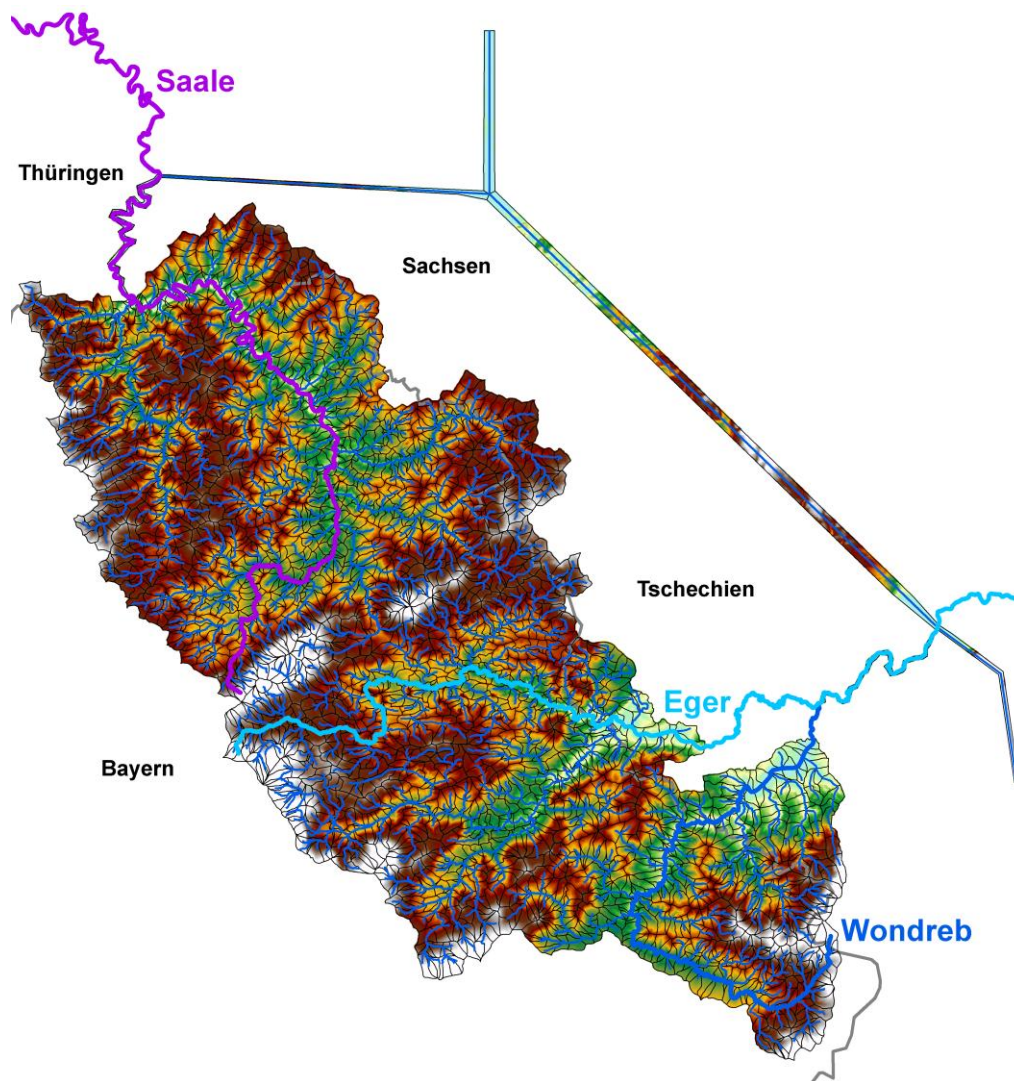


Erstellung von Wasserhaushaltsmodellen zur Hochwasservorhersage für das bayerische Elbegebiet



Auftraggeber: Flussgebietsgemeinschaft Elbe

Bearbeitung: Dipl.-Hyd. Mario Böhm (M.Sc.)
M.Sc. Axel Keeß

Dr.-Ing. Greta Moretti
Dr.-Ing. Kai Gerlinger

Stand: 14.07.2016

Erstellung von Wasserhaushaltsmodellen zur Hochwasservorhersage für das bayerische Elbegebiet

Inhalt	Seite
Zusammenfassung	4
1. Hintergrund und Zielsetzung.....	6
2. Datengrundlage und Datenaufbereitung	7
2.1 GIS- und Profil-Daten	7
2.2 Hydrometeorologische Daten	8
2.2.1 Übersicht und grundlegende Datenaufbereitung.....	8
2.2.2 Plausibilisierung der meteorologischen Daten.....	9
2.2.3 Plausibilisierung der Abflussdaten.....	11
3. Modellaufbau des LARSIM-WHM SEW	12
3.1 Gebietsaufteilung (Teilgebiete und Flüsse).....	12
3.1.1 Zielsetzung bei der Gebietsaufteilung.....	12
3.1.2 Durchführung der Gebietsaufteilung (TGB).....	12
3.1.3 Durchführung der Gebietsaufteilung (Flüsse)	14
3.2 Landnutzung und Boden	15
3.2.1 Landnutzung.....	15
3.2.2 Boden	16
3.3 Querprofile	19
3.4 Gebietsdatei (Tape12)	21
3.5 Ermittlung der externen Höhenzonierung.....	22
3.6 Sonstige Modelleigenschaften.....	24
3.6.1 Talsperren und andere Bauwerke	24
3.6.2 Stamm- und Steuerdateien für neue Formate.....	27
3.6.3 Zu verwendende Optionen und Einzelparameter:.....	27
3.6.4 LARSIM.EXE	28
4. Modelleichung	29
4.1 Vorgehen bei der allgemeinen Kalibrierung des Schneemoduls	29
4.2 Erstellung der Zustandsdatei.....	34
4.3 Flood-Routing-Tests	35
4.4 Bordvoller Abfluss	37
4.5 Verwendung von Tageswertstationen des Niederschlags	37
4.6 Vorgehen bei der pegelkontrollbereichsspezifischen Kalibrierung	39
4.6.1 Übersicht der Ergebnisse für alle Pegel.....	40

4.6.2	Pegel Weißdorf/Saale.....	43
4.6.3	Pegel Fahrenbühl/Lamitz	44
4.6.4	Pegel Oberkotzau/Saale	45
4.6.5	Pegel Rehau/Schwesnitz	46
4.6.6	Pegel Kautendorf/Südliche Regnitz	47
4.6.7	Pegel Hof/Saale	48
4.6.8	Pegel Hölle/Selbitz.....	49
4.6.9	Pegel Blankenstein/Saale.....	50
4.6.10	Pegel Marktleuthen/Eger	51
4.6.11	Pegel Hohenberg/Eger	52
4.6.12	Pegel Lorenzreuth/Röslau	53
4.6.13	Pegel Marktredwitz/Kössein.....	54
4.6.14	Pegel Arzberg/Röslau	55
4.6.15	Pegel Dobrigau/Wondreb	56
4.6.16	Pegel Waldsassen/Wondreb	57
5.	Besondere Testsimulationen	58
5.1	Testsimulation mit RADOLAN Niederschlagsdaten	58
5.2	Testsimulation mit Extremereignis.....	59
6.	Validierung.....	61
6.1	Validierung der Schneesimulation.....	61
6.2	Validierung der Abflusssimulation.....	62
6.2.1	Validierung des gesamten Abflussbereichs	62
6.2.2	Validierung Niedrigwasser	62
6.2.3	Validierung Mittelwasser.....	63
6.2.4	Spezifische Validierung für Hochwasser und Vorhersagetests	64
6.2.5	Validierung der Wasserhaushaltskomponenten	66
7.	Operationelle Modellkonfiguration und Empfehlungen.....	67
8.	Digitale Datenbereitstellung	69
9.	Literatur.....	70

Zusammenfassung

Ziel dieses Projekts war es, ein zusammenhängendes LARSIM-Wasserhaushaltsmodell (WHM) für die Saale (bis zum Pegel Blankenstein/Saale), die Eger (bis zur Talsperre Skalka) und die Wondreb (bis zur Talsperre Jesenice) zu erstellen. Dabei galt es im Stundenzeitschritt zu arbeiten und neben der eigentlichen LARSIM-WHM-Erstellung auch alle Vorkehrungen für einen operationellen Vorhersagebetrieb zu treffen.

Zu Beginn des Projekts wurden umfangreiche hydrometeorologische Daten gesichtet und plausibilisiert. Nach diesen erfolgreichen Arbeitsschritten wurden alle Daten (acht Parameter) für das LARSIM-WHM Saale-Eger-Wondreb, kurz WHM SEW, in jahresweise LILA-Dateien aufgeteilt, damit in der Folge ein Modell mit den neuen LARSIM-Formaten LILA und KALA erstellt werden konnte.

Das WHM SEW wurde als hydrologisches Teilgebietsmodell (nicht Rastermodell) aufgestellt. Hierzu wurde eine Vielzahl an Geodaten (Flüsse, hydrologische Teileinzugsgebiete, Landnutzung, Boden) gesichtet und aufbereitet. Im Ergebnis entstand ein LARSIM-WHM mit 3042 Teilgebieten (TGB) und einer durchschnittlichen TGB-Größe von 0,77 km² (Median = 0,74 km²). Nach jetzigem Kenntnisstand ist dies die bislang kleinräumigste Auflösung eines LARSIM-WHM. Um eventuelle spätere Aufgaben im Zusammenhang mit den Talsperren Skalka und Jesenice berücksichtigen zu können, wurde das Projektgebiet über die zunächst definierten Einzugsgebietsgrenzen hinaus bis zu den Staumauern der beiden Talsperren in Tschechien erweitert (+ ~31 km² im Gebiet der Talsperre Skalka an der Eger bzw. + ~72 km² im Gebiet der Talsperre Jesenice an der Wondreb). Eine explizite Modellierung dieser Talsperren findet auch im erweiterten Projektgebiet nicht statt, es wurden allerdings die modelltechnischen Grundlagen für eine mögliche spätere Anknüpfung von tschechischer Seite geschaffen. Mittels sieben virtuellen TGB wurden zudem die Teile der Saale, der Eger und der Wondreb LARSIM-technisch zu einem einzigen Modell vereint.

Zur besseren Berücksichtigung des Schnees innerhalb des schneereichen SEW-Mittelgebirgsgebietes wurde zusätzlich eine externe Höhenzonierung in 100m-Höhenschichten erstellt und im Modell verwendet. Des Weiteren wurden sechs Speicher (Talsperren/Seen/HWRückhaltebecken) und die Lamitz-Überleitung in das LARSIM-WHM SEW modelltechnisch eingebaut.

Die Kalibrierung des Modells erfolgte für den Zeitraum von Januar 2004 bis Juni 2014. Dabei wurden 15 Abflusspegel in den drei Flussgebieten Saale, Eger und Wondreb berücksichtigt. Die Kalibrierung erfolgte in Abstimmung mit dem Auftraggeber (AG) und gemäß dem LARSIM-Kalibrierleitfaden (Haag et al., 2016). Dabei wurde zweigeteilt vorgegangen: Zuerst eine Grobkalibrierung inklusive einer Schneekalibrierung, dann die Feinkalibrierung anhand von insgesamt 77 HW-Ereignissen für die 15 Eichpegel. Dabei kamen auch neueste LARSIM-Entwicklungen wie z.B. durchgängiger Einsatz des LILA/KALA-Formats oder die Option SCHNEEREGEN (LUBW & LUWG, 2015) zum Einsatz.

Im Zuge der Kalibrierung konnten für alle Pegel Pegelkontrollbereich (PKB) spezifische, zeitlich einheitliche Parameterwerte abgeleitet werden, mit welchen das gesamte Abflussspektrum von Niedrig- bis Hochwasser simuliert werden kann. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die bestmögliche Abbildung des Hochwassergeschehens gelegt, dem im Zweifelsfall mehr Gewicht eingeräumt wurde als den anderen Abflussbereichen. Für die große Mehrzahl der Pegel konnten zufriedenstellende, oft auch gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Negativ fällt lediglich

der Pegel Fahrenbühl/Lamitz auf. Die Korrelationskoeffizienten von Q_{sim} zu Q_{gem} an den 15 Pegeln haben einen arithmetischen Mittelwert von 0,78 (Median = 0,80). Der durchschnittliche Nash-Sutcliffe-Koeffizient beträgt 0,75 (Median = 0,79) bzw. für die logarithmierten Abflüsse (d.h. Fokus auf den Niedrigwasserperioden) 0,68 (Median = 0,82). Die durchschnittliche Bilanz (Verhältnis von Q_{sim} zu Q_{gem}) über die 15 Pegel hinweg liegt bei 1,02 (Median = 0,99), was insgesamt die obige positive Ergebnisdarstellung untermauert.

Zur Validierung des Modells wurden quasi-operationelle Vorhersagetests im NW-Bereich, MW-Bereich und HW-Bereich durchgeführt. Hierfür wurden im NW- bzw. im MW-Bereich jeweils zwei sinnvolle Zeitbereiche pro Pegel festgelegt. Für die zur Validierung ausgewählten NW-Perioden betrug der über alle 15 Pegel gemittelte Betrag der mittleren prozentualen Abweichung von Q_{gem} zu Q_{VHS} für die Vorhersagetiefe von 24 h nur 16%. Für die begutachteten MW-Perioden lag der analog zur NW-Auswertung berechnete Betrag der mittleren prozentualen Abweichung von Q_{gem} zu Q_{VHS} für die Vorhersagetiefe von 24 h bei 18% (ohne Berücksichtigung des Pegels Fahrenbühl/Lamitz bei nur 12%). So kann sowohl für den NW-Bereich als auch für den MW-Bereich von erfolgreichen Vorhersagetests gesprochen werden, zumal diese Mittelwerte nur schwach ansteigen, wenn man über alle sieben verschiedenen Vorhersagetiefen von 24 h bis 168 h mittelt (20% im NW-Bereich bzw. 25% im MW-Bereich).

Für den HW-Bereich wurden für alle 15 Pegel jeweils fünf HW-Ereignisse, zum Teil mit Schneeeinfluss, zur Validierung vereinbart. Alle Validierungsläufe mit LARSIM wurden unter Einsatz der operationellen Optimierungsverfahren und gemessener meteorologischer Eingangsdaten durchgeführt. Dabei wurde, wie schon im NW- und MW-Bereich, in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer das Programmpaket ProFoUnD (program to assess the forecast uncertainty of discharge) eingesetzt. ProFoUnD dient der detaillierten quantitativen Auswertung von Abflussvorhersagen des Modells LARSIM (Haag et al., 2013). Die gesamte Validierung in den drei Abflussbereichen belegte das insgesamt gute Ergebnis der Kalibrierung und produzierte in der großen Mehrzahl passende Vorhersagen.

Aus diesem zufriedenstellenden Kalibrier- und Validier-Ergebnis kann geschlussfolgert werden, dass der hier gewählte LARSIM-WHM-Ansatz (u.a. mit erweiterten Bodenparametern, sehr feiner TGB-Auflösung, neuen LARSIM-Optionen bzgl. Schnee und 100m-Höhenzonen) auf vergleichbare Mittelgebirgsgebiete übertragbar ist. Bei detailgenauer und guter Geo- bzw. Meteo-Datenbasis hätten derartige LARSIM-WHM sicherlich gute Erfolgsaussichten. Dies schließt nahegelegene Elbe-Gebiete in Deutschland und Tschechien mit ein. Mit dem Saale-Abschlusspegel Blankenstein innerhalb des WHM SEW steht z.B. ein wichtiger Übergabepiegel für eine anschließende Saale-Modellierung zur Verfügung. Auch die Erweiterung des WHM SEW zu einem Wasserhaushalts- UND Wassertemperaturmodell wäre bei ausreichender Datenbasis ohne Probleme möglich.

Abschließend wurde auf Grundlage der Analysen bei der Kalibrierung und in Absprache mit dem AG eine operationelle Modellkonfiguration abgeleitet und erfolgreich auf Lauffähigkeit getestet. Zusammen mit den positiven Ergebnissen bei den Vorhersagetests unter operationellen Bedingungen ist davon auszugehen, dass sich das WHM SEW gut für die operationelle Abflussvorhersage eignet. Damit ist ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der operativen Hochwasservorhersage in Mittelgebirgseinzugsgebieten mit schneller Abflussbildung geleistet.

Die operationelle Modellkonfiguration sowie alle im Zuge des Projekts relevanten Daten wurden dem AG zum Projektabschluss in einer kompletten Datenlieferung digital zur Verfügung gestellt.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Die Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) koordiniert die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie im deutschen Teil des Elbeeinzugsgebiets. Bedingt durch die Erfahrungen des Hochwassers 2013 ist die Verbesserung der operativen Hochwasservorhersage auch in mesoskaligen Mittelgebirgseinzugsgebieten ein wesentlicher Aspekt in der Umsetzung der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie.

Ziel dieses Vorhabens war die Erstellung eines Wasserhaushaltsmodells (WHM) zum Einsatz in der operationellen Hochwasservorhersage und –frühwarnung für den bayerischen Teil des Elbeeinzugsgebietes. Um einen effizienten Einsatz in der bestehenden Vorhersageumgebung zu gewährleisten, sollte das Modell auf dem Programm LARSIM basieren, welches auch Grundlage der gegenwärtig bereits bestehenden Modelle weiterer bayerischer Flusseinzugsgebiete ist. Das Modellgebiet gliedert sich in drei Teilgebiete und umfasst im Einzelnen das Einzugsgebiet der Sächsischen Saale bis kurz hinter der bayerischen Landesgrenze (Übergabepunkt thüringischer Pegel Blankenstein-Rosenthal/Saale mit einem Einzugsgebiet von etwa 1010 km²), das Einzugsgebiet der Eger bis kurz hinter der deutschen Staatsgrenze (Einzugsgebiet von etwa 670 km²) sowie das Einzugsgebiet der Wondreb ebenfalls bis kurz hinter der deutschen Staatsgrenze (Einzugsgebiet von etwa 410 km²). Bereits bei der Modellaufstellung wurde berücksichtigt, dass der operationelle Betrieb nicht in Teilmodellen sondern als ein Modell „WHM Saale-Eger-Wondreb“ (WHM SEW) erfolgen soll.

Das auf Teileinzugsgebieten (< 1 km²) basierende WHM SEW sollte in stündlicher Auflösung den terrestrischen Wasserhaushalt kontinuierlich berechnen und damit operationelle Vorhersagen im Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserbereich für ausgewählte Pegel innerhalb der drei genannten Einzugsgebiete ermöglichen. Der Fokus der Kalibrierung anhand historischer Daten von 2004 bis 2014 sollte gemäß dem späteren schwerpunktmäßigen Einsatz im Hochwasserbereich liegen.

Es galt bei der Modellerstellung zudem zu beachten, dass sich die Pegel aufgrund der Gebietsgröße und des Mittelgebirgscharakters durch ein schnelles Anlaufen der Hochwasserwelle auszeichnen und damit der auf gemessenen Abflüssen beruhende Vorhersagehorizont vernachlässigbar kurz ist. Somit war für eine Hochwasservorhersage und Hochwasserfrühwarnung alleinig der Prognosehorizont (also der Zeitbereich, in dem der hochwasserauslösende Niederschlag noch gar nicht gefallen war) entscheidend. Dieser sollte vollständig aus den Niederschlags-Vorhersageprodukten abgeleitet werden.

Die kompletten Arbeiten erfolgten in fachlicher Abstimmung mit dem Auftraggeber (FGG Elbe) und dem Hochwassernachrichtendienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt (BLfU).

2. Datengrundlage und Datenaufbereitung

2.1 GIS- und Profil-Daten

Das BLfU stellte im Oktober und November 2015 in sechs großen Datenlieferungen eine Vielzahl an GIS- und Profildaten bereit, auf welcher der SEW-Modellaufbau basierte. Teilweise wurden diese Daten im Dezember und Januar noch in Absprache zwischen BLfU und FGG Elbe als Auftraggeber (AG) und der HYDRON GmbH als Auftragnehmer (AN) erweitert bzw. ergänzt (z.B. 400 m breite Profile aus TINs zur Verfügung gestellt am 20. Januar 2016).

GIS-Daten:

Die nachfolgend aufgelisteten GIS-Daten stellten dabei die für die Projektbearbeitung relevanten Daten dar (in Klammer steht die Anzahl der bereit gestellten Datensätze):

- Flüsse: FGN25-Linien-Shapefiles (n=2)
- EZG: unterschiedlich feine EZG-Polygon-Shapefiles (n=14)
- Digitales Geländemodell: 5 m- LaserScan-Raster für Bayern bzw. SRTM-2-Raster (30m-Auflösung) außerhalb Bayerns (n=6)
- Landnutzung: Polygon-Shapefile (n=1) aus einer Verschneidung von ATKIS-BASIS-DLM- (bayerischer Teil) und CORINE2006-Daten (außerbayerischer Teil)
- Boden:
 - a) für bayerischen Teil: ÜBK25-Polygon-Shapefile mit CORINE-Unterstützung für Forst / Nicht-Forst und zusätzlicher Excel-Tabelle mit Werten zur nutzbaren Feldkapazität (= nFk) und Luftkapazität (= Lk)
 - b) für den tschechischen Teil: EU-Bodenkarte 1:200 00 als Rasterdatensatz
 - c) für den thüringischen und sächsischen Teil: BÜK 200

Gewässerprofile:

Zur verbesserten Abbildung des Gerinneabflusses wurden vom BLfU zwei Typen von Profilen bereitgestellt:

- Vermessene Profile im GeoCADOP-Format für Culmitz, Eger (geringer Anteil), Nördliche Regnitz, Röslau (geringer Anteil) und Sächsische Saale
- Profile aus TINs (aus HYDRO_AS-2D-Modellen) mit größtenteils 400 m langen (1. Lieferung nur 100 m lang) Profilstrecken in Form einer Excel-Tabelle mit 3 573 Profilen und über 205 000 Datenpunkten samt dazugehörigem Linien-Shapefile zur Georeferenzierung der Profile

2.2 Hydrometeorologische Daten

2.2.1 Übersicht und grundlegende Datenaufbereitung

Die in diesem Projekt verwendeten hydrometeorologischen Stationsdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und von anderen Betreibern bereitgestellt. Zudem lagen Niederschlags- und Temperaturdaten für 13 tschechische Stationen vor.

Die Daten wurden in unterschiedlichen Formaten geliefert (siehe Tabelle 2.1) und in ein einheitliches Eingabeformat für LARSIM (Listenformat LARSIM = LILA) umformatiert.

Die räumliche Zuordnung der Stationsdaten erfolgte über Stammdaten (Rechtswert, Hochwert, Höhe), welche in separaten Stammdateien zum Teil mitgeliefert wurden. Für die weitere Verarbeitung wurden die Koordinaten der Stationsdaten in das System des Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN, Gauß-Krüger Zone 4) transformiert.

Die Unterschiede in den deutschen und tschechischen Höhensystemen liegen im Bereich von ca. 13 cm (Quelle: Wikipedia). Die Höhenangabe der tschechischen Stationen wurde in der Stammdatei für die meteorologischen Messdaten im LILA-Format <mesklima.stm> entsprechend angepasst.

Die bereitgestellten Abflusszeitreihen für ursprünglich 22 Pegel lagen in 15-Minuten-Zeitschritten vor und wurden im Zuge der LILA-Umformatierung zu Stundenwerten aggregiert. Der Stundenwert entsteht aus der Mittelung der verfügbaren Abflussmesswerte in 15-Minuten-Zeitschritten (maximal vier), die den aktuellen Stundenwert abbilden. Wenn z.B. einer von den vier 15-Minuten-Werten fehlt, wurden nur drei Abflussmesswerte zum Stundenwert gemittelt.

Tabelle 2.1: Übersicht der Datensätze für die hydrometeorologischen Stationsdaten (die Kennungen der Datenarten beziehen sich auf das LILA-Format)

Datensatz	Datenart	zeitl. Auflösung	Format
DWD	N, TLU, ZSOS, XWIND, TTAU, XLUDR, RFLU, SWEQ	Stundenwerte, Tageswerte	verschiedene ASCII-Formate
LfL	N, TLU, XWIND, XLUDR, XGLOB	Stundenwerte	XLS
LfU	N, SWEQ, MAES	Stundenwerte	GMD
Andere Betreiber	N, TLU, XGLOB, XWIND, XLUDR, RFLU, SWEQ, MAES	Stundenwerte	GMD
Tschechien	N, TLU	Stundenwerte	XLS
Pegeldaten	Q, WSP	15 Minuten	ZRX

Die resultierenden LILA-Datensätze der meteorologischen Parameter bestanden aus:

- 65 Niederschlagsstationen
- 41 Lufttemperaturstationen
- 29 Luftfeuchtestationen

- 15 Taupunkttemperaturstationen
- 8 Globalstrahlungsstationen
- 14 Sonnenscheindauerstationen
- 7 Luftdruckstationen
- 19 Windgeschwindigkeitsstationen

Die Lage der Stationen ist in Anlage B.4 bis Anlage B.11 je Datenart dargestellt. In der Anlage A 1 bis A 8 sind die berücksichtigten meteorologischen Stationen je Datenart mit X- und Y-Koordinate, Höhe, Datenverfügbarkeit und Besonderheit der jeweiligen Zeitreihe aufgelistet. Die Grafiken in Anlage A.17 zeigen die verfügbaren Zeiträume der meteorologischen Stationen je Datenart.

Die leider erst kurz vor Projektende festgestellte Lage-Vertauschung der drei Niederschlagsmessstationen Plössberg-Liebenstein, Helmbrechts und Presseck wurde sowohl in den Inputdateien als auch in den von der Vertauschung betroffenen Ergebnissen korrigiert (siehe Anlagen A.1, B.4, E.6, E.7, F.6, F.7, G.6, G.7, J.6, J.7, K.3, O.7 und O.8).

2.2.2 Plausibilisierung der meteorologischen Daten

Visuelle und automatisierte Plausibilitätsprüfung

Im Zuge der Umformatierung der meteorologischen Antriebsdaten erfolgte zum Einen eine visuelle Plausibilitätsprüfung der Daten. Zum Anderen wurde eine automatisierte Plausibilitätsprüfung mittels eines HYDRON-eigenen Werkzeugs durchgeführt, welches auf folgenden Kriterien basiert:

- Vollständigkeit
- Grenzwertprüfung (Extremwerte, zulässige Minima und Maxima)
- Konstante Werte
- Zeitliche Konsistenz (Gradienten zwischen den Zeitschritten)

Die folgende Tabelle 2.2 zeigt die zur Plausibilitätsprüfung verwendeten Kriterien. Alle Werte, die eines oder mehrere der in Tabelle 2.2 aufgeführten Kriterien verletzen, wurden anschließend auf Fehlwert gesetzt.

Sind beispielsweise beim Niederschlag vier oder mehr aufeinanderfolgende Werte konstant und größer 0,5 mm, so werden diese Werte auf Fehlwerte gesetzt. Ebenso werden alle Niederschlagswerte eines Tages auf Fehlwerte gesetzt, wenn ihre Summe mehr als 300 mm beträgt. Das Kriterium Δ_{\max} prüft Sprünge von einem Wert zum nächsten. Ändert sich beispielsweise die Lufttemperatur von einem Zeitschritt zum nächsten um mehr als 10 °C, so wird dieser Zeitschritt auf Fehlwert gesetzt, in welchem der Sprung der Werte erfolgt. Hierbei wird zusätzlich geprüft, ob innerhalb von 12 Stunden ein Rücksprung größer des Schwellenwerts (10 °C) in die entgegengesetzte Richtung erfolgt. Ist dies der Fall, so werden alle Zeitschritte vom ersten Sprung bis zum zweiten (Rück-) Sprung der Werte auf Fehlwerte gesetzt.

Tabelle 2.2: Kriterien zur Plausibilitätsprüfung der Daten im Stundenzeitschritt (die Kennungen der Datenarten beziehen sich auf das LILA-Format).

Datenart	Anzahl maximal zulässiger konstanter Werte	Minimum	Maximum	Δ_{\max}	maximale 24-Stunden-Summe
N	4 bei Werten größer 0.5 mm 12 bei Werten größer 0 mm	0 mm	150 mm	-	300 mm
TLU	24	-40 °C	+50 °C	10 °C	-
XWIND	24 bei 0 m/s 12 bei größer 0 m/s	0 m/s	60 m/s	-	-
XGLOB	4 bei Werten größer 10 W/m ²	0 W/m ²	1100 W/m ²	-	-
ZSOS	-	0 min/h	60 min/h	-	-
RFLU	24 bei Werten kleiner 95%	5 %	105 %	50 %	-
XLUDR	-	750 hPa	1055 hPa	10 hPa	-
TTAU	24	-40 °C	+50 °C	10 °C	-

Die Ergebnisse der automatisierten Plausibilisierung sind für alle Stationen in Log-Dateien festgehalten, die dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden (siehe Anlage A). Bei der Plausibilisierung der Sonnenscheindauerstationen wurden keine unplausible Werte erkannt.

Plausibilisierung mit NIKLAS

Zusätzlich wurden die meteorologischen Daten mit dem Programmsystem NIKLAS auf innere Konsistenz und auf räumliche Konsistenz überprüft. Im Rahmen der inneren Konsistenz wurden

- die relative Luftfeuchte mit dem Niederschlag
- die Lufttemperatur mit der Taupunkttemperatur und
- die Sonnenscheindauer mit dem Niederschlag

verglichen. Bei der Prüfung der räumlichen Konsistenz wurden die Niederschlagsstationen mit vier Nachbarstationen des Niederschlags innerhalb eines maximalen Abstands von 40 km verglichen. Auch die anderen Klimaparameter wurden dabei mit einbezogen.

In NIKLAS werden unplausible Werte nicht automatisch auf Fehlwerte gesetzt. Vielmehr werden durch das Programm Warnungen erzeugt, die auf möglicherweise unplausible Messwerte hinweisen. Die so identifizierten Werte wurden vom Bearbeiter dann nochmals visuell überprüft und wenn nötig auf Fehlwert gesetzt.

Die LOG-Datei der Plausibilisierung mit NIKLAS wurde ebenfalls dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

2.2.3 Plausibilisierung der Abflussdaten

Die Pegel­daten wurden visuell auf die Überschrei­tung von Grenzwerten (Extremwerte), auf konstante Werte sowie auf räumliche Konsistenz durch den Vergleich zwischen Unter- und Oberlie­gerpegel überprü­ft. Zudem wurden die Zeitreihen der Abflussmessungen von eventuell negativen Werten bereinigt.

Bei der visuellen Überprü­fung der Pegel­daten ist Folgendes auffällig:

- Pegel Hohenberg/Eger: Im Niedrigwasser- bis Mittelwasserbereich ist ein deutlicher, durch eine Kraftwerkssteuerung verursachter Tagesgang vorhanden
- Pegel Oberkotzau/Sächsische Saale: Der Niedrigwasserbereich weist einen unnatürlich kantigen Verlauf auf
- Pegel Fahrenbühl/Lamitz: Die Abflussmessung am Pegel ist durch die Lamitz-Überleitung stark beeinflusst und weist keine natürliche Dynamik auf
- Am Pegel Blankenstein/Sächsische Saale sind die gemessenen Abflüsse erst ab November 2005 in geeigneter Auflösung vorhanden
- Zwischen Januar und Februar 2010 sehen die gemessenen Abflüsse an fast allen Pegeln un­plausibel aus, wie in Bild 2.1 für die Pegel Lorenzreuth/Röslau und Kautendorf/Südliche Regnitz dargestellt

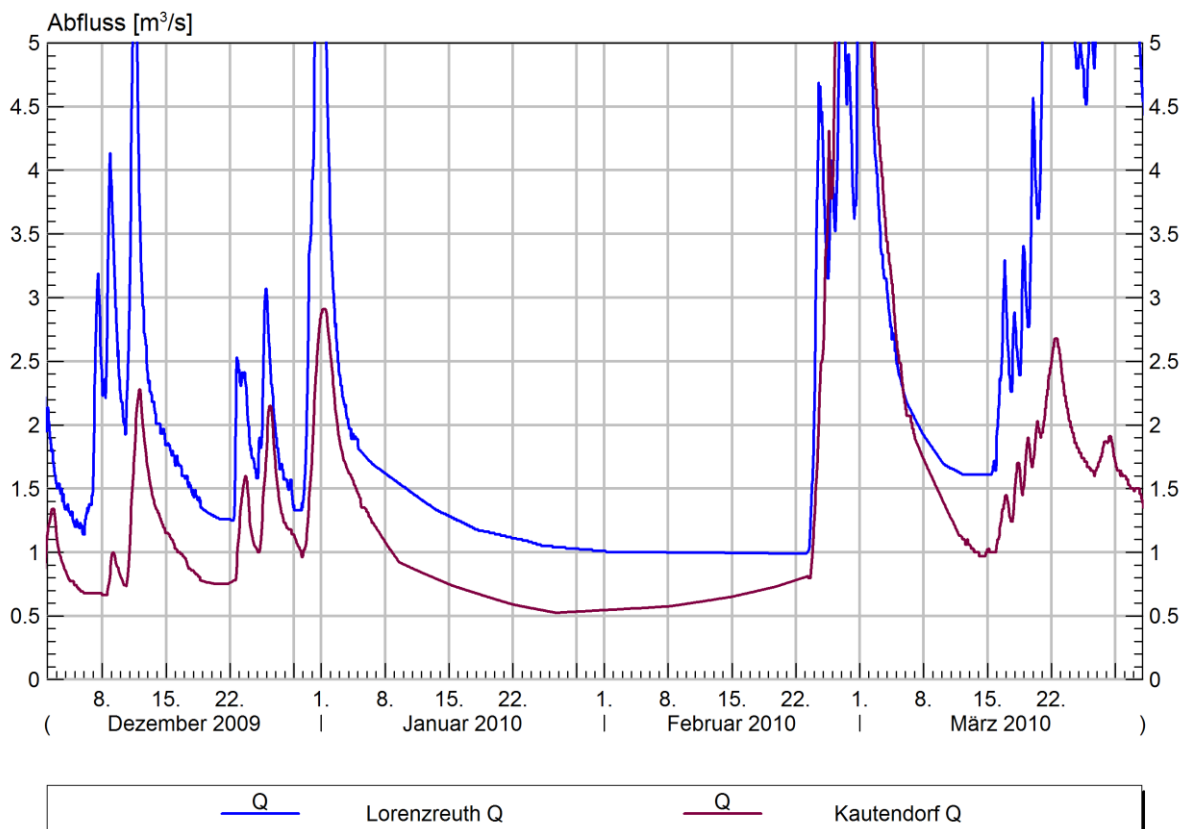


Bild 2.1: Gemessene Abflüsse am Pegel Lorenzreuth/Röslau und Kautendorf/Südliche Regnitz von Dezember 2009 bis Ende März 2010

3. Modellaufbau des LARSIM-WHM SEW

3.1 Gebietsaufteilung (Teilgebiete und Flüsse)

3.1.1 Zielsetzung bei der Gebietsaufteilung

Das LARSIM-WHM Saale-Eger-Wondreb sollte als hydrologisches Teilgebietsmodell (nicht Rastermodell) in stündlicher Auflösung aufgestellt werden. Dabei sollte die aktuelle Version des Programms LARSIM (Variante: „neue Formate“) zum Einsatz kommen, also LARSIM im LILA-/KALA-Format. Die hydrologischen Teilgebiete (TGB) sollten primär auf Basis des Gewässernetzes (FGN 25), vorhandener TGB-Polygon-Shapefiles und topographischer Daten (5m-LaserScan-DGM bzw. SRTM-DGM) definiert werden, wobei zusätzlich die Lage von Pegelstandorten, Rückhaltebecken, Verzweigungen etc. zu beachten war.

Um eine verhältnismäßig hohe räumlich Auflösung zu erzielen, sollte die Größe der einzelnen TGB dabei zwischen 0,4 km² und 1,0 km² liegen. Der Median für alle TGB sollte zwischen 0,6 km² und 0,8 km² betragen. Des Weiteren war ein wichtiges Projektziel, die drei Flussgebiete der Sächsischen Saale, der Eger und der Wondreb in einem einzigen LARSIM-Modell zusammenzufassen.

3.1.2 Durchführung der Gebietsaufteilung (TGB)

Für die TGB-Aufteilung gemäß den oben genannten Zielen wurde zuerst ein Abgleich durchgeführt, ob die zu verwendenden FGN25-Flussstücke prinzipiell geometrisch zu den 14 verschiedenen EZG-Polygon-Datensätzen passen. Erfreulicherweise war dieser an diversen Stellen durchgeführte Abgleich erfolgreich, d.h. Fluss- und EZG-Datensätze konnten zusammen verwendet werden.

Nach eingehender Kontrolle wurde sich als TGB-Startdatensatz für das vom BIfU bereitgestellte Shapefile „EZG09_clip.shp“ entschieden. Dieser Datensatz mit 4 580 Polygonen wies eine durchschnittliche TGB-Flächengröße von mit den Projektzielen übereinstimmenden 0,47 km² auf. Allerdings waren 1 526 Polygone (33 %) kleiner als 0,1 km² und 535 Polygone (12 %) größer als 1 km². Sprich, eine mehrstufige Überarbeitung des ausgewählten TGB-Startdatensatz war notwendig, um die Zielgrößen bei den TGB-Flächen zu erreichen.

In einem ersten Schritt wurden jene 93 TGB ermittelt und anschließend gelöscht, welche nicht zu Saale, Eger oder Wondreb gehörten, also außerhalb des Untersuchungsgebiets lagen.

Danach wurden, beginnend mit dem größten TGB (Flächengröße von 22,7 km²), zu große TGB disaggregiert. D.h. das ursprünglich größte TGB mit 22,7 km² wurde beispielsweise in 30 TGB disaggregiert samt komplexer Anpassung der LAWA-Nummerierung. Diese Disaggregation wurde manuell für 130 TGB durchgeführt, woraus 485 neue kleinere TGB resultierten. Diese aufwändige Disaggregation hatte zur Folge, dass alle TGB nunmehr eine Flächengröße kleiner 2 km² aufwiesen.

Im dritten Schritt wurde die große Anzahl sehr kleiner TGB verringert. Dies betraf z.B. Quellgebiete, in denen ein sehr fein verästelt Flussnetz mit dementsprechend vielen sehr kleinen TGB vorlag. Hierzu entwickelte HYDRON ein neues Python-Skript, mit welchem auf der Basis der vorhandenen LAWA-Nummerierung TGB mit einer Flächengröße kleiner als 0,4 km² mit passenden

Nachbar-TGB aggregiert wurden. Mit den Zielvorgaben bei den Flächengrößen (siehe Unterkapitel 3.1.1) erwies sich nach mehreren Skript-Durchläufen die Kombination

$$A_{\min} = 0,4 \text{ km}^2 \text{ [Schwellenwert, unterhalb dessen Flächen aggregiert werden sollen]}$$

$$A_{\max} = 1,0 \text{ km}^2 \text{ [Schwellenwert, der durch Aggregation nicht überschritten werden darf]}$$

als die zielführendste und wurde folglich eingesetzt. Mit diesem Verfahren wurde der TGB-Datensatz um über 2 200 TGB reduziert.

Im vierten Schritt stimmte der AG einem Kulanzvorschlag der HYDRON GmbH zu, das Projektgebiet (größtenteils in Tschechien) um ca. 30 km² im Gebiet der Talsperre Skalka bzw. um 70 km² im Gebiet der Talsperre Jesenice zu erweitern, damit das feine TGB-Netz für das finale WHM bis einschließlich zum Ende der Talsperren reicht. Diese Erweiterung hat den Vorteil, dass später auch sinnvolle LARSIM-Berechnungen für die beiden Talsperren durchgeführt werden können. Deshalb wurden hierzu 21 (Talsperre Skalka) bzw. 55 (Talsperre Jesenice) TGB auf der Basis des DGM neu digitalisiert.

Im nächsten Schritt wurden in Absprache mit dem AG jene TGB nochmals geteilt, welche einen Pegel enthielten. D.h. für alle 28 ursprünglich bereitgestellten Pegel (beinhalten die 15 späteren Eichpegel) wurden die dazugehörigen TGB so geteilt, dass die Pegel exakt auf der Grenze zwischen zwei neu geteilten TGB liegen.

In einem sechsten und letzten Schritt wurde das Projektgebiet noch um sieben TGB erweitert, sodass später gemäß Leistungsbeschreibung des AG nur eine Gebietsdatei (Tape12) erstellt werden konnte, welche die TGB aller drei gewünschten Flussgebiete (Saale, Eger und Wondreb) enthält. Diese sieben TGB wurden als dünne schlauchförmige TGB digitalisiert und bewirken, dass letztlich alle Modellflusstücke in einem virtuellen Elbe-Mündungs-TGB enden. Zur Verdeutlichung dieses Vorgehens dient Bild 3.1.

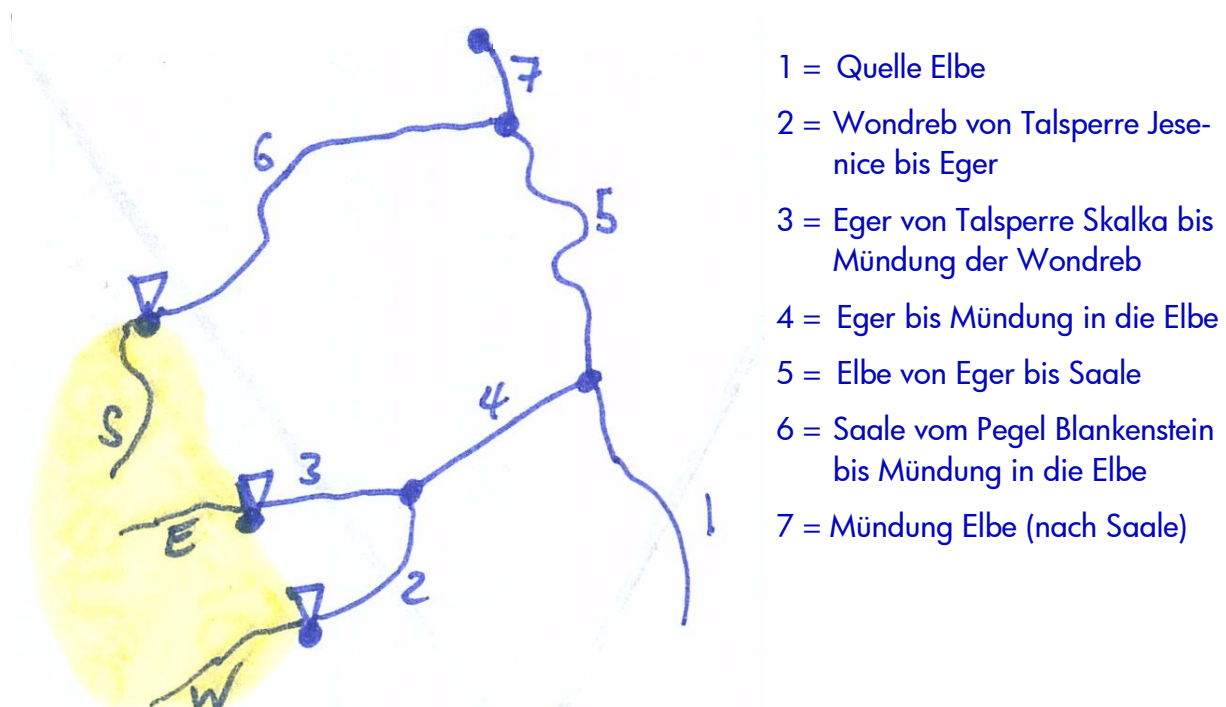


Bild 3.1: Lageskizze der sieben zusätzlichen digitalisierten TGB bzw. Flusstücke (gelb hinterlegt das Kerngebiet des WHM Saale [S], Eger [E] bzw. Wondreb [W])

Diese sieben sogenannten virtuellen TGB dienen lediglich dazu ein zusammenhängendes WHM SEW zu erzeugen. Sie können nicht für sinnvolle Ausgaben an diesen Modellpunkten (z.B. an der Elbe) genutzt werden, da die dazugehörigen Modellparameter im finalen Tape12 (z.B. TGB-Größe, Höhenverhältnisse, Landnutzung) fiktiv sind, also keineswegs der Realität entsprechen. Dieses Vorgehen geschah in Absprache mit dem AG und gemäß den Vorgaben der Leistungsbeschreibung (siehe Titelbild des Berichts).

Mit der Ergänzung dieser sieben virtuellen TGB war die Bearbeitung der TGB abgeschlossen. Eine detaillierte Überprüfung der TGB (QM), innerhalb der z.B. kleinste geometrische Fehler der TGB noch korrigiert wurden, schloss diesen Arbeitsschritt zum Modellaufbau ab. Die folgende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der so erzeugten 2 737 TGB.

Tabelle 3.1: Übersicht über die Eigenschaften der final bearbeiteten TGB

Parameter	Ohne 7 virtuelle TGB	Mit 7 virtuellen TGB
Anzahl []	2 730	2 737
Flächengröße _{min}	0,001 km ²	0,001 km ²
Flächengröße _{max}	1,99 km ²	49,1 km ²
Flächengröße _{mean}	0,77 km ²	0,80 km ²
Flächengröße _{median}	0,74 km ²	0,74 km ²
Flächengröße _{Summe}	2 093,7 km ²	2 187,5 km ²

3.1.3 Durchführung der Gebietsaufteilung (Flüsse)

Nun wurde das bereitgestellte FGN25-Flussnetz aufbereitet. Dazu wurde dieses Linien-Shapefile auf die 2 737 TGB abgestimmt mit dem Ziel, exakt 2 737 Flussstücke zu erzeugen, für jedes TGB genau ein passendes Flussstück.

Hierzu wurde zuerst ein Python-Skript geschrieben, welches die fast 18 400 vorhandenen FGN25-Flussstücke gemäß der LAWA-Nummerierung zusammenfasste. So entstand ein neuer Fluss-Datensatz mit nur noch 825 Flüssen. Sprich, Flussstücke entlang des gleichen Flusses wurden in diesem Schritt zu einer Geometrie zusammengefasst.

Nach diesem Schritt fehlten im Vergleich zum TGB-Datensatz gut 60 Flüsse, fast ausschließlich in den außerbayerischen Teilen des Projektgebiets gelegen. Diese Flüsse wurden im Anschluss via DGM sauber nachdigitalisiert. Hierzu bedurfte es aber des kompletten Projekt-DGM, dessen Erstellung an diesem Punkt der Bearbeitung eingeschoben wurde.

Für das Projekt-DGM stand primär das fein aufgelöste 5m-LaserScan-DGM aus Bayern zur Verfügung, welches ca. 90% des Projektgebiets abdeckte. Die fehlenden Teile des Projektgebiets in Tschechien, Sachsen und Thüringen wurden mit neuen SRTM-DGM ergänzt. Dabei wurden zuerst die SRTM-DGM zu einem DGM zusammengefasst. Die durchgeführte Kontrolle an den Übergängen zum 5m-LaserScan-DGM zeigte einen relativ regelmäßigen Versatz. D.h. der WGS84-basierte DGM-Datensatz passte nicht sauber zum 5m-LaserScan-DGM, welcher seinerseits gut mit dem TGB-Polygon- und dem Flüsse-Linien-Shapefile harmonierte. Damit letztlich das Gesamt-DGM mit den TGB und den Flüssen gut harmonieren konnte, wurde das neue SRTM-

DGM um 110 m nach Osten und um 120 m nach Norden verschoben. Mit dieser Harmonisierung am Übergang vom 5m-LaserScan- zum SRTM-DGM wurden dann die beiden DGM via dem GIS-Werkzeug „Mosaic to New Raster“ zusammengefasst. Anschließend wurde das neue DGM (mit einer einheitlichen Rasterweite von 5m) auf das Projektgebiet + 50 m Puffer zurechtgeschnitten und so das finale SEW-DGM erzeugt.

Nach diesem Zwischenschritt konnte die Bearbeitung des Flussdatensatzes fortgesetzt werden, indem die bis dato fehlenden Flüsse mittels des neuen SEW-DGM nachdigitalisiert wurden. Diese Arbeit schloss die Überprüfung der sogenannten Snaps zwischen den einzelnen Flüssen mit ein. In wenigen Fällen mussten dabei Snaps korrigiert werden. Zudem wurde die Einhaltung einer einheitlichen Digitalisierungsrichtung im Gesamtflussdatensatz überprüft. Anschließend wurden ca. 30 Mühlbäche/kleine Kanäle, welche eigene Einzugsgebiete im TGB-Datensatz enthalten, um wenige 10er Meter gekürzt, um die in einer LARSIM-WHM-Gebietsdatei nicht umsetzbaren Bifurkationen aus dem Flussdatensatz zu eliminieren (z.B. LARSIM-Nr. 1908 mit der LAWA-Abschnittsnummer 5611921000 von der Saale getrennt). Als Zwischenergebnis erhielten wir so einen Flussdatensatz mit 887 Flüssen, d.h. jeder Fluss wird genau durch eine geometrische Linie dargestellt.

Im nächsten Schritt wurde dieser Flussdatensatz zuerst an allen internen Mündungspunkten und anschließend mittels der 2 737 TGB-Polygone geteilt. Natürlicherweise resultierten aus diesen beiden „Split“-Befehlen mit gut 3 300 Flusstücken mehr als nur die anvisierten 2 737 Flusstücke (z.B. wegen Flussmäander am Übergang von einem zum nächsten TGB). In detailgenauer Kleinarbeit wurden dann mittels des GIS-Befehls „Merge“ Flusstücke manuell wieder zusammengefügt, um eine perfekte Übereinstimmung mit dem TGB-Datensatz zu erreichen. Die finale Überprüfung des neuen Flussdatensatzes mit letztendlich 2 737 Flusstücken auf MultiPart-freie Geometrien und auf die Existenz aller benötigten Attributfelder im Linien-Shapefile (z.B. Länge, Rechts- und Hochwerte der Flussanfangs- bzw. Flussendpunkte) schloss diese Bearbeitungsphase ab.

Der finale Flussdatensatz hat eine summarische Länge von 2 370,5 km bei einem arithmetischen Mittelwert von 866 m pro Flusstück.

Somit standen nun unter Einhaltung aller Vorgaben in der Leistungsbeschreibung und in Absprache mit dem AG die beiden wichtigsten GIS-Datensätze zur Tape12-Erstellung, ein TGB-Datensatz als Polygon-Shapefile und ein Fluss-Datensatz als Linien-Shapefile (jeweils mit 2 737 records), bereit.

3.2 Landnutzung und Boden

3.2.1 Landnutzung

Der AG stellte letztlich ein mehrstufig überarbeitetes Polygon-Shapefile der Landnutzung für das SEW-Projektgebiet samt 5 km Puffer bereit. Darin wurden fein aufgelöste ATKIS-Daten (bayerischer Teil) mit CORINE2006-Daten (außerbayerische Teile) kombiniert und mittels einer Reklassifizierungstabelle auf die 16 LARSIM-Standardklassen reklassifiziert. Dabei kommen die Klassen 5 (Gletscher) und 11 (extensives Grünland) im SEW-Projektgebiet nicht vor.

Das ursprünglich bereitgestellte Polygon-Shapefile der Landnutzung mit nur 14 records (gemäß den 14 vorkommenden Landnutzungsklassen) wurde anschließend mittel dem GIS-Werkzeug „MultiPart to SinglePart“ soweit wie möglich in SinglePart-Geometrien umgewandelt und exakt auf das SEW-Projektgebiet zurechtgeschnitten.

Für das 2185,5 km² große Projektgebiet bestand der finale Landnutzungsdatensatz aus knapp über 24 800 Einzelpolygonen und aus 14 Klassen gemäß der nachfolgenden Tabelle 3.2. Den sieben speziellen virtuellen TGB außerhalb des eigentlichen Projektgebiets (siehe Bild 3.1 im vorherigen Kapitel) wurde einheitlich die Landnutzungsklasse 15 (Mischwald) zugewiesen.

Tabelle 3.2: Im SEW-LARSIM-Modell vorhandene Landnutzungsklassen

Klassennummer gemäß <lanu.par>	Landnutzung
1	Siedlungsflächen
2	Siedlungsfreiflächen
3	Versiegelt
4	Acker
6	Obstbau
7	Brachflächen
8	unbewachsener Boden
9	Grünland, intensiv
10	Feuchtfächen
12	locker baumbestanden
13	Nadelwald
14	Laubwald
15	Mischwald
16	Wasser

Dieser Landnutzungsdatensatz wurde abschließend geometrisch und inhaltlich auf Richtigkeit überprüft (QM), bevor er mit dem TGB-Datensatz verschnitten wurde.

3.2.2 Boden

Das WHM SEW sollte mit erweiterten Bodenparametern ausgestattet werden, wozu die flächen-deckende Bereitstellung von Werten der nutzbaren Feldkapazität (nFk) und der Luftkapazität (Lk] jeweils in der Einheit [mm] notwendig war. Vor allem wegen des länder-übergreifenden SEW-Projektgebiets gestaltete sich die Erstellung dieses Bodendatensatzes schwierig und es gab mehrere Stufen der Datenbereitstellung durch den AG.

Der finale für den bayerischen Teil bereitgestellte ÜBK25-Bodendatensatz (UBK25_LANU_SEW.shp) deckte ca. 85% des SEW-Projektgebiets ab (siehe grüne Fläche in Bild 3.2).

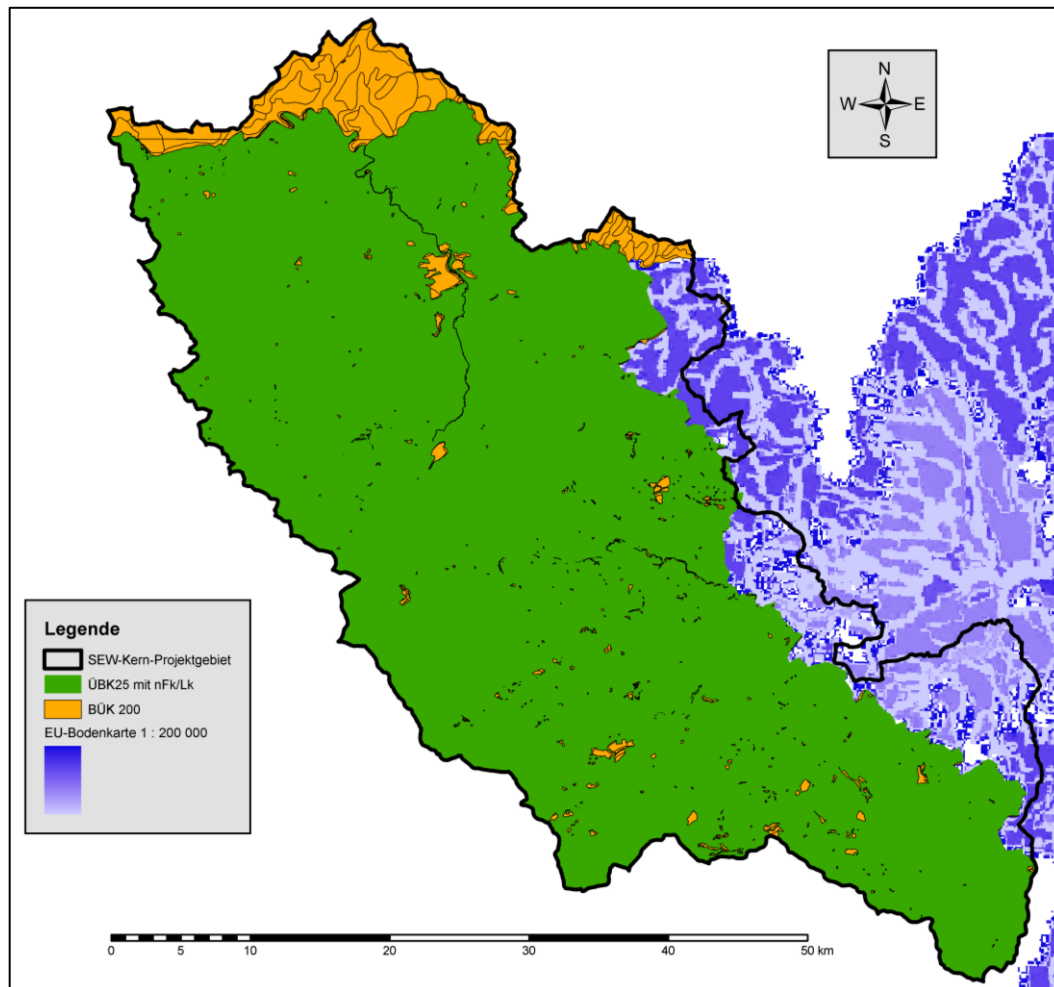


Bild 3.2: Herkunft der letztlich verwendeten Bodendaten (drei Quellen)

Nur für den grünen Teil waren über die zur Verfügung gestellte Excel-Tabelle (seinerseits aus Bodenprofilaten bzw. aus KA5 abgeleitet) direkt nFk- und Lk-Werte vorhanden, da nur hier Leitbodengesellschaftsnummern und eine Unterscheidung in forstliche/nicht forstliche Nutzung existierte. Dabei wurde in der finalen Datenbereitstellung durch den AG die Unterscheidung in forstliche/ nicht-forstliche Nutzung nicht mehr auf Grundlage der CORINE-2006 Daten, sondern innerhalb Bayerns auf Grundlage der ATKIS BASIS-DLM Daten getroffen.

Viele der im Bild 3.2 orange durchscheinenden Flächen (also innerhalb des grünen bayerischen Projektgebiets) sind versiegelte Flächen (z.B. Stadtgebiet Hof) oder Wasserflächen (siehe erkennbare Flussläufe von Saale bzw. Eger). Diese Flächen wurden auf der Basis der Landnutzung auf 0 mm nFk und 0 mm Lk gesetzt.

Zudem gab es nach erster Prüfung durch den AN einige wenige doppelt belegte Flächen. Hier stellte der AG nach Eliminierung der Überlappungsbereiche einen aktualisierten Bodendatensatz für das bayerische Modellgebiet bereit. Diese Überlappungsbereiche hatten sich bei vorheriger Prozessierung an Verkehrswegen (z.B. Autobahnbrücken) ergeben. Diese wenigen doppelt be-

legten Flächen wurden einheitlich der Landnutzungsklasse 3 (versiegelt) zugewiesen und erhielten so den nFk-Wert 0 mm und den Lk-Wert 0 mm.

Es verblieben im bayerischen Teil des Projektgebiets etwa 29 km², welche keinen Partner in der nFk-Lk-Excel-Tabelle hatten. Diese gut 2 300 (zumeist sehr kleinen) Teilflächen wurden der Größe nach absteigend sortiert. Beginnend mit der größten Teilfläche (A = 0,9 km²) wurden anschließend manuell passende Nachbarn aus dem grünen ÜBK25-Gebiet ermittelt und deren nFk- bzw. Lk-Werte übertragen. Dieses Vorgehen wurde für 182 Teilflächen durchgeführt. Die letzte so mit nFk- und Lk-Werten belegte Teilfläche war 0,099 km² groß. Es verblieben ca. 2 100 Teilflächen (alle kleiner 0,099 km²; summarische Fläche von 10,8 km²). Diesen vernachlässigbar kleinen Teilflächen wurden Mittelwerte aus dem gesamten ÜBK25-SEW-Gebiet (siehe grüne Fläche in Bild 3.2) zugewiesen: nFk = 136,3 mm und Lk = 62,4 mm.

Hiermit war ein Großteil des bayerischen Projektgebiets (siehe grüne Flächen plus orange Inseln innerhalb der grünen Flächen in Bild 3.2) und damit ca. 85% des gesamten Untersuchungsgebiets mit benötigten Werten für nFk und Lk belegt.

Im nächsten Schritt wurden sinnvolle nFk- und Lk-Werte für die thüringischen und sächsischen SEW-Gebiete ermittelt. Dabei handelte es sich um gut 100 km² Flächen im nördlichen zur Saale gehörenden Untersuchungsgebiet (siehe orange Flächen im Norden von Bild 3.2).

Das Vorgehen zur nFk- bzw. Lk-Ermittlung sah wie folgt aus:

- Aus der BÜK 200 (Blattschnitte CC 5534 Zwickau bzw. CC 6334 Bayreuth), beginnend bei den großen, direkt an Bayern angrenzenden Gebieten, die jeweils vorhandene Bodenart notieren: z.B. „Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye (Nr. 89 in CC 6334 Bayreuth)“
- Im benachbarten bayerischen Gebiet (also innerhalb des ÜBK25-Datensatzes) die gleiche (oder ähnlichste) Bodenart suchen und aus der(n) dortigen Fläche(n) (hier z.B. LBG „64800 NF“) die nFk- bzw. Lk-Werte direkt übernehmen oder ggfls. mitteln (hier z.B. nFk = 106 mm und Lk = 50 mm)
- Evtl. Auffinden der ähnlichsten Nachbarfläche/Bodenart mit Zwischenschritt über anderen BÜK200-Datensatz

Somit konnten die gut 100 km² großen thüringischen und sächsischen SEW-Gebiete sinnvoll auf Basis des ÜBK25-Datensatzes mit Werten für nFk und Lk belegt werden.

Im letzten Schritt mussten nun noch sinnvolle nFk- und Lk-Werte für die tschechischen SEW-Gebiete (etwas über 200 km²; siehe blaue Flächen innerhalb des SEW-Gebiets in Bild 3.2) abgeleitet werden.

Hierzu wurde der vom AG bereitgestellte Rasterdatensatz (EU-Bodenkarte 1:200 000 von 2008) im anvisierten gut 200 km² großen tschechischen SEW-Gebiet in 50 Teilflächen bei fünf verschiedenen Bodenarten unterteilt. Diesen fünf Bodenarten wurden im Anschluss mittels ähnlicher Partner aus den beiden BÜK 200 Blattschnitten bzw. der ÜBK 25 sowie zusätzlich aus der BÜK 1000 und via anderer Informationen (z.B. Höhenlage, ähnliche Nachbarn) ein mittlerer nFk- bzw. Lk-Wert zugeordnet. Das Ergebnis dieser aufwändigen manuellen Zuweisung für die tschechischen SEW-Gebiete zeigt die nachfolgende Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Bodendatenergebnisse innerhalb der tschechischen SEW-Gebiete

Bodenart nach EU-Bodenkarte	Flächensumme [km ²]	Ermittelter nFk-Wert [mm]	Ermittelter Lk-Wert [mm]
Gleysol	43	160	50
Eutric Cambisol	49	140	50
Haplic Cambisol	30	120	50
Dystric Cambisol	51	100	40
Podzol	31	80	40

Mit diesen nFk- und Lk-Werten war der Bodendatensatz, nach Kombination mit den vorherigen Ergebnissen aus Bayern bzw. Sachsen/Thüringen, mit über 24 400 Teilflächen für den SEW-LARSIM-Modellaufbau komplett.

3.3 Querprofile

Zuerst wurden die vom AG bereitgestellten Querprofilaten begutachtet. Dabei handelte es sich zum Einen um vermessene Profile im GeoCADOP-Format, zum Anderen um Daten aus TINs basierend auf hydraulischen HYDRO_AS-2D-Modellen.

Eine Analyse der eigentlich anvisierten vermessenen Profile zeigte erhebliche Mängel bei diesen Daten. Vor allem war problematisch, dass diese Daten nur die folgenden fünf Flüsse Culmitz, Eger (nur ein minimal kurzer Abschnitt vorhanden), nördliche Regnitz, Rösau (nur ein minimal kurzer Abschnitt vorhanden) und Saale beinhalteten. D.h. wesentliche Flüsse wie z.B. die Wondreb, die Selbitz und die Schwesnitz sind überhaupt nicht abgedeckt. Nach Abstimmung mit dem AG wurde deshalb von einer flächenhaften Bearbeitung dieser vermessenen Profile Abstand genommen.

Stattdessen konzentrierten sich die weiteren Arbeiten auf die für alle wichtigen Flüsse im SEW-Gebiet vorliegenden XYZ-Daten aus den TINs der HYDRO_AS-2D-Modelle. Nach einer Reihe von Vor-Analysen verständigten sich AG und AN darauf, in einem ersten Schritt flächendeckend den Gerinneschätzer zur Ermittlung der Querprofile anzuwenden, evtl. anschließend flankiert von Informationen aus den TIN-basierten XYZ-Daten der HYDRO_AS-2D-Modelle. Hier noch einige Hintergrundinformationen, welche dieses sinnvolle Vorgehen untermauern:

- Gerinneschätzer-Profile und vermessene Profile liefern meist sehr ähnliche und in weiten Bereichen zufriedenstellende Ergebnisse
- Ein flächenhafter, möglichst genauer Einbau vermessener Profile bringt daher kaum, allenfalls vereinzelt leichte Verbesserungen des Flood-Routing (siehe zuletzt Überarbeitung des LARSIM-WHM für die Chiemsee-Zuflüsse)

- Andererseits gibt es in vielen Modellen einzelne Bereiche, in denen deutliche Probleme mit dem Flood-Routing auftreten, unabhängig davon, ob vermessene Profile oder Gerinneschätzer-Profile verwendet werden
- An diesen einzelnen Punkten ist durch eine gezielte Optimierung der verwendeten Profile (oberhalb der betroffenen Stelle im Gerinne) eine klare Modellverbesserung zu erreichen
- Daher lautete die Empfehlung, zunächst das einfachere Gerinneschätzer-Verfahren anzuwenden und die so geschätzten Profile pauschal an vermessene Profile anzupassen (sofern deutliche Unterschiede sichtbar)
- Dann sollte im Zuge der Eichung festgestellt werden, ob und wo Flood-Routing-Probleme auftreten. Die „eingesparten“ Ressourcen sollten dann genutzt werden, um an diesen Stellen eine gezielte Optimierung vorzunehmen
- Mit diesem Vorgehen sollte bei vergleichbarem Aufwand insgesamt ein besseres Modell erzielt werden als durch den flächendeckenden undifferenzierten Einbau vermessener Profile

Folglich wurden die Voraussetzungen für den flächendeckenden Einsatz des Gerinneschätzers geschaffen. Um eine ausreichend große Grundgesamtheit zu erreichen, wurden die Werte zur Pegel-EZG-Größe und zum dazugehörigen HQ_2 der 15 SEW-Pegel kombiniert mit den Werten von jeweils zwölf Naab-EZG- bzw. Main-EZG-Pegeln. Mittels dieser insgesamt 39 Pegel wurde eine robuste Regressionsbeziehung von EZG-Größe zu HQ_2 ermittelt (siehe Bild 3.3).

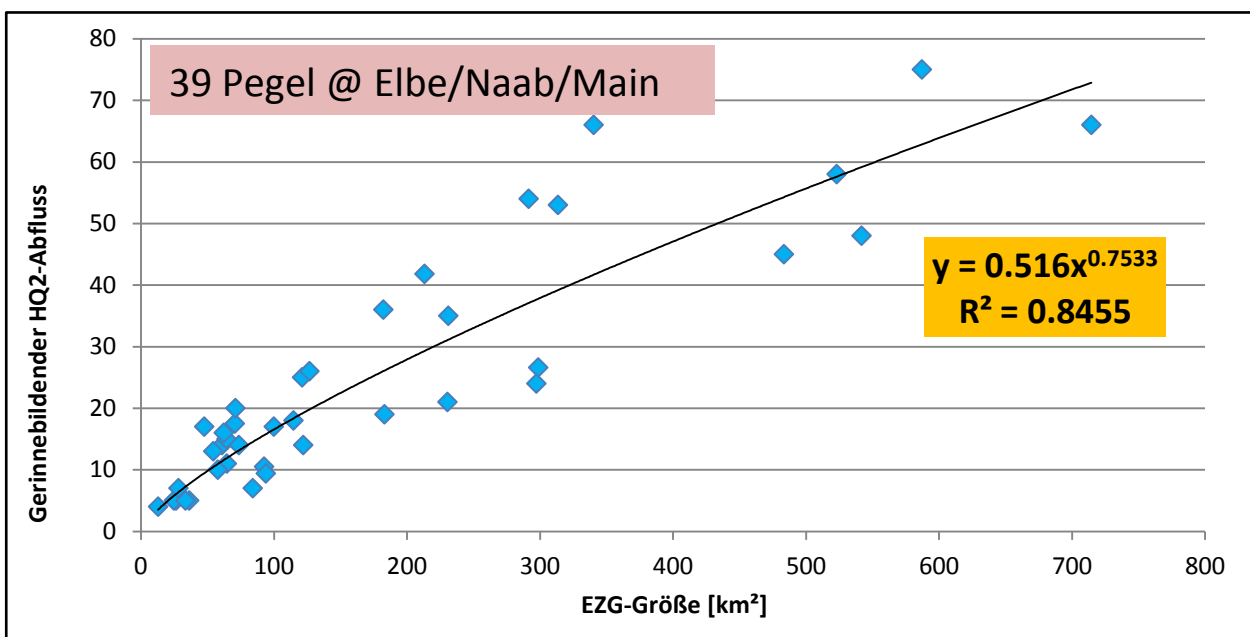


Bild 3.3: Regressionsbeziehung von Pegel-EZG-Größe zu HQ_2 an 39 Pegeln

Mit dieser stabilen Regressionsbeziehung (siehe oranges Kästchen in Bild 3.3) berechnet der sogenannte Gerinneschätzer, basierend auf der an jedem Modellpunkt vorliegenden EZG-Größe, den gerinnebildenden HQ_2 -Abfluss und anschließend alle Parameter eines passenden Tripel-Trapez-Profils.

In Absprache mit dem AG erfolgte dann ein manueller Abgleich der Hauptbettbreiten und – tiefen sowie der Vorländer (Gerinneschätzer vs. aus hydraulischen 2D-Modellen abgeleitet) entlang der wichtigsten Flüsse im Projektgebiet: Hierzu wurden die sieben SEW-Flüsse länger 20 km ausgewählt und in regelmäßigen Abständen letztlich 34 Abgleichstellen definiert.

Im Ergebnis wurden von HYDRON an den obigen 7 Flüssen für die kompletten Laufstrecken (jeweils ohne Quell-TGB) die Vorlandbreiten von 0 m auf aus hydraulischen 2D-Modellen basierte Werte minus Böschungsbreiten gesetzt, da der Gerinneschätzer Vorländer grundsätzlich auf 0 m und die Böschungsbreiten, aus Ermangelung besserer Schätzungen, gleich der Hauptbettbreite setzt. Dabei wurden stets gleich breite Vorländer links wie rechts verwendet (435 Profiländerungen!). Bei Hauptbettiefen und –breiten waren aufgrund unserer vergleichenden Analysen keine Änderungen nötig.

Da die später durchgeführten Flood-Routing-Tests sowie die Grob- und Feineichung keine gravierenden Probleme zu Tage förderten, welche auf unpassende Tripel-Trapez-Geometrien zurückzuführen gewesen wären, wurde hiermit die Querprofilermittlung abgeschlossen. D.h. im finalen SEW-Modell (Tape12) sind flächendeckend passende Tripel-Trapez-Profile aus dem Gerinneschätzer vorhanden, samt Korrektur der Vorlandbreiten an 435 TGB an den sieben längsten Flüssen im SEW-Gebiet (Eger, Rösau, Saale, Schwesnitz, Selbitz, Südliche Regnitz und Wondreb).

3.4 Gebietsdatei (Tape12)

Mit Fertigstellung der Datensätze bzgl. TGB (siehe Kapitel 3.1.2), Flüsse (siehe Kapitel 3.1.3), Landnutzung (siehe Kapitel 3.2.1), Boden (siehe Kapitel 3.2.2) und Querprofile (siehe Kapitel 3.3) lagen alle für die Gebietsdatei (Tape12) benötigten Daten aufbereitet vor.

Pro TGB beinhaltet ein LARSIM-WHM-Tape12 bis zu 30 Parameter. Zur exakten Berechnung jedes einzelnen TGB bzw. dessen Parameterwerte wurde ein robuster und vielfach erprobter GIS-Workflow verwendet, welcher für das WHM SEW aus 21 nacheinander auszuführenden Python-Skripten bestand. Ergebnis dieses Workflows war die Roh-Datei des SEW-Tape12 im gewünschten GK4-Koordinatensystem (EPSG-Code 31468).

Nach einem ersten erfolgreichen LARSIM-Lauffähigkeitstest standen (u.a. gemäß Leistungsbeschreibung) noch einige Ergänzungen des Tape12 auf dem Programm, flankiert von zusätzlichen Kommentaren zur besseren Lesbarkeit und Verständlichkeit des Tape12.

Die wichtigste Ergänzung beinhaltete den Einbau von 305 Dummy-Elementen als Nullelemente. Sprich, an 61 Stellen im Tape12 wurden jeweils fünf zusätzliche Modellelemente ohne Fläche (deshalb Nullelemente) eingebaut, um in regelmäßigen Abständen sowie an alle besonderen Konstrukten (z.B. Talsperren oder Seen) zusätzlichen Raum für Modellerweiterungen o.ä. zu erzeugen. Diese 61 Stellen schlossen gut 50 Stellen in regelmäßigen Abständen entlang der Modellhauptflüsse (ca. alle 50 TGB gemäß Angebot) mit ein, sowie die sechs im SEW-Modell vorhandenen Talsperren/Seen/Speicher. Diese 305 Dummy-Elemente wurden lagegetreu georeferenziert und können über die Kommentarzeile im Tape12 („* Dummy-Element ...“) leicht gefunden werden.

Zudem wurden Werte des Parameters TAL (Fließlänge zur Berechnung der Abflusskonzentration in einem TGB) teilweise mittels eines verfeinerten Berechnungsalgorithmus geändert. Dies betraf

im Besonderen TGB mit großer Fläche aber sehr kurzem Hauptgerinne und folglich ungünstigen Berechnungsergebnissen via standardmäßigem TAL-Rechteck-Ansatz.

Des Weiteren wurden TAL-Werte an sechs Seen/Talsperren angepasst (42 TGB), um kürzere Fließwege wegen der Seen/Talsperren zu berücksichtigen. Dies liegt darin begründet, dass seitliche Zuflüsse z.B. zu einem See stets bis zur digitalisierten Seemittellinie verlaufen und somit der Parameter TAL für die Zufluss-TGB normalerweise überschätzt wird. Mit einer manuellen Korrektur an 42 TGB wurde dieses Manko behoben.

Eine weitere Ergänzung bestand im Hinzufügen der Kommentarzeile "Kein Flood-Routing in TGB" bei 36 TGB im Tape12, und zwar genau bei jenen 36 TGB, wo der vorhandene Fluss komplett in einem See verläuft, also streng genommen kein Fluss vorhanden ist. Bei diesen 36 TGB wurde mittels Eintrag in der Steuerdatei (Tape10) das Flood-Routing komplett ausgeschaltet.

An dieser Stelle wird auch hingewiesen auf die besondere Kommentarzeile "Angepasstes Profil!", welche entlang der sieben SEW-Hauptflüsse in 435 TGB vorkommt. Bei diesen 435 TGB wurden die beiden Vorlandbreiten (siehe die Tape12-Parameter BL und BR) von ursprünglich 0m aus dem Gerinneschätzer mittels manueller Analyse auf realistische Werte gemäß XYZ-Daten aus TINs von 2D-Hydraulikmodellen geändert (siehe auch Kapitel 3.3).

Eine finale Ergänzung bestand aus der detailgenauen Umsetzung der Lamitz-Überleitung in die Förmitz-Talsperre, z.B. inklusive des 7,2 km langen Stollens, welcher jetzt in TGB-Nr. 1768 berücksichtigt wird. Die jeweilige Funktion der diesbezüglichen TGB erschließt sich dem Nutzer in den vorangehenden Kommentarzeilen.

Mit der 10. Version waren die Ergänzungen und Korrekturen des Tape12 abgeschlossen. Die letztlich für die Kalibrierung eingesetzte Gebietsdatei wurde erneut erfolgreich auf ihre LARSIM-Lauffähigkeit überprüft. Sie datiert auf den 23. März 2016.

3.5 Ermittlung der externen Höhenzonierung

gebietsdaten.dat:

Zur präziseren Wiedergabe der realen Höhenverhältnisse in den einzelnen Modell-TGB wurde in LARSIM die Option GEBIETSDATEN EXTRA implementiert. Wird diese Option bei der Berechnung eines Wasserhaushaltsmodells vereinbart, werden zusätzliche Gebietsparameter, die nicht in der Gebietsdatei <tape12> enthalten sind, aus der Datei <gebietsdaten.dat> eingelesen.

Die Eingabedatei <gebietsdaten.dat> darf maximal die Parameter mit den folgenden Kennungen enthalten:

- mitlHoehe: Mittlere Geländehöhe im Teilgebiet in m+NN (Format: Real)
- minHoehe: Minimale Geländehöhe im Teilgebiet in m+NN (Format: Real)
- maxHoehe: Maximale Geländehöhe im Teilgebiet in m+NN (Format: Real)
- HZoneAuto: Höhenstufenabstand für die automatische Höhenzonierung in m (Real)
- HZoneExt: Schalter (J/N) zur Übernahme einer externen Höhenzonierung (Character)

Für das komplette Projektgebiet des WHM SEW wurden alle Original-DGM-Pixel ausgewertet, sodass anschließend für alle 2 737 LARSIM-Flächenelemente die Parameter mitlHoehe, minHoehe und maxHoehe exakt bestimmt und in der Datei <gebietsdaten.dat> festgehalten waren.

Der Parameter mitlHoehe wird anstelle des Mittelwerts der in der Datei <tape12> enthaltenen Werte HUT und HOT (mittlere untere und obere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet) als mittlere Geländehöhe im Teilgebiet übernommen (z.B. für die Höhenkorrektur bei der Interpolation der Klimadaten). Die Parameter minHoehe und maxHoehe werden anstelle der in der Datei <tape12> enthaltenen Werte HUT und HOT verwendet, wenn die Höhendifferenz oder das Gefälle im Teilgebiet zu bestimmen ist (z.B. für den Massentransport von Schnee). Die Werte für HUT und HOT werden bei Einsatz der neuen Datei <gebietsdaten.dat> im WHM SEW dann nur noch zur Bestimmung der Fließzeit im Rahmen der Berechnung der Rückhaltekonstanten für die Gebietsspeicher (Abflusskonzentration im TGB) verwendet.

h-zonen.dat:

Neben den exakten Werten für die minimale, mittlere und maximale Höhe innerhalb aller 2 737 TGB des WHM-SEW (<gebietsdaten.dat>) wurde in Abstimmung mit dem AG ebenfalls die sogenannte externe Höhenzonierung berechnet und im LARSIM-WHM umgesetzt.

Dabei bewirkt der Eintrag 'J' beim Parameter HZoneExt in der Datei <gebietsdaten.dat> (s.o.) zusammen mit der eingeschalteten Option SCHNEE: H-ZONEN EXTERN das Einlesen der Höhenzonierung für das entsprechende Teilgebiet aus der Datei <h-zonen.dat>. Zur möglichst realitätsnahen, differenzierten Abbildung des Schneedeckenauf- und -abbaus innerhalb der Teilgebiete wurde in LARSIM diese Option SCHNEE: H-ZONEN EXTERN implementiert.

Die Eingabedatei <h-zonen.dat> enthält dabei für alle extern höhenzonierte Teilgebiete die Flächenanteile der verschiedenen Höhengschichten in der Einheit Prozent. Das Ausmaß einer Höhengschicht wird durch die in der Kopfzeile angegebene obere Grenze der Höhengschicht sowie die dazugehörige untere Grenze definiert. Die untere Grenze einer Höhengschicht ergibt sich dabei aus der oberen Grenze der darunter liegenden Schicht. Die unterste Höhengschicht beginnt grundsätzlich bei 0 m üNN.

Basierend auf den Ergebnissen aus anderen LARSIM-Höhenzonierungsprojekten (z.B. im Oberlauf der Isar, in Vorarlberg oder in der Schweiz) wurde für das WHM SEW ob seines Mittelgebirgscharakters (maximale Höhe von 1 047 m üNN) eine Höhengschichtdicke von 100 m vereinbart. Da die externe Höhenzonierung in LARSIM nur mit gleichbleibend dicken Höhengschichten funktioniert, ergaben sich folglich für die Umsetzung innerhalb des WHM SEW elf Höhengschichten à 100m, beginnend bei 0m üNN (siehe Zeile 5 in der im Modell verwendeten Datei <h-zonen.dat>).

Die Erstellung der Höhenzonierung basierte auf einer detaillierten GIS-basierten Auswertung des für das WHM SEW zusammengestellten digitalen Geländemodells (siehe auch Kapitel 3.1.3) für alle 2 737 TGB des WHM SEW. Sprich, alle 2 737 TGB wurden einzeln evaluiert und die prozentualen Anteile an den 100 m dicken Höhengschichten (0-100 m, 100-200 m, 200-300 m,

300-400 m, , 1000-1100 m) bestimmt. In der LARSIM-Datei <h-zonen.dat> wurden für die insgesamt 11 Höhengschichten von 0 m bis 1100 m die so bestimmten Höhengschichtenanteile [%] für alle 2 737 Modellflächenelemente des WHM SEW digital festgehalten.

Das Ergebnis sieht ausschnittsweise wie folgt aus:

```
# WHM SEW (Bayrische Elbe)
# Ersterstellung am 04.03.2016 von Mario Boehm (HYDRON GmbH)
# Flaechenanteile fuer die Hoehehzonen in %
# Die Kopfzeile enthaelt die obere Grenze der Hoehehzonen in m+NN
TGB; 100.0; 200.0; 300.0; 400.0; 500.0; 600.0; 700.0; 800.0; 900.0; 1000.0; 1100.0;
1; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 21.6; 3.2; 8.4; 49.6; 17.2; 0.0; 0.0;
2; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.8; 79.5; 19.7; 0.0; 0.0;
3; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 68.6; 30.1; 0.0; 0.0;
4; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 34.9; 60.7; 4.4; 0.0;
5; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 90.7; 9.3; 0.0; 0.0;
6; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 59.4; 40.6; 0.0; 0.0;
7; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 58.8; 41.2; 0.0; 0.0;
8; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 88.0; 12.0; 0.0; 0.0;
9; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 98.1; 1.9; 0.0; 0.0;
10; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 96.7; 3.3; 0.0; 0.0;
11; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 100.0; 0.0; 0.0; 0.0;
12; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 8.3; 84.5; 7.2; 0.0;
13; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 81.5; 18.5; 0.0; 0.0;
14; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 89.9; 10.1; 0.0; 0.0;
15; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.7; 41.4; 34.2; 23.7;
16; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 31.2; 48.2; 14.9; 5.7;
17; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 19.0; 41.0; 32.1; 7.9;
18; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.3; 29.6; 29.2; 36.5; 4.4;
19; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 1.2; 86.2; 12.6; 0.0;
20; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 41.4; 41.0; 12.0; 5.6;
21; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 10.0; 56.6; 31.9; 1.5;
22; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 10.9; 76.0; 13.1; 0.0;
23; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 99.3; 0.7; 0.0; 0.0;
24; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 84.0; 16.0; 0.0; 0.0;
25; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 100.0; 0.0; 0.0; 0.0;
26; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 44.1; 55.9; 0.0; 0.0;
27; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 43.9; 56.1; 0.0; 0.0;
28; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 99.9; 0.1; 0.0; 0.0;
```

Bild 3.4: Ausschnitt der LARSIM-Inputdatei <h-zonen.dat> des WHM SEW zum Einsatz der externen Höhengzonierung

3.6 Sonstige Modelleigenschaften

3.6.1 Talsperren und andere Bauwerke

Strukturelemente wie Talsperren und andere Bauwerke waren gemäß Leistungsbeschreibung systemkonform und georeferenziert einzubauen und ggf. mit georeferenzierten Dummy-Elementen zu versehen. Dabei sollten die aktuell gültigen Betriebsregeln soweit wie möglich abgebildet werden. In Abstimmung mit dem AG betraf diese Umsetzung sechs Seen/Speicher und eine Überleitung.

(A) Förmitz-Talsperre

Die Förmitz-Talsperre liegt ca. 3 km südwestlich der Stadt Schwarzenbach an der Saale. Sie besitzt einen Gesamtstauraum von 10,85 Mio. m³ und dient hauptsächlich der NW-Aufhöhung der Saale (Ziel: Q_{gem} am Pegel Hof/Saale stets mindestens 1 m³/s). Das direkte EZG der Förmitz-Talsperre (nur 14,1 km²) wird durch eine Überleitung aus dem benachbarten Lamitz-EZG auf 24,6 km² vergrößert (Quelle: Wikipedia).

Die vom AG bereitgestellten Daten zur Förmitz-Talsperre wurden LARSIM-technisch in Form einer Talsperre (= TALS) umgesetzt, welche im TGB mit der LARSIM-Nr. 1770 verdrahtet wurde.

Für die Kalibrierung des Modells wurde unterhalb der Förmitz-Talsperre allerdings auf die gemessene Ganglinie am Pegel Förmitz-Speicherabfluss/Förmitz (LARSIM-Nr. 1771) zurückgegriffen, wie vom AG gewünscht.

(B) Ölsnitz-Talsperre (Untreusee)

Die Ölsnitz-Talsperre, auch Untreusee genannt, befindet sich am südlichen Rand der Stadt Hof, kurz vor der Mündung der Ölsnitz in die Saale.

Sie hat einen hohen Stellenwert als Naherholungs- und Freizeitgebiet und dient zudem wasserwirtschaftlich zur NW-Aufhöhung der Saale (vor allem im Spätherbst/Winter) und z.T. als HW-Rückhaltebecken.

Wegen diesen jahreszeitlich unterschiedlichen Funktionen wurde die Ölsnitz-Talsperre LARSIM-technisch als TALS ins Modell eingebaut (@ TGB mit der LARSIM-Nr. 2170) mit zwei verschiedenen Stauzielen (500 m üNN von Anfang April bis Mitte Oktober und nur 499 m üNN während der restlichen Zeit).

Analog zur Förmitz-Talsperre wurde auch hier für die Kalibrierung auf die vorhandene gemessene Ganglinie am Unterliegerpegel Moschendorf/Ölsnitz (LARSIM-Nr. 2173) aufgesetzt. Die korrekte Funktionsweise des LARSIM-Konstrukts TALS wurde natürlich trotzdem sichergestellt.

(C) Weißstädter See

Der 0,48 km² große Weißstädter See liegt am Westrand von Weißstadt an der Eger. Der maximal 3,5m tiefe See ist als eutropher und ungeschichteter Flachsee einzustufen. Er dient als Freizeitsee, Hochwasserrückhaltebecken, Vogelschutzgebiet und Trinkwassergewinnungsanlage.

Da u.a. keine Angabe für einen Standardabfluss der Eger aus dem Weißstädter See vorlag, wurde der See vereinfacht als LARSIM-Rückhaltebecken (= RUEC) ins Modell eingebaut. Als standardmäßiger Abfluss aus dem See wurde ein Abfluss von 0,285 m³/s festgelegt, was dem Median von Q_{sim} an der Eger (Höhe Staumauer) zwischen 2004 und 2014 entspricht. Dieses RUEC wurde modelltechnisch im TGB mit der LARSIM-Nr. 55 verdrahtet.

Die Auswirkung des Weißstädter Sees auf den Pegel Marktleuthen ist spürbar, Hochwasser werden leicht abgemildert (ca. 5-15 %). Aufgrund der Lage des Weißstädter Sees wird der Großteil des Abflusses im Pegelkontrollbereich Marktleuthen aber unterhalb des Sees generiert und durchläuft also nicht diesen Puffer. Mit ähnlicher bis teils sehr geringer Wirkung verhält es sich auch mit allen anderen hier aufgeführten Bauwerken und dem jeweiligen Pegel, was jeweils auf die Lage des Bauwerks im PKB zurückzuführen ist.

(D) Feisnitz-Talsperre

Die Feisnitz-Talsperre (auch Feisnitzspeicher oder Stausee Haid genannt) ist ein 0,16 km² großer Stausee an der Feisnitz, einem rechten Zufluss der Röslau kurz vor Arzberg. Der Speicherraum umfasst ca. 1,3 Mio. m³.

Der Stausee diente ursprünglich als Kühlwasserspeicher für das Kraftwerk Arzberg. Nachdem der letzte Besitzer des Kraftwerks, die E.ON AG, das Kraftwerk Arzberg 2003 stilllegte, wurde der Stausee an die Stadt Arzberg übergeben. Heute wird der Stausee einerseits zur Naherholung und zur Fischzucht andererseits zur NW-Aufhöhung der Röslau genutzt. Zudem existiert ein kleines Wasserkraftwerk.

LARSIM-technisch wurde der Feisnitzspeicher als Rückhaltebecken (RUEC) im Modell umgesetzt und im TGB mit der LARSIM-Nr. 884 eingebaut. Wegen der dünnen Datenlage ist das RUEC lediglich als Approximation der Realität anzusehen.

(E) HRB Vielitzergraben

Das Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Vielitzergraben liegt am Westrand der Stadt Selb. Die Datenlage für eine LARSIM-Umsetzung war leider dürftig. Deshalb wurde das HRB Vielitzergraben als einfaches RUEC in das Modell eingebaut (TGB-Nr. 369). Es muss im Einsatzfall aktiv in der Steuerdatei des Modells (<tape10>) eingeschaltet werden.

(F) HRB Krugelsbach

Das Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Krugelsbach befindet sich am Westrand der Stadt Wunsiedel. Auch hier war die Datenlage für eine LARSIM-Umsetzung leider dünn. Deshalb wurde, analog zum HRB Vielitzergraben, das HRB Vielitzergraben als einfaches RUEC in das Modell eingebaut (TGB-Nr. 600). Es muss im Einsatzfall aktiv in der Steuerdatei des Modells (<tape10>) eingeschaltet werden.

(G) Lamitz-Überleitung

Gut 3 km nordöstlich der Stadt Kirchenlamitz wird aus der Lamitz Wasser ausgeleitet (siehe auch Punkt A zur Förmitz-Talsperre). Das ausgeleitete Wasser fließt anschließend durch einen 7,2 km langen Stollen und wird letztlich der Förmitz-Talsperre zugeführt.

Unglücklicherweise läuft diese Verzweigung entgegen der LARSIM-innewohnenden Raum-Zeit-Schleife. D.h. der Verzweigungsbeginn an der Lamitz befindet sich im TGB mit der LARSIM-Nr. 1837, das Verzweigungsende an der Förmitz-Talsperre hingegen im TGB mit der LARSIM-Nr. 1767, was in LARSIM unmöglich ist, da eine Verzweigung stets in eine höhere LARSIM-Nr. verlaufen muss.

Wegen dieses Problems wurde die Lamitz-Verzweigungsganglinie im Modell zweifach verwendet: Einmal im TGB-Nr. 1837, wo sie der Lamitz an der passenden Stelle entnommen und ins Nirwana verzweigt wird (siehe auch LARSIM-Steuerdatei <tape10>). Und ein zweites Mal im TGB-Nr. 1767, wo sie als zusätzlicher Input im Nebenschluss der Förmitz-Talsperre zugeführt wird. Diesem Zufluss wurde übrigens auch ein TGB (Nr. 1768) mit einer 7,2km langen Flood-Routing-Strecke nachgestellt, um die Fließstrecke durch den Stollen korrekt abzubilden.

3.6.2 Stamm- und Steuerdateien für neue Formate

Das WHM SEW sollte unter Verwendung der neuen Formate (LILA und KALA) mit der aktuellsten LARSIM-Revision erstellt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im TAPE10 die für die neuen Formate erforderlichen Optionen und Einzelparameter entsprechend gesetzt.

Folgende Stamm- bzw. Steuerdateien wurden hierzu neu (also LILA- und KALA-konform) erstellt:

- mesklima.stm
- pegel.stm
- pfade.dat
- punktausgaben.str
- rhb.stm

3.6.3 Zu verwendende Optionen und Einzelparameter:

Für die Modellkalibrierung des WHM SEW sollten sinnvolle Neuentwicklungen möglichst mit berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund wurden gemäß Leistungsbeschreibung und in finaler Abstimmung mit dem AG folgende Optionen vereinbart:

Meteorologie

- HOEHENGEWICHTUNG RASTERPUNKT: Berücksichtigung der Höhenlage bei der Interpolation des Niederschlags
- SOSD-IN-GLOB ANGSTROEM: Umrechnung von Sonnenscheindauer in Globalstrahlung
- KORR. N-MESSUNG SEVRUK: Korrektur des Windfehlers beim gemessenen Punkt-Niederschlag

Schneemodellierung

- SCHNEE: H-ZONEN EXTERN: Nutzung der externen Höhenzonierung
- GEBIETSDATEN EXTRA: Nutzung der externen Höhenzonierung
- SCHNEEEREGEN: Neue Option zum gleitenden Übergang von Schnee zu Regen (LUBW & LUWG, 2015)
- SNOW-COMPACTION 3: Neues Bertle-Verfahren zur Setzung des Schnees
- SCHNEEINTERZEPTION: Neue Option zur Berücksichtigung der Schnee-Interzeption im Kronendach von Wäldern
- BODENTEMPERATUR: Physikalisch basierte, zeitlich dynamische Berechnung des Bodenwärmestroms für die Energiebilanz der Schneedecke
- SCHNEEALBEDO: Dynamische Änderung der Schnee-Albedo durch Alterung der Schneedecke
- MAX. SCHNEE-RET. TAPE35: Rückhalt flüssigen Wassers in der Schneedecke kann über Kalibrierung angepasst werden

Hydrologische Modellierung

- 4 Q-KOMP MIT A2
- ERW. BODENPARAMETER: Unterteilung jedes Teilgebiet in eine beliebige Anzahl von Unterteilgebieten mit gleicher Landnutzung und unterschiedlichen Bodenparametern. Die Parameter WZBo (Schwellenwert Wasserinhaltsmittlerer Bodenspeicher) und MAuf (Maximale Aufstiegsrate Grundwasser - Boden) werden für jedes Unterteilgebiet aus tape12-Angaben berechnet und die Werte im tape35 werden ignoriert.
- KOPPELUNG BODEN/GRUNDWASSER: Berechnung des kapillaren Wasseraufstieges vom Grundwasser in den Bodenwasserspeicher

- VERDUNSTUNG STUNDENWERTE: Stundengenauere Berechnung der Verdunstung, unabdingbar für Ensemble-Berechnungen
- INTERZEPT. PENMAN-MONTEITH (Bei VERDUNSTUNG STUNDENWERTE erforderlich)
- RAUHIGKEITSL. NACH QUAST UND BOEHM: Standard für Verdunstungsberechnung
- GERINNEVERDUNSTUNG: Standard für WHM
- TIEFENVERSICKERUNG EXPONENTIELL: Realistischere und variabelere Abbildung der Tiefenversickerung, auch für Hochwasser relevant

Flood-Routing

- WILLIAMS
- DV/DQ FUER WILLIAMS: Verbessertes Floodrouting und (später) problemlose Integration externer dV/dQ-Beziehungen
- TRIPEL-TRAPEZ-PROFIL

Bauwerke

- VERZWEIGUNG EINLEITUNGSGANGLINIE
- VERZWEIGUNG AUSLEITUNGSGANGLINIE
- TALSPERRE-SOLL-INTERPOLATION
- VERZ. OHNE FLAECHEAENDERUNG
- MIN. RESTABFLUSS VERZWEIGUNG

Zudem wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber folgende zusätzlichen bzw. angepassten Einzelparameter vereinbart:

- HOEHENGEW RAST P1 P2 500. 1.0: Standardwerte
- ANGSTROEM KOEF A B 0.24 0.55: Analog zum WHM Isar
- MAX. SEVRUK-KORR [%] 50.00: Standardwerte
- XGLOB REDUKTION WALD 0.5 0.03: Neuer Optionaler Einzelparameter, Werte gemäß aktueller Auswertungen (LUBW & LUWG, 2015)
- XWIND REDUKTION WALD 0.6 0.025: Neuer Optionaler Einzelparameter, Werte gemäß aktueller Auswertungen (LUBW und LUWG 2015)
- SCHNEEINZ KAPAZITAET 8.0 1.5: Neue Einzelparameter für Schneeinterzeption, Werte gemäß aktuellen Testrechnungen (AVLR, LUBW und LUWG, 2015)
- SCHNEEINZ RATE 0.2 0.02 0.003: Neue Einzelparameter für Schneeinterzeption, Werte gemäß aktuellen Testrechnungen (AVLR, LUBW und LUWG 2015)
- FROST-VERSIEGEL-FAK 0.0: Einzelparameter der Option BODENTEMPERATUR, durch den Wert 0 wird die Wirkung der Frostversiegelung auf den Abfluss nicht berücksichtigt

3.6.4 LARSIM.EXE

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurde eine aktuelle, bezüglich der Feldgrenzen (L1-L21) an das SEW-Modellgebiet angepasste Version von LARSIM (neue Formate) kompiliert, in der alle erforderlichen neuen Optionen zur Verfügung stehen. Es handelt sich dabei um die im April 2016 aktuellste LARSIM-Revision 961.

4. Modelleichung

Die Eichung erfolgte gemäß den Vorgaben im Leitfaden für die Kalibrierung des WHM LARSIM (Haag et al., 2016) und lässt sich in folgende Schritte unterteilen (iterative Eichung des Pegelkontrollbereichs):

1. Beurteilung der Konsistenz der Ausgangsdaten
(wie passen die Pegelmessungen zusammen?)
2. Ermittlung der Anfangsbedingungen
3. Grobkalibrierung für den gesamten Abflussbereich und das gesamte Modellgebiet
4. Detailanpassung im Niedrigwasserbereich
5. Detailanpassung im Mittelwasserbereich
6. Detailanpassung im Hochwasserbereich
(inklusive Detailoptimierung anhand ausgewählter Hochwasser mit Wasserdargebotsnachführung und Optimierung des Wellenablaufs in den Gerinnen)

Für jeden der 15 zu eichenden Pegel wurde ein einheitlicher (pegelkontrollbereichsspezifischer) Parametersatz zur Simulation und Vorhersage des gesamten Abflussbereichs ermittelt (Ergebnisse siehe Tabelle 4.3). Das Hauptaugenmerk lag im Zweifelsfall auf der bestmöglichen Kalibrierung des Hochwasserbereichs.

Als Startwerte für die Eichung wurden die Parameterwerte aus naturräumlich ähnlichen Modellen verwendet.

4.1 Vorgehen bei der allgemeinen Kalibrierung des Schneemoduls

Gemäß der Leistungsbeschreibung sollte die Scheekalibrierung zunächst mit dem Temperaturbereich von -1 °C bis $+3\text{ °C}$ des Übergangs Schnee zu Regen begonnen werden (LARSIM-Option SCHNEEREGEN). Die Eignung dieses Bereichs sollte in der weiteren Schneekalibrierung festgestellt werden.

Die Überprüfung erfolgte für die Winter 2008/2009, 2009/2010 und 2010/2011 anhand der verfügbaren Punktmessdaten des Schneewasseräquivalents (SWEQ). Für die drei Winter lagen Punktmessdaten des SWEQ für insgesamt 16 Stationen im und knapp außerhalb des Untersuchungsgebiets vor (Tabelle 4.1; Bild 4.1).

Im Einzugsgebiet der Eger und der Wondreb wurden fünf von sechs verfügbaren Schneestationen ausgewertet, d.h. die Stationen Waldstein, Fichtelberg, Tirschenreuth-Loderm, Mähring und Hohenberg Eger (nur als DWD-Station berücksichtigt, da die von anderen Betreibern bereitgestellte Station Hohenberg Eger sich quasi am gleichen Ort befindet).

Aus den zehn verfügbaren Schneestationen im Einzugsgebiet der Saale wurden sechs Stationen zur Auswertung ausgewählt, damit das gesamte Gebiet gleichmäßig abgedeckt ist. Bevorzugt wurden die Stationen, welche sich im Einzugsgebiet befinden.

Die Stationen innerhalb des Einzugsgebiets wurden dem Teilgebiet (TGB) und der Höhenzone zugeordnet, in denen sie tatsächlich liegen. Die in LARSIM verwendete Höhe weicht durch die Höhenzonierung im Allgemeinen nur wenige Meter von der tatsächlichen Höhenlage der Stationen ab. Die Stationen außerhalb des Untersuchungsgebiets wurden dem jeweils nächstgelegenen TGB mit passender Höhenzone zugewiesen.

Tabelle 4.1: Verfügbare Messstationen des Schneewasseräquivalents (SWEQ) zur allgemeinen Eichung des Schneemoduls

Stationsnummer	Stationsname	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe üNN] [m]	Quelle	im Gebiet	Zugeordnetes LARSIM-TGB	ausgewertet	PKB
-	Waldstein	4489515	5554812	846	Andere Betreiber	ja	45	ja	Markleuthen
40153	Hohenberg Eger	4515609	5551550	517	DWD	ja	474	ja	Pseudogebietsauslass Elbe
4029	Fichtelberg Ofr Huettstadl	4488153	5538564	657	DWD	nein	551	ja	Lorenzreuth
-	Hohenberg Eger	4515370	5550650	517	Andere Betreiber	ja	950	nein	
40125	Mähring	4538411	5531272	676	DWD	nein	1004	ja	Dobrigau
91102	Tirschenreuth_Loderm	4525279	5523779	500	DWD	nein	1110	ja	Dobrigau
73002	Stambach Querenbach	4481047	5557123	598	DWD	nein	1598	nein	
-	Foermitzalsperre	4493739	5562804	538	Andere Betreiber	ja	1765	ja	Oberkotzau
-	Rehau	4502940	5566811	560	Andere Betreiber	ja	2011	ja	Rehau
43019	Hof Hohensaas (WEWA)	4491797	5575634	565	DWD	ja	2415	ja	Blankenstein
43330	Heinersgruen	4500106	5583044	517	DWD	nein	2442	nein	
-	Muenchenreuth	4494543	5586490	558	Andere Betreiber	ja	2575	ja	Blankenstein
-	Wuestenselbitz	4478507	5564545	625	Andere Betreiber	ja	2687	nein	
-	Helmbrechts	4478950	5566950	650	LfU	ja	2719	ja	Hölle
-	Doebraberg	4475000	5571504	787	Andere Betreiber	nein	2810	nein	
43034	Steben,Bad	4472832	5581260	608	DWD	ja	2962	ja	Hölle

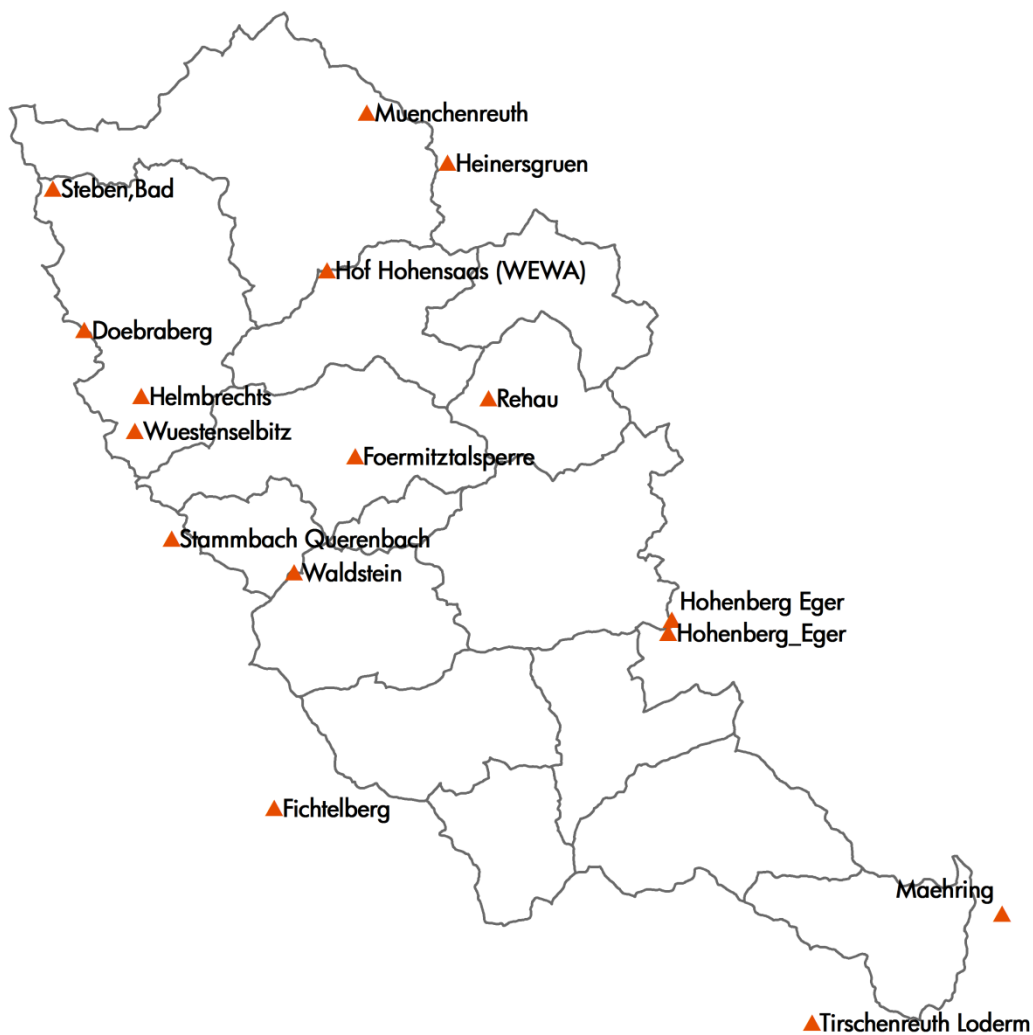


Bild 4.1: Lage der vorhandenen Messstationen des Schneewasseräquivalents (SWEQ)

Für die allgemeine Eichung des Schneemoduls standen die folgenden Parameter zur Verfügung:

- Tmit_Sr: Mittlere Temperatur des Übergangsbereichs von Schneefall zu Regen
- Tspann_Sr: Temperaturspannweite des Übergangsbereichs von Schneefall zu Regen
- Abso: Absorptionskoeffizient der Schneedecke für kurzwellige Strahlung
- A0: Windunabhängiger Koeffizient für Wärmeaustausch an der Schneegrenze
- A1: Windabhängiger Koeffizient für Wärmeaustausch an der Schneegrenze
- SRet: Koeffizient für die Retention flüssigen Wassers in der Schneedecke

Der sensitivste Parameter für die Schneesimulation ist die mittlere Temperatur des Übergangsbereichs von Schneefall zu Regen Tmit_Sr. Dieser Parameter beeinflusst den Aufbau der Schneedecke und die Wasserabgabe aus dieser. Die Spannweite des Übergangsbereichs von Schnee zu Regen Tspann_Sr weist dagegen nur eine geringe Sensitivität auf.

Tabelle 4.2 fasst die Werte der Schneeparameter zur allgemeinen Eichung des Schneemoduls zusammen. Tmit_Sr und Tspann_Sr wurden gemäß der Leistungsbeschreibung auf den Startwert +1°C bzw. +4°C, A0, A1 und Sret wurden auf Standardwerte gesetzt.

Tabelle 4.2: Bei der allgemeinen Eichung des Schneemoduls festgelegte Start-Parameterwerte

Tmit_Sr	Tspann_Sr	Abso	A0	A1	Sret
+1°C	4°C	0,2	2,0	1,6	30%

Den Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Schneewasseräquivalent (SWEQ) ist an drei verschiedenen Stationen für die drei simulierten Winter veranschaulicht: Bild 4.2 (Station Rehau für den Winter 2008/2009), Bild 4.3 (Station Steben für den Winter 2009/2010) und Bild 4.4 (Station Tirschenreuth für den Winter 2010/2011). Die Schneeparameter Abso, A0, A1, Sret und Tmit_Sr wurden pegelkontrollspezifisch grob angepasst, damit das simulierte SWEQ das gemessene besser nachbildet, und Tspann_Sr blieb unverändert (Tabelle 4.2).

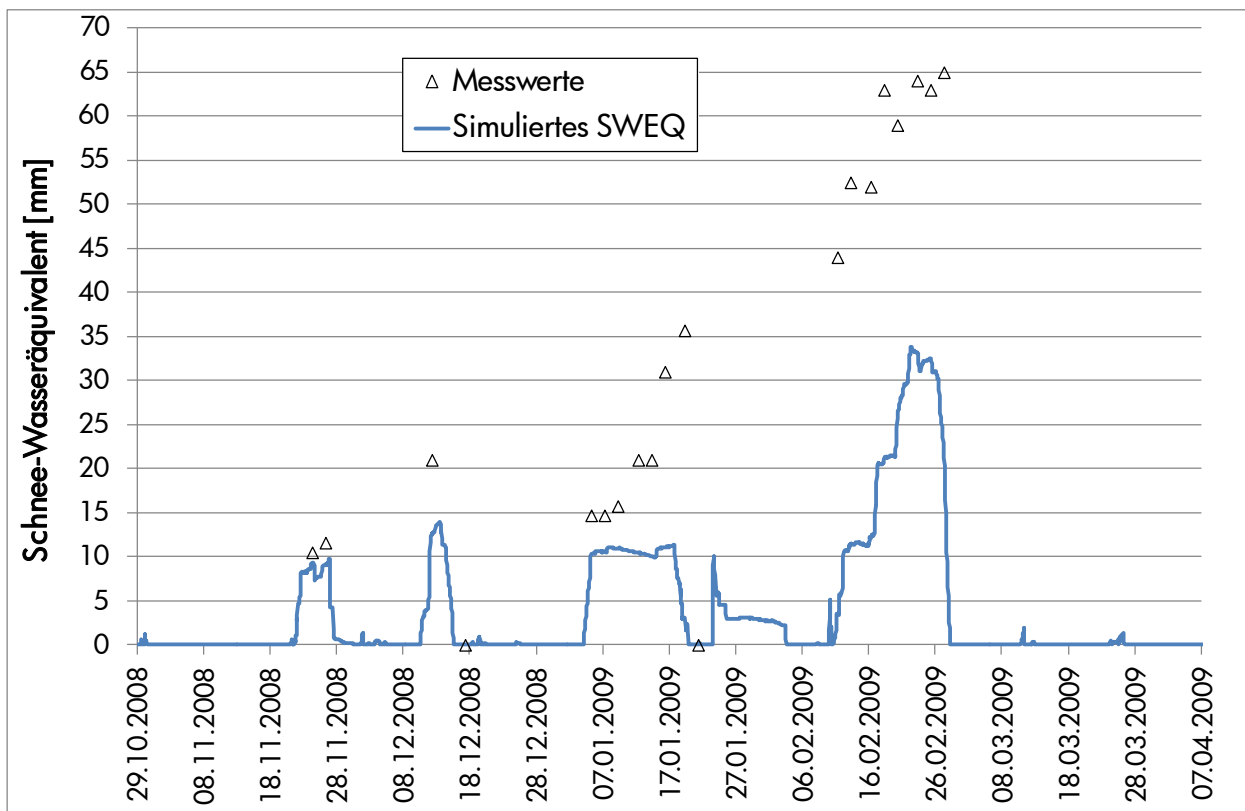


Bild 4.2: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem SWEQ an der Station Rehau für den Winter 2008/2009

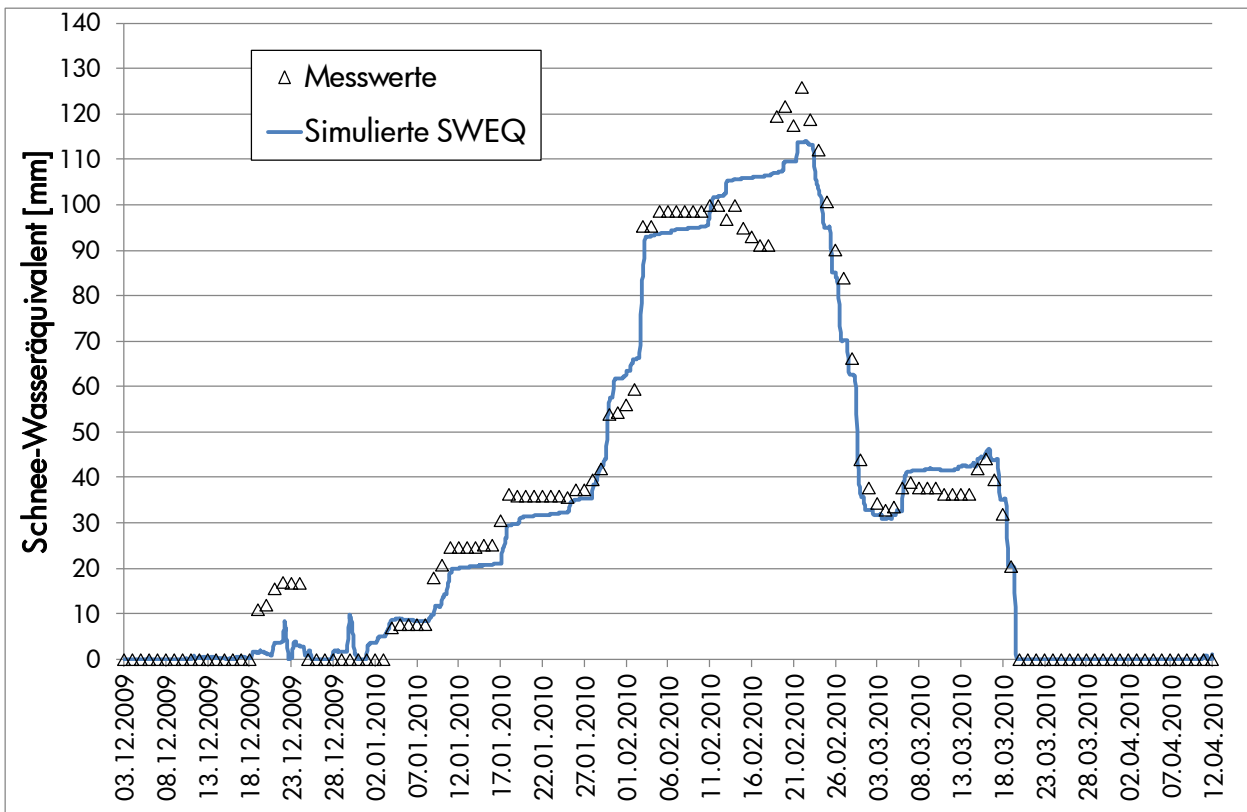


Bild 4.3: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten SWEQ an der Station Steben für den Winter 2009/2010

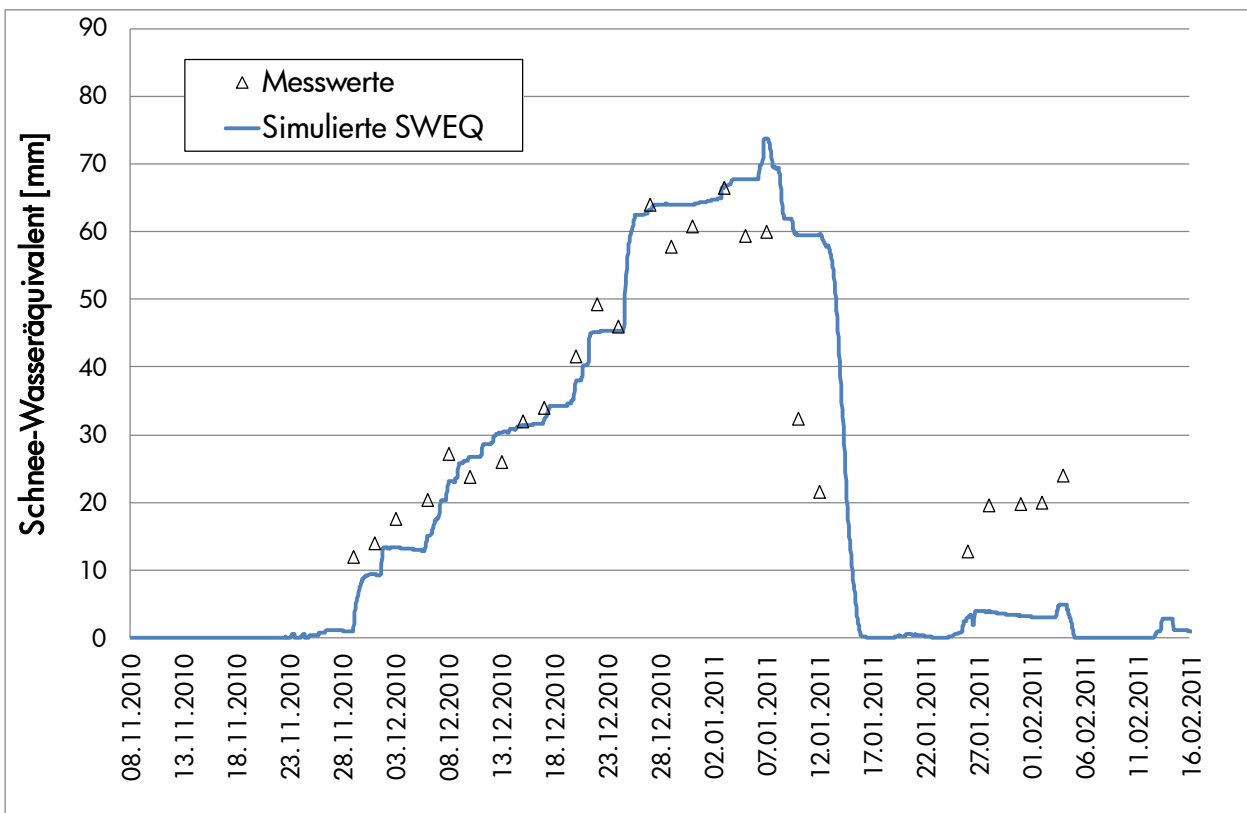


Bild 4.4: Vergleich zwischen gemessenenem und simuliertem SWEQ an der Station Tirschenreuth für den Winter 2010/2011

Die Bilder mit dem Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem SWEQ sowie auch die Ergebnisse der anderen Schneestationen (siehe auch elf Excel-Dateien im Unterordner \3_kalibrier-ergebnisse\j_sweq-vergleiche\ auf der DVD) zeigen, dass mit dem vorgeschlagenen Temperaturbereich von -1 °C bis $+3\text{ °C}$ zumeist eine korrekte Simulation der Schneedecke und der Schneeschmelze erzielt werden kann. An der Station Rehau (Bild 4.2) ist zwar das gemessene SWEQ im Winter 2008/2009 unterschätzt, für die anderen simulierten Winter passen simulierte und gemessene SWEQ allerdings ordentlich bis gut zusammen. Bei der Station Waldstein wurde allerdings eine deutliche Unterschätzung des von LARSIM simulierten SWEQ im Vergleich zu den SWEQ-Messwerten beobachtet.

Die Schneeparameter wurden im Rahmen der pegelkontrollbereichsspezifischen Eichung (siehe Kapitel 4.6) in einigen Fällen noch speziell angepasst.

4.2 Erstellung der Zustandsdatei

Für die Erstellung der Zustandsdatei wurde zunächst der Zeitraum 1.1.2004 bis 31.12.2005 unkalibriert simuliert, wobei die LARSIM-Option STARTABFLUESSE, GEG. verwendet wurde. Die hierbei anzugebenden initialen Abflusswerte wurden aus den gemessenen Ganglinien entnommen. Wie mit dem Auftraggeber abgestimmt, wurde anschließend die so erzeugte Zustandsdatei vom 1.1.2006 auf den 1.1.2004 rückdatiert, wobei eine „ähnliche hydrologische Situation zu den beiden Zeitpunkten“ angenommen wurde (E-Mail vom 06.08.2015 der FGG Elbe).

Im Zuge der Grobkalibrierung leistete diese Zustandsdatei dann gute Dienste, wobei für einige Pegel das Jahr 2004 noch tendenziell zu hohe Bilanzen aufwies. Dies relativierte sich aber dadurch, dass in hydrologischen Jahren simuliert wurde und der Zeitraum 1.1.2004 bis 31.10.2004 als Einschwingzeitraum betrachtet wurde. Somit war das erste offiziell kalibrierte hydrologische Jahr das Jahr 2005 (1.11.2004 – 31.10.2005).

Mit abgeschlossener Grobkalibrierung wurde nochmals eine neue Zustandsdatei auf Basis der rückdatierten Zustandsdatei vom 1.1.2006 erzeugt. Mit dieser verbesserten Zustandsdatei wurde dann während der Feinkalibrierung des Modells gearbeitet.

4.3 Flood-Routing-Tests

Gemäß der Leistungsbeschreibung bzw. in Abstimmung mit dem AG wurde vor Beginn der Kalibrierung ausführlich und detailliert mittels Flood-Routing-Tests geprüft, ob innerhalb des WHM SEW neben dem Standard-Williams-Verfahren auch der Einsatz des Translationsverfahren sinnvoll ist, evtl. sogar kombiniert mit einem sogenannten Flood-Routing-Netz-Overlay, um etwaige sehr kurze Fließstrecken zusammenzufassen.

Test-Aufbau:

Um potentiell problematische Stellen bzgl. des Flood-Routing innerhalb des WHM SEW zu überprüfen, wurde zuerst ein Flussabschnitt gesucht, der zum einen eher steil ist und zum anderen auch kurze Fließlängen aufweist. So wurde der Oberlauf der Kössein mit 10 TGB ausgewählt. Dieser beinhaltet steile Flussabschnitte (z.B. zwei TGB mit Gefälle > 6%) und auch sehr kurze Flusslängen (z.B. zwei TGB mit jeweils ca. 500 m Fließlänge und ein TGB mit nur 113 m Fließlänge). Nun wurde ein für das Kössein-Gebiet großes Hochwasserereignis ausgewählt: HW-Ereignis „Ende Mai 2006“, welches flussabwärts am Pegel Marktredwitz/Kössein das viertgrößte HW-Ereignis im elfjährigen Beobachtungszeitraum war. Anschließend wurde für dieses HW-Ereignis im TGB mit der LARSIM-Nr. 630 (= erstes Flood-Routing-TGB an der Kössein, sprich insgesamt zweites TGB an der Kössein) die simulierte Zuflussganglinie ermittelt, welche in der Folge als reale Startganglinie für die Flood-Routing-Tests diente.

Durchführung:

Im Lauf 1 wurde mit der oben beschriebenen Startganglinie und den folgenden zehn Kössein-TGB (-> 632 -> 634 -> 635 -> 637 -> 640 -> 642 -> 645 -> 646 -> 684) gemäß aktuellem Tape12 (also mit den sehr großen Gefällewerten, den z.T. sehr kurzen Fließlängen und den kompletten 10 Kössein-TGB) das Flood-Routing getestet (siehe rot-gepunktete Q_{sim} -Ganglinie im nachfolgenden Bild 4.5).

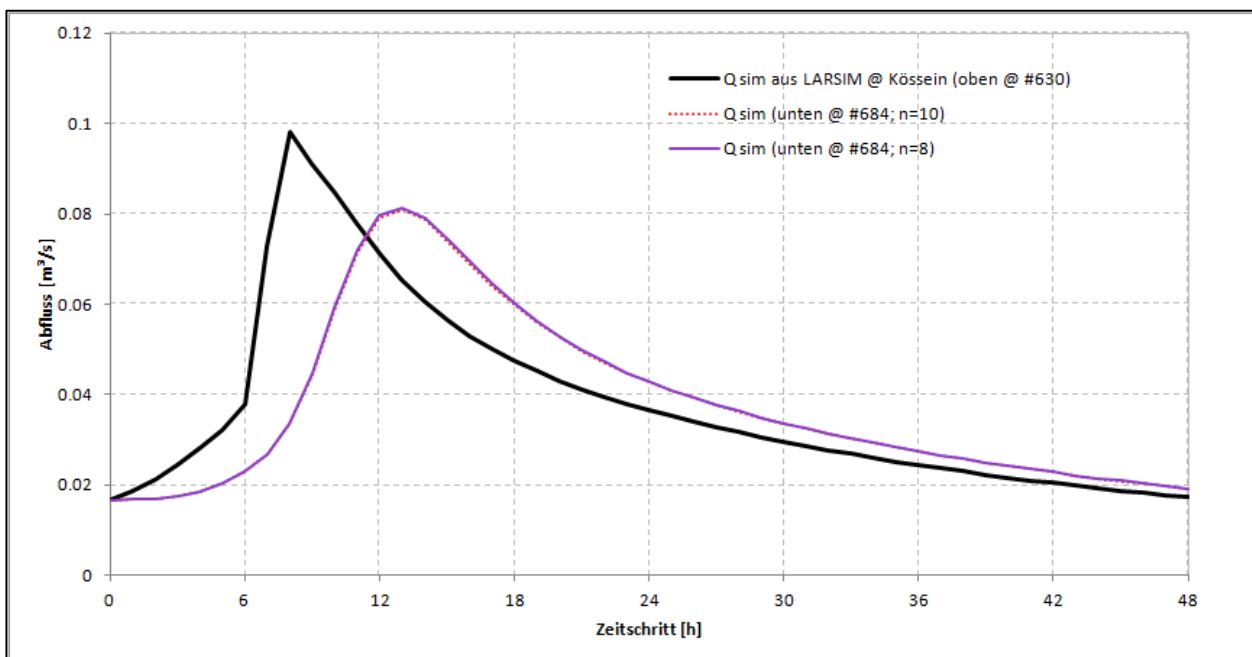


Bild 4.5: Flood-Routing-Tests an der Kössein (Vergleich Lauf 1 und Lauf 2)

Im Lauf 2 wurden die drei ersten (von zehn) TGB zusammengefasst, sodass für dieses neue TGB ein Fließlänge von 1546 m entstand (909 m aus TGB-Nr. 630 + 524 m aus TGB-Nr. 632 + 113 m aus TGB-Nr. 634). Das Gefälle wurde angepasst, sodass das resultierende Gefälle von 0,06191 exakt dem gleichen absoluten Gefälle in [m] entspricht wie bei den eigentlich drei TGB zusammen. Nach diesem kumulierten TGB (aus 3 mach' 1) durchlief die HW-Welle die exakt gleichen sieben Kössein-TGB wie bei Lauf 1. Das Ergebnis dieses Flood-Routing-Tests zeigt die lila Ganglinie in Bild 4.5.

Lauf 3 beinhaltete zum einen die gleiche TGB-Zusammenfassung wie in Lauf 2 (d.h. aus den TGB-Nr. 630 & 632 & 634 wurde ein neues kumuliertes TGB). Zusätzlich wurde im mittleren Abschnitt aus den drei TGB-Nr. 640 (541 m lang) & Nr. 642 (790 m lang) & Nr. 645 (878 m lang) auch ein kumuliertes TGB gemacht mit einer Gesamtlänge von 2209m und einem neuen Gefälle von 0,007877 (wiederum entspricht das absolute Gefälle dieses neuen kumulierten TGB der Summe der absoluten Gefälle [m] der drei ursprünglichen TGB). Mit der gleichen Startganglinie wie in den Läufen 1 und 2 kam am Ende der Flood-Routing-Kette der nunmehr nur noch sechs Kössein-TGB die orange Ganglinie heraus (siehe Bild 4.6).

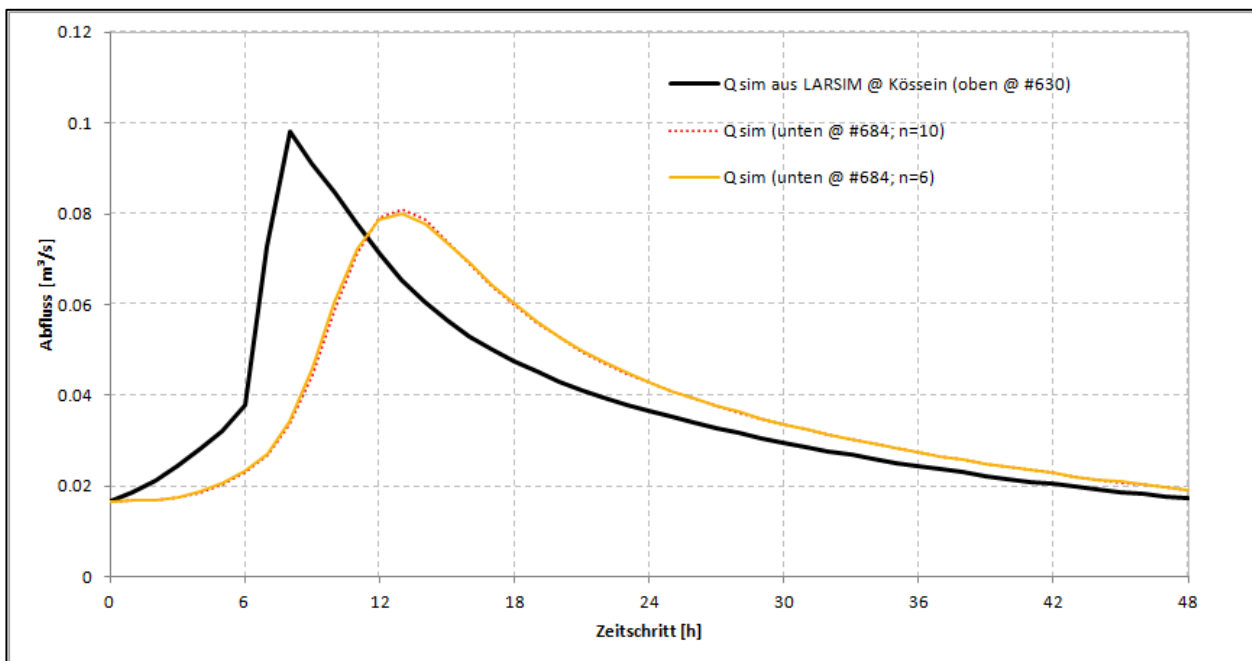


Bild 4.6: Flood-Routing-Tests an der Kössein (Vergleich Lauf 1 und Lauf 3)

Ergebnis und Schlussfolgerung:

Die beiden Ergebnisgrafiken (siehe Bild 4.5 bzw. Bild 4.6) zeigen nahezu identische Abflussganglinien am Ende des steilen Kössein-Testgebiets, egal mit welchem Set-Up. Dabei zeigt die rot gepunktete Ganglinie jeweils das Abflussergebnis nach dem Flood-Routing durch die zehn aktuellen Kössein-TGB, also mit dem sehr kurzen TGB-Nr. 634 mit nur 113 m Fluss-länge. Bei beiden Läufen mit verändertem TGB-Set-Up (Lauf 2 nur noch 8 TGB bzw. Lauf 3 nur noch 6 TGB) beträgt die mittlere Abweichung der Abflusswerte am Ende der insgesamt 7834 m langen Fließstrecke entlang der Kössein nur 0,2 % bzw. 0,3 % (bei 48 Zeitschritten à 1 Stunde). Neben diesen minimalen Abweichungen pro Zeitschritt und dem nahezu identischen Verlauf fällt zusätzlich auf, dass die schwarze Startganglinie trotz sehr steilem Gelände mehrere Stunden benötigt

vom Beginn des HW-Ereignisses bis zum Scheitel. Sprich, eine Beeinträchtigung der Simulationsergebnisse im vorgegebenen Stundenzeitschritt ist auch in kleinen und steilen Gebieten innerhalb des WHM SEW mit dem Standard-Williams-Verfahren nicht zu erwarten trotz der z.T. sehr kurzen Fließlängen.

Aus all diesen Ergebnissen der verschiedenen Flood-Routing-Tests wurde in Abstimmung mit dem AG geschlossen, dass einem Einsatz des aktuellen Tape12 (also mit z.T. sehr kurzen Fließlängen innerhalb einzelner TGB) mit dem Williams-Flood-Routing-Verfahren nichts im Wege steht und aus Flood-Routing-Sicht gute Simulationsergebnisse ermöglichen kann. D.h. die Verwendung eines Flood-Routing-Netz-Overlay samt Einsatz des Translationsverfahrens ist nicht angezeigt und wurde deshalb nicht angestrebt.

4.4 Bordvoller Abfluss

Gemäß der Leistungsbeschreibung sollte der Verlauf des bordvollen Abflusses zwischen den Teilgebieten kontrolliert und auf Plausibilität überprüft werden.

Die Generierung der Tripel-Trapez-Profile des WHM SEW erfolgte mit dem sogenannten Gerinneschätzer (siehe auch Kapitel 3.3), welcher an jedem Modellpunkt aus der vorliegenden EZG-Größe und dem damit ermittelten gerinnebildenden Abfluss alle Tripel-Trapez-Parameter im Tape12 berechnet.

Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, erwiesen sich die via Gerinneschätzer ermittelten Hauptbettiefen und Hauptbettbreiten als plausibel und realistisch, was diverse punktuelle Vergleiche mit HYDRO-AS-2D-basierten Profilen an den wichtigsten Flüssen des SEW-Gebiets belegten. Mit der Entscheidung, Hauptbettiefen und Hauptbettbreiten stets direkt aus dem Gerinneschätzer im Modell (Tape12) zu verwenden, wurde implizit auch beschlossen, dass der bordvolle Abfluss kontinuierlich mit der Einzugsgebietsgröße zunimmt und keine unplausiblen Sprünge aufweist.

Anders ausgedrückt, muss bei dieser Vorgehensweise via Gerinneschätzer der bordvolle Abfluss exakt dem gerinnebildenden Abfluss gemäß Tape12 entsprechen. Dieser Sachverhalt wurde sicherheitshalber noch an drei Stellen (jeweils im Mittellauf von Saale, Eger und Wondreb) mittels Einsatz der Option SCHLUESSELKURVEN überprüft. Die Tests waren an allen drei Stellen erfolgreich.

4.5 Verwendung von Tageswertstationen des Niederschlags

Auf Wunsch des AG wurde an drei Beispielen überprüft, ob der Einsatz von Tageswertstationen des Niederschlags eventuell zu verbesserten Abflusssimulationen beitragen könnte. Hierzu wurden zuerst die Ganglinien von drei Tageswertstationen des Niederschlags auf Stundenwerte disaggregiert. Danach wurden diese neuen Niederschlagsstationen der LILA-Niederschlags-Inputdatei hinzugefügt und Testrechnungen durchgeführt.

Mit den beiden Tageswertstationen des Niederschlags in den PKB von Dobrigau/Wondreb bzw. Kautendorf/Südliche Regnitz konnte die Abflusssimulation an diesen beiden Pegeln kaum bis gar nicht verbessert werden. Offensichtlich passen hier die gemessenen Niederschläge, gleichgültig ob von Stundenwert- oder Tageswertmessstationen, nicht besonders gut zu den gemessenen Abflüssen an den Pegeln, vor allem im PKB von Kautendorf/Südliche Regnitz.

Hingegen hatte die Hinzunahme der Tageswertstation Naila für die Simulationsergebnisse am Pegel Hölle/Selbitz einen positiven Effekt. Diese Tageswertstation liegt mitten im PKB von Hölle/Selbitz (siehe auch Anlage B.4) und ergänzt deshalb positiv die beiden am Rand des PKB gelegenen Stundenwertstationen. Dieser günstige Effekt kann z.B. bei der Simulation des HW-Ereignisses vom Februar 2005 gesehen werden, wo die Abflusssimulation mit der Tageswertstation Naila (grüne Linie) eine klare Verbesserung zur Simulation ohne (rote Linie) darstellt (siehe Bild 4.7)

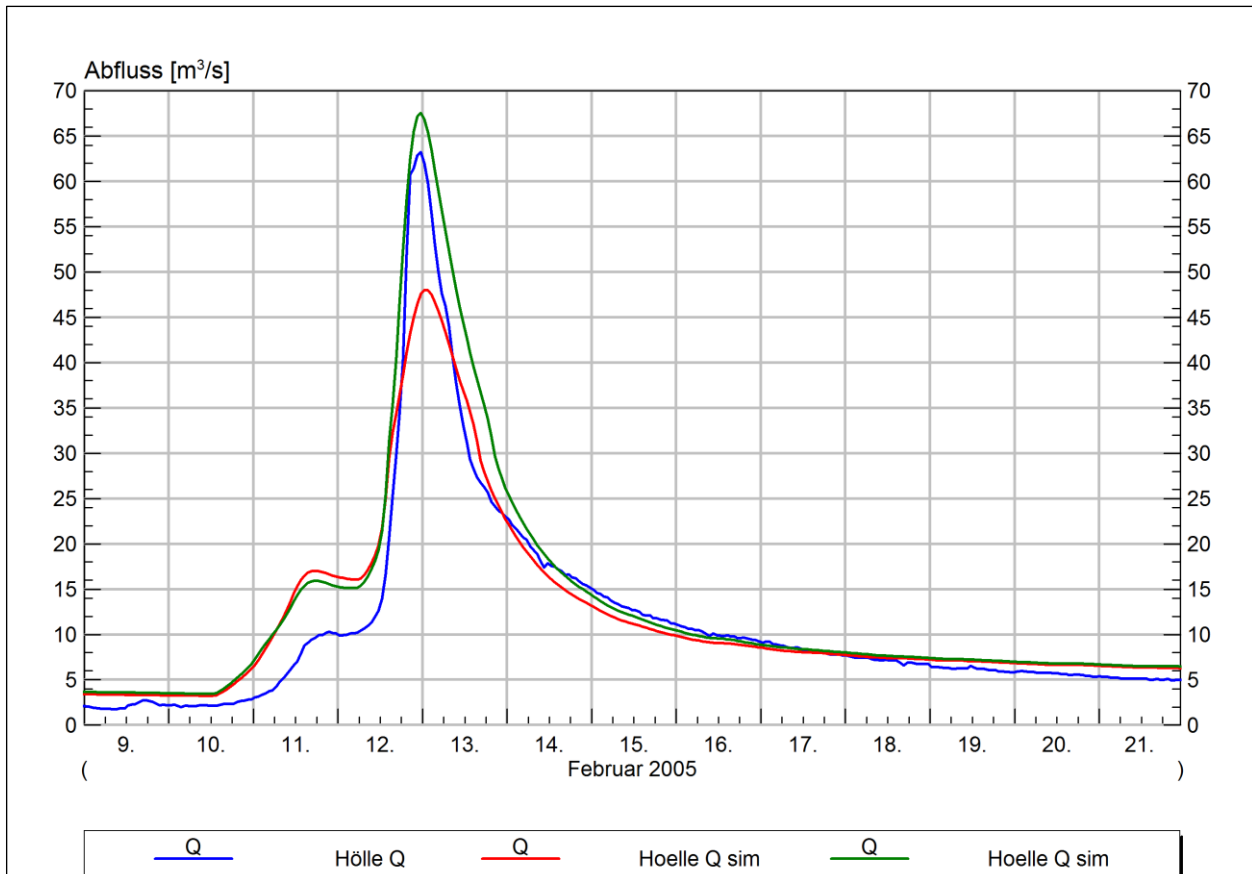


Bild 4.7: HW-Simulation am Pegel Hölle/Selbitz mit (grün) bzw. ohne (rot) die Niederschlagstageswertstation Naila

Da die Hinzunahme von Tageswertstationen nur in einem von drei Beispielen einen positiven Effekt hatte, und vor allem da nach Auskunft des BLfU die Tageswertstationen im operationellen Betrieb nicht zur Verfügung standen, wurde von einem weiteren Einsatz der Niederschlagstageswertstationen abgesehen.

4.6 Vorgehen bei der pegelkontrollbereichsspezifischen Kalibrierung

Die PKB-spezifische Kalibrierung der Modellparameter erfolgte für den Zeitraum November 2004 bis Oktober 2013. Der Zeitraum vom Januar 2004 bis Oktober 2004 wurde als Einschwingzeitraum verwendet. Aufgrund der in den letzten Jahren verbesserten Datenlage, die weitgehend der aktuellen operationellen Datenlage entspricht, wurde im Zweifelsfall der Schwerpunkt der Kalibrierung auf die jüngeren Jahre gelegt.

Die Kalibrierung erfolgte manuell gemäß den Vorgaben des aktuell neu überarbeiteten Kalibrier-Leitfadens für operationelle LARSIM Wasserhaushaltsmodelle der LARSIM-Entwicklergemeinschaft (Haag et al., 2016). Die sequentielle Kalibrierung erfolgte dabei zunächst auf der Grundlage einer durchgehenden Simulation, wurde aber zusätzlich immer unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien überprüft. In diesem Zusammenhang wurde die Abfolge der Pegel auch hinsichtlich möglicher Inkonsistenzen überprüft.

Im Zuge der Kalibrierung wurde versucht, die simulierten Abflüsse möglichst gut in Einklang mit den gemessenen Abflüssen zu bringen. Die Simulationsergebnisse wurden mit integralen Gütemaßen (Bilanz, Modelleffizienz, Modelleffizienz logarithmierter Abflüsse) bewertet. Im Zweifel wurde jedoch dem visuellen Vergleich zwischen Simulation und Messung der Vorrang vor diesen Gütemaßen eingeräumt. Die Anpassung erfolgte für den gesamten Abflussbereich (Niedrig- bis Hochwasser) mit einem Parametersatz, wobei zunächst eine Grobkalibrierung durchgeführt wurde, in der besonderes Augenmerk auf die Abflusskomponenten Basisabfluss und Interflow und die Gesamtbilanz gelegt wurde. Im Zuge der Feinkalibrierung wurden dann die Hochwasser und somit auch die schnellen Abflusskomponenten kalibriert.

Die Simulation der Schneedynamik erfolgte auf Grundlage der allgemeinen Parameterwerte, die im Zuge der gesonderten Schneekalibrierung festgelegt worden waren. Sofern im Zuge der Feineichung vonnöten, wurde eine weitere PKB-spezifische Anpassung der Schneeparameter vorgenommen.

Besonderes Augenmerk wurde bei der Kalibrierung auf den Hochwasserbereich gelegt. Hierzu wurden in Absprache mit dem Auftraggeber fünf Hochwasserereignisse ausgewählt und gesondert betrachtet. Dabei wurde versucht, das Abflussvolumen der Ereignisse über die Parameter für die Abflussbildung ohne Wasserdargebotsoptimierung (WD-Opti) bestmöglich abzubilden. Der zeitliche Verlauf und die Gradienten (vor allem im ansteigenden Ast) wurden dann mit den entsprechenden Parametern für die Gebietsspeicher (Abflusskonzentration) bestmöglich angepasst. Hierfür wurde auch die ereignisspezifische Wasserdargebotsnachführung genutzt. Im Zweifel wurde der bestmöglichen Anpassung des Hochwasserabflusses Vorrang gegenüber den anderen Abflussbereichen gegeben.

Weiterführende Details zum Vorgehen bei der Kalibrierung sind Haag et al. (2016) zu entnehmen.

4.6.1 Übersicht der Ergebnisse für alle Pegel

Anlage C.1 gewährt einen Überblick über die kalibrierten Pegelkontrollbereiche (PKB) und die zugehörigen Pegel. Im Zuge der Kalibrierung wurden pegelspezifisch alle Kalibrierparameter für die insgesamt 15 Pegelkontrollbereiche manuell angepasst. Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die neu bestimmten Parameterwerte inklusive der pegelspezifisch angepassten Schneeparameter. Zur weiteren Veranschaulichung enthält Anlage C Flächendarstellungen der kalibrierten Parameterwerte. Hierbei ist zu bemerken, dass z.B. der Parameter `fbas_fak` in Anlage C.11 in Kautendorf und Rehau mit 20 einen deutlich höheren Wert einnimmt als in den meisten anderen Pegelkontrollbereichen. Grundsätzlich wurde aber bei der Kalibrierung darauf geachtet, dass alle Parameter in vom Kalibrierleitfaden vorgegebenen Grenzen variiert wurden. Für den Faktor `fbas_fak` wären diese Grenzen 1-500 mit einem Startwert von 5. Somit sind die hier letztlich verwendeten Werte hoch im Vergleich zum restlichen Modell, aber weit unterhalb der üblichen Höchstgrenze. Durch die erhöhten `fbas_fak`-Werte in Kautendorf und Rehau wurde ganz konkret einer erhöhten jahreszeitlichen Dynamik beim Basisabfluss Rechnung getragen.

Tabelle 4.4 gibt eine Übersicht über die im Simulationszeitraum der hydrologischen Jahre 2005 bis 2013 erzielten Modellgüten. Die hier abgebildeten Werte sind als Gütemaße der Gesamtzeiträume zu verstehen (Ausnahme Blankenstein, 2006-2013). Jahresweise Modellgüten finden sich in diesem Kapitel bei der jeweiligen Pegelbeschreibung. Im Anhang J sind statistische Auswertungen für die im Detail betrachteten Hochwasserereignisse vorgenommen und tabellarisch dargestellt. Anhang K zeigt zusätzlich für die sechs Unterliegerpegel nochmals statistische Gütemaße mit gemessener Zulaufganglinie.

Zu beachten ist, dass die hier angegebenen Gütemaße alle mit durchgängiger Simulation ermittelt wurden. Es wurden also keine gemessenen Abflüsse an den Oberliegerpegeln nach Unterstrom übergeben. Durch eine solche Weitergabe gemessener Ganglinien hätten an den Unterliegerpegeln naturgemäß noch deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Die mittleren Ergebnisse erlauben eine erste Einschätzung. Vor dem Hintergrund der meist recht kleinen und sehr schnell reagierenden Einzugsgebiete kann das Ergebnis als insgesamt gut beurteilt werden. Bei der Mehrzahl der Pegel konnten gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Modelleffizienz liegt zumeist über 0,7 und häufig über 0,8.

Auf mögliche Ursachen für die etwas schlechteren Ergebnisse an den Pegeln Kautendorf und Fahrenbühl wird in den nachfolgenden Unterkapiteln eingegangen.

Neben den statistischen Maßzahlen wurde eine aus der Kalibrierung abgeleitete Bewertung der Simulationsergebnisse für den Gesamtzeitraum und spezifisch für die Hochwasserereignisse vorgenommen, die in Tabelle 4.5 zusammengefasst ist. Hierfür wurden sowohl die statistischen Auswertungen als auch die grafischen Vergleiche zwischen simulierten und gemessenen Ganglinien bewertet.

Sowohl der Gesamtzeitraum als auch die Hochwasserereignisse werden in drei Kategorien unterteilt:

- Gut (+)
- Zufriedenstellend (o)
- Schlecht/problematisch (-)

In die mittlere Kategorie fallen vor allem die Pegel, bei denen manche Jahre bzw. Ereignisse sehr gut andere aber schlecht waren. Der Pegelkontrollbereich Hölle hat beispielsweise eine sehr hohe Modellgüte, was den Gesamtzeitraum angeht, bei den kalibrierten Hochwassern konnte er allerdings nur mittelmäßig abschneiden.

Tabelle 4.3: Im Zuge der Kalibrierung angepasste Kalibrierparameter für alle Pegel

Pegel	EQB	EQI	EQD	EQD2	A2	EKM	EKL	EKR	BSF	beta	Dmin	Dmax	KG	Abso	A0	A1	fbas_fak	SRet	Tmit_Sr
Marktleuthen	10000	1000	280	100	2.5	0.5	0.8	0.8	0.3	0.0035	0	1.5	1.09	0.23	2.5	1.8	5	25	0.5
Hohenberg	13000	1500	250	50	1.5	0.5	0.8	0.8	0.15	0.004	0	1.5	1	0.15	2	1.5	5	20	0.5
Lorenzreuth	10000	1000	400	50	0.5	0.3	0.6	0.6	0.38	0.0072	0	2.5	1.1	0.1	2.5	2	2.5	10	0.5
Marktredwitz	15000	1000	200	100	3.5	1	1	1	0.08	0.003	0	0.3	0.98	0.2	3.5	2.5	1.6	15	0
Arzberg	15000	1000	200	100	1.6	1.2	1.2	1.2	0.2	0.002	0	2	1	0.15	2	1	4	30	0
Dobrigau	18000	1500	300	150	2	1	1	1	0.2	0.0023	0	0.35	0.95	0.25	3	2	3.5	10	0
Waldsassen	13000	500	450	50	1	0.5	0.5	0.5	0.25	0.0026	0	0.4	0.98	0.2	3	2	3	10	0
Weissdorf	14000	1500	250	30	0.9	0.3	0.7	0.7	0.15	0.002	0	0.8	1.07	0.2	3	2	4	35	0
Fahrenbühl	20000	500	300	150	3.5	1.2	1	1	0.05	0.005	0	0.5	1	0.1	2	1.6	2	20	1
Oberkotzau	17000	500	400	100	1.8	0.8	1	1	0.15	0.0015	0	0.5	1	0.1	2	1.6	4	25	0.5
Rehau	12000	2000	300	100	2	1	1	1	0.08	0.0015	0	1	1	0.05	1	1	20	10	0
Kautendorf	8000	700	500	80	2	0.5	0.8	0.8	0.4	0.00072	0	1	1.15	0.2	3	2	18	20	0.5
Hof	15000	1500	250	100	1.7	1	1	1	0.2	0.0025	0	1	1	0.2	3	2	2	20	0.5
Hölle	17000	700	400	150	2.5	0.7	1	1	0.13	0.0032	0	0.9	0.98	0.25	3	2	1	10	0.5
Blankenstein	12000	800	200	80	1.5	0.8	0.8	0.8	0.4	0.0035	0	3	1.1	0.2	3	2	15	20	0.5

Tabelle 4.4: Übersicht der Gütemaße für den Zeitraum 2005-2013

Pegel	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE* [-]
Weißdorf	0	0.81	0.8	0.81	1.05	0.73
Fahrenbühl	2	0.42	0.17	-1.21	1.29	0.37
Oberkotzau	0	0.88	0.88	0.82	1.08	0.77
Rehau	1	0.84	0.82	0.82	1.03	0.76
Kautendorf	3	0.72	0.72	0.82	0.99	0.68
Hof	0	0.91	0.9	0.84	1.1	0.8
Hölle	2	0.87	0.87	0.88	0.99	0.78
Blankenstein	0	0.82	0.82	0.85	0.89	0.75
Marktleuthen	0	0.76	0.76	0.84	0.99	0.78
Hohenberg	-3	0.8	0.79	0.72	0.97	0.73
Lorenzreuth	1	0.8	0.79	0.83	0.93	0.77
Marktredwitz	1	0.73	0.68	0.82	1.01	0.70
Arzberg	0	0.83	0.83	0.86	0.99	0.78
Dobrigau	-5	0.70	0.69	0.73	0.98	0.73
Waldsassen	1	0.74	0.73	0.74	1.07	0.71

*Formel für Volume Error (VE): $VE = 1 - \frac{\sum |Q_{sim} - Q_{mes}|}{\sum Q_{mes}}$

Tabelle 4.5 erlaubt einen raschen Überblick über alle Pegel. Es wird sofort deutlich, an welchen Pegeln speziell für Hochwasser oder für den restlichen Abflussbereich noch Verbesserungsbedarf besteht. Aus Sicht der Kalibrierung sind aber alle Pegel bestmöglich parametrisiert.

Für die meisten Pegel können die Ergebnisse in beiden Bereichen als sehr gut bis zufriedenstellend eingestuft werden. Lediglich für den Pegel Fahrenbühl konnten weder im Gesamtzeitraum noch im Hochwasserbereich zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Hierauf und auf etwaige Besonderheiten an allen anderen Pegeln wird in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer eingegangen.

Tabelle 4.5: Übersicht über die Bewertung der Simulationsergebnisse für den Gesamtzeitraum und die Hochwasserereignisse

Pegel	Gesamtzeitraum	Hochwasserereignisse
Weißdorf	+	+
Fahrenbühl	-	-
Oberkotzau	+	-
Rehau	+	0
Kautendorf	0	-
Hof	+	+
Hölle	+	0
Blankenstein	+	0
Marktleuthen	+	0
Hohenberg	+	0
Lorenzreuth	0	+
Marktrechwitz	+	+
Arzberg	+	+
Dobrigau	+	0
Waldsassen	+	0

An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass alle Ergebnisse darauf hindeuten, dass sich der hohe Detaillierungsgrad des WHM SEW (durchschnittliche TGB-Größe von nur 0,77 km²) im Vergleich zu anderen gröber aufgestellten LARSIM-WHM vorteilhaft auswirkt. Eine hieb- und stich-feste Aussage hierzu könnte aber nur getroffen werden, wenn für das gleiche Projektgebiet zwei unterschiedliche TGB-Diskretisierungsgrade vorliegen (also zwei Tape12), diese beiden Modelle separat geeicht werden und anschließend die Ergebnisse im Detail verglichen werden würden.

4.6.2 Pegel Weißdorf/Saale

Kopfpegel, EZG: 48 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Generell recht gute Übereinstimmung mit gemessener Ganglinie
- Gute Bilanzen und hohe Modelleffizienz
- Schnee bzw. Schneeschmelze tendenzieller Schwachpunkt
- Übersicht: Tabelle 4.6, Anlage D8

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Mittel bis gut. Das Hochwasser vom Januar 2011 konnte im Gegensatz zu vielen anderen Pegeln gut simuliert werden.
- Sowohl Sommer- als auch Winterhochwasser werden gleichermaßen gut simuliert
- Die meisten kleineren Hochwasser werden (ohne WD-Opti) tendenziell unterschätzt
- Tabelle: Anlage J8
- Grafiken: Anlage E8

Besonderheiten:

- Generell lässt sich das Abflussverhalten des Einzugsgebietes gut mit dem Wasserhaushaltsmodell darstellen, was sich an den hohen Effizienzen von > 0.75 zeigt.
- Allerdings konnte dies nur durch eine Anhebung von KG auf 1.07 realisiert werden. Hochwasser werden dennoch meist unterschätzt, was sich auch nicht durch eine extreme Anhebung des Parameters BSF ausgleichen lässt. Daher wurde BSF auf einem normalen Niveau belassen. Auch eine weitere Anhebung des Parameters KG war nicht indiziert

Tabelle 4.6: Gütemaße des Pegels Weißdorf

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	3	0.67	0.64	0.72	0.99	0.64
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.85	0.84	0.81	1.08	0.72
01.11.2006 - 31.10.2007	1	0.82	0.80	0.84	1.09	0.79
01.11.2007 - 31.10.2008	1	0.78	0.78	0.79	1.11	0.70
01.11.2008 - 31.10.2009	0	0.69	0.69	0.69	1.15	0.68
01.11.2009 - 31.10.2010	0	0.76	0.76	0.73	1.15	0.71
01.11.2010 - 31.10.2011	1	0.95	0.94	0.91	1.00	0.81
01.11.2011 - 31.10.2012	3	0.70	0.64	0.78	0.98	0.68
01.11.2012 - 31.10.2013	0	0.85	0.84	0.90	0.95	0.80
Mittelwert über Einzeljahre	1	0.78	0.77	0.80	1.06	0.73
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.81	0.8	0.81	1.05	0.73

4.6.3 Pegel Fahrenbühl/Lamitz

Kopfpegel, EZG: 26 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Mit Ausnahme des hydrologischen Jahres 2013 weist Fahrenbühl schlechte Modellgüten auf. Die Bilanz von 2004 bis 2007 ist viel zu hoch, jedoch ab 2007 gut.
- Übersicht: Tabelle 4.7, Anlage D9

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Für diesen Pegel wurden lediglich 3 geeignete Hochwasser zur Kalibrierung verwendet
- Davon konnte lediglich das HW vom Mai/Juni 2013 recht gut dargestellt werden.
- Tabelle: Anlage J9
- Grafiken: Anlage E9

Besonderheiten:

- Der Pegel Fahrenbühl hat durch die Lamitz-Förmitz-Überleitung schlechte Voraussetzungen für ein gutes Eichergebnis
- Der Pegelkontrollbereich ist mit 26 km² außerdem der kleinste aller Pegelkontrollbereiche und somit extrem anfällig für lokal begrenzte Niederschlagsereignisse, welche durch geringe Stationsdichte nicht gut im Modell abgebildet werden können
- Die Einschwingzeit des Modells wurde nach vorheriger Absprache bei der Eichung des Pegels Fahrenbühl/Lamitz bis einschl. Oktober 2007 verlängert
- Der eigentliche Eichzeitraum beginnt somit mit dem 1. November 2007
- Beim Übergang von Grob- zu Feineichung wurde durch die Neuerstellung der Zustandsdatei an diesem Pegel kaum eine Verbesserung erreicht

Tabelle 4.7: Gütemaße des Pegels Fahrenbühl

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	4	0.33	0.24	-2.43	1.83	0.01
01.11.2005 - 31.10.2006	-1	0.49	0.33	0.10	1.36	0.40
01.11.2006 - 31.10.2007	0	0.24	-14.40	-11.45	2.67	-0.69
01.11.2007 - 31.10.2008	0	0.15	-1.02	-3.41	1.08	0.40
01.11.2008 - 31.10.2009	0	0.09	-2.61	-13.36	0.84	0.59
01.11.2009 - 31.10.2010	0	0.40	0.18	-2.52	1.01	0.53
01.11.2010 - 31.10.2011	0	0.42	0.22	0.33	1.16	0.47
01.11.2011 - 31.10.2012	0	0.03	-0.57	-2.74	1.03	0.43
01.11.2012 - 31.10.2013	2	0.83	0.74	0.26	1.04	0.71
Mittelwert über Einzeljahre	1	0.33	-1.87	-3.91	1.33	0.32
Mittelwert Gesamtzeitraum	2	0.42	0.17	-1.21	1.29	0.37

4.6.4 Pegel Oberkotzau/Saale

Unterliegerpegel von Weißdorf und Fahrenbühl, EZG: 232 km², PKB: 158 km² (68 %)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Generell recht gute Übereinstimmung mit gemessener Ganglinie
- Gute Bilanzen und hohe Modelleffizienz
- Übersicht: Tabelle 4.8, Anlage D10, Anlage K4 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Mittel. Einige Hochwasser werden vom Volumen her unterschätzt, was an zu geringem Niederschlagsinput liegt (z.B. HW 2005).
- Der ansteigende Ast der Hochwasser verläuft oft zu langsam (HW 2005, 2006, 2011)
- Kein gravierender Unterschied in der Güte von Sommer- und Winterereignissen
- Tabelle: Anlage J10
- Grafiken: Anlage E10

Besonderheiten:

- Trotz schlechtem Oberliegerpegel Fahrenbühl weist Oberkotzau weitestgehend eine hohe Modellgüte auf.
- Der Auftraggeber hat sich dafür entschieden, die im PKB liegende Förmitztalsperre beim Eichen mit der gemessenen Abflussganglinie zu verwenden. Dies wurde über die Option IPRIN 9 in der pegel.stm für den Förmitz Speicherabfluss realisiert. Die Auswirkung dieser Vorgehensweise auf die Modelleffizienz stellte sich als gering heraus.

Tabelle 4.8: Gütemaße des Pegels Oberkotzau (ohne gemessene Zulaufganglinie)

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	1	0.79	0.78	0.77	1.08	0.73
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.92	0.91	0.86	1.14	0.78
01.11.2006 - 31.10.2007	-1	0.86	0.85	0.82	1.12	0.80
01.11.2007 - 31.10.2008	1	0.88	0.88	0.85	1.07	0.80
01.11.2008 - 31.10.2009	-1	0.75	0.72	0.71	1.09	0.74
01.11.2009 - 31.10.2010	-2	0.82	0.80	0.70	1.15	0.73
01.11.2010 - 31.10.2011	2	0.94	0.94	0.85	0.99	0.76
01.11.2011 - 31.10.2012	-1	0.89	0.82	0.83	1.01	0.75
01.11.2012 - 31.10.2013	-2	0.89	0.89	0.80	1.07	0.77
Mittelwert über Einzeljahre	0	0.86	0.84	0.80	1.08	0.76
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.88	0.88	0.82	1.08	0.77

4.6.5 Pegel Rehau/Schwesnitz

Kopfpegel, EZG: 84 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Außer in den hydrologischen Jahren 2007 und 2010 werden hier durchwegs gute Simulationsergebnisse erzielt
- Sehr gute Bilanzen (KG 1) und hohe Modelleffizienz
- Übersicht: Tabelle 4.9, Anlage D11

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Mittel. Das Hochwasser vom Mai 2013 kann nicht gut simuliert werden. Die meisten Hochwasser werden an diesem Pegel ohne WD-Opti überschätzt, mit WD-Opti allerdings gut simuliert.
- Kein gravierender Unterschied in der Güte von Sommer- und Winterereignissen
- Tabelle: Anlage J11
- Grafiken: Anlage E11

Besonderheiten:

- Auf die Schneekalibrierung wurde bei diesem Pegel viel Zeit investiert. Es war dennoch nicht möglich, die Schneeschmelze z.B. beim Hochwasser 2011 besser zu treffen, ohne dabei andere Winterhochwasser zu verschlechtern.

Tabelle 4.9: Gütemaße des Pegels Rehau

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	1	0.84	0.83	0.76	1.21	0.74
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.89	0.81	0.75	1.11	0.74
01.11.2006 - 31.10.2007	0	0.52	0.51	0.40	0.85	0.66
01.11.2007 - 31.10.2008	0	0.86	0.84	0.88	0.89	0.82
01.11.2008 - 31.10.2009	-2	0.84	0.81	0.80	0.99	0.73
01.11.2009 - 31.10.2010	0	0.77	0.65	0.76	1.11	0.78
01.11.2010 - 31.10.2011	2	0.91	0.84	0.89	1.08	0.76
01.11.2011 - 31.10.2012	-1	0.90	0.89	0.89	0.98	0.80
01.11.2012 - 31.10.2013	1	0.87	0.87	0.88	1.06	0.78
Mittelwert über Einzeljahre	0	0.82	0.78	0.78	1.03	0.76
Mittelwert Gesamtzeitraum	1	0.84	0.82	0.82	1.03	0.76

4.6.6 Pegel Kautendorf/Südliche Regnitz

Kopfpegel, EZG: 92 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Für den Gesamtzeitraum konnten hier zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.
- Gute Bilanzen (KG 1.15) und hohe Modelleffizienz
- Übersicht: Tabelle 4.10 sowie Anlage D12

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Winterhochwasser werden im Mittel OK dargestellt. Es wurde versucht, Schneeparameter so zu wählen, dass der Schnee im Mittel gut simuliert wird
- Ausgewählte Sommerhochwasser werden eher schlecht simuliert, HW im Juli 2010 hat viel zu wenig Niederschlagsinput
- Tabelle: Anlage J12
- Grafiken: Anlage E12

Besonderheiten:

- KG musste auf 1.15 angehoben werden, da Niederschläge tendenziell unterschätzt werden
- 2007 generell zu geringes Volumen an Niederschlagsinput
- Basisabfluss lässt sich nicht gut an Niedrigwasserbereiche angleichen
- Der Pegel war bei der Kalibrierung einer der aufwändigsten, erst im Zuge der Feinkalibrierung konnten hier gute Ergebnisse erzielt werden
- Einer der Pegel, die durch ein dichteres Messnetz an Niederschlagsstationen besonders profitieren sollten

Tabelle 4.10: Gütemaße des Pegels Kautendorf

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	0	0.83	0.83	0.68	1.14	0.65
01.11.2005 - 31.10.2006	4	0.91	0.88	0.74	1.26	0.64
01.11.2006 - 31.10.2007	-7	0.71	0.71	0.80	1.03	0.71
01.11.2007 - 31.10.2008	-4	0.89	0.89	0.86	1.01	0.78
01.11.2008 - 31.10.2009	-6	0.88	0.83	0.86	0.99	0.71
01.11.2009 - 31.10.2010	-4	0.67	0.65	0.87	0.94	0.72
01.11.2010 - 31.10.2011	8	0.75	0.65	0.78	0.97	0.58
01.11.2011 - 31.10.2012	-5	0.84	0.80	0.79	0.89	0.65
01.11.2012 - 31.10.2013	6	0.78	0.67	0.86	0.86	0.66
Mittelwert über Einzeljahre	-0.9	0.81	0.77	0.81	1.01	0.68
Mittelwert Gesamtzeitraum	3	0.72	0.72	0.82	0.99	0.68

4.6.7 Pegel Hof/Saale

Unterliegerpegel von Weißdorf, Fahrenbühl, Oberkotzau, Rehau und Kautendorf; EZG: 521 km², PKB: 113 km² (22%)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Der Pegel weist sowohl mit als auch ohne gemessene Zulaufganglinie hohe Effizienzen auf
- Die Bilanz ist ohne gemessene Zulaufganglinie tendenziell etwas zu hoch
- Übersicht: Tabelle 4.11 und Anlage D13. Außerdem Anlage K5 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Das Hochwasser vom Februar 2005 wird nur unzureichend simuliert
- Alle anderen Ereignisse werden unabhängig von der Jahreszeit gut simuliert
- Aus den Ereignissen Dez. 2010 und Jan 2011 wird ersichtlich, dass die Schneeschmelze wengleich nicht perfekt, recht gut getroffen wird
- Tabelle: Anlage J13
- Grafiken: Anlage E13

Besonderheiten:

- Die Simulationsqualität an diesem Pegel ist von überdurchschnittlicher Güte. Vorhersagen sollten mit gemessener Zulaufganglinie und WD-Opti verlässlich getroffen werden können

Tabelle 4.11: Gütemaße des Pegels Hof

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	0	0.82	0.82	0.70	1.18	0.73
01.11.2005 - 31.10.2006	1	0.92	0.87	0.83	1.18	0.77
01.11.2006 - 31.10.2007	-2	0.87	0.86	0.84	1.08	0.81
01.11.2007 - 31.10.2008	0	0.92	0.92	0.86	1.08	0.84
01.11.2008 - 31.10.2009	-3	0.84	0.83	0.79	1.09	0.76
01.11.2009 - 31.10.2010	-3	0.90	0.90	0.86	1.09	0.84
01.11.2010 - 31.10.2011	2	0.96	0.94	0.84	1.11	0.78
01.11.2011 - 31.10.2012	-2	0.92	0.88	0.84	1.00	0.75
01.11.2012 - 31.10.2013	-1	0.94	0.94	0.90	1.08	0.85
Mittelwert über Einzeljahre	-1	0.90	0.88	0.83	1.10	0.79
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.91	0.9	0.84	1.1	0.8

4.6.8 Pegel Hölle/Selbitz

Kopfpegel; EZG: 213 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Der Pegel weist grundsätzlich hohe Modellgüten auf
- Übersicht: Tabelle 4.12, Anlage D14

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Das Hochwasser vom Februar 2005 sowie die erste Abflussspitze des HW vom Dezember 2007 werden eher unzureichend simuliert. Alle anderen Ereignisse werden recht gut abgebildet
- Trotz hoher Simulationsgüte weist der Pegel somit bei Hochwassern nur mittlere Vorhersagequalität auf
- Tabelle: Anlage J14
- Grafiken: Anlage E14

Besonderheiten:

- KG wurde auf 0.98 gesenkt. Somit ist bei diesem Pegelkontrollbereich im Gegensatz zu vielen anderen Pegeln der Niederschlag eher über- als unterschätzt
- Der Pegel Hölle war bei der Kalibrierung eher unkompliziert, es konnten recht schnell gute Parametersätze gefunden werden
- Gemäß Absprache mit dem AG wurde der PKB Hölle/Selbitz im Tape35 gemäß festgestelltem Bodenwechsel in zwei PKB aufgeteilt bei gleichlautenden Parameterwerten (siehe auch E-Mails von Frau Moretti vom 11. März 2016 und vom 21. März 2016 samt Anhängen). Dem AG steht somit die Möglichkeit offen, den Oberlauf des PKB anders zu parametrisieren (Stichwort: Virtueller Pegel)

Tabelle 4.12: Gütemaße des Pegels Hölle

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	0	0.90	0.90	0.89	1.07	0.79
01.11.2005 - 31.10.2006	1	0.95	0.89	0.88	1.10	0.78
01.11.2006 - 31.10.2007	1	0.92	0.92	0.88	0.93	0.85
01.11.2007 - 31.10.2008	2	0.91	0.91	0.93	1.01	0.82
01.11.2008 - 31.10.2009	1	0.84	0.83	0.83	1.00	0.75
01.11.2009 - 31.10.2010	-1	0.87	0.86	0.78	0.98	0.77
01.11.2010 - 31.10.2011	8	0.85	0.81	0.89	1.00	0.69
01.11.2011 - 31.10.2012	0	0.87	0.87	0.90	0.89	0.76
01.11.2012 - 31.10.2013	2	0.84	0.84	0.85	0.94	0.76
Mittelwert über Einzeljahre	2	0.88	0.87	0.87	0.99	0.77
Mittelwert Gesamtzeitraum	2	0.87	0.87	0.88	0.99	0.78

4.6.9 Pegel Blankenstein/Saale

Unterliegerpegel von Weißdorf, Fahrenbühl, Oberkotzau, Rehau, Kautendorf, Hof und Hölle;
EZG: 1010 km², PKB: 276 km² (27%)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Gute Effizienzen aber eher zu niedrige Bilanzen
- Übersicht: Tabelle 4.13 und Anlage D15. Außerdem Anlage K6 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Das Ereignis im Juni 2006 wird sehr gut simuliert, wohingegen echte Probleme beim Hochwasser Januar 2011 zutage treten. Hier wird auch mit WD-Opti noch ein 50 m³/s zu hoher Abflussscheitelwert ausgegeben. Es summieren sich letztlich die Ungenauigkeiten verschiedener Oberliegerpegel auf. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass bei der HW-Kalibrierung mit simulierten Zuflüssen gearbeitet wurde, somit können für den operationellen Betrieb bei weitem bessere Ergebnisse erwartet werden
- Tabelle: Anlage J15
- Grafiken: Anlage E15

Besonderheiten:

- Am Pegel Blankenstein sind vor allem die frühen Jahre (2005-2009) von extrem niedrigen Bilanzen geprägt. Dies verbessert sich allerdings in den jüngeren Jahren. Da dieses Phänomen aber am Oberlieger Hof nicht eintritt, muss von Messungenauigkeiten ausgegangen werden
- In Kälteperioden scheint der Pegel des öfteren frostbedingte Messfehler zu verursachen. Es lässt sich dann über bestimmte Zeiten ein Versatz zwischen gemessener und simulierter Ganglinie ausmachen, welcher oft plötzlich eintritt und auch wieder verschwindet
- Eine gemessene Ganglinie in 1h-Auflösung liegt erst seit dem hydrologischen Jahr 2006 vor, daher war hier der Eichzeitraum um 2 Jahre gegenüber den anderen Pegeln verkürzt

Tabelle 4.13: Gütemaße des Pegels Blankenstein

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.93	0.91	0.80	0.85	0.78
01.11.2006 - 31.10.2007	-1	0.77	0.76	0.72	0.76	0.74
01.11.2007 - 31.10.2008	-1	0.86	0.81	0.91	0.83	0.75
01.11.2008 - 31.10.2009	-3	0.74	0.67	0.79	0.79	0.70
01.11.2009 - 31.10.2010	-3	0.89	0.85	0.83	0.94	0.77
01.11.2010 - 31.10.2011	7	0.85	0.73	0.81	1.08	0.68
01.11.2011 - 31.10.2012	-1	0.89	0.88	0.85	0.93	0.76
01.11.2012 - 31.10.2013	0	0.93	0.93	0.90	0.99	0.83
Mittelwert über Einzeljahre	0	0.86	0.82	0.83	0.90	0.75
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.82	0.82	0.85	0.89	0.75

4.6.10 Pegel Marktleuthen/Eger

Kopfpegel, EZG: 115 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Der Pegel weist grundsätzlich hohe Modellgütemaße auf
- Übersicht: Tabelle 4.14, Anlage D1

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Um die Hochwasser weniger stark zu unterschätzen, wurde hier der Parameter KG auf 1.1 angehoben
- Hochwasser werden eher nicht gut simuliert, oftmals scheint das zur Verfügung stehende Wasservolumen nicht zu stimmen
- Tabelle: Anlage J1
- Grafiken: Anlage E1

Besonderheiten:

- Bei diesem Pegel haben sich im Zuge der Grobkalibrierung recht schnell vernünftige Effizienzen erzielen lassen
- Die Feinkalibrierung mit Fokus auf den Hochwassern gestaltete sich hier schwierig, bei der Parameterwahl mussten letztlich Kompromisse eingegangen werden

Tabelle 4.14: Gütemaße des Pegels Marktleuthen

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	0	0.59	0.53	0.71	0.84	0.68
01.11.2005 - 31.10.2006	1	0.69	0.65	0.88	0.99	0.76
01.11.2006 - 31.10.2007	-3	0.82	0.81	0.81	1.07	0.81
01.11.2007 - 31.10.2008	0	0.87	0.87	0.89	1.04	0.81
01.11.2008 - 31.10.2009	-4	0.80	0.80	0.73	1.07	0.76
01.11.2009 - 31.10.2010	-5	0.73	0.73	0.73	1.09	0.73
01.11.2010 - 31.10.2011	4	0.90	0.86	0.87	0.95	0.79
01.11.2011 - 31.10.2012	-3	0.88	0.86	0.88	0.88	0.80
01.11.2012 - 31.10.2013	-1	0.91	0.91	0.91	1.01	0.83
Mittelwert über Einzeljahre	-1	0.80	0.78	0.82	0.99	0.77
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.76	0.76	0.84	0.99	0.78

4.6.11 Pegel Hohenberg/Eger

Unterliegerpegel von Marktleuthen, EZG: 300 km², PKB: 185 km² (62%)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Hohe Güte der simulierten Ganglinie. Sehr gute Bilanzen sowie keine Notwendigkeit, KG zu verändern
- Übersicht: Tabelle 4.15, Anlage D2; Außerdem Anlage K1 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Die erste Abflussspitze beim Hochwasser im März 2006 wird kaum erfasst
- Das Ereignis im Mai 2006 kann nicht gut simuliert werden
- Das Ereignis im Dezember 2012 konnte insgesamt (Kurvenverlauf und Abflussscheitel) nicht gut abgebildet werden
- Somit lässt sich das schlechte Abschneiden des Pegels bei den Hochwassern auch auf eine geringe Anzahl an geeigneten N-Messstationen zurückführen
- Tabelle: Anlage J2
- Grafiken: Anlage E2

Besonderheiten:

- teilweise durch Kraftwerkssteuerung beeinflusst, im Mittel bis Niedrigwasser ist ein deutlicher Tagesgang vorhanden, was die Kalibrierung des PKB erschwert.

Tabelle 4.15: Gütemaße des Pegels Hohenberg

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	-3	0.65	0.62	0.60	0.91	0.65
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.84	0.84	0.73	0.96	0.74
01.11.2006 - 31.10.2007	-5	0.73	0.72	0.63	0.97	0.75
01.11.2007 - 31.10.2008	-4	0.82	0.82	0.77	0.97	0.77
01.11.2008 - 31.10.2009	-6	0.63	0.62	0.51	0.94	0.64
01.11.2009 - 31.10.2010	-8	0.53	0.48	0.47	1.00	0.67
01.11.2010 - 31.10.2011	-2	0.93	0.90	0.80	0.92	0.77
01.11.2011 - 31.10.2012	-6	0.87	0.86	0.84	0.93	0.77
01.11.2012 - 31.10.2013	-1	0.91	0.87	0.88	1.07	0.82
Mittelwert über Einzeljahre	-4	0.77	0.75	0.69	0.96	0.73
Mittelwert Gesamtzeitraum	-3	0.8	0.79	0.72	0.97	0.73

4.6.12 Pegel Lorenzreuth/Röslau

Kopfpegel, EZG: 122 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Effizienz in jüngerer Zeit besser
- Generelle Volumenprobleme beim Niederschlag, aber Kurvenverlauf passt hier generell ganz gut!
- Übersicht: Tabelle 4.16, Anlage D3

Bewertung Hochwasserereignisse:

- HW werden tendenziell eher unterschätzt
- Schnee spielt große Rolle, dieser kann auch ausreichend gut parametrisiert werden
- Jan 2011 HW wird hier überdurchschnittlich gut getroffen. Restliche Hochwasser mittelmäßig bis gut
- Tabelle: Anlage J3
- Grafiken: Anlage E3

Besonderheiten:

- Generell zu geringe Niederschläge -> KG musste auf 1.1 angehoben werden.
- Frühjahrsschnee generell schwierig

Tabelle 4.16: Gütemaße des Pegels Lorenzreuth

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	4	0.41	0.41	0.61	0.90	0.63
01.11.2005 - 31.10.2006	0	0.92	0.89	0.89	1.02	0.80
01.11.2006 - 31.10.2007	1	0.76	0.75	0.83	0.92	0.78
01.11.2007 - 31.10.2008	1	0.86	0.79	0.89	0.88	0.78
01.11.2008 - 31.10.2009	-1	0.65	0.63	0.78	0.92	0.75
01.11.2009 - 31.10.2010	0	0.58	0.57	0.71	0.96	0.76
01.11.2010 - 31.10.2011	0	0.93	0.92	0.84	0.86	0.80
01.11.2011 - 31.10.2012	1	0.87	0.85	0.88	0.90	0.80
01.11.2012 - 31.10.2013	-1	0.88	0.86	0.90	1.02	0.82
Mittelwert über Einzeljahre	1	0.76	0.74	0.81	0.93	0.77
Mittelwert Gesamtzeitraum	1	0.8	0.79	0.83	0.93	0.77

4.6.13 Pegel Marktredwitz/Kössein

Kopfpegel, EZG: 70 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Der Pegel schneidet in Puncto Güte und Bilanz überdurchschnittlich gut ab
- Übersicht: Tabelle 4.17, Anlage D4

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Mit WD-Opti werden an diesem Pegel sehr gute HW-Vorhersagen erzielt. Ohne WD-Opti werden sowohl das HW vom Mai 2006 als auch das HW vom Januar 2011 deutlich überschätzt.
- Grundsätzlich kann bei diesem Pegel aber von soliden Vorhersagen ausgegangen werden
- Tabelle: Anlage J4
- Grafiken: Anlage E4

Besonderheiten:

- Die Niederschlagsstationen scheinen bei diesem Pegel recht gute Daten zu liefern, KG wurde bei der Kalibrierung letztlich auf 0.98 gesetzt.

Tabelle 4.17: Gütemaße des Pegels Marktredwitz

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	1	0.67	0.60	0.75	1.10	0.61
01.11.2005 - 31.10.2006	1	0.69	0.69	0.81	1.02	0.68
01.11.2006 - 31.10.2007	1	0.85	0.84	0.82	0.93	0.76
01.11.2007 - 31.10.2008	1	0.87	0.87	0.90	1.01	0.78
01.11.2008 - 31.10.2009	-1	0.71	0.68	0.77	0.99	0.69
01.11.2009 - 31.10.2010	0	0.71	0.69	0.74	1.02	0.74
01.11.2010 - 31.10.2011	2	0.84	0.40	0.84	1.12	0.64
01.11.2011 - 31.10.2012	0	0.81	0.80	0.82	0.83	0.70
01.11.2012 - 31.10.2013	1	0.83	0.78	0.79	1.02	0.72
Mittelwert über Einzeljahre	1	0.77	0.71	0.80	1.00	0.70
Mittelwert Gesamtzeitraum	1	0.73	0.68	0.82	1.01	0.70

4.6.14 Pegel Arzberg/Röslau

Unterliegerpegel von Lorenzreuth und Marktredwitz, EZG: 291 km², PKB: 99 km² (34%)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Hohe Güte der simulierten Ganglinie. Sehr gute Bilanzen sowie keine Notwendigkeit, KG zu verändern
- Übersicht: Tabelle 4.18, Anlage D5; Außerdem Anlage K2 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- HW-Vorhersagequalität des Pegels ist für die ausgewählten Ereignisse sehr gut, sofern Wasserdargebot stimmt (Juni 2010 z.B. zu wenig Niederschlagsinput vorhanden)
- Sowohl Winter als auch Sommer hohe Vorhersagequalität
- Tabelle: Anlage J5
- Grafiken: Anlage E5

Besonderheiten:

- Mit werden gemessener Zulaufganglinie werden hier sehr gute Effizienzen > 0.9 erreicht
- Auch ohne gemessene Zulaufganglinie ist bereits die Grobkalibrierung gut

Tabelle 4.18: Gütemaße des Pegels Arzberg

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	In NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	1	0.60	0.60	0.74	1.08	0.68
01.11.2005 - 31.10.2006	1	0.87	0.87	0.88	1.05	0.81
01.11.2006 - 31.10.2007	0	0.82	0.80	0.76	0.92	0.79
01.11.2007 - 31.10.2008	0	0.89	0.88	0.92	1.03	0.85
01.11.2008 - 31.10.2009	-2	0.67	0.65	0.79	0.92	0.72
01.11.2009 - 31.10.2010	-1	0.78	0.78	0.81	0.99	0.79
01.11.2010 - 31.10.2011	3	0.88	0.88	0.88	0.86	0.78
01.11.2011 - 31.10.2012	0	0.90	0.89	0.89	0.95	0.80
01.11.2012 - 31.10.2013	0	0.89	0.87	0.90	1.07	0.79
Mittelwert über Einzeljahre	0	0.81	0.80	0.84	0.99	0.78
Mittelwert Gesamtzeitraum	0	0.83	0.83	0.86	0.99	0.78

4.6.15 Pegel Dobrigau/Wondreb

Kopfpegel, EZG: 94 km²

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Der Pegel Dobrigau hat im Mittel eine sehr ausgeglichene Bilanz, schwankt aber in einigen Jahren deutlich. Die Simulationsergebnisse sind über alle Jahre hinweg gut, wobei die Stärke dieses Pegels eher im Niedrig- bis Mittelwasserbereichs liegt. Übersicht: Tabelle 4.19, Anlage D6

Bewertung Hochwasserereignisse:

- Trotz intensiver Grob- und Feinkalibrierung konnte an diesem Pegel keine gute Hochwasservorhersagegüte erzielt werden. Mittlere Hochwasser werden tendenziell eher unterschätzt. Im Allgemeinen ist das Timing bezüglich der Hochwasserwellen nicht gut, wobei hier kein eindeutiger Trend festzustellen war. Die Gütemaße sind die Hochwasser betreffend gut, visuell fallen die Unzulänglichkeiten aber dann ins Auge.
- Der Pegel weist somit jahreszeitunabhängig eine mittelmäßige HW-Vorhersagegüte auf
- Tabelle: Anlage J6
- Grafiken: Anlage E6

Besonderheiten:

- Ab 2008 sorgt die neu hinzugekommene Niederschlagsstation Tirschenreuth für bessere Ausgangsdaten: Sie befindet sich näher am Pegelkontrollbereich als die anderen einflussreichen Stationen Mähring, Plössberg-Liebenstein und Konnersreuth

Tabelle 4.19: Gütemaße des Pegels Dobrigau

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	-4	0.67	0.65	0.80	0.97	0.73
01.11.2005 - 31.10.2006	-7	0.77	0.77	0.73	1.03	0.72
01.11.2006 - 31.10.2007	-5	0.73	0.55	0.45	1.12	0.72
01.11.2007 - 31.10.2008	-7	0.74	0.72	0.83	1.19	0.73
01.11.2008 - 31.10.2009	-7	0.56	0.56	0.74	0.95	0.74
01.11.2009 - 31.10.2010	-8	0.78	0.77	0.71	0.97	0.78
01.11.2010 - 31.10.2011	5	0.66	0.52	0.57	0.87	0.69
01.11.2011 - 31.10.2012	-7	0.76	0.74	0.82	0.80	0.75
01.11.2012 - 31.10.2013	-4	0.79	0.79	0.77	0.99	0.76
Mittelwert über Einzeljahre	-4.9	0.72	0.67	0.71	0.99	0.74
Mittelwert Gesamtzeitraum	-5	0.70	0.69	0.73	0.98	0.73

4.6.16 Pegel Waldsassen/Wondreb

Unterliegerpegel von Dobrigau, EZG: 230 km², PKB: 136 km² (59%)

Bewertung Gesamtzeitraum:

- Etwas erhöhte Bilanzen, vor allem in den Jahren 2004-2008, in jüngerer Zeit bessere Situation
- Ansonsten aber gute simulierte Ganglinie, in den Jahren 2012 und 2013 sogar sehr gut, somit tendenziell besser werdend
- Übersicht: Tabelle 4.20, Anlage D7; Außerdem Anlage K3 (Gütemaße unter Verwendung gemessener Zulaufganglinien)

Bewertung Hochwasserereignisse:

- HW-Vorhersagequalität des Pegels ist für die ausgewählten Ereignisse mittelmäßig, ähnlich dem Pegel Dobrigau treten vereinzelt Timing-Probleme bei den Hochwasserwellen auf
- Im Februar 2005 verursacht ein zu niedriges Wasserdargebot schlechte Ergebnisse
- Grundsätzlich können die Hochwasser mit WD-Opti aber verlässlich simuliert werden
- Tabelle: Anlage J7
- Grafiken: Anlage E7

Besonderheiten:

- Ähnlich wie am PKB Dobrigau hat auch für Waldsassen die höhere Messnetzdicke in jüngerer Zeit einen positiven Effekt auf die Modellgüte

Tabelle 4.20: Gütemaße des Pegels Waldsassen

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	ln NSE [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2004 - 31.10.2005	-3	0.62	0.60	0.65	1.16	0.68
01.11.2005 - 31.10.2006	-3	0.80	0.79	0.51	1.10	0.65
01.11.2006 - 31.10.2007	0	0.73	0.68	0.52	1.17	0.71
01.11.2007 - 31.10.2008	-2	0.82	0.82	0.78	1.22	0.71
01.11.2008 - 31.10.2009	-2	0.57	0.57	0.68	1.04	0.67
01.11.2009 - 31.10.2010	-5	0.73	0.72	0.58	1.13	0.71
01.11.2010 - 31.10.2011	8	0.72	0.59	0.82	0.96	0.71
01.11.2011 - 31.10.2012	-2	0.87	0.80	0.86	0.89	0.74
01.11.2012 - 31.10.2013	0	0.88	0.88	0.86	1.05	0.77
Mittelwert über Einzeljahre	-1	0.75	0.72	0.69	1.08	0.71
Mittelwert Gesamtzeitraum	1	0.74	0.73	0.74	1.07	0.71

5. Besondere Testsimulationen

5.1 Testsimulation mit RADOLAN Niederschlagsdaten

Vom Auftraggeber wurde für den Zeitraum Mai bis Juni 2013 ein RADOLAN-Datensatz mit 3 x 3 km Rasterauflösung geliefert, welcher das SEW Projektgebiet inklusive einer 10 km Pufferzone abdeckt. Um die Daten in LARSIM verwenden zu können, mussten die einzelnen Rasterzellen zusätzlich mit einer aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten „Stationshöhe“ versehen werden. Jeder der 581 RADOLAN-Rasterpunkte geht somit als „Niederschlagsstation“ ins Modell ein. LARSIM sucht für jedes Teilgebiet die 4 bestgelegenen RADOLAN- Zellen aus, welche somit deutlich näher an den einzelnen Teilgebieten liegen als bei konventioneller Verwendung von Niederschlagsstationen. Dadurch ist vor allem für Teilgebiete mit schlechter Abdeckung durch konventionelle Messstationen ein deutlicher Anstieg in der Simulationsgüte zu erwarten, sofern die RADOLAN-Datengüte ebenfalls hoch ist.

Die Simulation für das Gesamtgebiet wurde genau wie bei der Pegelkalibrierung mit simulierten Zulaufganglinien durchgeführt. Es wurden keine spezifischen Anpassungen (z.B. KG-Faktor) an die neuen Niederschlagsinputdaten vorgenommen.

Im Kapitel I des Anlagenbands sind die Ergebnisgrafiken aller Pegel über den Testzeitraum Mai/Juni 2013 zu sehen. Dargestellt sind sowohl die gemessene als auch die herkömmlich simulierte Abflussganglinie (blau bzw. rot), sowie die mit RADOLAN-Niederschlagsdaten simulierten Werte (türkis). Am Pegel Arzberg (Anlage I.5) kann anhand der RADOLAN-Daten die bisher fälschlich simulierte Abflussspitze nach dem 10. Juni deutlich verbessert werden. Es gibt aber auch Beispiele von schlechteren Ergebnissen durch die RADOLAN-Daten, z.B. wird am Pegel Waldsassen (Anlage I.7) am 21. Juni eine deutliche Abflussspitze simuliert, welche sich nicht in den gemessenen Daten widerspiegelt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die breitere Datengrundlage keine konsequente Verbesserung für den zweimonatigen Testzeitraum erzielt werden konnte. Hierbei muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Testumgebung auf den fertig kalibrierten Parametern mit den herkömmlichen Niederschlagsstationen basiert. Würde man das Modell spezifisch für die RADOLAN-Daten neu kalibrieren, so wären weit bessere Ergebnisse zu erwarten. Wie die Erfahrungen im Kalibriervorgang des SEW-Projekts gezeigt haben, wäre diese bessere Gebietsabdeckung für einige Pegelkontrollbereiche (z.B. Dobrigau, Waldsassen, Kautendorf, Reihau) von hohem Wert gewesen. Hierbei spielen auch die in Höhenlagen häufigen Luv/Lee- Effekte eine Rolle, welche vom Radarbild mit erfasst werden.

Abschließend lässt sich also eine Nachbesserung des SEW-WHM auf der Grundlage von RADOLAN-Daten durchaus begrüßen, sofern diese Daten in hoher Güte vom DWD zur Verfügung gestellt werden können. Da die Daten laut DWD auch mit einer räumlichen Auflösung von einem Quadratkilometer angeboten werden (DWD, 2015) wäre dies dem hoch aufgelösten SEW-Gebiet möglicherweise weiter zuträglich.

5.2 Testsimulation mit Extremereignis

Die Lauffähigkeit des Modells bei extremen Hochwasserereignissen wird durch die Wahl eines hohen Korrekturfaktors für den Niederschlag getestet. Hierbei wurde der Korrekturfaktor auf 4,0 gesetzt.

Der damit simulierte Abfluss liegt dadurch bei fast allen Pegeln deutlich über den vom Auftraggeber gelieferten HQ₁₀₀₀-Werten. Bild 5.1 und Bild 5.2 zeigen das Ergebnis der Lauffähigkeitstests an den ausgewählten Pegel Hof/Sächsische Saale (HQ₁₀₀₀ = 240 m³/s) und Pegel Hohenberg/Eger (HQ₁₀₀₀ = 195 m³/s).

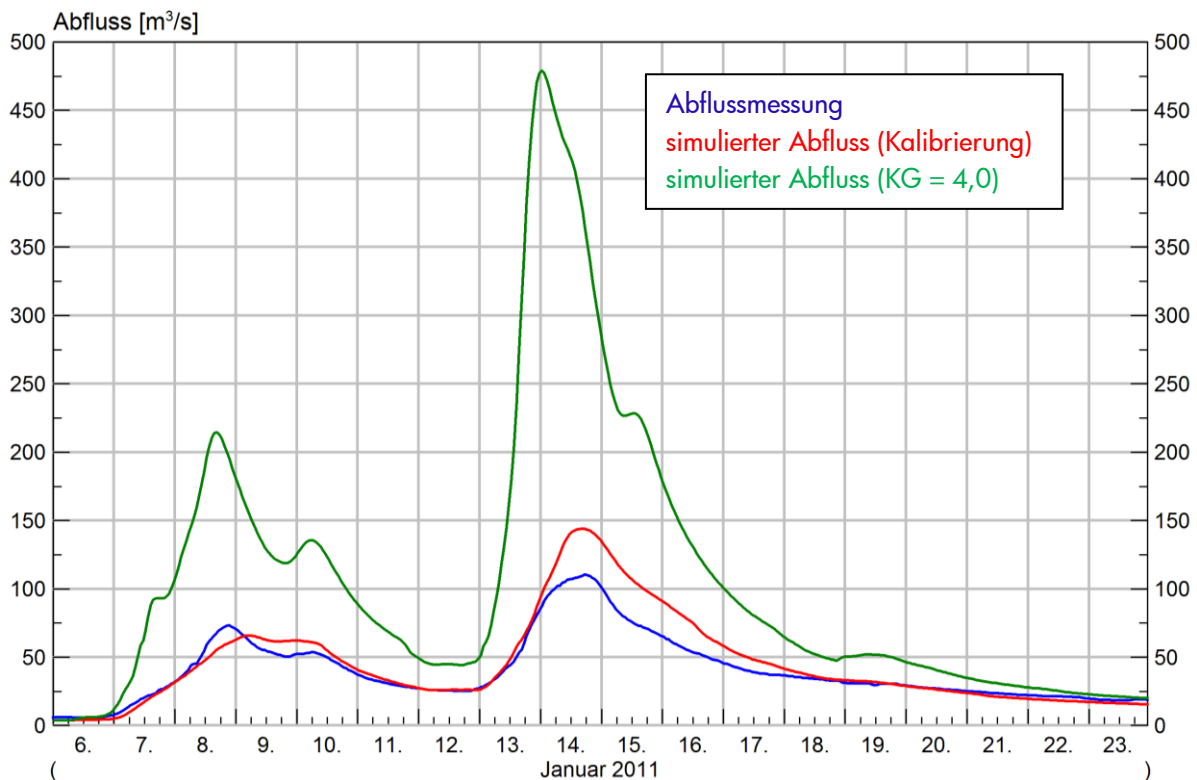


Bild 5.1: Pegel Hof/Sächsische Saale mit einem KG von 4,0 (Hochwasser Januar 2011)

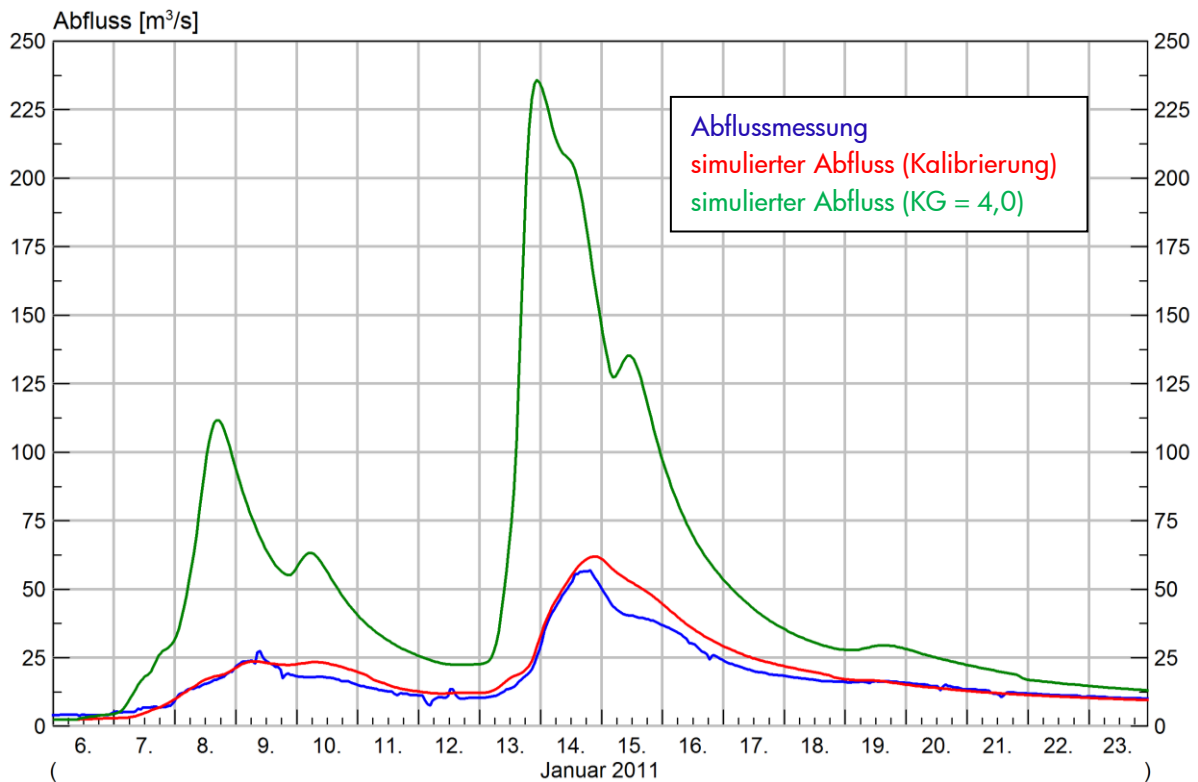


Bild 5.2: Pegel Hohenberg/Eger mit einem KG von 4,0 (Hochwasser Januar 2011)

Damit kann belegt werden, dass mit dem WHM SEW auch bei extremen Abflüssen noch ordnungsgemäße Berechnungen durchgeführt werden können und das Modell bei derartigen Belastungen nicht abstürzt.

Die Eingangs- und Ausgangsdatensätze des Lauffähigkeitstests des Modells bei extremen Hochwasserereignissen wurden dem Auftraggeber mit der Datenlieferung übergeben.

6. Validierung

6.1 Validierung der Schneesimulation

Alle Anpassungen, die nach der eigentlichen Schneekalibrierung im Rahmen der Grobeichung durchgeführt wurden (siehe Kapitel 4.1 samt Tabelle 4.1 bzw. Bild 4.2 bis Bild 4.4), wurden nur nach sorgfältiger Prüfung der Simulationsergebnisse vorgenommen. Im Zweifel wurde jedoch dem Simulationsergebnis des Abflusses am Pegel eine größere Bedeutung zugemessen als dem punktuellen Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Schneewasseräquivalent.

Die zusätzliche Validierung der Schneesimulation wurde in Form eines 3er-Kartenvergleichs durchgeführt: Zuerst wurden die an 18 Schneemessstationen gemessenen Schneewasseräquivalente (= SWEQ) in die Fläche interpoliert. Hierzu wurde das Programmpaket „HVZ-SnowRegio“ verwendet mit einem Interpolationsraster von 1x1 km (d.h. 2271 Raster) und einem höhenabhängigen External Drift Kriging-Verfahren. Als Zweites wurden die innerhalb LARSIM simulierten SWEQ-Werte in KALA-Dateien ausgegeben und mit dem KALA-Viewer flächig dargestellt. Als Drittes stellte der AG SWEQ-Grafiken bereit, welche aus dem SNOW4-Produkt des DWD stammen.

Dieser bildliche Vergleich wurde in drei verschiedenen Winterperioden jeweils vor, während und nach der Schneeschmelzperiode durchgeführt. Die somit neun Zeitpunkte wurden sorgfältig ausgewählt und mit dem AG abgestimmt:

Winter 2005/2006: 04.03.2006, 13.03.2006, 29.03.2006

Winter 2010/2011: 28.12.2010, 08.01.2011, 15.01.2011

Winter 2012/2013: 26.02.2013, 08.03.2013, 15.03.2013

Die Ergebniskarten des 3er-Vergleichs befinden sich allesamt in Anlage L des Anlagenbands. Sie zeigen zum einen, dass es durchaus Unterschiede zwischen den drei SWEQ-Karten gibt. Dabei ist es wichtig, auf die vom AG bereitgestellten SNOW4-SWEQ-Grafiken und damit auf die unterschiedlich fixierten Legenden und Wertebereiche zu achten.

Die von LARSIM simulierten SWEQ-Werte weichen z.T. erheblich von den beiden letztlich auf Messwerten beruhenden SWEQ-Produkten (HVZ-SnowRegio und SNOW4) ab. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass bei den mit LARSIM simulierten Werten ohne Nachführung gearbeitet wurde. D.h. Abweichungen innerhalb eines Winters (oder einer Schneeperiode) werden nicht ausgeglichen. Für den zukünftigen OP-Betrieb wird deshalb zur Verwendung einer operationellen Schneenachführung geraten.

An dieser Stelle wird auch nochmals an den punktuellen Vergleich der SWEQ-Entwicklung hingewiesen, welcher im Rahmen der Grobeichung bereits erfolgte. Dieser punktuelle Vergleich auf TGB-Ebene erbrachte überwiegend gute Übereinstimmungen zwischen SWEQ-Messwerten und mit LARSIM simulierten SWEQ-Werten (siehe Kapitel 4.1).

Bei den Gründen der SWEQ-Unterschiede in der Anlage L wird zudem darauf verwiesen zu beachten, dass Besonderheiten einzelner Pegelkontrollbereiche (PKB) sich negativ auf die flächenhafte Darstellung des $SWEQ_{sim}$ auswirken können. Beispielsweise ergab die Eichung am Pegel Fahrenbühl/Lamitz den insgesamt höchsten Wert für den Parameter T_{mit_Sr} (= mittlere Grenztemperatur [°C] zur Berechnung eines Schnee-Regen-Gemischs), was bedeutet, dass in diesem PKB relativ zu den Nachbar-PKB eichbedingt mehr Regen fällt und somit dort die SWEQ-Werte generell niedriger ausfallen.

Ein Manko der LARSIM-Schneedeckenmodellierung wurde in den nordöstlichen Hochlagen des Fichtelgebirges beobachtet. Dort wurden die zu erwartenden hohen SWEQ-Werte (siehe auch interpolierte Messdaten bzw. SNOW4) mit LARSIM deutlich unterschätzt. Bei einer detaillierten Ursachenforschung trat zu Tage, dass die Niederschlagsmessstationen Waldstein (Uni) und vor allem Großer Kornberg anscheinend generell zu wenig Niederschlag messen und so maßgeblich dazu beitragen, dass in diesen Hochlagen im Winter zu wenig Schnee simuliert wird. Deshalb plant das BLfU in einem Folgeprojekt, diese beiden Niederschlagsmessstationen (stammen beide von externen Betreibern) genauer zu inspizieren, um hoffentlich bereits vor dem nächsten Winter eine Verbesserung der Situation erzielen zu können.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Langzeitsimulation der Schneedecke problematisch ist und zu merklichen Fehleinschätzungen führen kann. Dieses Problem kann auch durch den Einsatz der neuen LARSIM-Option SCHNEEREGEN nicht gänzlich behoben werden. Im schneereichen SEW-Gebiet wird deshalb empfohlen, im OP-Betrieb mit einer Schneenachführung zu arbeiten, mit der mehrfach im Winter die SWEQ-Werte nachjustiert werden.

6.2 Validierung der Abflusssimulation

6.2.1 Validierung des gesamten Abflussbereichs

Die Validierung des gesamten Abflussbereichs der einzelnen Pegel erfolgte bereits im Zuge der Kalibrierung (Abschnitt 4.6.1 ff.), sowie Anlage D (jahresweiser Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen) und Anlage K (Gütemaße der Unterliegerpegel mit gemessener Zulaufganglinie).

Eine rasche Übersicht über die Bewertung für den gesamten Abflussbereich gewähren Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5. Genauere pegelspezifische Informationen sind dem Unterkapitel für den jeweiligen Pegel in Kapitel 4.6 zu entnehmen.

Die außerdem vom Auftraggeber geforderten Scatterplots von gemessenen und simulierten Abflüssen sind in Anlage F pro Pegel dargestellt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass X- und Y-Achse dieselbe Skalierung haben und somit die 1:1 Linie (in blau) genau im 45° Winkel abstrahlt. Diese Darstellungsart hat den Vorteil, dass auf einen Blick eine relativ hohe Simulationsgüte (z.B. Hof, Hölle) von eher unsichereren Pegeln (Kautendorf, Weißdorf) unterschieden werden kann.

Ebenfalls eine schnelle Übersicht über die Güte bzw. Bilanz eines Pegels geben die in Anlage G dargestellten Summenlinien der kumulativen Abflüsse (gemessen und simuliert) über den Gesamtzeitraum.

6.2.2 Validierung Niedrigwasser

Die Validierung im Niedrigwasserbereich umfasst Vorhersagetests für folgende Zeiträume (Tabelle 6.1):

Tabelle 6.1: Übersicht der Niedrigwasser-Validierungszeiträume

Pegel	Gewässer	MNQ (hnd.bayern.de, m³/s)	NW-Bereich	
Dobrigau	Wondreb	0.258	Ende Juli bis Anfang Oktober 2009	Ende Juli bis Anfang Oktober 2012
Waldsassen	Wondreb	0.556	Ende Juli bis Anfang Oktober 2009	Ende Juli bis Anfang Oktober 2012
Marktleuthen	Eger	0.45	Ende Juli bis Mitte September 2009	Ende Juli bis Mitte September 2012
Hohenberg	Eger	0.854	Ende Juli bis Mitte September 2009	Ende Juli bis Mitte September 2012
Marktrechwitz	Koessein	0.186	20.Juli.2009 bis Mitte August 2009	Ende Juli bis Ende August 2012
Lorenzreuth	Roeslau	0.47	Ende Juli bis Ende August 2009	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Arzberg	Roeslau	0.933	Ende Juli bis Ende August 2009	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Rehau	Schwesnitz	0.169	Anfang Oktober bis Ende November 2005	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Kautendorf	Südliche Regnitz	0.091	Ende Juli bis Anfang September 2009	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Weissdorf	Sächsische Saale	0.122	Anfang Oktober bis Ende November 2005	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Oberkotzau	Sächsische Saale	0.639	Anfang Oktober bis Ende November 2005	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Hof	Sächsische Saale	0.943	Anfang Oktober bis Ende November 2005	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Blankenstein	Sächsische Saale	1.97	38657	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Fahrenbühl	Lamitz	0.023	Juli-August 2009	20.Juli.2012 bis Ende August 2012
Hölle	Selbitz	0.534	20.Juli bis Ende August 2009	20.Juli.2012 bis Ende August 2012

Die Vorhersagetests wurden dabei in 24-Stunden-Schritten für die maximale Vorhersagetiefe von 168 h durchgeführt (siehe digitale Datenlieferung bzw. DVD) und anschließend mit ProFoUnD ausgewertet (siehe digitale Datenlieferung bzw. DVD) bzw. grafisch aufbereitet (Anlage M). Die ausgewerteten Vorhersagetiefen sind 24, 48, 72, 96, 120, 144 und 168 Stunden. In Abschnitt 6.2.4 sind überdies genauere Ausführungen zur LARSIM-Kalibrierung während der Vorhersageläufe aufgeführt.

An den meisten Pegeln ist das Ergebnis der grafischen Darstellung der Niedrigwasservalidierung (Anlage M) als sehr gut einzustufen. Selbst eher schwächere Pegel wie Kautendorf (M.12) weisen hier ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis auf.

6.2.3 Validierung Mittelwasser

Die Validierung im Mittelwasserbereich umfasst Vorhersagetests für folgende Zeiträume (siehe folgende Tabelle 6.2):

Tabelle 6.2: Übersicht der Mittelwasser-Validierungszeiträume

Pegel	Gewässer	MQ (hnd.bayern.de, m³/s)	MW-Bereich	
Dobrigau	Wondreb	0.842	März bis Mitte April 2008	März bis Mai 2013
Waldsassen	Wondreb	1.9	März bis Mitte April 2008	März bis Mai 2013
Marktleuthen	Eger	1.77	März bis Mitte April 2008	Aug 10
Hohenberg	Eger	3.59	März bis Mitte April 2008	Aug 10
Marktrechwitz	Koessein	0.85	März bis April 2008	Aug 10
Lorenzreuth	Roeslau	1.83	März bis Mitte April 2008	Aug 10
Arzberg	Roeslau	3.42	März bis Mitte April 2008	Aug 10
Rehau	Schwesnitz	0.677	März bis April 2008	März bis Mitte Mai 2013
Kautendorf	Südliche Regnitz	0.897	März bis April 2008	März bis Mitte Mai 2013
Weissdorf	Sächsische Saale	0.734	März bis April 2008	Aug 10
Oberkotzau	Sächsische Saale	2.76	März bis April 2008	Aug 10
Hof	Sächsische Saale	5.42	März bis April 2008	Aug 10
Blankenstein	Sächsische Saale	11.8	März bis April 2008	März bis Mitte Mai 2013
Fahrenbühl	Lamitz	0.13	März bis April 2008	Aug 10
Hölle	Selbitz	3	März bis Mitte April 2008	Aug 10

Die Vorhersagetests wurden dabei (analog zum Niedrigwasser) in 24-Stunden-Schritten für die maximale Vorhersagetiefe von 168 h durchgeführt (siehe digitale Datenlieferung bzw. DVD) und anschließend mit ProFoUnD ausgewertet (siehe digitale Datenlieferung bzw. DVD) bzw. grafisch aufbereitet (Anlage N). Die ausgewerteten Vorhersagetiefen sind 24, 48, 72, 96, 120, 144 und 168 Stunden. In Abschnitt 6.2.4 sind überdies genauere Ausführungen zur LARSIM-Kalibrierung während der Vorhersageläufe ausgeführt.

An den meisten Pegeln ist das Ergebnis der grafischen Darstellung der Mittelwasserkalibrierung ähnlich wie beim Niedrigwasser als sehr gut einzustufen. Die Grafiken dazu finden sich in Anlage N. Allerdings gibt es deutlich Unterschiede, z.B. scheint das Ergebnis für den Pegel Waldsassen (N.7) recht gut zu sein, wohingegen Weißdorf (N.8) durchaus Schwächen bei der Vorhersage von Abflussspitzen im Mittelwasserbereich hat. Generell spiegelt die Validierung von Mittel- und Niedrigwasserbereich aber die gute Simulationsqualität im Gesamtzeitraum wider. Auch die grundsätzlich hohen Werte von > 0.7 (Tabelle 4.4) für das Gütemaß In NSE für alle Pegel außer Fahrenbühl finden somit Bestätigung.

6.2.4 Spezifische Validierung für Hochwasser und Vorhersagetests

Die spezifische Validierung für den Hochwasserbereich umfasst die statistische Auswertung der Hochwassersimulationen im Kalibrierzeitraum (Anlage J), die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse für fünf Hochwasser je Pegel (Anlage E), sowie die Vorhersagetests für fünf in Absprache mit dem Auftraggeber ausgewählte Hochwasserereignisse. Diese sind in Anlage O.1 tabellarisch dargestellt, wobei jeweils Sommer- sowie Winterereignisse ausgewählt wurden.

Statistische Auswertung der Hochwasser im Kalibrierungszeitraum (Anlage J):

Für jeden Pegel wurden die im Kalibrierzeitraum jeweils relevanten Hochwasser separat ausgewählt. Diese Hochwasser wurden bei der Kalibrierung gesondert betrachtet und zur Anpassung der hochwasserrelevanten Parameter genutzt. Hierfür wurden die Ereignisse jeweils mit und ohne gemessene Zuläufe sowie mit und ohne WD-Opti betrachtet.

In Anlage J werden die mit WD-Opti und simulierten Zuläufen durchgeführten Hochwassersimulationen statistisch ausgewertet. Die Auswertung umfasst die Modelleffizienz und die Volumeneffizienz des simulierten Ereignisses, den hinsichtlich der höchsten Modelleffizienz optimalen Lag für das Gesamtereignis und den WD-Faktor, der angewandt wurde, um das simulierte Abflussvolumen an das gemessene Abflussvolumen anzupassen. An Kopfpegeln kann der WD-Faktor ein guter Hinweis darauf sein, ob die Abflussvolumina der Hochwasser tendenziell falsch eingeschätzt werden. Für Unterliegerpegel ist die Interpretation hingegen schwieriger, da die WD-Faktoren PKB-spezifisch sind und somit in erheblichem Maße von den Zuflüssen abhängen.

Im zweiten Teil der Ergebnistabellen werden die simulierten und die gemessenen Scheitel hinsichtlich zeitlichem Auftreten und maximalem Abfluss verglichen. Hieraus wird deutlich, ob ggfs. systematische Abweichungen vorliegen.

Grafische Darstellung von fünf Hochwassern je Pegel (Anlage E):

In Anlage E werden die Simulationsergebnisse für drei ausgewählte Hochwasser mit den jeweiligen Messwerten verglichen.

Für alle Hochwasser erfolgt der Vergleich zu den gemessenen Ganglinien mit und ohne Wasserdargebotsoptimierung (LARSIM Option WD-NACH SIMZEITRAUM). Diese Option bewirkt folgendes: „[Es] wird innerhalb des gesamten Simulationszeitraumes eine Nachführung des Wasserdargebots vorgenommen, so dass die Bilanzen von gemessenen und simulierten Werten im Simulationszeitraum im Mittel übereinstimmen“ (Haag et. al. 2016). Dadurch können auch Hochwasser kalibriert werden, bei denen das Wasserdargebot offensichtlich nicht stimmt (z.B. zu geringer Niederschlagsinput aufgrund eines konvektiven Sommerereignisses mit weit entfernter N-Messstation).

Der Vergleich ermöglicht es einerseits, die maßgeblichen Fehlerquellen (Fehleinschätzung des Abflussvolumens, Laufzeitprobleme, Messfehler) getrennt einzuschätzen. Andererseits werden eventuelle Inkonsistenzen zwischen den gemessenen Abflüssen von aufeinander folgenden Pegeln sichtbar.

Die Bewertung der Ergebnisse ist bereits in die Kalibrierung eingeflossen und wird daher in Kapitel 4 ggfs. gesondert erwähnt. Im Zweifelsfall wurde das Hauptaugenmerk dabei auf die bestmögliche Abbildung der extremen HW (März 2006 bzw. Januar 2011) gelegt. Die Ergebnisbewertung bildete zudem die Grundlage für die Konfiguration der Datei pegel.stm für die nachfolgend beschriebenen Vorhersagetests.

Vorhersagetests für 5 Hochwasser pro Pegel (Anlage O):

Für insgesamt 14 Zeiträume (Anlage O.1) wurden Vorhersagetests für das gesamte Einzugsgebiet durchgeführt und für alle Pegel ausgewertet. Diese Zeiträume wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt und stellen eine Mischung aus bereits kalibrierten und unkalibrierten Ereignissen dar. Dies war erforderlich, da keine ausreichende Anzahl unkalibrierter Ereignisse zur Verfügung stand. Die vollständigen Ergebnisse der Vorhersagetests sind in der Datenlieferung enthalten. Die Ergebnisse für je acht ausgewählte Vorhersage-Tiefen sind in Anlage O grafisch dargestellt.

Da es im operationellen Betrieb üblich ist, die teils während der Kalibrierung angepassten KG-Werte auf 1 zu setzen, wurden auch die Vorhersagetests mit der LARSIM-Option WHM-KG-VHS-AUS gerechnet.

Die Datei pegel.stm wurde für die Vorhersagetests analog zum operationellen Betrieb konfiguriert. Dabei wurden die Einstellungen in der Datei pegel.stm hinsichtlich der für die ARIMA-Korrektur verwendeten Anzahl der Zeitschritte iterativ optimiert. Mit der so vorbereiteten Umgebung wurden für die jeweiligen Zeiträume stündliche Vorhersagen unter quasi-operationellen Bedingungen berechnet. Das heißt, dass die operationelle Modellnachführung und die ARIMA-Korrektur gemäß den Vorgaben in der Datei pegel.stm angewandt wurden und gemessene Abflüsse bis zum Vorhersagezeitpunkt nach Unterstrom weitergegeben wurden, wie dies in der pegel.stm vereinbart war. Für den Vorhersagezeitraum wurden jedoch (analog zum operationellen Betrieb) keine Abflussmessdaten verwendet. Alle Vorhersagen wurden mit der maximalen Vorhersagetiefe von 72 Stunden berechnet. Für den Vorhersagezeitraum wurden als meteorologische Antriebsdaten die Messdaten verwendet.

In der Datenlieferung werden alle stündlich berechneten Vorhersagen zur Verfügung gestellt. Zur möglichst übersichtlichen Veranschaulichung der Ergebnisse wurden die einzelnen Vorhersagen

mit Hilfe von ProFoUnD zu zusammenhängenden Ganglinien unterschiedlicher Vorhersagetiefen zusammengefügt. Im Einzelnen wurden hierfür zusammenhängende Ganglinien für Vorhersagetiefen von 1h, 3h, 6h, 12h, 24h, 36h, 48h und 72 h erstellt. Um eine detaillierte Analyse für einzelne Vorhersagetiefen zu ermöglichen, werden die so erstellten Ganglinien inklusive der ProFoUnD -Auswertungen ebenfalls alle in der Datenlieferung bereit gestellt.

In Anlage O werden pro Pegel und Hochwasser die zusammenhängenden Vorhersageganglinien aller Vorhersagetiefen mit den gemessenen Abflüssen verglichen. Bei dieser Darstellungsart muss beachtet werden:

- Die Linie für die Vorhersagetiefe 1 liegt meist direkt auf der gemessenen Ganglinie, da die ARIMA-Korrektur in der Regel für Vorhersagen von einer Stunde den exakt gemessenen Wert abbilden kann. Hiervon gibt es jedoch Ausnahmen
- Das Ereignis vom Januar 2011 am Pegel Lorenzreuth ist ein Beispiel für ein sehr gut vorhergesagtes Ereignis, die Linien der einzelnen Vorhersagetiefen liegen relativ eng beieinander
- Grundsätzlich größte Bedeutung haben die zum (gemessenen) Scheitelpunkt eines Hochwassers ausgegebenen Werte aller Vorhersagetiefen. So ist z.B. das Hochwasser vom Februar 2005 am Pegel Marktleuthen/Eger (Anlage O.2) ein gutes Beispiel hierfür, denn es kann leicht missinterpretiert werden: Der Scheitel des Ereignis wurde von frühen Vorhersagen deutlich unterschätzt (zu wenig Niederschlagsinput). Die deutlich (um die jeweilige Vorhersagetiefe) versetzten Linien nach dem Ereignis resultieren lediglich aus den zum Zeitpunkt des ansteigenden Astes (des gemessenen Hochwassers) getroffenen Vorhersagen. Hierbei spielt der verwendete ARIMA-Korrekturfaktor eine Rolle. Diese versetzten Linien sind aber lediglich ein Artefakt aus schlechter Vorhersage und starker ARIMA-Korrektur. Sie dürfen nicht als „verspätetes Hochwasser“ interpretiert werden, da dieses so nicht simuliert worden wäre

6.2.5 Validierung der Wasserhaushaltskomponenten

Mit dem kalibrierten Modell wurden Simulationsläufe für den Gesamtzeitraum 2005 bis 2013 durchgeführt, bei denen für jede Teilgebiet des Modells folgende Größen ausgegeben wurden:

- Mittlere jährliche Niederschlagssumme [mm]
- Mittlere jährliche Verdunstungshöhe [mm]
- Mittlere jährliche Summe der Basisabflussbildung [mm]
- Mittlere jährliche Gesamt-Abflusshöhe [mm]

Die Ergebnisse sind in Anlage H grafisch dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass z.B. für den Niederschlag auch der Faktor KG berücksichtigt wurde, was unter anderem verursacht, dass Pegel mit hohem KG wie Kautendorf tendenziell höhere Werte aufweisen und sich somit „Grenzartefakte“ zwischen Pegelkontrollbereichen bilden können. Dies wirkt sich natürlicherweise auch auf die anderen Wasserhaushaltskomponenten aus.

7. Operationelle Modellkonfiguration und Empfehlungen

Gemäß Abstimmung mit dem AG wurde eine erste operationelle Modellumgebung abgeleitet. Diese OP-Modellumgebung für das WHM SEW wurde erfolgreich auf Lauffähigkeit geprüft. Um die Einbindung dieser OP-Modellumgebung in den bayerischen OP-Betrieb (insbesondere HUGO-Anpassung) wird sich vereinbarungsgemäß das BfU kümmern. Die hierzu benötigten Modelldateien werden dem Auftraggeber mit der Datenlieferung übergeben.

Generelle Hinweise:

Bei Bedarf kann die Option KLIMASTAMMDATEN EXTRA aktiviert werden, wenn eine Auswahl der Meteo-Stationen über die Datei mesklima.stm erfolgen soll. Falls die Option grundsätzlich nicht genutzt wird, kann die Datei mesklima.stm gelöscht werden.

Operationelle Optionen und Einzelparameter, die WHM-Nachführung und insbesondere die ARIMA-Korrektur betreffend, sind ggfls. an den bayerischen Standard anzupassen.

Für die Ausleitung aus der Lamitz (LARSIM-TGB-Nr. 1837) und die Wiedereinleitung der identischen Ganglinie in die Förmitz-Talsperre (LARSIM-TGB-Nr. 1767) muss wegen der LARSIM-Raum-Zeitschleife zweimal die identische Ganglinie verwendet werden (analog zur Kalibrierung – eine besser geeignete Verzweigung ist LARSIM-technisch unmöglich). Diese Ganglinie muss folglich im OP-Betrieb auch für den Vorhersagezeitraum erstellt werden und gemäß „pfade.dat“ verfügbar sein. Diese beiden identischen Ganglinien („ausleitung-q.lila“ bzw. „einleitung-q.lila“ gemäß bereitgestellter OP-Modellumgebung) benötigen gemäß aktuellem Tape10 die Stationsnummer 111111 (siehe auch Kalibrier-Modellumgebung).

Für die Abflüsse unterhalb der beiden Talsperren (Förmitz-Talsperre und Ölsnitz-Talsperre/Untreusee) werden die Pegel Förmitz-Speicherabfluss/Förmitzbach (LARSIM-TGB-Nr. 1771) und Moschendorf/Ölsnitz (LARSIM-TGB-Nr. 2173) mit der Berechnungsanforderung „IPRIN 4“ verwendet (siehe auch „pegel.stm“ der OP-Umgebung). Das Setzen von IPRIN 4 bewirkt, dass im Messzeitraum grundsätzlich die Übernahme der gemessenen Ganglinie als Zulaufganglinie zum nächsten Teilgebiet erfolgt. Im Vorhersagezeitraum existieren für diese beiden Pegel natürlich keine Abflusswerte, weshalb LARSIM dann mit den implementierten Talsperren-Regelungen (Förmitz-Talsperre @ LARSIM-TGB-Nr. 1770 bzw. Ölsnitz-Talsperre @ LARSIM-TGB-Nr. 2170) rechnet. Falls jedoch zukünftig vom Talsperrenbetreiber Abgabepfanungen vorliegen würden, könnten diese in die Messwertdatei integriert werden und somit eine Verbesserung für die Abflussvorhersage unterstromwärts bewirken.

Für den operationellen Betrieb eignen sich gewiss 13 der 15 Eichpegel (siehe auch Tabelle 4.5 und alle dortigen Pegel mit der Bewertung „+ & +“, „+ & o“, „+ & -“, „o & +“ bzw. „o & o“). Eingeschränkt geeignet für den OP-Betrieb befinden wir den Pegel Kautendorf/Südliche Regnitz (mit Bewertung „o & -“ in der Tabelle 4.5). Als einzigen für den OP-Betrieb eher ungeeigneten Pegel stufen wir den Pegel Fahrenbühl/Lamitz ein, hauptsächlich wegen der ungenauen Bilanzen durch den großen Einfluss der Lamitz-Überleitung in die Förmitz-Talsperre.

Schnee im operationellen Betrieb:

Wie bereits für andere Gebiete ausführlich dokumentiert wurde, ist die Simulation der Schneedynamik mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dies liegt zum allergrößten Teil an der Annahme einer zeitlich konstanten Grenztemperatur für den Übergang von Schnee zu Regen. In der Realität ist diese „Grenztemperatur“ von der aktuellen Wetterlage abhängig und zeitlich äußerst variabel (vgl. Haag & Bremicker 2013).

Für den operationellen Betrieb bedeutet dies, dass hinsichtlich der Schneedynamik zwei Aspekte besondere Beachtung finden sollten:

1. Entspricht die (langfristig) simulierte Schneedecke der realen Schneedecke?
2. Welcher potentielle Fehler resultiert (kurzfristig) aus der Unsicherheit von T_{mit_Sr} bzw. der Frage, ob ein aktueller Niederschlag als Schnee oder Regen fällt?

Hinsichtlich des ersten Aspekts kann operationell folgendes hilfreich sein:

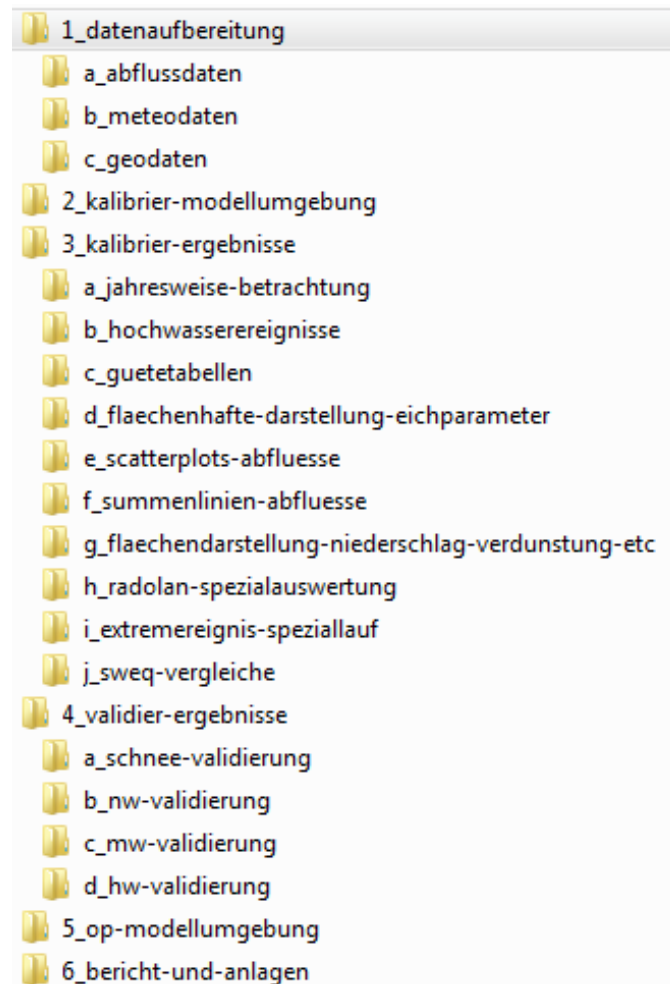
- Vergleich der simulierten Schneedeckenausdehnung mit Satellitendaten
- Vergleich des punktuell gemessenen SWEQ mit simulierten Werten
- Vergleich des simulierten SWEQ mit entsprechenden flächenhaften Produkten des DWD (z.B. SNOW4)
- Nachführung der SWEQ anhand räumlich interpolierter Messwerte oder der Produkte des DWD mit HVZ_SnowUpdate. (Hier ist auch eine graduelle sowie eine nach Gebieten und/oder Höhenbereichen differenzierte Nachführung möglich)
- Grobe Anpassung der simulierten SWEQ z.B. auf der Grundlage qualitativer Informationen mit einfachen Faktoren. (Auch dies kann mit HVZ_SnowUpdate nach Gebieten und/oder Höhenbereichen differenziert erfolgen)
- Verwendung unterschiedlicher Simulationsvarianten, die während des gesamten Winters mit unterschiedlichen T_{mit_Sr} -Werten arbeiten und somit zu unterschiedlich hohen SWEQ gelangen. Verwendung der Variante, die am besten zu den vorliegenden Vergleichswerten passt.

Hinsichtlich des zweiten Aspekts der kurzfristigen Unsicherheit (in der aktuellen Vorhersage) kann operationell folgendes hilfreich sein:

- Variantenrechnungen mit einer niedrigen und einer hohen T_{mit_Sr} . Dies verdeutlicht, die Unsicherheit in der Vorhersage infolge der Unsicherheit ob Regen oder Schnee fällt.
- Zukünftig soll es in LARSIM möglich werden, das sogenannte RE-Produkt des DWD zu nutzen, in dem angegeben ist, welcher Anteil des Niederschlags als Schnee fällt. Die Entwicklung ist derzeit in Abstimmung mit der LARSIM Entwicklergemeinschaft. Sofern sie zielführend ist, könnte sie auch im vorliegenden Gebiet von Nutzen sein.

8. Digitale Datenbereitstellung

Nach Durchführung aller oben beschriebenen Bearbeitungsschritte werden dem AG sowohl die Ergebnisse als auch die hierfür verwendeten Daten in digitaler Form bereitgestellt. Die Abgabe erfolgt in der folgenden selbsterklärenden Ordnerstruktur:



In jedem der Unterordner findet sich eine genauere Erklärung über die Ordnerstruktur und die darin enthaltenen Dateien (readme.txt).

Neben den meteorologischen Eingangsdaten werden dem Auftraggeber außerdem die Ergebnisse der Kalibrierung und der Validierung zur Verfügung gestellt.

Im Abgabeordner "2_kalibrier-modellumgebung" befindet sich zudem die komplette Eichumgebung am Ende der Feineichung. Des Weiteren liegt im Abgabeordner "5_op-modellumgebung" die für den AG spezifisch vorbereitete operationelle SEW-Modellumgebung.

Alle im Rahmen dieses Projekts eingesetzten LARSIM-Daten werden dem Auftraggeber im neuen LILA-Format übergeben.

9. Literatur

- AVLR, LUBW & LUWG (2015): Konzeption und Umsetzung der Schneeeinterzeption von Wäldern in LARSIM. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag von AVLR, LUBW und LUWG (unveröffentlicht).
- DWD (2015): RADOLAN Kurzbeschreibung (Stand: April 2015), Onlinedokument abgerufen von <http://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html> am 25.05.2016.
- Haag, I. & Bremicker, M. (2013): Möglichkeiten und Grenzen der Schneesimulation mit dem Hochwasservorhersagemodell LARSIM. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 33.13, S. 47-58.
- Haag, I., Ehret, U., Demuth, N. & Moritz, K. (2013): ProFoUnD: Ein Werkzeug zur statistischen Analyse von Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen und zur Ermittlung von Vorhersageunsicherheiten.. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 33.13, S. 93-103.
- Haag, I., Johst, M., Sieber, A., Bremicker, M. (2016): Leitfaden zur Kalibrierung von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz im Hochwasserbetrieb (Kalibrieranleitung). LARSIM Entwicklergemeinschaft, Entwurf 19.02.2016.
- LUBW & LUWG (2015): Auswertung von Messungen aus dem Rain-on-Snow-Projekt der Universität Freiburg zur Verbesserung der Schneesimulation in LARSIM. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag von LUBW und LUWG (unveröffentlicht).