen Hochwasserrückhalts im Mittleren Erzgebirge - Ergebnisse der Modellierung mit NASIM und WaSIM-ETH. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*. 3. (09). S. 151-158.
- Schulte, A., Bölscher, J., Wenzel, R., Roch, I., Bohumír, J., (2007): INTERREG II A Projekt DINGHO: dezentraler, integrierter und grenzübergreifender Hochwasserschutz im Mittleren Erzgebirge. *Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement*. 7. (6). S. 25-28.
- Schwarze, R., (2007): Objectives of hydrological research in forested catchments. In: Puhmann, H., Schwarze, R. (Eds.). *Forst hydrology – results of research in Germany and Russia, Part 1*. HP/HWRP-Sekretariat. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. S. 310.
- Semmel, A., (1972): *Geomorphologie der Bundesrepublik Deutschland. Grundzüge, Forschungsstand, aktuelle Fragen, erörtert an ausgewählten Landschaften*. Erdkundliches Wissen, H. 30. Steiner. Wiesbaden S. 1-149.
- Semmel, A., Terhorst, B., (2010): The concept of the Pleistocene periglacial cover beds in central Europe: A review. *Quaternary International*. 222. (1–2). S. 120-128.
- Servat, E., Dezetter, A., (1991): Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*. 36. (4). S. 307-330.
- Sieker, F., Wilcke, D., Reich, M., Rüter, S., Jasper, J., Salzmann, M., Schmidt, W.-A., Zacharias, S., Nitzsche, O., (2007): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: "Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte - am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen". Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt Osnabrück. DBU-Projekt AZ 21467. S.270. Hannover. S. 1-346.
- SLfL (2006): *Dezentraler Hochwasserschutz - Vorbeugende Maßnahmen im ländlichen Raum*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden. 35 Seiten.
- SMUL, (2005a): *Ergebnisse der landesweiten Priorisierung von Hochwasserschutzmaßnahmen*. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. 120 Seiten.
- SMUL, (2005b): *Klimawandel in Sachsen - Sachstand und Ausblick 2005*. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden. 109 Seiten.
- SMUL (2007): *Hochwasserschutz in Sachsen. Die sächsische Hochwasserschutzstrategie*. Dresden. 23 Seiten.
- Tönsmann, F., (1995): Studie zum Hochwasserschutz an der Bauna. Kurzfassung. In: Tönsmann, F. (Ed.). *Kasseler Wasserbau-Materialien und -Forschungsberichte* 3. Herkules Verlag. Kassel. S. 1-15.
- Van Haveren, B.P., (1986): Management of instream flows through runoff detention and retention. *Journal of the American Water Resources Association*. 22. (3). S. 399-404.

- VEB, (1956): Erläuterungen zur Standortserkundung des Wuchsgebietes "Oberes Erzgebirge im StfB. Marienberg 1955/56. VEB Forstprojektierung Potsdam Betriebteil Dresden. o.A. Seiten.
- VEB (1979): Erläuterungen zur Standortskarte des staatlichen Forstwirtschaftsbetriebes Marienberg. VEB Forstprojektierung Potsdam Betriebteil Dresden.
- VEB, (1984): Karte der hydrogeologischen Kennwerte 1:50.000, Annaberg-Buchholz 1408-1/Olbernhau 1408-2/1409-1 (SB9). In: VEB Kombinat Geologische Forschung und Erkundung, H. (Ed.). Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik. Zentrales Geologisches Institut Berlin.
- Veit, H., Mailänder, R., Vonlanthen, C., (2002): Periglaziale Deckschichten im Alpenraum. Bodenkundliche und landschaftsgeschichtliche Bedeutung. Petermanns Geogr. Mitteilungen (146/4). S. 4-9.
- Verstraeten, G., Poesen, J., (1999): The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology*. 29. (3-4). S. 275-292.
- Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L., (2004): Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecological Engineering*. 22. (4-5). S. 279-298.
- Völkel, J., Leopold, M., Mahr, A., Raab, T., (2002): Zur Bedeutung kaltzeitlicher Hangsedimente in zentraleuropäischen Mittelgebirgslandschaften und zur Frage ihrer Terminologie. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 146 (2). 146. S. 50-59.
- Völkel, J., Zepp, H., Kleber, A., (2002): Periglaziale Deckschichten in Mittelgebirgen - ein offenes Forschungsfeld. *Berichte zur deutschen Landeskunde*. Heft 2/3. 76. Deutsche Akademie für Landeskunde e.V. Flensburg. S. 101-114.
- Wagenbreth, O., Steiner, W., (1990): *Geologische Streifzüge*. Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 204 Seiten.
- Wainwright, J., Mulligan, M., (2013): *Environmental modelling. Finding simplicity in complexity*. Wiley-Blackwell, Oxford, 494 Seiten.
- Wegner, H., (1992): Dezentraler Hochwasserschutz.-*Wasser & Boden* 1/1992. S. 6-10.
- Wenzel, R., Reinhardt-Imjela, C., Schulte, A., Bölscher, J., (2014): The potential of in-channel large woody debris in transforming discharge hydrographs in headwater areas (Ore Mountains, Southeastern Germany). *Ecological Engineering*. 71. S. 1-9.
- Whipple, W., (1981): Dual purpose detention basins in storm water management. *Journal of the American Water Resources Association*. 17. (4). S. 642-646.
- Williams, E.S., Wise, W.R., (2006): Hydrological impacts of alternative approaches to storm water management and land development. *Journal of the American Water Resources Association*. 42. (2). S. 443-455.
- Wilson, L., Wilson, J., Holden, J., Johnstone, I., Armstrong, A., Morris, M., (2011): The impact of drain blocking on an upland blanket bog during storm and drought events, and the importance of sampling-scale. *Journal of Hydrology*. 404. (3-4). S. 198-208.

Kartenwerke und Geodaten

Böden

- Akademie der Landwirtschaftswissenschaften 1980: Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung. Blatt 58. Annaberg-Buchholz. 1:100.000.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1993-2006: Bodenkonzeptkarte des Freistaates Sachsen (BK_{konz.}). Blatt 5245, 5246, 5247, 5345, 5346, 5347. 1:25.000 (digital).
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1998: Bodenkarte des Freistaates Sachsen (BK50). Blatt L5346 Olbernhau. 1:50.000.
- Tschechisches Katasteramt 1991: Bodenkarte. Blatt 01 – 44 Vejprty. 1:50.000.
- Tschechisches Katasteramt 1992: Bodenkarte. Blatt 02 – 31 Litvinov. 1:50.000.

Geologie

- Königl. Sächsisches Finanzministerium / Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 1926: Geologische Karte von Sachsen. Blatt 5345 Zöblitz Nr. 129. 1:25.000.
- Königl. Sächsisches Finanzministerium / Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 1888: Geologische Karte von Sachsen. Blatt 5346 Olbernhau-Purschenstein Nr. 130. 1:25.000.
- Königl. Sächsisches Finanzministerium / Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 1886: Geologische Karte von Sachsen. Blatt 5445 Kühnheide-Sebastiansberg Nr. 140. 1:25.000.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie / Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 1995: Geologische Karte Vogtland/Erzgebirge (GK100). 1:100.000.
- Zentrales Geologisches Institut Prag 1990: Geologische Karte der Tschechischen Republik. Blatt 02 – 31 Litvinov. 1:50.000.

Landnutzung

- European Environment Agency 2005: CORINE Landcover Europe 2000.

Topographie

- Landesvermessungsamt Sachsen 2002: Zöblitz. Blatt 5345. Topographische Karte 1:25.000.
- Landesvermessungsamt Sachsen 2002: Olbernhau. Blatt 5346. Topographische Karte 1:25.000.

- Landesvermessungsamt Sachsen 2002: Reizenhain. Blatt 5445. Topographische Karte 1:25.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Olbernhau. Blatt M-33-51-B-a-2. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Rübenau. Blatt M-33-51-B-a-3. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Einsiedel-Sensenhammer. Blatt M-33-51-B a 4. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Olbernhau-Oberneuschönberg. Blatt M-33 51 B-b-1. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Oberlochmühle. Blatt M-33-51-B-b-3. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Jindřichova Ves. Blatt M-33-51-B-c-1. Topographische Karte 1:10.000.
- Ministerium für Nationale Verteidigung 1986: Kalek. Blatt M-33-51-B-c-2. Topographische Karte 1:10.000.
- Tschechisches Katasteramt 1982: Blatt Nova Ves v Horach 25 – 02-313. Topographische Karte 1:25.000.
- Digitales Geländemodell SRTM (3Bogensekunden) 2004. Szene n50e013. United States Geological Survey / Global Land Cover Facility, University of Maryland.

Wasser

- Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft T.G. Masaryk 2007: Digitales wasserwirtschaftliche Basisdaten der Tschechischen Republik (DIBAVOD). Fließgewässer. 1:10.000.
- Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 2006: Digitales Landschaftsmodell ATKIS®-Basis-DLM 2. Mit Erlaubnis des Landesvermessungsamtes Sachsen, Erlaubnis-Nr. 4615/2006.
- Zentrales Geologisches Institut Berlin / Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 1984: Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik. Karte der hydrogeologischen Kennwerte (SB9). Blatt Annaberg-Buchholz 1408-1/Olbernhau 1408-2/1409-1. 1:50.000.

Anhang

Tab. 42: Durchmesser der Rohrdrosseln am Speicherauslass			
Nr.	Standort	Bezeichnung im Modell	Drossel HQ ₁₀₀
N01	Telčský Teich 1	Telčský_Teich1	Dn300s
N02	Telčský Teich 2	Telčský_Teich2	DN700s
N03	Telčský Teich 3	Telčský_Teich3	DN1100s
N04	Telčský 1	HRB_Nr8_Telčský	DN1700s
N05	Telčský 2	HRB_Nr9_Telčský	DN1300r
N06	Steinbach 1	Steinbach1	DN300s
N07	Steinbach 2	Steinbach2	DN300s
N08	Rübenauer Bach 1	HRB_Nr7_Rübe	DN800s
N09	Rübenauer Bach 2	RübenauB2_Teich	DN400s
N10	Rübenauer Bach 3	RübenauB1	DN300s
N11	Luznice 1	HRB_Nr5_Luzni	DN400r
N12	Jindrichova 1	HRB_Nr6_Jindri	DN1300s
N13	Bily 1	HRB_Nr4_Bily	DN900s
N14	Bily 2	Bily2	DN800s
N15	Natzschung 1	HRB_Nr3_Natz	DN1800r
N16	Natzschung 2	HRB_Nr2_Natz	DN900s
N17	Natzschung 3	Natzschung_T2_T	DN300s
N18	Natzschung 4	HRB_Nr1_Natz	DN600s
N19	Natzschung 5	Natzschung_R3	DN500s

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Literatur verfasst habe.

Berlin, den 30.07.2015

Jens Bölscher

