Anlage 15

Neubewilligung Nordharzverbundsystem

Bericht:

Entwicklung und Anwendung

eines Speicherverbundmodells für die

Oker-, Innerste-, und Granetalsperre

Braunscheig, den 22.04.2015

Prof. Dr.-Ing. Günter Meon
Dipl.-Hydr. Tim Müller

LWI, TU Braunschweig
Beethovenstraße 51 a
38106 Baraunschweig

Dr.-rer.nat. Andreas Koch

IWUD GmbH
Grüne Mühle 34
37671 Höxter

Entwicklung und Anwendung eines Speicherverbundmodells für die Oker-, Innerste- und Granetalsperre

Abschlussbericht zur Projektphase 1

April 2015

Auftraggeber

Harzwasserwerke GmbH, Nikolaistr. 8, 31137 Hildesheim

Auftragnehmer

Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
LWI, TU Braunschweig, Beethovenstraße 51 a, 38106 Braunschweig
(Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Günter Meon und Dipl.-Hydr. Tim Müller)

In Kooperation mit

Ingenieure für Wasser, Umwelt und Datenverarbeitung IWUD GmbH
Grüne Mühle 34, 37671 Höxter
(Bearbeiter: Dr.-rer.nat. Andreas Koch)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6
1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung 6
1.2 Vorgehensweise 8
2 Projekt- und Datengrundlagen 10
2.1 Anforderungen an das Speicherverbundmodell 10
2.2 Das Nordharzverbundsystem 11
2.3 Daten im Modell 14
2.3.1 Topographische und hydraulische Kenngrößen der Sperren 14
2.3.2 Historische Daten für die Kalibrierung und Validierung 19
2.3.3 Generierte Zuflusszeitreihen 21
3 Aufbau des Speicherverbundmodells 24
3.1 Komponenten des Systems 24
3.2 Aufbau des Speicherverbundmodells IGOmod für das Nordharzspeicherverbundsystem 27
4 Kalibrierung und Validierung 34
4.1 Kalibrierung 34
4.1.1 1985-1988 – Überleitung Innerste-Grane nicht aktiv 34
4.1.2 1996-1997 – Überleitung Innerste-Grane aktiv 37
4.2 Validierung 41
4.2.1 2001-2005 – Überleitung Innerste-Grane nicht aktiv 41
5 Simulationslauf für die reale verlängerte Vergangenheit ohne Klimaänderung nach aktuellem Betriebsplan 46
5.1 Überblick 46
5.2 Wasserhaushaltsgrößen 48
5.3 Trinkwassergewinnung 52
5.4 Energieerzeugung 52
5.5 Gütebestimmender Mindeststau 53
5.6 Zusammenfassende Bewertung des Simulationslaufes “real verlängerte Vergangenheit“ 54
6 Simulationsläufe für die Realisationen ohne und mit Klimaänderung nach aktuellem Betriebsplan 55
6.1 Überblick 55
6.2 Wasserhaushaltsgrößen 57
6.3 Trinkwassergewinnung 63
6.4 Energieerzeugung 63
6.5 Gütebestimmender Mindeststau 64
6.6 Zusammenfassende Bewertung der simulierten Zukunfts-realisationen 65
7 Zusammenfassung und Ausblick 66
Literaturverzeichnis 69
Anhang 70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Niedersachsen mit Einzugsgebiet des Nordharzverbundsystems 11

Abbildung 2-2: Teileinzugsgebiete des Nordharzverbundsystems 13

Abbildung 2-3: Lamellenplan der Okertalsperre (Quelle: Harzwasserwerke GmbH) 15

Abbildung 2-4: Historische übergeleitete Wassermengen der Überleitung Innerste-Grane für den zweiten Kalibrierungszeitraum von November 1995 bis Oktober 1997 (Quelle: Harzwasserwerke GmbH) 20

Abbildung 2-5: Verlauf des Wasserstandes der Innerstetalsperre vom 1.November 2001 bis zum 31.Oktober 2005 mit erkennbarer Absenkung des Speicherinhaltes aufgrund von Sanierungsarbeiten an der Talsperre im Jahr 2004..... 20

Abbildung 2-6: Mittlerer Zufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre: Vergleich von realer Vergangenheit mit künstlicher Vergangenheit (20C-Läufe). Die Historie umfasst den Kalibrierungszeitraum von 1983 bis 2002. Die generierte “reale verlängerte Vergangenheit“ über 10.000 Jahre hat die Bezeichnung “Ohne Klimaänderung“. 23

Abbildung 2-7: Mittlerer Zufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre. Vergleich der Realisation 18 ohne Klimaänderung (20C) mit Klimaänderung (R18 nah, R18 fern). Zusätzlich eingetragen ist die “Historie“ (Kalibrierungszeitraum 1983-2002) und die reale Vergangenheit über 10.000 Jahre “Ohne Klimaänderung“. R18 ist die Realisation 18 aus den 20 WETTREG-Realisationen zum Szenario A1B..... 24

Abbildung 3-1: Allgemeiner Aufbau des Softwaresystems Gecko mit Schnittstellen zu Modellen; IGOmod ist im grünen Bereich implementiert 25

Abbildung 3-2: Aufbau der Softwareplattform Gecko GeodataCore 25

Abbildung 3-3: Zweite Verbindungsform im Speicherverbundmodell IGOmod..... 26

Abbildung 3-4: Modellaufbau am Beispiel der Innerstetalsperre. Mit dem Zufluss über den Pegel Rote Klippe, den einzelnen auftretenden Entnahmeelementen und dem entstehenden Abfluss im Unterlauf. 29

Abbildung 3-5: Einbau der Fließgewässer Gose und Wintertalbach in das Speicherverbundmodell. Aus Platzgründen ist die Verbindung zum Entnahmeverteiler der Grane nicht eingetragen. 30

Abbildung 3-6: Struktur des Speicherverbundmodells für die Okertalsperre, mit dem Zufluss über den Pegel Altenau und der kontinuierlichen Beileitung vom Dammgraben, den einzelnen auftretenden Entnahmeelementen und dem entstehenden Abfluss in den Unterlauf; zusätzlich noch die Implementierung der beiden Fließgewässer Radau und Romke..... 31

Abbildung 3-7: Das komplette Speicherverbundmodell IGOmod innerhalb der Modellsoftware Gecko. 33

Abbildung 4-1: Simulationsergebnisse des ersten Kalibrierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot). 35

Abbildung 4-2: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Radau, Gose und Okertalsperre für den Kalibrierungszeitraum von November 1985 bis Oktober 1988. 37

Abbildung 4-3: Simulationsergebnisse des zweiten Kalibrierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot). 38

Abbildung 4-4: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Okertalsperre und Innerstetalsperre für den zweiten Kalibrierungszeitraum von November 1995 bis Oktober 1997. 39

Abbildung 4-5: Simulationsergebnisse des Validierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot). 42

Abbildung 4-6: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Radau, Gose und Okertalsperre für den Validierungszeitraum von November 2001 bis Oktober 2005. 43

Abbildung 4-7: Simulationsergebnisse des Validierungszeitraumes an der Granetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot). 44

Abbildung 5-1: Vergleich der Monatsmittelwerte der abgeleiteten Wassermengen von der Okertalsperre in die Granetalsperre 51

Abbildung 5-2: Überschreitungsdauerlinie des Speicherinhaltes der Granetalsperre für die langjährige Zeitreihe über 10.000 Jahre 52

Abbildung 5-3: Jährliche potenziellen Energieerzeugung an der Francis-Turbine an der Okertalsperre in Abhängigkeit vom Jahreszufluss in die Turbine 53

Abbildung 6-1: Mittlerer Monatszufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre aus der Kalibrierung und aus generierten 10.000 jährlichen Serien von Haberlandt (2013 und 2014); für die Klimaprojektionen wurde die WETTREG-Realisation 18 verwendet 57

Abbildung 6-2: Überschreitungsdauerlinie der täglichen Abgaben der Innerstetalsperre in den Unterlauf für die vier Zeitreihen über 10.000 Jahre 59

Abbildung 6-3: Vergleich der mittleren Ableitungsmengen der Okertalsperre in die Granetalsperre für alle Zeitreihen auf Monatsbasis 61

Abbildung 6-4: Überschreitungsdauerlinie des Speicherfüllstandes der Granetalsperre für alle Langzeitsimulationen 62

Abbildung 6-5: Überschreitungsdauerlinie der potenzielle Energieerzeugung für die Turbine an der Okertalsperre 63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Technische Daten und Informationen zu den Talsperren Innerste, Grane und Oker (Quelle: Harzwasserwerke GmbH) 12

Tabelle 2-2: Funktionsweise der Überleitungen der Fließgewässer Gose, Wintertalbach und Radau (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)..... 18

Tabelle 2-3: Pegeldaten der Messstationen oberhalb der Talsperren des Nordharzverbundsystems..... 19

Tabelle 5-1: Ergebnisse des Simulationslaufes “reale verlängerte Vergangenheit“.. 47

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Abflüsse unterhalb der drei Talsperren des Nordharzverbundsystems für den Zeitraum von 1984 bis 2002 (hydrologische Jahre) und der realen verlängerten Vergangenheit. 48

Tabelle 5-3: Ablauf des Hochwasserereignisses an der Innerstetalsperre am 12. März im Modelljahr 1752 49

Tabelle 5-4: Mittlere jährliche Überleitungsmengen des Simulationslaufs “reale verlängerte Vergangenheit“ 50

Tabelle 6-1: Simulationen mit Modell IGOmod: Vergleich der Ergebniskenngrößen aus allen Simulationsläufen über 10.000 Jahre auf Tagesbasis..... 56

Tabelle 6-2: Vergleich der langjährigen Zeitreihen hinsichtlich der mittleren Talsperrenabgabe in den Unterlauf für alle drei Stauanlagen des Nordharzverbundsystems..... 58

Tabelle 6-3: Aufgetretene maximale Abgaben der Talsperren in den Unterlauf für alle langjährigen Zeitreihen (oft im Frühjahr, unterschiedliche Zeitpunkte des Auftretens) 59

Tabelle 6-4: Vergleich der untersuchten Realisationen hinsichtlich der Anzahl der Tage, wo die Hochwasserentlastung eingesetzt wurde ohne voller Auslastung oder mit voller Auslastung des Grundablasses..... 60

Tabelle 6-5: Vergleich der jährlichen Überleitungsmengen aller Ableitungen für alle langjährigen Simulationen. 61

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Rechenläufe hinsichtlich der Unterschreitungshäufigkeit des gütebestimmenden Mindeststaus in den Talsperren Oker und Grane am ersten Tag der Sommerstagnation..... 64

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Für die Harzwasserwerke GmbH steht die Beantragung der Neubewilligung des Betriebs des Nordharzspeicherverbundsystems an. Dieses besteht aus den drei Talsperren Innerste, Grane und Oker. Die Sperren werden kombiniert über abgestimmte Betriebsregeln und ein Stollensystem betrieben. Zu dem Verbundsystem gehören noch kleinere Fließgewässer, die an das Stollensystem angeschlossen sind.

Für die Neubewilligung soll die Wirksamkeit des Verbundsystems bezüglich Versorgungssicherheit, Hochwasserschutz, Wasserkraftpotential und weiterer - auch ökologischer - Kriterien überprüft werden. Hierfür sind Langzeitsimulationen des Betriebes mit Hilfe eines numerischen Speicherbetriebsmodells vorgesehen.

Ein solches Speicherbetriebsmodell wird primär von Zuflussreihen – oft auf Tagesbasis - angetrieben. Da beobachtete Zeitreihen der Zuflüsse und anderer Kenngrößen des Wasserhaushaltes in der Regel nur für einige Dekaden verfügbar sind und damit nicht alle möglichen Extreme des natürlichen Abflussgeschehens abdecken, werden als Modellinput für die Prognosen häufig generierte Zuflussserien verwendet. Solche Langzeitserien werden aus den beobachteten Serien mittels multivariater Statistik erzeugt. Sie geben die wesentlichen Eigenschaften der kurzen beobachteten Serien gut wieder, decken aber auch die Heterogenität und gesamte Spannbreite des Abflussgeschehens realistisch ab. Eine statistische Generierung ist möglich, wenn die benötigten Serien ein natürliches Abflussgeschehen repräsentieren. Dies trifft auf die natürlichen Zuflüsse in die drei Nordharzsperren zu. Die Langzeitserien können grundsätzlich für das gegenwärtige Klima und für das zukünftige Klima erstellt werden. Mit Hilfe eines derart angetriebenen Bilanzierungsmodells kann detailliert untersucht werden, ob das Speicher-verbundsystem seine Aufgaben auch bei einer möglichen Veränderung des Klimas erfüllen kann und wie die Betriebsregeln ggf. angepasst werden können.

Grundsätzlich können Langzeitserien des Zuflusses in das Speicherbetriebsmodell auch mit einem hydrologischen Wasserbilanzmodell erzeugt werden. Ein solches Modell benötigt lange Zeitreihen von räumlichen meteorologischen Datenfeldern (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung usw.) als Input. Der Daten- und Bearbeitungsaufwand ist im Vergleich zur Direktgenerierung des Zuflusses erheblich höher. Mit einem hydrologischen Modell können allerdings auch Zuflussserien, die durch Bauwerke beeinflusst sind, entwickelt werden.

Unter Beachtung der oben genannten Sachverhalte beauftragte die Harzwasserwerke GmbH die Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) mit folgenden Hauptaufgaben, die in einer Projektphase 1 zu leisten waren:

1. Aufstellen eines Speicherverbundmodells für die Innerste-, Grane- und Okertalsperre einschließlich der Überleitungen auf Tageswertbasis

2. Implementierung der **vorhandenen** Betriebspläne und Überleitungsregeln

3. Simulation des Verbundsystems mit Zuflussserien auf Tagesbasis über 10.000 Jahre. Die Serien stammen aus einer Studie von Haberlandt (2013) und repräsentieren die meteorologische und hydrologische Situation der Vergangenheit bis heute. Die Ergebnisse sind statistisch auszuwerten.

4. Simulation des Verbundsystems mit Zuflussserien auf Tagesbasis über 10.000 Jahre für die Zukunft unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Serien stammen aus einer Studie von Haberlandt (2014) und repräsentieren die meteorologische und hydrologische Situation für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) Die Ergebnisse sind statistisch auszuwerten.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Projektphase 1 sollen in der Projektphase 2 Modellvarianten mit modifizierten Betriebsplänen und Überleitungsregeln entwickelt, simuliert und ausgewertet werden.

Das Nordharzspeicherverbundsystem mit seinen Randbedingungen, Überleitungen und vernetzten Betriebsregeln für die unterschiedlichen Betriebsziele ist als hochkomplex einzustufen. Eine numerische Nachbildung war deshalb mit am LWI vorhandener oder externer Software aus der Wasserwirtschaft (reine Speicherbetriebsmodelle oder hydrologische Modelle mit Modulen für eine vereinfachte Simulation von Stauanlagen, wie zum Beispiel in PANTA RHEI oder WASIM-ETH eingebracht) nicht machbar.

Die Aufgabe erforderte die Entwicklung und Programmierung eines neuen Betriebs- und Bilanzierungsmodells (Software) **IGOmod** (“Innerste-Grane-Oker-Modell“). Mit der Softwareentwicklung beauftragte das LWI in Abstimmung mit der Harzwasserwerke GmbH die Firma Ingenieure für Wasser, Umwelt und Datenverarbeitung IWUD GmbH, Höxter. Die Software wurde vom LWI in Kooperation mit IWUD GmbH erfolgreich getestet. Danach wurde das Modell vom LWI für den Nordspeicherverbund aufgebaut, kalibriert und für die benötigten Modellrechnungen eingesetzt. Das Modell IGOmod aus der Projektphase 1 steht den Harzwasserwerken in der robusten Basisversion, wie im Projekt verwendet, zur Verfügung. IGOmod kann in der Projektphase 2 bezüglich graphischer Oberfläche, Nutzerfreundlichkeit und zusätzlicher Auswertetools erweitert werden.

1.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist grundsätzlich an den in Kapitel 1.1. genannten Hauptaufgaben ausgerichtet, sie musste aber erheblich ausgeweitet werden (Entwicklung und Austesten eines neuen Modells, Kalibrierung und Validierung mit echten historischen Daten, Simulationen und Auswertungen von mehreren Realisationen über 10.000 Jahre aus Klimamodellen). Folgende Arbeitsschritte fielen an:

1. Erster Arbeitsschritt war die detaillierte Bestandsaufnahme des Nordharzverbundsystems und der Interaktionen der Oker-, Innerste- und Granetalsperre.

2. Daraus wurde ein Systemplan erstellt, der alle wichtigen Informationen beinhaltet, z.B. die Abgabemengen einer Talsperre in den Unterlauf in Abhängigkeit vom Wasserstand und der Jahreszeit, maximale Überleitungsmengen in die Granetalsperre usw.

3. Dieser Systemplan wurde von IWUD GmbH als Grundlage für die Programmierung des Speicherverbundmodells (Software) genutzt. Hierfür konnte die schon von IWUD entwickelte Modellplattform Gecko mitverwendet werden.

4. Es wurden neue Teilelemente der Software konzipiert, programmiert und systematisch unter Nutzung von zunächst kurzen historischen Zeiträumen getestet. Mit der entwickelten Software wurde das Gesamtmodell IGOmod für den Nordharzverbund aufgestellt. Die Software wurde modular und objektorientiert programmiert. Das Gesamtmodell IGOmod kann somit mit relativ geringem Aufwand erweitert oder programmtechnisch modifiziert werden.

5. Im Anschluss wurde IGOmod für das gesamte Speicherverbundsystem über zwei historische Perioden kalibriert und über eine historische Periode validiert. Hierfür wurden die aufgezeichneten Zuflüsse und andere Daten von der Harzwasserwerke GmbH zur Verfügung gestellt. Während dieses Arbeitsschrittes wurden weitere Programmierfehler, Datenfehler und noch nicht korrekt implementierte Betriebsregeln korrigiert. Die Bewertung der Kalibrierung und Validierung erfolgte in enger Kooperation mit den Harzwasserwerken GmbH.

6. Nach erfolgreicher Kalibrierung und Validierung wurden mit dem Modell und den vorhandenen Betriebsregeln zuerst eine Simulation über 10.000 Jahre für die reale Vergangenheit bis heute durchgeführt und ausgewertet. Die Simulation repräsentiert die “echte“ Vergangenheit bis zum Jahr 2000 – somit im Sinne der Klimaforschung noch ohne signifikante Klimaänderung. Für die Generierung der Zuflussserien an fünf maßgebenden Pegeln wurden hier nur beobachtete historische Daten verwendet (Haberlandt, 2013).

7. Für die Simulationen der Zukunft mit Klimaänderung entwickelte Haberlandt zahlreiche langjährige Zeitreihen über 10.000 Jahre. Da keine Empfehlung für deren Verwendung vorlag, analysierte das LWI zunächst die Vorgehensweise

von Haberlandt (2014). Es wurden Zuflussserien für fünf Zukunftsprojektionen, hier als Zukunftsrealisationen bezeichnet, zur Verfügung gestellt. Für jede Realisation standen drei Serien über 10.000 Jahre zur Verfügung. Haberlandt (2014) generierte diese Serien unter Nutzung der Ergebnisse aus dem niedersächsischen Forschungsvorhaben KliBiW (NLWKN, 2012, 2014). Dort wurden für das Szenario A1B die verfügbaren meteorologischen Datenfelder (1960 bis 2100) des globalen Klimamodels ECHAM5 mit Hilfe der deutschen Downscalingmodelle WETTREG (drei Realisationen) und REMO (zwei Realisationen) auf ein kleinskaliges Raster für Niedersachsen heruntergebrochen. Aus diesen Daten entwickelte Haberlandt pro Realisation folgende drei Serien à 10.000 Jahre jeweils für die fünf Pegel:

- Serie aus 20C-Lauf: dieser repräsentiert die "künstliche Vergangenheit" ohne Klimasignal (1961-2000)
- Serie für die Zeitscheibe "Nahe Zukunft (2021-2050)" mit Klimasignal
- Serie für die Zeitscheibe "Ferne Zukunft (2071-2100) mit Klimasignal.

8. Für die Auswahl einer repräsentativen Zukunftsrealisation ermittelte das LWI die mittleren Zuflüsse der fünf 20C-Realisationen. Diese wurden mit den mittleren Zuflüssen der "echten" verlängerten Vergangenheit (Punkt 6) sowie den mittleren Werten aus der kurzen Kalibrierzeit verglichen. Ziel war, herauszufinden, welcher 20C-Lauf der echten verlängerten historischen Vergangenheit bzgl. mittlerer jährlicher und monatlicher Zuflüsse (Punkt 6) am nächsten kam. Dieser Lauf sowie die dazugehörenden zwei Läufe für die nahe und ferne Zukunft sollten dann als maßgebende Realisation für die Simulationen mit Klimaänderung verwendet werden.

9. Basierend auf dem vorigen Arbeitsschritt wurde die Realisation WETTREG 18 als repräsentativ für die Zukunft mit Klimaänderung verwendet. Mit den drei dazugehörenden Serien über 10.000 Jahre wurde der Speicherbetrieb simuliert. Bei der Auswertung wurden die Ergebnisse der nahen und fernen Zukunft mit den Ergebnissen des 20C-Laufes verglichen. In den Differenzen der Kenngrößen zeigte sich der Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit und Bewirtschaftung des Verbundspeichersystems.

10. Im Rahmen der Projektphase 1 konnten einige Auswerteroutinen, statistische Kenngrößen und Graphiken für die Langzeitsimulationen direkt in IGOmod implementiert werden, zum Beispiel mittlere Abflüsse, Zeitreihen des Abflusses oder Wasserstandes und deren Dauerlinien über beliebige Zeiträume. Für ein umfassendes und effizientes Post-Processing der langjährigen Simulationen entwickelte und nützte das LWI ein eigenes Auswertetool, das die vom Auftraggeber angeforderten statistischen Kenngrößen direkt liefert und über Excel graphisch ausgibt. Es bietet sich an, in der Projektphase 2 das Modell IGOmod bzgl. Auswerteroutinen und Graphiken zu erweitern.

2 Projekt- und Datengrundlagen

2.1 Anforderungen an das Speicherverbundmodell

Die Entwicklung eines Speicherverbundmodells für das Nordharzverbundsystem hat das Ziel, die aktuellen Betriebsregeln umfassend auf ihre Wirksamkeit für die heutige Situation und für die Zukunft mit Berücksichtigung der Klimaänderung zu überprüfen. Es wird also ein Modell benötigt, mit dem Betriebsregeln wie die erforderliche Abgabe einer Talsperre beim Speicherfüllstand x am Tag i eines Jahres eingerichtet und der Verbundbetrieb entsprechend simuliert werden kann.

Zum einen werden die drei Sperren durch natürliche Zuflüsse gespeist. Zum anderen versorgen die Oker- und Innerstetalsperre die Granetalsperre mit Wasser. Die Überleitungsmenge wird durch die Speicherfüllstände der drei Talsperren bestimmt. Zusätzlich wird Wasser aus kleineren Fließgewässern abgeschlagen und in den Granespeicher eingeleitet. Diese Beileitungen sind auch vom Füllstand der Granetalsperre und der maximal erlaubten Ableitungsmenge, vorgegeben durch die Art der Überleitung, abhängig.

Die oben skizzierten Wechselwirkungen sind über Betriebsregeln und Randbedingungen (Stauziele, Mindestabgaben u.a.) beschrieben. Sie sind in dem Modell so zu parametrisieren, dass das Verbundsystemsystem mit den heutigen Regeln und mit geänderten Regeln simuliert werden kann. Maßgebende Kriterien und Kenngrößen sind:

- Wildbettabgaben (Unterstromabgaben) in Abhängigkeit von Jahreszeit und Speicherinhalt (Lamellenpläne)
- Überleitungsmengen von einer Talsperre zu den anderen in Abhängigkeit vom Speicherinhalt der jeweiligen Stauanlagen und vom Wochentag
- Beileitungsmengen von Fließgewässern in Abhängigkeit von der Jahreszeit oder der Ableitungsschwelle
- Entnahmeraten zur Rohwasserentnahme oder Energieerzeugung
- Mindestspeicherfüllstand zum Einsetzen der Hochwasserentlastung.

Anhand dieser Aufzählung wird deutlich, dass das Modell neben den Zuflüssen und Abflüssen der einzelnen Talsperren Verknüpfungsoptionen der Talsperren miteinander benötigt. Innerhalb eines Zeitschrittes im Modell muss es möglich sein, dass zwei Talsperren Wasser abgeben (Entnahme) und die dritte Anlage dieses Wasser erhält (Zuführung).

Für die Auswertung der Simulationen sind folgende Kriterien von Bedeutung:

- Das Verhalten der Talsperren:
  - Abgabe der Talsperren in den Unterlauf
  - Durchschnittliche Speicherfüllstände
- Die Wirkung der Talsperren während eines Extremereignisses:
  - Einhaltung der Hochwasserschutzfunktion an allen drei Talsperren
  - Auftreten von Niedrigwassersituationen unterhalb der Talsperren
- Die Bereitstellung von Rohwasser für die Trinkwassergewinnung
- Die potenzielle Energiegewinnung durch die Turbinen an den drei Talsperren

- Gewährleistung der Speicherfüllstände zum Schutz des Hypolimnions
- Überleitungsmengen der verschiedenen Beileitungen.

2.2 Das Nordharzverbundsystem

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Einzugsgebiete der Talsperren Innerste, Grane und Oker mit einer Fläche von ca. 204 km^2 und der Fließgewässer Radau und Gose. Die Sperren sind im Süden Niedersachsens im nördlichen Teil des Harzes (siehe Abbildung **2-1**) lokalisiert. Den größten Stauraum besitzt die Okertalsperre mit 46,85 hm³, den kleinsten die Innerstetalsperre mit 19,26 hm³. Genauere Informationen zu den drei Talsperren sind der Tabelle 2-1 zu entnehmen. Der Unterlauf der Granetalsperre mündet in Langelsheim in die Innerste, welche später in die Leine fließt. Die Oker fließt bei Müden in die Aller, die dann nach Zufluss der Leine in die Weser mündet.

Wie schon aufgeführt, wird die Granetalsperre durch die Oker- und Innerstetalsperre mitaufgefüllt. Neben der Nutzung als Erholungsgebiet, für den Hochwasserschutz, die Niedrigwassererhöhung und Energieerzeugung ist die Rohwasserentnahme für die Trinkwassergewinnung die wichtigste Funktion. Die Granetalsperre wäre mit ihrem natürlichen Zufluss aus dem 22 km^2 großen Einzugsgebiet nicht in der Lage, alle diese Funktionen zu erfüllen. Die in die Granetalsperre übergeleiteten Wassermengen sind für jeden Zeitschritt abhängig von den aktuellen Speicherinhalten der Granetalsperre und der liefernden Talsperren (Okertalsperre und/oder Innerstetalsperre). Der Hauptversorger der Granetalsperre ist die Okertalsperre mit einem mittleren Überleitungsvolumen von 18,58 Mio. m³, bezogen auf den Zeitraum 1973-2010 (Quelle: Harzwasserwerke GmbH) über ein Abflussjahr.

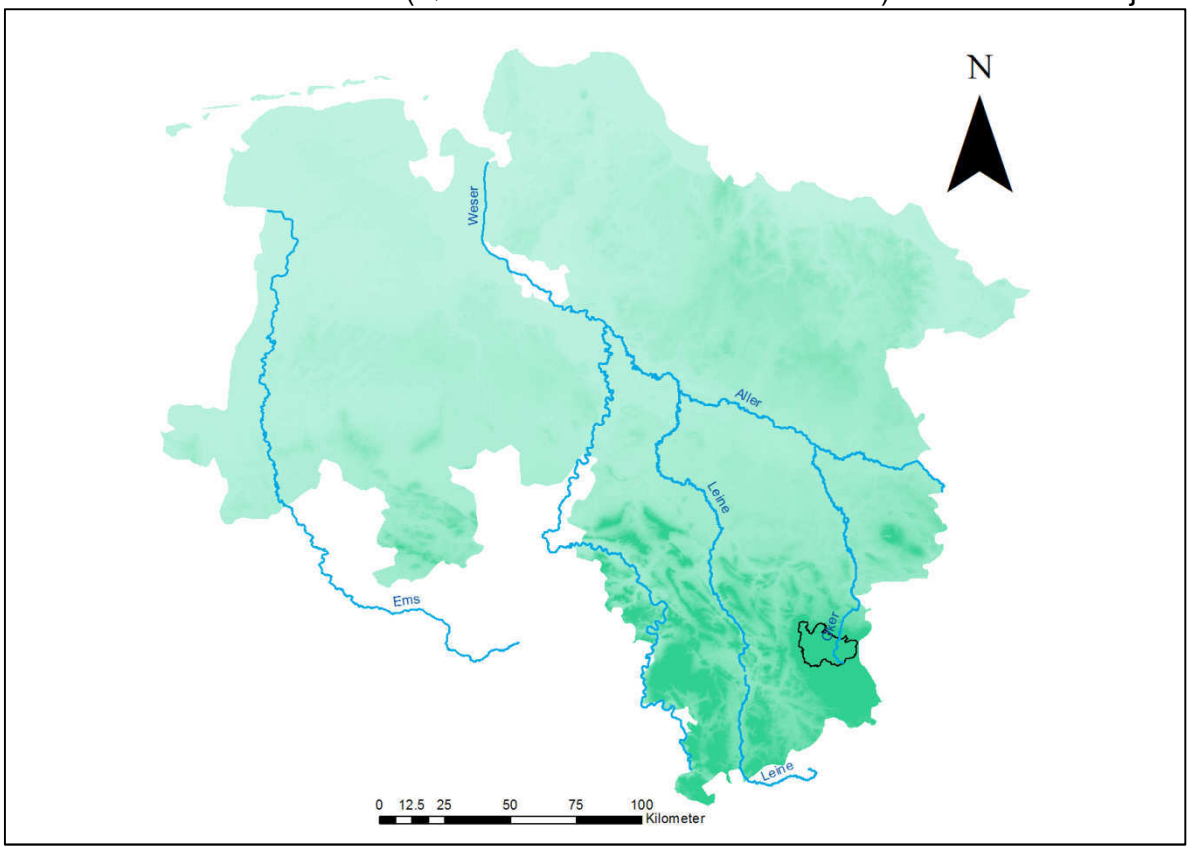


Abbildung 2-1: Niedersachsen mit Einzugsgebiet des Nordharzverbundsystems

Tabelle 2-1: Technische Daten und Informationen zu den Talsperren Innerste, Grane und Oker (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

	Innerstetalsperre	Granetalsperre	Okertalsperre
Einzugsgebiet AE_o [km²]	97	22	85
Vollstau [m ü. NN]	260,95	311	416,60
Absenkziel [m ü. NN]	247,69	271,56	383,17
Tiefstes Absenkziel [m ü. NN]	230,34	254,90	358,00
Speicheroberfläche (bei höchstem Stauziel) [km²]	1,39	2,19	2,25
Jahr der Inbetriebnahme	1966	1969	1956
Speicherinhalt [Mio. m³]	19,26	46,39	46,85
Sperrentyp	Erddamm und Asphaltbeton-Außendichtung	Erddamm und Asphaltbeton-Außendichtung	Bogengewichtsmauer
Hochwasser-entlastungsanlagen	• Überlaufschwelle • Hochwasser-entlastungsturm	• Fischbauch-klappe	• 8 Heber auf 2 Gruppen aufgeteilt
Nutzungen	• Trinkwassergewinnung • Energieerzeugung • Hochwasserschutz • Niedrigwassererhöhung • Sport • Fremdenverkehr		

Darüber hinaus wird der Speicherinhalt der Granetalsperre zusätzlich durch die kleineren Fließgewässer Gose, Wintertalbach, Radau und Große Romke beeinflusst. Diese Fließgewässer sind, wie die Talsperren, an das Stollensystem angeschlossen. Somit hat das “wirkliche“ Einzugsgebiet der Granetalsperre laut Harzwasserwerke GmbH ein Einzugsgebiet von insgesamt 227 km². Die Einzugsgebiete des Verbundsystems sind Abbildung 2-2 dargestellt. Weitere Informationen der Gewässer sind im Anhang 1 zusammengestellt.

Die älteste Stauanlage ist die Okertalsperre, für die die Vorarbeiten zum Bau schon 1938 begonnen hatten. Diese wurden wegen des Zweiten Weltkrieges erst wieder 1949 aufgenommen. Zur Fertigstellung kam es im Jahr 1956. Zehn Jahre später erfolgte die Fertigstellung der Innerstetalsperre, und im selben Jahr war Baubeginn für die Stauanlage Grane. Diese wurde dann 3 Jahre später in Betrieb genommen. Zum Zweck der Trinkwassergewinnung an der Granetalsperre wird seit 1980 über eine 4.3 km lange Druckrohrleitung Wasser von der Innerstetalsperre in die Granetalsperre übergeleitet. Die Überleitung wird vorwiegend in Trockenzeiten eingesetzt, da diese Überleitung von einem niedrigeren Höhenniveau auf ein höheres Niveau kostenintensiv ist.

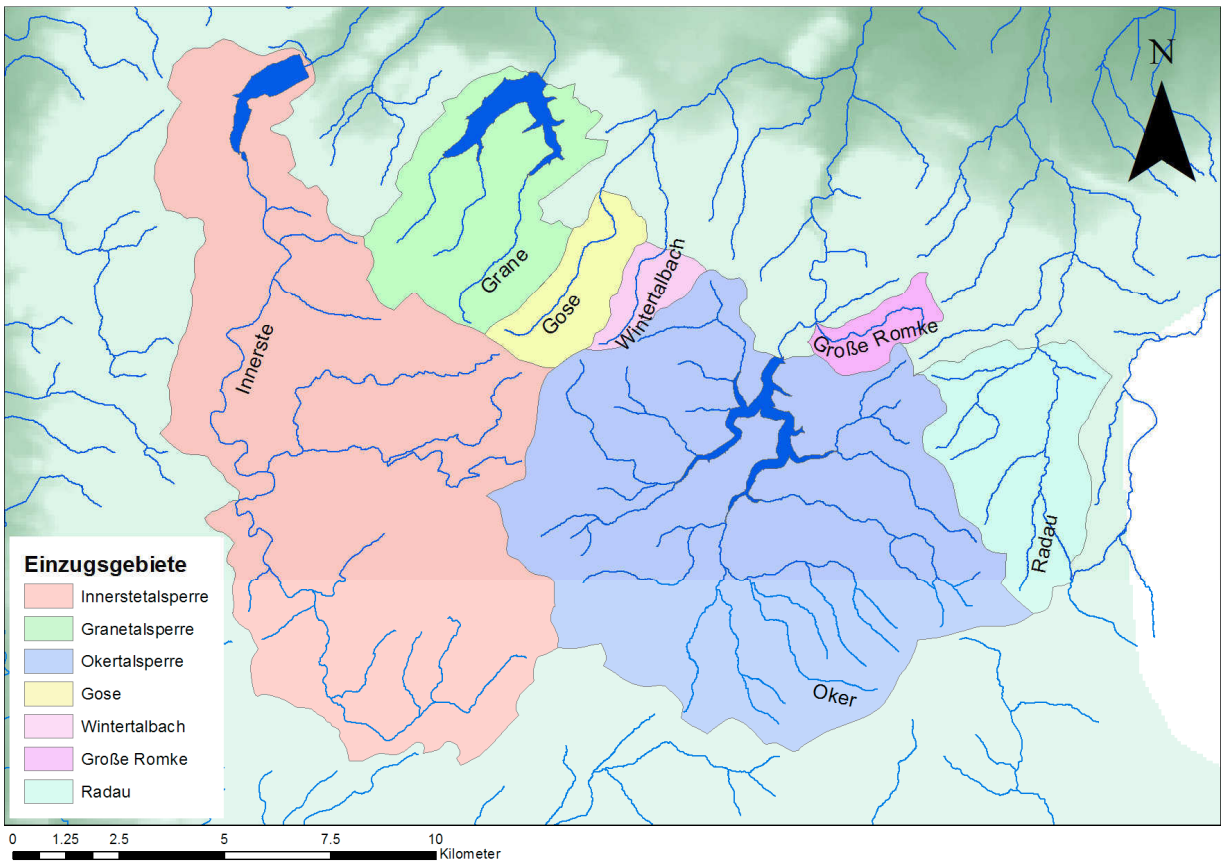


Abbildung 2-2: Teileinzugsgebiete des Nordharzverbundsystems

Eine Besonderheit des Harzes, auch im Speicherverbundmodell erkennbar, ist der sogenannte Dammgraben. Dieser künstlich erbaute Graben im Oberharz wurde zwischen dem 18. und 19. Jahrhundert für wirtschaftliche Zwecke angelegt. Die damalige Aufgabe war es, Oberflächenwasser für industrielle Betriebe abzuleiten. Bis 1970 wurde auch ein Teil des Wassers in die Innerstetalsperre übergeleitet. Seit September 1976 wird nach wasserrechtlicher Genehmigung in das Okergebiet abgeleitet. Dieser Graben wird als ein konstanter Zufluss angenommen und in das Modell implementiert.

Das Einsetzen der Überleitungen an den kleineren Fließgewässern findet unter zwei Bedingungen statt: Zum einen, wenn ein vorgegebener Mindestzufluss überschritten wird und zum anderen, wenn der Wasserstand der Granetalsperre unter 310,00 Meter über NN liegt. In Abhängigkeit von der Bauart des Eingangs in das Stollensystem sind die Überleitungsmengen limitiert.

Basierend auf der Bestandsaufnahme wurde von IWUD GmbH ein Systemplan erstellt, der alle wichtigen Informationen des Verbundsystems beinhaltet. Dieser Plan diente zum Systemverständnis und als Grundlage für die Programmierung des Modells. Er ist im Anhang 2 dargestellt.

2.3 Daten im Modell

2.3.1 Topographische und hydraulische Kenngrößen der Sperren

Talsperren

Die Speicherinhaltslinien und Wasserstands-Flächenbeziehungen der drei Sperren sind im Anhang 3 aufgeführt.

Die wichtigsten Informationen über die Talsperren für das Speicherverbundmodell sind die Festlegungen bezüglich der Abgabe der Talsperren in den Unterlauf. Die Vorgabe der Abgabe ist abhängig von zwei Faktoren: dem Speicherfüllstand der betroffenen Talsperre und der zeitlichen Zuordnung in Form von Tag und Monat innerhalb des Jahres. Die Festlegungen dieser Entnahmewerte basieren auf den Erfahrungen der Vergangenheit und werden zusammengefasst in Form von Lamellenplänen. Diese wurden von den Harzwasserwerken bereitgestellt und können als Entnahmesteuerung betrachtet werden.

Als Beispiel dient die Abbildung 2-3 mit dem Lamellenplan der Okertalsperre. Danach hängt die Abgabe der Talsperre in den Unterlauf von dem Füllstand und der Jahreszeit ab. In den Wintermonaten gibt die Talsperre weniger Wasser bei gleichem Füllstand als im Sommer ab. Dies resultiert aus einer Erhöhung des Speicherinhaltes bei Normalbetrieb der Talsperre. Des Weiteren ist das Verhalten der Talsperre in Sommer und Winter hinsichtlich des Hochwasserschutzes unterschiedlich. Bei einem hohen Füllstand der Talsperre wird im Winter mehr Wasser abgegeben als bei dem gleichen Speicherinhalt in den Sommermonaten. Die Lamellenpläne der drei Sperren sind teilweise unterschiedlich aufgebaut. Sie sind im Anhang 4 einsehbar.

Eine Besonderheit bei der Okertalsperre sind die Vorgaben bezüglich der Überleitungsmengen in die Granetalsperre. Das übergeleitete Volumen, das die Okertalsperre abgibt, um die Granetalsperre auf einem Speicherfüllstand zu halten, ist durch den Speicherinhalt der Okertalsperre festgelegt. Es wird hier nur nach Sommer- oder Winterzeit unterschieden. Die Entnahme aus der Okertalsperre umfasst damit die Abgabe in den Unterlauf und die Abgabe in die Überleitung zur Granetalsperre. Zusätzlich verringert die Seespiegelverdunstung den Speicherinhalt.

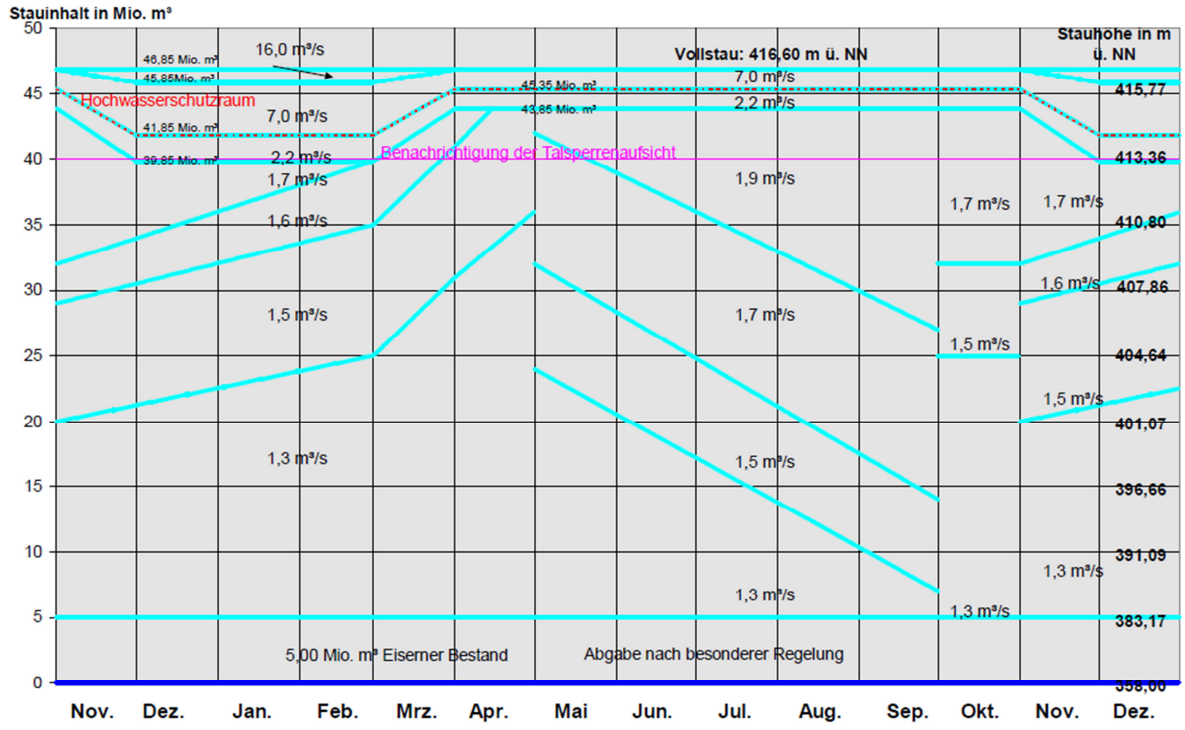


Abbildung 2-3: Lamellenplan der Okertalsperre (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Bei regulärem Betrieb der Innerstetalsperre wird bei der Abgabe in den Unterlauf, wie bei der Okertalsperre, zwischen Sommer- und Wintermonaten unterschieden. Im Verlauf des Sommerhalbjahres verschieben sich die Lamellenübergänge (abnehmend hinsichtlich Speicherfüllstand). Dies ist vergleichbar mit dem Lamellenplan der Okertalsperre. Außerhalb des Lamellenplans erfolgt die Überleitung durch eine Druckrohrleitung in die Granetalsperre. Die Überleitungsmengen sind durch den Wochentag und durch die Speicherinhalte von Innerste- und Granetalsperre festgelegt.

Letztendlich setzt sich die Abgabe einschließlich Verluste der Granetalsperre zusammen aus der auftretenden Verdunstung, der Abgabe in den Unterlauf und der Entnahme für die Förderung von Trinkwasser. Im Speicherverbundmodell wird mit einem von den Harzwasserwerken vorgegebenen Richtwert in der Größenordnung von 38 Millionen m³ simuliert. Dies geschieht durch eine konstante Entnahme von 1,2 m³/s von der Talsperre. Die Bereitstellung von Rohwasser für die Trinkwassergewinnung ist ein wichtiger Aspekt dieser Untersuchung.

Relevant für einen funktionierenden Simulationslauf ist außerdem die Deklarierung eines Startwasserstandes zu Beginn der Simulation für jede Talsperre im Modell. Die Startwerte wurden von dem Beginn der Kalibrierungsphase auch für die Langzeitsimulationen übernommen. Sie lagen bei der Innerstetalsperre bei 256,70 m über NN, bei der Granetalsperre bei 302,70 m über NN und bei der Okertalsperre bei 407,98 m über NN. Diese Angaben entsprechen den gemessenen Wasserständen vom 01. November im Jahr 1984, welche eine jahreszeittypische Füllung für die drei Talsperren darstellen.

Entnahmeeinrichtungen der Talsperren

Die Abgabe von Wasser in den Unterlauf der drei Talsperren des Nordharzverbundsystems erfolgt über eine Vielzahl von verschiedenen Bauwerken, im Modell als “Entnahmeelemente“ bezeichnet. Zum Beispiel wird Wasser der Innerstetalsperre über einen Betriebsauslass, einen Grundablass und gegebenenfalls, beim Übersteigen des Vollstauvolumens, über den Einlaufturm und die Überlaufschwelle abgegeben. Dagegen findet die Abgabe der Granetalsperre über zwei Grundablässe und im Hochwasserfall zusätzlich über eine Fischbauchklappe statt. An der Okertalsperre schließlich erfolgt die Abgabe über einen Betriebsauslass, einen Grundablass und ein spezielles System von Hebern zur Hochwasserentlastung.

Innerhalb des Speicherverbundmodells wird jedem Auslassbauwerk bis auf den Betriebsauslass ein Element zugeteilt. Da die zwei Betriebsauslässe an der Innerste- und Okertalsperre direkt an Turbinen zur Energieerzeugung angrenzen, wurden diese Auslässe nicht in das Modell implementiert. Stattdessen wurden die Turbinen als Elemente mit konstanter Entnahme pro Zeitschritt in das Modell eingebaut. Die Reihenfolge bezüglich der Verteilung der abgegebenen Wassermenge aus den Talsperren kann innerhalb des Modells manuell festgelegt werden. Standardmäßig wird im Modell festgelegt, dass zuerst das Wasser über die Turbine in den Unterlauf fließt. Erst wenn die Turbinen voll ausgelastet sind, sollen dann die überschüssigen Wassermengen über die Grundablässe abfließen. Dies soll gewährleisten, dass über den gesamten Simulationszeitlauf, wenn Wasser aus den Talsperren abgegeben wird, die Turbinen vorrangig versorgt werden.

Die Funktionsweise der Trinkwasserpumpstation im Modell ist vergleichbar mit den Turbinen, mit dem Unterschied, dass die entnommenen Wassermengen nicht in den Unterlauf abfließen, sondern als Verlust betrachtet werden. Außerdem wird zur Gewährleistung der festgelegten Wasserentnahmemenge von 38 Millionen m³ über ein Jahr immer Wasser durch die Pumpstation entnommen ohne Limitierung durch Speicherfüllstand oder zeitlichen Zuordnung.

Für die Abgaben aus den Grundablässen wurden hydraulische Leistungskurven (Abgabe als Funktion des Speicherinhaltes) von den Harzwasserwerken für alle existierenden Grundablässe im Nordharzverbundsystem bereitgestellt (siehe Anhang 5).

Die Operationsweise der vorhandenen Hochwasserentlastungsbauwerke (siehe Tabelle 2-1) wird beim Überschreiten des Vollstaus durch die nachfolgende Poleni-Gleichung beschrieben. Ausnahme dabei bildet das Hebersystem an der Okertalsperre, da das Prinzip der Anlage nicht mit Poleni dargestellt werden kann. Zu diesem Zweck hat IWUD die Abhängigkeit der Abgabe über die Heber von dem Wasserstand im Okerstausee tabellarisch aufgestellt.

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * \sqrt{2 * g} * b * h^{\frac{3}{2}}$$

Mit:

Q	[m³/s]	Durchfluss am Wehr
μ	[-]	Überfallbeiwert
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
b	[m]	Wehrbreite
h	[m]	Überfallhöhe

Für die Fischbauchklappe an der Granetalsperre wird die Poleni-Gleichung leicht modifiziert angewendet, da die Überfallhöhe dieses Bauwerkes zwischen zwei Werten variieren kann. Im aufgestellten Zustand liegt die Oberkante der Fischbauchklappe bei 311 m über NN. Überschreitet der Wasserstand diese Höhe, wird die Fischbauchklappe soweit abgesenkt, dass der Wasserstand von 311 m über NN gehalten wird. In Abhängigkeit von der Situation kann die Oberkante der Fischbauchklappe bis auf 309 m über NN heruntergefahren werden.

Eine indirekte Form der Entnahme ist die Evaporation von der Wasseroberfläche der Stauseen. Von Haberlandt (2013, 2014) wurden keine Serien der täglichen Verdunstung zur Verfügung gestellt. Die Evaporation sollte grundsätzlich für die Langzeitbilanzierung des Speicherwasserhaushaltes berücksichtigt werden, da sie das verfügbare Wasservolumen reduziert. In Mitteleuropa liegt die Reduktion oft nicht über 3 % des jährlichen Zuflussvolumens.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Evaporation vereinfacht berücksichtigt. Grundlage dafür sind hydrologische Untersuchungen der Universität Göttingen (Haase et al., 1970), aus denen folgender Auszug entnommen ist:

"Die Verdunstung ist allerdings nicht direkt meßbar, sondern wird bestimmt aus der von der Stauhöhe im Sperrenbecken abhängigen überstauten Fläche und der monatlichen Verdunstungshöhe in mm. Nach Verdunstungsmessungen von Friedrich an der Edertalsperre wurde eine Beziehung aufgestellt zu der vom Deutschen Wetterdienst ermittelten monatlichen Landverdunstung im Harz. Dabei ergab sich folgende Beziehung:

$$Beckenverdunstung\ der\ Talsperre = Verdunstung\ in\ Braunlage * 1{,}32 + 4\ mm"$$

Anhand dieser Beziehung konnte näherungsweise die Evaporation der Stauseeoberflächen in der Vergangenheit ermittelt werden. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells PANTA RHEI, das vom LWI in den KliBiW-Projekten eingesetzt wird, konnte die Verteilung der monatlichen Verdunstungswerte auf die einzelnen Tage abgeschätzt werden. PANTA RHEI ist ein deterministisches hydrologisches Modell, welches von der TU Braunschweig, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz am LWI und dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH, Braunschweig, entwickelt wurde. Die Ergebnisse – mittlere tägliche Verdunstungsmengen für ein Standardjahr – wurden auch für die Langzeitsimulationen übernommen.

Überleitung von Fließgewässern

Wenn sich der Wasserstand der Granetalsperre unter 310 m über NN befindet, können neben den zwei Talsperren zusätzlich noch die Gose, der Wintertalbach und die Radau, Wasser für die Granetalsperre bereitstellen. Wenn bei diesen Fließgewässern ein festgelegter Zufluss überschritten wird, wird die überschüssige Menge in die Überleitung abgeführt. Die Abgabemenge ist entsprechend Tabelle 2-2 limitiert. Für die Kalibrierung des Speicherverbundmodells liegen die Überleitungsmengen auf Monatsbasis für Gose und Radau vor.

Tabelle 2-2: Funktionsweise der Überleitungen der Fließgewässer Gose, Wintertalbach und Radau (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Fließgewässer	Gose	Wintertalbach	Radau
Abgabe in die Überleitung ab einem Zufluss von [m³/s]	0,1	0,03	– Vom 01.10 bis 30.04: 0,215 – Vom 01.05 bis 30.09: 2,0
Maximale Abgabe in die Überleitung [m³/s]	2,5	1,5	5,0

Neben den Steuerregeln und der Verdunstung an der Wasseroberfläche sind die Zuflüsse der Talsperren die wichtigsten Voraussetzungen für die Modellierung des Talsperrenbetriebs. Als Grundlage für die Bestimmung des Zuflusses in die Talsperren wurden die Pegel oberhalb der Talsperren betrachtet (Tabelle 2-3). Die auftretenden Zuflüsse an diesen Messstationen werden zusätzlich mit einem Faktor beaufschlagt, durch den die Gebiete einbezogen werden sollen, die zum Einzugsgebiet gehören, aber nicht vom Pegel erfasst werden. Dieser Faktor ist abhängig von der Einzugsgebietsgröße der betrachteten Stauanlage. Vorgegeben wurden diese Werte von der Harzwasserwerke GmbH.

Tabelle 2-3: Pegeldaten der Messstationen oberhalb der Talsperren des Nordharzverbundsystems

Pegel	Rote Klippe	Margarethenklippe	Altenau
Messbeginn	01.11.1963	01.11.1979	01.11.1948
Einzugsgebietsgröße [km²]	85	6,70	31,2
Fließgewässer	Innerste	Grane	Oker
NNQ [m³/s]	0,049 am 08.09.1966	0,004 am 21.11.1983	0,004 am 24.09.1975
MQ [m³/s]	1,62	0,14	0,86
HHQ [m³/s]	40,8 am 29.06.1966	4,66 am 27.03.1981	24,60 am 13.04.1994
Faktor Zufluss Talsperren	1,16	3,3	2,7

2.3.2 Historische Daten für die Kalibrierung und Validierung

Auf Empfehlung der Harzwasserwerke GmbH wurde der Zeitraum von November 1984 bis Oktober 1988 für die Kalibrierung des Speicherverbundmodells verwendet. Während dieses Zeitraums wurde die Überleitung von der Innerstetalsperre in die Granetalsperre zu keinem Zeitpunkt in Anspruch genommen. Dies erlaubte eine vorübergehende Vereinfachung des Modells und somit eine verbesserte Untersuchung der Oker-Grane-Überleitung auf Plausibilität.

Für die Kalibrierung des Modells stellten die Harzwasserwerke neben gemessenen Zu- und Abflüssen der Talsperren Daten für die Speicherfüllstände der Stauseen zur Verfügung. Diese Daten wurden täglich aufgezeichnet und stellten eine weitere Kontrollmöglichkeit des Modells dar.

Um die Richtigkeit der Innerste-Grane Überleitung innerhalb des Modells zu überprüfen, wurde eine zweite Kalibrierungsphase für den Zeitraum November 1995 bis Oktober 1997 angesetzt. Während dieses Zeitraumes war die Innerste-Grane Überleitung sowie alle anderen Überleitungen und Zuleitungen in die Granetalsperre aktiv. Die übergeleiteten Wassermengen von der Innerstetalsperre in die Granetalsperre sind in der Abbildung 2-4 dargestellt.

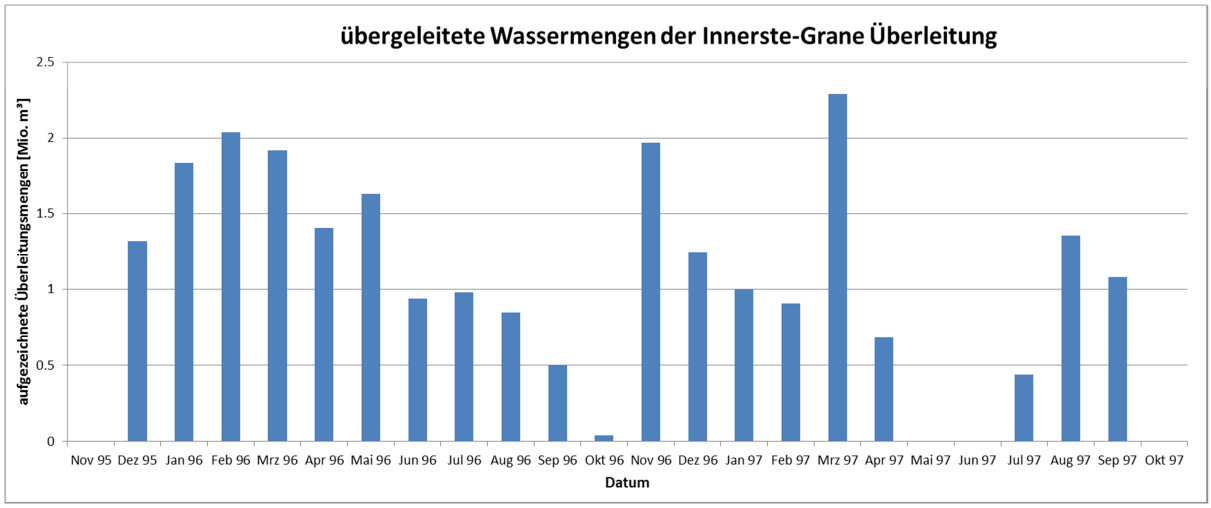


Abbildung 2-4: Historische übergeleitete Wassermengen der Überleitung Innerste-Grane für den zweiten Kalibrierungszeitraum von November 1995 bis Oktober 1997 (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Zur Validierung des Speicherverbundmodells wurde der Zeitraum November 2001 bis Oktober 2005 herangezogen. Über diese vier Jahre war die Innerste-Grane Überleitung nicht aktiv, weil von 2003 bis 2004 eine Sanierung an der Innerstetalsperre durchgeführt wurde (Abbildung 2-5). Dies geschah, um die wasserseitige Asphaltdichtung des Dammes zu erneuern und gleichzeitig den Grundablass der Talsperre umzubauen (Harzwasserwerke GmbH, 2004). Für die Durchführung dieser Sanierung wurde der Innerstestausee entgegen der Betriebsregel vor Beginn der Bauphase fast vollständig entleert. Als Folge wichen die Modellsimulationen von den realen Daten des Wasserstandes und Abflusses aus der Sperre vor und während der Bauarbeiten ab. Dies ist im Detail in Kapitel 4 beschrieben.

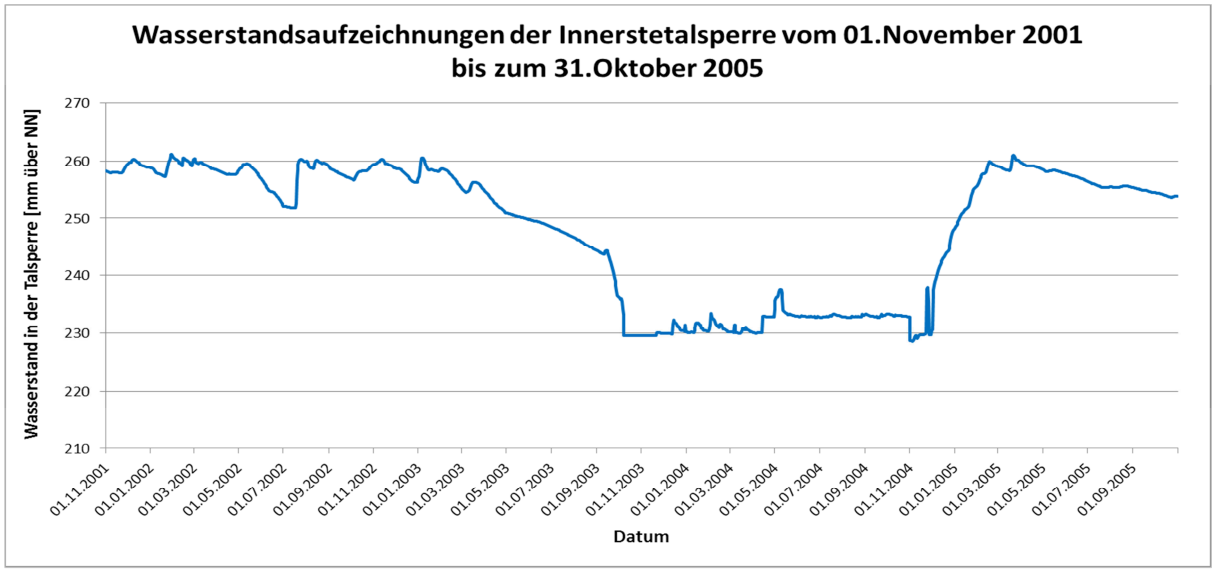


Abbildung 2-5: Verlauf des Wasserstandes der Innerstetalsperre vom 1. November 2001 bis zum 31. Oktober 2005 mit erkennbarer Absenkung des Speicherinhaltes aufgrund von Sanierungsarbeiten an der Talsperre im Jahr 2004

2.3.3 Generierte Zuflusszeitreihen

Für die Neubewilligung des Nordharzverbundsystems entwickelte Haberlandt (2013 und 2014) im Auftrag der Harzwasserwerke GmbH für die Abflüsse an fünf Pegeln im Projektgebiet langjährige Zeitreihen für verschiedene Klimaszenarien. Die fünf Pegel sind:

- Rote Klippe (Innerstetalsperre)
- Margarethenklippe (Granetalsperre)
- Altenau (Okertalsperre)
- Sennhütte (Gose)
- Harzburg (Radau)

Die generierten mittleren täglichen Abflüsse, die die Vergangenheit bis heute repräsentieren, erstrecken sich über einen Zeitraum von 10.000 Jahren und wurden von der Harzwasserwerke GmbH dem Auftragnehmer zur Verfügung gestellt. Sie wurden unter Nutzung der vorhandenen historischen Datenserien mit Hilfe des Knn-Bootstraps Verfahren, welches eine multivariate Generierung von täglichen Abflusswerten zulässt, generiert. Für Details wird auf Haberlandt (2013) verwiesen.

Die generierten 10.000 Jahre langen Abflussserien aus Klimaprojektionen (Realisationen) basieren auf Untersuchungen der niedersächsischen Forschungsvorhaben KLIFF und KliBiW zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die niedersächsische Wasserwirtschaft. An beiden Forschungsvorhaben waren und sind die Universität Hannover (Haberlandt) und die TU Braunschweig (Meon) sowie die Harzwasserwerke GmbH beteiligt.

Aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 verwendete Haberlandt fünf regionale Realisationen, die schon im Projekt KliBiW (NLWKN, 2012, 2014) für den Zeitraum 2000 bis 2100 und die künstliche Vergangenheit (20-C Läufe) entwickelt wurden:

- Zwei Realisationen (UBA und BfG) des regionalen Klimamodells REMO
- Drei Realisationen (Nr. 3, 13 und 18) des regionalen Klimamodells WETTREG

Diese Realisationen (Tagesserien von meteorologischen Daten) lieferten für das Projekt KliBiW Tageswerte für drei Zeiträume: die künstliche Vergangenheit von 1961 bis 2000 (Bezeichnung 20C), die nahe Zukunft von 2021 bis 2050 und die ferne Zukunft von 2071 bis 2100.

Haberlandt (2014) generierte aus den vorliegenden meteorologischen Datenserien der fünf Realisationen mit Hilfe von multivariaten statistischen Methoden Abflussserien auf Tagesbasis über jeweils 10.000 Jahre. In diesen Serien spiegeln sich die Eigenschaften des jeweils zugrunde gelegten KliBiW-Zeitraumes wieder, sie beinhalten aber auch die ganze Spannweite möglicher Abflüsse am betreffenden Pegel.

Jede Realisation enthält drei Serien über 10.000 Jahre:

- Die Serie aus dem 20C Lauf für die künstliche Vergangenheit – ohne Klimasignal
- Zwei Serien für die dazugehörenden Zukunftsprojektionen der Zeitscheiben „nahe Zukunft (2021-2050)“ und “ferne Zukunft (2071-2100)“ – mit Klimasignal

Eine Empfehlung, welche Realisation für den Verbundspeicherbetrieb angewendet werden soll, wurde nicht gegeben. Für die Auswahl einer repräsentativen Realisation als Input für die Simulation des Verbundspeicherbetriebes führte das LWI nachfolgende Untersuchungen durch.

Zuerst wurden die mittleren Abflüsse der Zuflusspegel für die unterschiedlichen Zeitreihen des Zeitraumes “Vergangenheit bis heute“ verglichen.

Der Vergleich ist in Abbildung 2-6 beispielhaft für den Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre dargestellt. Der blaue Balken “Historie“ zeigt den mittleren Abfluss des (kurzen) Kalibrierungszeitraumes. Der Balken “Ohne Klimaänderung“ zeigt den mittleren Abfluss der aus historischen Abflüssen generierten, 10.000 Jahre langen “echten“ historischen Abflussserie von Haberlandt (2013). Beide Werte sind identisch. In den Kapiteln 4 und 5 wird diese Serie auch mit “reale verlängerte Vergangenheit“ bezeichnet. Zusätzlich sind die mittleren Abflüsse aller 20C-Klimarealisationen (künstliche Vergangenheit) abgebildet. Die entsprechenden mittleren Abflüsse für die Pegel Margarethenklippe und Rote Klippe sind im Anhang 6 dargestellt.

Die Gegenüberstellung der Abflüsse oberhalb der Talsperren hilft bei der Wahl der repräsentativen Klimarealisation für diese Untersuchung. Beim Zufluss oberhalb der Okertalsperre (Abbildung 2-6) liegen die Mittelwerte der Realisationen 3 und 13 von WETTREG erkennbar unter dem Mittelwert der Historie. Für eine aussagekräftige Bewertung der Betriebsregeln sollten die Werte der künstlichen Vergangenheit der ausgewählten Klimarealisation sich der wirklichen Vergangenheit bestmöglich annähern. Bei Betrachtung des berechneten Mittelwertes sind die am besten geeignetsten Realisationen für diese Untersuchung UBA, BFG und die Realisation 18 des WETTREG-Modells. Die Unterschiede zwischen diesen drei Realisationen treten nur an der dritten Stelle nach dem Komma auf.

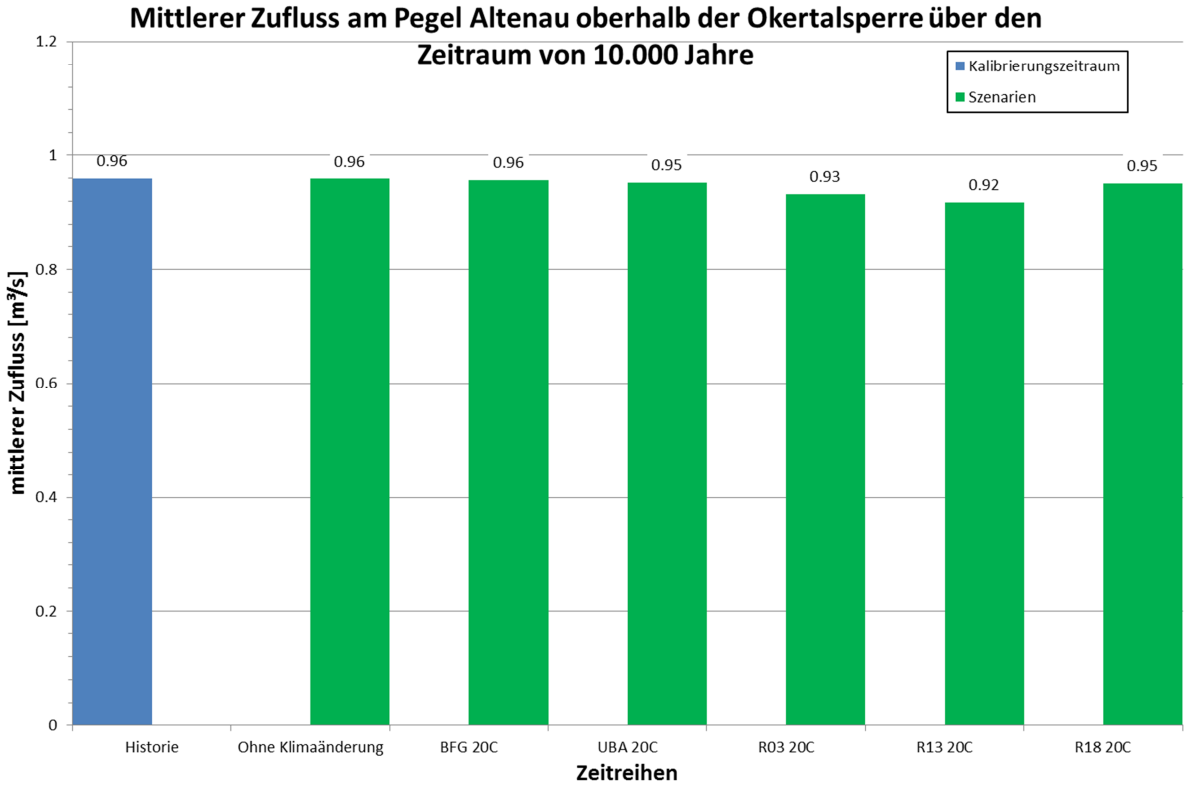


Abbildung 2-6: Mittlerer Zufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre: Vergleich von realer Vergangenheit mit künstlicher Vergangenheit (20C-Läufe). Die Historie umfasst den Kalibrierungszeitraum von 1983 bis 2002. Die generierte "reale verlängerte Vergangenheit" über 10.000 Jahre hat die Bezeichnung "Ohne Klimaänderung".

Mit den Erfahrungen aus den KliBiW-Projekten und den Mittelwerten der Zuflüsse wurde die WETTREG-Realisation 18 näher untersucht. Der 20C-Lauf dieser Klimaprojektion zeigt nur geringe Abweichungen zu den historischen Mittelwerten für alle drei Pegel oberhalb der Talsperren. Die höchste Abweichung tritt an der Margarethenklippe auf mit einem Unterschied von 0,008 m³/s, welche als vernachlässigbar betrachtet werden kann (Anhang 6).

In der Abbildung 2-7 sind für die WETTREG-Realisation 18 zusätzlich noch die mittleren Zuflüsse der langjährigen Zeitreihen für die nahe und ferne Zukunft für den Pegel Altenau dargestellt. Darin ist sichtbar, dass der Zufluss der Okertalsperre mit diesem Klimarealisationen in der Zukunft abnimmt. Schon in der nahen Zukunft (2021-2050) ist der mittlere Zufluss an diesem Pegel sichtbar geringer als der bisherige mittlere Zufluss. In der fernen Zukunft nimmt dieser zusätzlich noch um 0,03 m³/s weiter ab. Dieser Trend ist auch an den anderen Zuflüssen der Talsperren zu beobachten und ist im Anhang 7 darstellt.

Diese Annahmen sind aber nur unter Vorbehalt zu betrachten, weil alle Klimarealisationen aus dem Szenario A1B stammen, das neben anderen Szenarien nur eine mögliche Projektion der klimatischen Zukunft darstellt.

Auf der Basis der obigen Analyse und Bewertung wurde die WETTREG-Realisation Nr. 18 als repräsentative Realisation für die Simulation des Verbundspeicherbtriebs mit Klimaänderung ausgewählt.

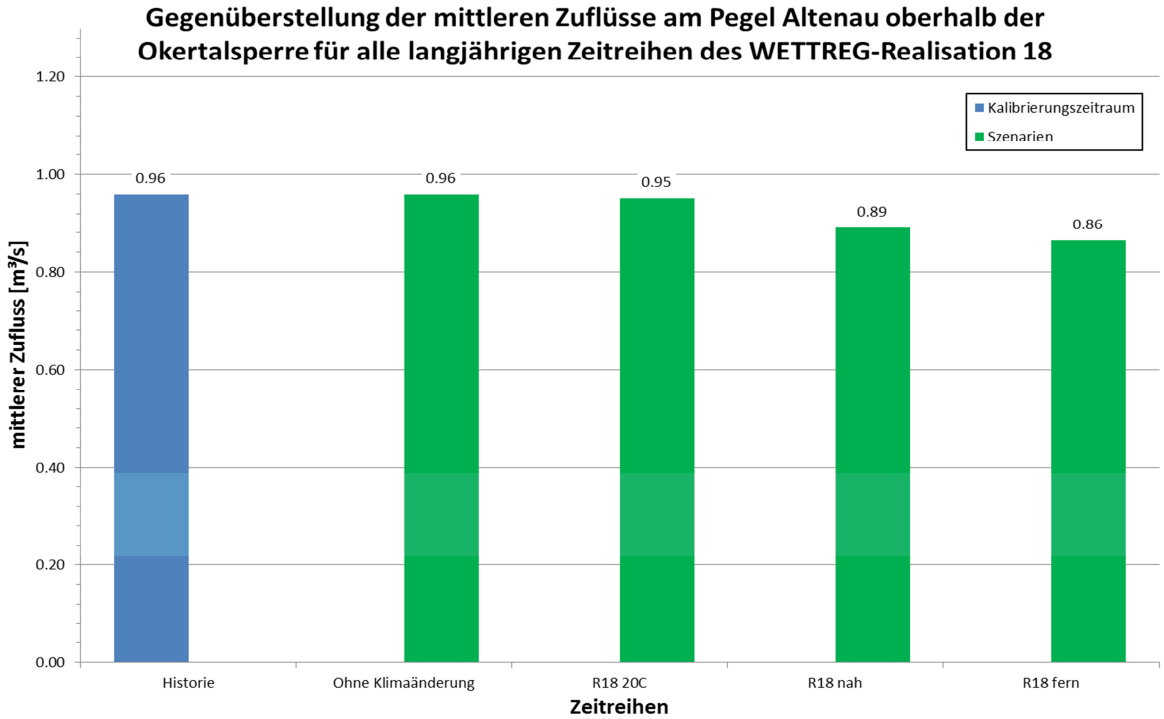


Abbildung 2-7: Mittlerer Zufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre. Vergleich der Realisation 18 ohne Klimaänderung (20C) mit Klimaänderung (R18 nah, R18 fern). Zusätzlich eingetragen ist die "Historie" (Kalibrierungszeitraum 1983-2002) und die reale Vergangenheit über 10.000 Jahre "Ohne Klimaänderung". R18 ist die Realisation 18 aus den 20 WETTREG-Realisationen zum Szenario A1B.

3 Aufbau des Speicherverbundmodells

3.1 Komponenten des Systems

Das neu zu entwickelnde Modell für die Berechnung des Nordharzverbundsystems wurde in die Softwareplattform Gecko GeodataCore des Ingenieurbüros IWUD integriert. Gecko ist ein modulares System zur Umsetzung von Softwarelösungen für hydrologische und hydronumerische Fragestellungen. Neben dem Speicherverbund-modell ist das Pre- und Postprozessing des 2D-hydronumerischen Finite-Elements-Strömungsmodells MeadFlow (IWUD GmbH) in Gecko realisiert. Die Schnittstelle zwischen Gecko und dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI des LWI ist in Bearbeitung. Gecko stellt unter anderem den Kern eines geographischen Informationssystems, Funktionen zur Darstellung und Bearbeitung von Zeitreihen, Schnittstellen zu Datenbanksystemen und die Infrastruktur zum Einbinden von Simulationsmodellen zur Verfügung. Die Abbildung 3-1 zeigt den grundlegenden Aufbau des Softwaresystems. Das Speicherverbundsystem wurde ebenfalls als modulares System konzipiert, programmiert und direkt in Gecko integriert (innerhalb des grünen Blocks in der Abbildung). Hierzu wurde das Speicherverbundsystem in seine Komponenten zerlegt. Diese wurden dann getrennt voneinander als eigenständiger Bausteine in Software umgesetzt. Die einzelnen Bausteine wurden beim Aufbau des Modells IGOmod über definierte Schnittstellen miteinander zu einem Gesamtsystem verbunden. Die Schnittstellen zum Verbinden der Bausteine, die Steuerung der Simulation und den Export sowie die Darstellung der Berechnungsergebnisse stellt das Grundsystem zur Verfügung.

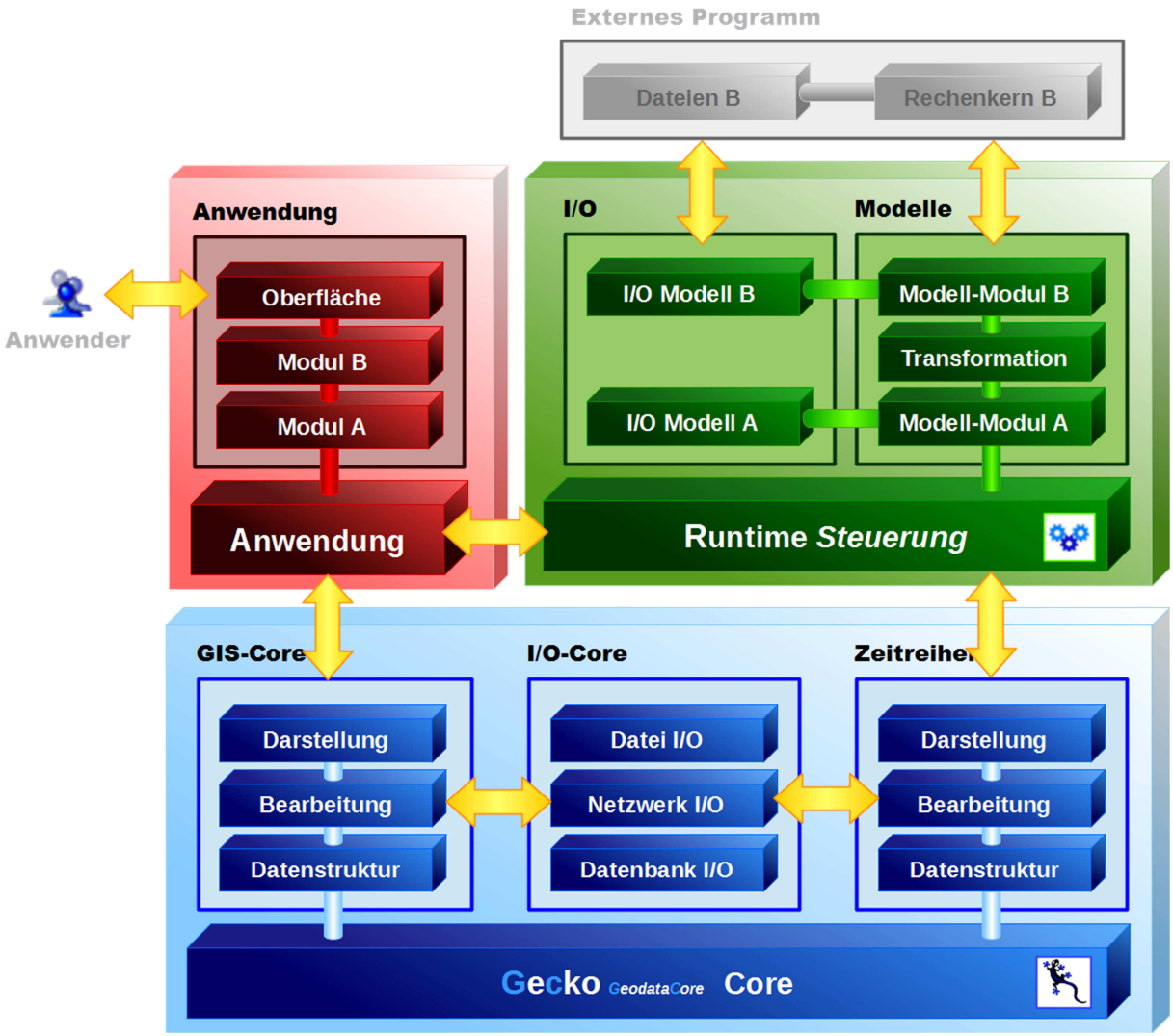


Abbildung 3-1: Allgemeiner Aufbau des Softwaresystems Gecko mit Schnittstellen zu Modellen; IGOmod ist im grünen Bereich implementiert

Das Modellkonzept sieht zwei mögliche Verbindungsformen zwischen zwei Bausteinen vor. Die erste Verbindungsform (Source/Sink) ist in den Systemplänen blau dargestellt (Abbildung 3-2). Sie wird bei voneinander unabhängigen Bausteinen verwendet. Über diese Schnittstelle werden ganze Zeitreihen, den aktuellen Berechnungszeitraum umfassend, ausgetauscht. Die Zeitreihe wird dabei von einer Quelle (Source) berechnet und an eine Senke (Sink) übergeben. Zwischen Quelle und Senken können noch zusätzliche Transformationen geschaltet werden.

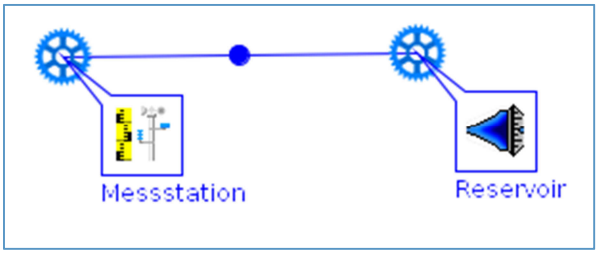


Abbildung 3-2: Erste Verbindungsform im Speicherverbundmodell IGOmod

Die zweite Verbindungsform (Demand/Withdrawal) wird für voneinander abhängige Bausteine verwendet und ist im Systemplan grün dargestellt (Abbildung 3-3). Hier findet eine gemeinsame zeitschrittweise Berechnung der Baustein statt. Die Berechnung erfolgt iterativ nach dem Prädiktor/Korrektor-Verfahren und wird von einem entsprechenden Baustein (Iterator) gesteuert. Wird von einem der Bausteine eine Zeitreihe über die Sink/Source-Schnittstelle angefordert, löst dies die gleichzeitige Berechnung aller gemeinsam verbundenen Bausteine aus. Die Demand/Withdrawal-Schnittstelle wird zum Beispiel für wasserstandsabhängige Entnahmen (Demands) aus oder wasserstandsabhängige Abschläge in einen Speicher verwendet.

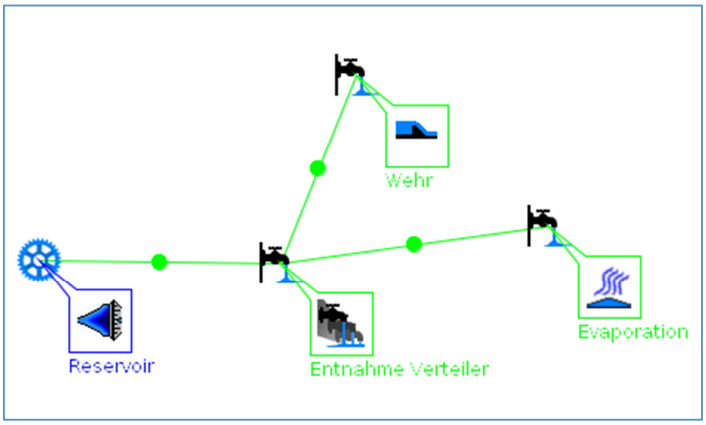


Abbildung 3-3: Zweite Verbindungsform im Speicherverbundmodell IGOmod

Zusätzlich kennt das Modellsystem noch übergeordnete Systemelemente, welche zum Beispiel die Berechnung von wasserstandsabhängigen Überleitungen zwischen zwei Speichern steuern (Innerste- und Okerüberleitung in die Granetalsperre) oder eine Priorisierung von zwei konkurrierenden Überleitungen ermöglichen. Diese sind rot im Systemplan dargestellt. Bei diesen Elementen handelt es sich ebenfalls um Iteratoren, die nach dem Prädiktor/Korrektor-Verfahren arbeiten und zeitschrittweise die Berechnungen zwischen zwei Speichern oder zwei Überleitungen steuern. In diesem Fall werden mehrere Berechnungsschleifen ineinander verschachtelt. Hierbei schätzt der Iterator der Überleitung die Überleitungsmenge (Prädiktor). Die mit der Überleitung verbundenen Speicher berechnen jeweils mit dem zugehörigen Iterator gemeinsam ihre Entnahmen unter Berücksichtigung der geschätzten Überleitungsmenge. Danach kontrolliert der Iterator der Überleitung seine Schätzung anhand der Wasserstände in den beteiligten Speichern. Passt diese nicht, wird sie angepasst (Korrektor) und die Berechnung des aktuellen Zeitschritts wiederholt.

Die modulare Umsetzung des Speicherverbundmodells in Form von untereinander verbundenen Bausteinen ermöglicht eine einfache Erweiterung (durch Hinzufügen neuer Bausteine) oder Anpassung (durch austauschen von Bausteinen bzw. deren Parameter) des bestehenden Modells. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt wahlweise in eine Datei oder am Bildschirm über die entsprechenden Funktionen von Gecko. Dies wird ebenfalls über Bausteine realisiert, die über die Source/Sink-Schnittstelle mit beliebigen Berechnungsbausteinen verbunden werden können.

3.2 Aufbau des Speicherverbundmodells IGOmod für das Nordharzspeicherverbundsystem

Die vom Ingenieurbüro IWUD bereitgestellte und im Projekt weiterentwickelte Softwareplattform “Gecko“ bietet die Möglichkeit, die Struktur und den Betrieb des Nordharzverbundsystems in einem Modell wiederzugeben. Die Aufstellung des Modells erfolgte innerhalb der Software auf Grundlage des entwickelten Systemplans (siehe Anhang 2). Viele der Elemente und ihre Funktionen und Interaktionen mit anderen Elementen entsprechend dem Systemplan mussten als Modellelemente erst programmiert werden. Alle verwendeten Modellelemente innerhalb des Speicherverbundmodells sind im Anhang 8 dargestellt. In dieser Tabelle werden die Symbole der einzelnen Elemente sowie ihre Funktionen und ihre Einstellungen für diese Untersuchung gezeigt.

In der Modellsoftware setzt sich eine Talsperre aus zwei Elementen zusammen. Das erste Element ist das “Reservoir“, das die Speicherinhaltslinie und die Wasserstand-Flächenbeziehung des Stausees beinhaltet. Zusätzlich wird über das Reservoir der Speicherfüllstand der Talsperre zu Beginn der Simulation vorgegeben. Das zweite Element einer Talsperre ist der sogenannte “Entnahmeverteiler“, welcher die Abgaben auf die verschiedenen Entnahmeelemente der jeweiligen Talsperre steuert. Am Beispiel der Innerstetalsperre sind dies folgende relevanten (Unter-)Elemente: der Einlaufturm, die Überlaufschwelle, der Grundablass, die Francis-Turbine, die Überleitung in die Granetalsperre und die Verdunstung der Talsperre. Veranschaulicht ist der vollständige Aufbau der Innerstetalsperre innerhalb des Speicherverbundmodells in der Abbildung 3-4. Wie schon im Abschnitt 2.3.1 angesprochen, wird bei der Innerstetalsperre der Betriebsauslasses im Speicherverbundmodell nicht als eigenes Element definiert.

Der Zufluss in die Talsperren im Modell erfolgt hier am Beispiel der Innerstetalsperre über den Pegel Rote Klippe. Dieses Modellelement, welches in der Software als “Messstation“ bezeichnet wird, enthält die Abflusszeitreihe für diesen Pegel auf Tagesbasis. Für die Bestimmung des gesamten auftretenden natürlichen Zuflusses bis zum Sperrenbauwerk wird der Abfluss des Pegels für jeden Zeitschritt mit einem festgelegten Wert oder Flächenfaktor multipliziert. Die Faktoren für die einzelnen Talsperren sind in der Tabelle 2-3 angegeben. Die Multiplikation wird über die Verknüpfung (blaue Verbindungslinie mit Kreis auf halber Strecke) von Pegel und Reservoir in das Modell eingebaut.

Die grünfarbige Verbindungslinie zwischen dem Entnahmeverteiler und dem Reservoir weist auf die Interaktion dieser Elemente hin. Darunter ist zu verstehen, dass das Reservoir für jeden Zeitschritt dem Entnahmeverteiler angibt, wie voll die Talsperre ist. Der Entnahmeverteiler bestimmt mit dieser Information die Abgabe der Talsperre und verteilt diese auf die verschiedenen Entnahmen in Abhängigkeit von der festgelegten Reihenfolge. Dies findet innerhalb des Modells über Iterationen statt, weil der Entnahmeverteiler für jede Variante der Abgabenverteilung schaut, ob die Verteilung der Abgaben und der resultierende Speicherfüllstand immer noch mit dem Lamellenplan der Innerstetalsperre übereinstimmt. Wenn dies nicht der Fall ist, muss der Entnahmeverteiler eine andere Verteilung der Abgaben testen, bis er die Betriebsregeln korrekt einhält. Ausnahmen bilden dabei die Verdunstung, die Überleitung und die Hochwasserentlastung. Die Evaporation findet zu jedem Zeitschritt statt und wird mit der Speicheroberfläche aus dem Element “Reservoir“

und der Verdunstung von der implementierten Zeitreihe berechnet. Die Überleitung in die Granetalsperre, welche in der Abbildung nicht vollständig eingestellt ist (Fehlen der Verknüpfung zum Entnahmeverteiler der Granetalsperre), operiert auch außerhalb des Lamellenplans. Der Betrieb der Überleitung ist in diesem Fall abhängig vom Wasserstand in der Grane- und Innerstetalsperre. Die Überleitung soll abgeschaltet werden, wenn der Wasserstand in der Granetalsperre über 310 m über NN liegt oder der Wasserstand der Innerstetalsperre unter 252,05 m über NN fällt. Zusätzlich variiert die Überleitungsmenge in Abhängigkeit vom Wochentag, zum Beispiel mit einer erhöhten Ableitung an Wochenenden. Zusätzlich ist das Überleitungselement im Modell noch mit einem Controller verbunden, der auch eine Verknüpfung mit der Oker-Grane Überleitung herstellt. Dieser Controller regelt den Überleitungsbetrieb in der Hinsicht, dass über die Oker-Grane Überleitung die Granetalsperre versorgt wird und dann erst Wasser aus der Innerstetalsperre erhält. Dies kann im Modell zu Zeitschritten führen, in denen die Überleitung Innerste-Grane kein Wasser in die Granetalsperre überleiten muss, weil die Okertalsperre schon das notwendige Wasser liefern kann.

Die Hochwasserentlastungsbauwerke werden wie folgt berücksichtigt: In Abhängigkeit der Parametrisierung des jeweiligen Bauwerkes setzt bei der Überschreitung eines spezifischen Wasserstandes (Regelfall: Die Überschreitung des Vollstaus) die Hochwasserentlastung ein. Diese Anlagen geben dann selbstständig, ohne Berücksichtigung des Lamellenplans, so viel Wasser in den Unterlauf ab, wie sie können. Die Abgabe wird nur durch die Bauart begrenzt. Ein Abfluss über bzw. durch die Hochwasserentlastung findet solange statt, bis der Wasserstand, ab dem die Hochwasserentlastung aktiv wird, wieder unterschritten wird. Am Beispiel der Innerstetalsperre liegt der maßgebende Wasserstand für den Einlaufturm bei 260,95 m über NN und bei der Überlaufschwelle bei 263,00 m über NN. Mit den bisher genannten Ausnahmen hat der Lamellenplan der Innerstetalsperre nur Einfluss auf die Wassermengen, die durch den Grundablass und die Francis-Turbine fließen. Da die Stromerzeugung eine der erbrachten Leistungen der Harzwasserwerke ist, soll jegliche Abgabe in den Unterlauf erst über die Turbine laufen. Erst ab einer Abgabe größer als 3,00 m^3/s wird auch über den Grundablass abgegeben.

Die komplette Reihenfolge der Entnahmen an der Innerstetalsperre ist somit:

- Evaporation (von der aktuellen Seespiegelfläche abhängig)
- Überleitung Innerste-Grane (nicht begrenzt, da sich selbst begrenzend)
- Francis-Turbine (begrenzt nach Lamellenplan)
- Grundablass (begrenzt nach Lamellenplan)
- Einlaufturm (nicht begrenzt)
- Überlaufschwelle (nicht begrenzt)

Die Bestimmung des Abflusses im Unterlauf der Talsperre erfolgt über das Element “Zusammenfluss“. In dieses Element gehen alle verknüpften Modellelemente ein, die zu diesem Element verlinkt wurden. Aufgrund der Vorgaben des Systemplans wurden für die Innerstetalsperre drei Zusammenflüsse in das Speicherverbundmodell eingebaut.

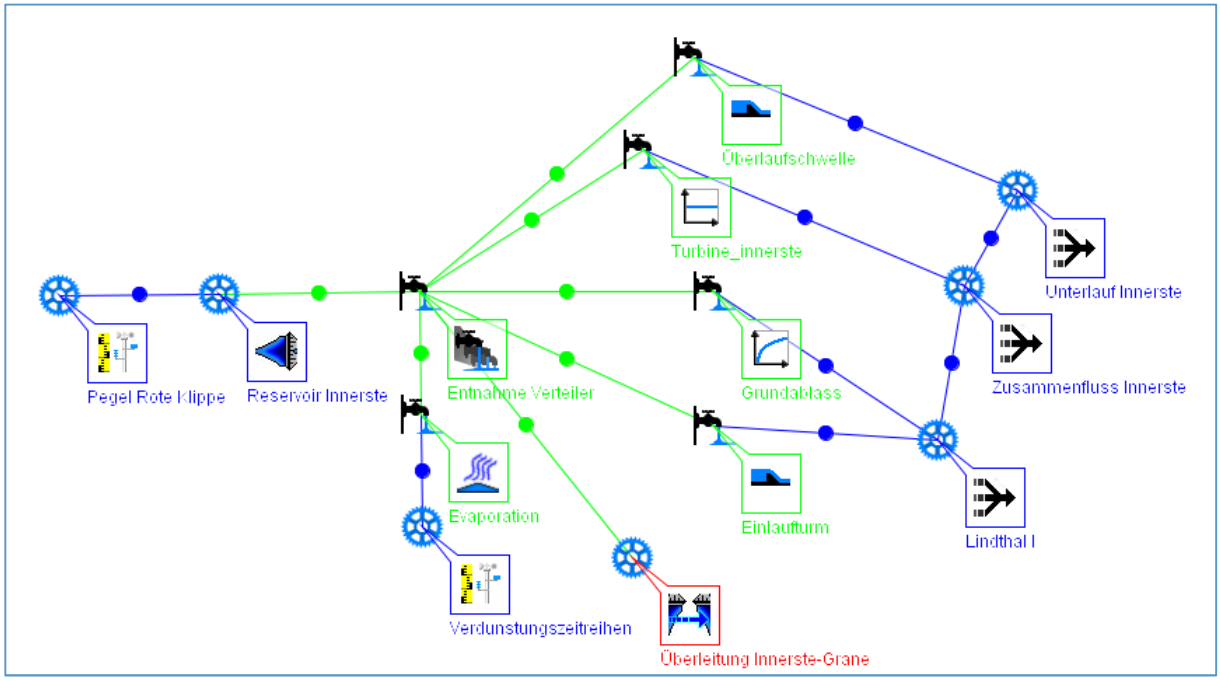


Abbildung 3-4: Modellaufbau am Beispiel der Innerstetalsperre. Mit dem Zufluss über den Pegel Rote Klippe, den einzelnen auftretenden Entnahmeelementen und dem entstehenden Abfluss im Unterlauf.

Für die Überleitung an den Fließgewässern Gose und Wintertalbach wurde das Element “Abschlag in den Speicher“ verwendet (Abbildung 3-5). Der Output dieses Elementes ist zum einen die Abgabe in den Unterlauf und zum anderen der Abschlag in den Speicher, welche in der Summe gleich dem Zufluss sind. Da an dem Fließgewässer Wintertalbach keine Messstation installiert ist und somit keine Daten vorliegen, wird der Abfluss über einen Flächenfaktor von dem Abfluss der Gose abgeschätzt. Zur Kontrolle der Bestimmung wurde das Element “Zufluss Wintertalbach“ in das Modell eingebaut. Die Multiplikation mit dem Faktor von 0,53 erfolgt im Speicherverbundmodell auf der Verbindungslinie vom “Pegel Sennhütte“ zum “Zufluss Wintertalbach“. Ausgangspunkt für das Einsetzen der Überleitungen an beiden Fließgewässern ist die Unterschreitung des Wasserstandes von 310 m über NN in der Granetalsperre. Beim Eintritt dieses Zustandes kann von diesen beiden Abflüssen Wasser in die Granetalsperre übergeleitet werden. Abgeleitet wird dann Wasser beim Überschreiten eines Mindestzuflusses. Die maximale Ableitungsmenge ist dann noch limitiert durch die Konstruktion der Überleitung an dem jeweiligen Fließgewässer. Zum Beispiel beginnt für die Gose die Ableitung in die Granetalsperre ab einem Zufluss größer als 0,1 m³/s und ist auf einen Zufluss von 2,5 m³/s limitiert. Die benötigten Wassermengen zur Aufrechterhaltung des Speicherinhaltes der Granetalsperre werden zu gleichen Anteilen aus den drei Gewässern abgeleitet. Mit dieser Annahme werden die Überleitungsmengen aus der Gose und dem Wintertalbach in IGOmod parallel mit der Überleitung der Okertalsperre berechnet. Diese Annahme hat sich in der nachfolgenden Kalibrierung (Kapitel 4) als sinnvoll erwiesen.

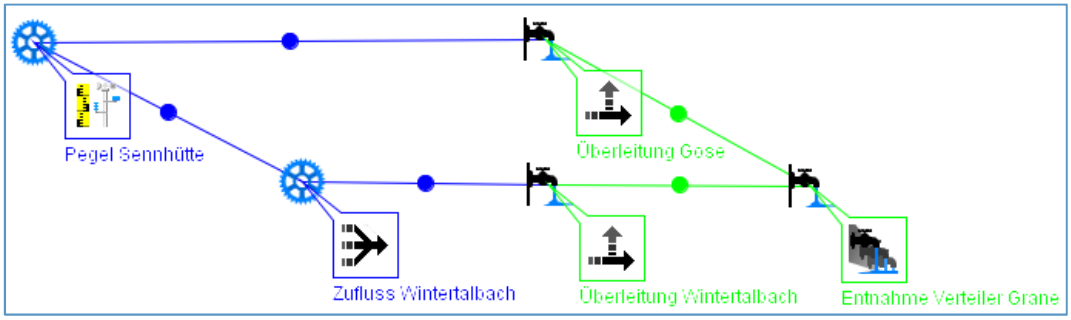


Abbildung 3-5: Einbau der Fließgewässer Gose und Wintertalbach in das Speicherverbundmodell. Aus Platzgründen ist die Verbindung zum Entnahmeverteiler der Grane nicht eingetragen.

Die verbleibende Überleitung im Nordharzverbundsystem befindet sich in der Nähe des Pegels Romkerhall, wo gegebenenfalls die Radau, die Romke und die Okertalsperre Wasser in die Granetalsperre ableiten. Die Implementierung dieses Abschnittes des Systemplans ist in der Abbildung 3-6 dargestellt. Wegen der Übersichtlichkeit sind die Verknüpfungen der Oker-Überleitung mit dem Controller und zu dem Entnahmeverteiler der Granetalsperre nicht in der Abbildung dargestellt. Eine Besonderheit der Okertalsperre hinsichtlich des Zuflusses ist die Existenz von zwei Zuflüssen. Einer davon ist der reguläre Zufluss mit dem Pegel Altenau. Der andere Zufluss ist die Beileitung durch den Dammgraben, der kontinuierlich die Talsperre mit Wasser versorgt. Der Einbau der Okertalsperre in das Modell ist vergleichbar mit dem der Innerstetalsperre. Ein Unterschied zur Innerstetalsperre ist die Hochwasserentlastung mit dem Hebersystem, welches mit dem gleichen Element wie der Grundablass im Modell abgebildet wird. Dies wurde getan, weil diese Form der Hochwasserentlastung nicht mit der Poleni-Gleichung dargestellt werden kann. Die begrenzte Abgabe der Talsperre in die Turbine und in den Grundablass findet auf Basis von zwei Lamellenplänen statt: dem Lamellenplan für die Abgabe in den Unterlauf und dem Plan für die Ableitung in die Granetalsperre.

Beim Radaustollen wird das Modellelement “Abflussaufteilung“ verwendet. Dieses Element ist vergleichbar mit dem “Abschlag in den Speicher“, aber besitzt noch als eine zusätzliche Einstellungsmöglichkeit die Angabe, in welchem Zeitraum diese Überleitung aktiv ist. Denn eine Besonderheit des Radaustollens ist, dass das Einsetzen der Überleitung in den Sommermonaten erst bei einem deutlich höheren Zufluss stattfindet als in den Wintermonaten. Jedoch besitzt die Abflussaufteilung nicht die Option, die Überleitung bei Überschreitung des Zielwasserstandes in der Granetalsperre einzustellen. Zur Umgehung dieses Problems wurde das Element “Abschlag in den Speicher“ separat in das Speicherverbundmodell eingebaut. Aus modelltechnischen Gründen wurde der betreffende Zeitraum auf zwei Zeiträume aufgeteilt. Damit ist die Abflussaufteilung “ÜL Radau Winter 1“ vom 1. Januar bis zum 30. April aktiv und die “ÜL Radau Winter 2“ vom 1. Oktober bis zu 31. Dezember jeden Jahres. Alle anderen Einstellungen sind bei diesen beiden Elementen identisch. Die Wiedergabe der Romke im Modell erfolgt wie beim Wintertalbach über einen Übertragungsfaktor. Grundlage für das kleine Fließgewässer ist die Zeitreihe der Radau am Pegel Harzburg.

Die Oker-Grane Überleitung wird anders als die Überleitung von der Innerste- zur Granetalsperre betrieben. Die Innerste-Grane-Überleitung ist direkt mit dem Entnahmeverteiler der Innerstetalsperre verbunden ist (siehe Abbildung 3-4). Die Überleitung von der Okertalsperre hingegen bekommt von fünf Modellelementen Wasser. Die Wassermengen innerhalb dieser Komponente werden auf drei virtuelle

“Kanäle“ verteilt. Dies ist vergleichbar mit der Abflussaufteilung am Radaustollen. Der erste Kanal transportiert die Abgabe in den Unterlauf, welche sich am Lamellenplan der Okertalsperre orientiert. Der zweite Kanal ist die Überleitung in die Granetalsperre und hat eine maximale Leistungsfähigkeit von 15 m³/s. Die Wassermenge setzt sich aus den Teilmengen aus der Okertalsperre, der Romke und gegebenenfalls der Radau zusammen. Der Überleitungskanal ist aber nur aktiv, wenn der Wasserstand der Granetalsperre unter 310,00 m über NN liegt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird die verbleibende Wassermenge in den dritten Kanal abgegeben. Dieser wird im Modell als der “Restabfluss“ bezeichnet und fließt endgültig in den Unterlauf. Dieser Kanal wird verstärkt bei Hochwasserereignissen an der Okertalsperre in Anspruch genommen.

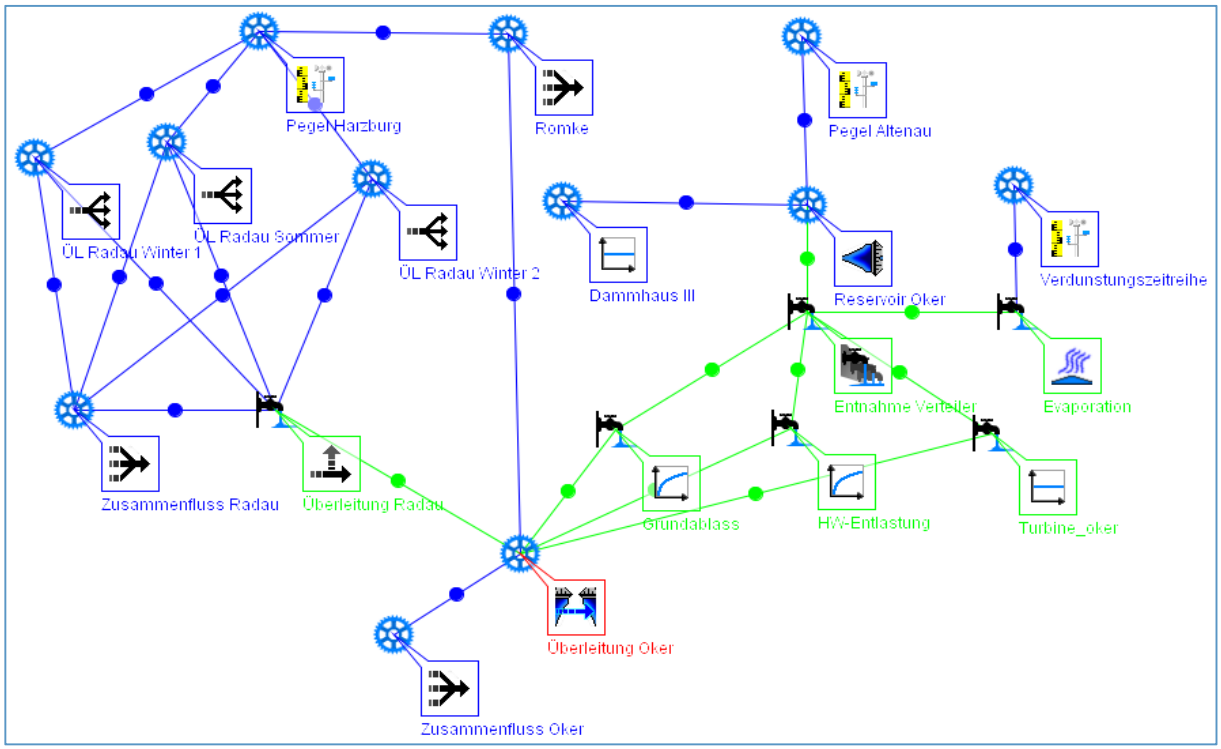


Abbildung 3-6: Struktur des Speicherverbundmodells für die Okertalsperre, mit dem Zufluss über den Pegel Altenau und der kontinuierlichen Beileitung vom Dammgraben, den einzelnen auftretenden Entnahmeelementen und dem entstehenden Abfluss in den Unterlauf; zusätzlich noch die Implementierung der beiden Fließgewässer Radau und Romke.

Der Einbau der Granetalsperre ist prinzipiell ähnlich wie bei den anderen Talsperren. Als Zufluss dient der Pegel Margarethenklippe, welcher in das Reservoir der Granetalsperre abfließt. Dieses Element ist mit dem Entnahmeverteiler der Granetalsperre verknüpft. Hinsichtlich der Entnahmeanlagen wird im Modell die Trinkwasserpumpstation direkt mit dem Entnahmeverteiler verknüpft und nicht mit den Grundablässen. Durch die direkte Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler kann die kontinuierliche Entnahme von Rohwasser vereinfacht im Speicherverbundmodell wiedergegeben werden. Da die Entnahme für die Trinkwassergewinnung eine Art Output darstellt, weil das Wasser dem System entnommen wird und nicht in den Unterlauf fließt, ist das Element der konstanten Entnahme im Modell nicht mit dem Unterlauf der Granetalsperre verbunden. Auf die Darstellung der Turbine unterhalb der zwei Grundablässe wurde im Speicherverbundmodell verzichtet, weil der Betrieb der Turbine keinen Einfluss auf die Abgabe der Talsperre hat. Die Bestimmung der

potenziellen Energieerzeugung dieser Turbine erfolgt mittels Postprozessing bei der Auswertung der Modellergebnisse.

Für die Hochwasserentlastungsanlage an der Granetalsperre, einer Fischbauchklappe, wurde die Komponente “Wehr“ verwendet. Mit dieser Komponente lassen sich die zwei Zustände der Klappe darstellen. Beim Überschreiten des Vollstaus in der Talsperre, welcher bei 311,00 m über NN eintritt, wird die Klappe auf 309,00 m über NN heruntergefahren. Dadurch verändert sich die Überfallhöhe in der Poleni-Gleichung. Im Modell besitzt das Element „Wehr“ die Fähigkeit, am Wasserstand festzustellen, welcher Wert für die Überfallhöhe in der Berechnung verwendet werden soll. Die Besonderheit des Entnahmeverteilers der Granetalsperre ist, dass alle Überleitungen an dieses Element geknüpft sind. Das bedeutet für den Entnahmeverteiler, dass neben der Bestimmung der Abgaben auf die einzelnen Entnahmeelemente noch die einzelnen Überleitungsmengen mit einzubeziehen sind. Somit muss der Verteiler für jeden Zeitschritt und jede Iteration mit zehn anderen Modellelementen innerhalb des Speicherverbundmodells kommunizieren, um eine richtige Wiedergabe der aktuellen Betriebsregeln durchzuführen.

In den Excel-Ergebnistabellen eines IGOmod-Simulationslaufs kann in der Sprache des Modells die “Entnahme“ aus der Granetalsperre negativ sein. Dies bedeutet nur, dass an dem betreffenden Tag die Summe aller Überleitungen größer ist als die Summe aller Entnahmen und somit die Granetalsperre aufgefüllt wird.

Die Implementierung der Granetalsperre in das Speicherverbundmodell ist in der Abbildung 3-7 veranschaulicht, welche das komplette System in der Modellsoftware „Gecko“ darstellt. Auf der linken Hälfte der Abbildung ist das System der Innerstetalsperre dargestellt und auf der rechten Hälfte der Abschnitt der Okertalsperre, Radau, Gose und Wintertalbach. Im Zentrum der Abbildung sind die drei wichtigsten Elemente des Nordharzverbundsystems, die Überleitungen von der Oker- und Innerstetalsperre und der Entnahmeverteiler der Granetalsperre. Das Element “Überleitung“, welches mit den beiden Überleitungen verbunden ist, dient zur Priorisierung der Oker-Grane Überleitung. Da die Ableitung von der Innerstetalsperre in die Granetalsperre kostenintensiv ist, wird in der Realität und somit auch im Modell die von der Granetalsperre benötigte Wassermenge vorrangig von der Okertalsperre übergeleitet.

Für die Auswertung der Simulationen wurde in das Modell noch eine Exportfunktion in eine .csv-Datei eingebaut, die im Symbol “Datenexport“ hinterlegt ist. Dieses Element wurde dann mit jeder Komponente verbunden, welche für die Bewertung der Betriebsregeln und zur Kontrolle des Modells auf Gültigkeit wichtig ist.

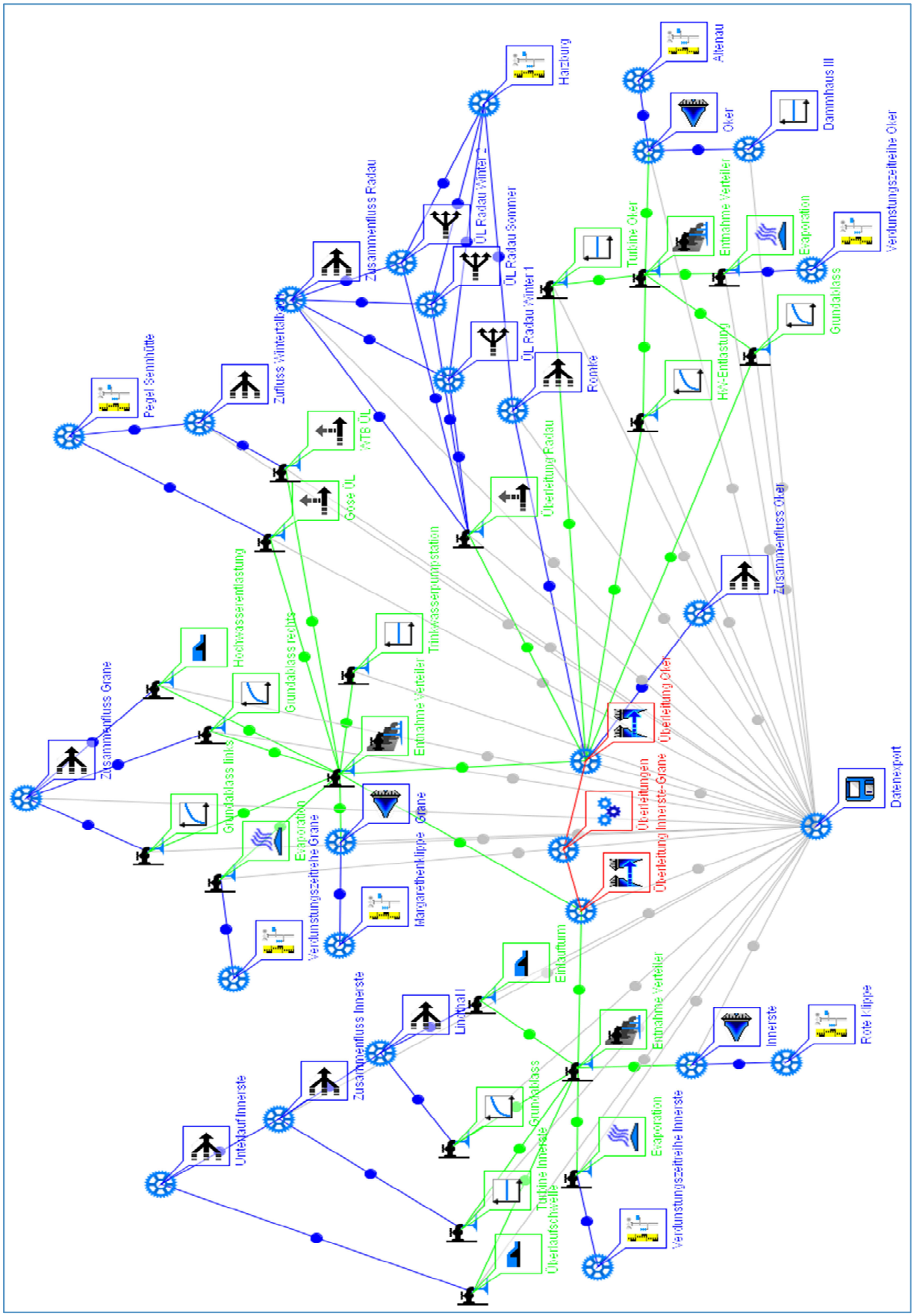


Abbildung 3-7: Das komplette Speicherverbundmodell IGOmod innerhalb der Modellsoftware Gecko.

4 Kalibrierung und Validierung

4.1 Kalibrierung

Wie schon angeführt, wird die Kalibrierung des Modells an zwei Zeiträumen in der Vergangenheit durchgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Zeiträume wird auf den Abschnitt 2.3.2 verwiesen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Kalibrierung des Speicherverbundmodells vom Ablauf her nicht mit der Kalibrierung eines hydrologischen Modells zu vergleichen ist. Im hydrologischen Modell werden Modellparameter optimiert, um die physikalischen Transformationsprozesse von Niederschlag in Abfluss realistisch nachzubilden. Im Speicherbetriebs- und Bilanzierungsmodell mussten keine Modellparameter optimiert werden. Dafür wurde bei der Kalibrierung getestet, ob das Verbundsystem intern richtig verknüpft ist und ob die Betriebsregeln und Eingangsdaten korrekt eingebracht wurden. Eine perfekte Anpassung von gerechneten Abflüssen oder Wasserständen an beobachtete Werte kann hier aus nachfolgenden Gründen nur partiell erreicht werden.

Es ergaben sich immer wieder Abweichungen zwischen beobachteten und simulierten Zeitreihen. Die Hauptursache der Abweichungen zwischen Modell und Realität liegt bei der Steuerung des Systems, die in der Realität gelegentlich nicht regelkonform ist. Nach Aussage der Harzwasserwerke kam es in den Kalibrierungszeiträumen vor, dass die Abgaben der Talsperren und der Ableitungen in die Granetalsperre abweichend von den Betriebsregeln gesteuert werden mussten.

4.1.1 1985-1988 – Überleitung Innerste-Grane nicht aktiv

Die Simulation über den ersten Zeitraum ermöglicht eine bessere Kontrolle der ablaufenden Prozesse an den Talsperren, da die Innerstetalsperre damals autonom betrieben wurde. Dieser Zustand wurde auch im Modell umgesetzt, indem die Überleitung Innerste-Grane und der Controller der Überleitungen aus dem Modell entfernt wurden. Die Simulation über diesen Zeitraum zeigte, dass das Speicherverbundmodell in der Lage ist, die Betriebsregeln der Innerstetalsperre richtig wiederzugeben. Diese Schlussfolgerung kann aus der Abbildung 4-1 gezogen werden, da sich die Modellergebnisse den historischen Daten stark annähern. An vielen Tagen über diesen Simulationszeitraum liegen die Abgaben des Modells fast genau auf den historischen Abgaben. Dies zeigt sich auch an den Wasserständen der Talsperre. Dort stimmen die modellierten Wasserstände an vielen Tag mit den beobachteten Wasserständen überein. Die sichtbaren Abweichungen zwischen den simulierten und damals aufgezeichneten Wasserständen in der Abbildung sind laut Harzwasserwerke GmbH primär auf die reale Steuerung der Talsperre, die teilweise von den Betriebsregeln abweichen kann, zurückzuführen. Dies geschieht zum Beispiel häufig bei einem Füllstand der Talsperre größer als 17,26 Mio. m³, was einem Wasserstand von 259,50 m über NN entspricht. Nach dem Lamellenplan wird ab diesem Niveau die Talsperrenaufsicht eingeschaltet.

Dies kann zur Folge haben, dass die Steuerung der Talsperre nicht nach den Betriebsregeln durchgeführt wird, sondern manuell in Abhängigkeit von der Situation. Dies geschieht, um möglichen Extrembelastungen vorzubeugen.

Der Einsatz der manuellen Steuerung ist nach dem Extremereignis am 01. Januar 1987 gut zu erkennen. Die erhöhte Abgabe aufgrund der Überschreitung des Vollstaus wird von dem Modell selbst gut dargestellt. Am 5. Januar 1987 wurde in der Innerstetalsperre ein Wasserstand von 260,55 m über NN festgestellt. Das Modell errechnete ein Niveau von 260,53 m über NN. Aufgrund dieser Ähnlichkeit sollte die Abgabe am Folgetag im Modell gleich der Realität sein. Jedoch wurde am 6. und 7. Januar ein mittlerer Abfluss von 11,1 m³/s gemessen, während das Modell an beiden Tagen nur 7,5 m³/s abgab. Dieser Wert von 7,5 m³/s weist darauf hin, dass der Wasserstand sich im Übergangsbereich der 5 und 10 m³/s Lamellen befindet. Die erhöhte Abgabe führte nun dazu, dass der Wasserstand in der Talsperre damals stärker abgenommen hat als in der Simulation. Schon am 6. Januar wurde in der Talsperre ein Wasserstand festgestellt (360,19 m über NN), während der Lamellenplan eine Abgabe von 5 m³/s vorgibt. Trotzdem wurden am Tag darauf weiterhin 11 m³/s in den Unterlauf abgegeben. Ein weiteres Beispiel, bei dem die Abgabe der Talsperre abweichend von den Regeln erfolgt sein muss, ist der Zeitraum vom 18. Mai bis zum 1. Juni 1987. Die Situation an diesem Tag ist ein aufgezeichneter Wasserstand von 258,74 m über NN und ein modellierter von 259,19 m über NN. Ausgehend vom Lamellenplan und unter Berücksichtigung des Zuflusses sollte die Abgabe in der Vergangenheit bei 1,5 m³/s und im Modell bei 1,5-3,0 m³/s liegen. Doch die historischen Aufzeichnungen zeigen, dass bis zum Monatswechsel kontinuierlich 3 m³/s in den Unterlauf abgegeben wurden, wohingegen das Speicherverbundmodell entsprechend dem Betriebsplan nur Abgaben von 1,5 oder 2,25 m³/s berechnet hat. Das Resultat dieser verschiedenen Entnahmen in den Unterlauf hat zur Folge, dass die Wasserstände zwischen Modell und Realität nicht übereinstimmen.

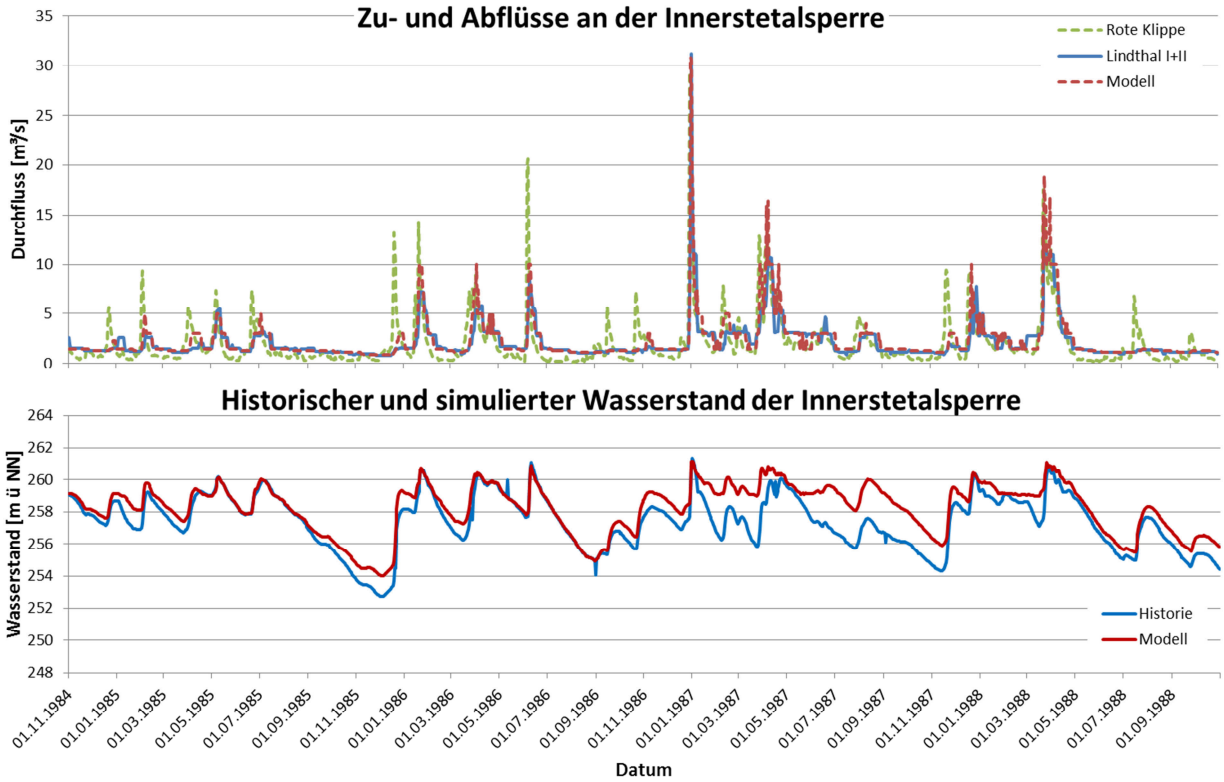


Abbildung 4-1: Simulationsergebnisse des ersten Kalibrierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot).

Auch an der Granetalsperre konnten mit den Simulationen in der ersten Kalibrierungsphase Abweichungen der realen Steuerung von der Steuerung nach Betriebsregeln festgestellt werden. Die Ganglinien aus IGOmod und den Aufzeichnungen sind für die Oker- und die Granetalsperre im Anhang 9 dargestellt. Am Pegel Herzog-Julius-Hütte, der sich unterhalb der Granetalsperre befindet, wurden auch Abflüsse von 0,45 und 1,0 m³/s aufgezeichnet, die sich nicht mit dem Lamellenplan der Granetalsperre erklären lassen. Bezüglich des Abflusses im Unterlauf der Okertalsperre kann die Aussage getroffen werden, dass sich das Modell wie bei der Innerstetalsperre relativ gut an die Realität annähert. Auch an der Okertalsperre liegen die größten Abweichungen zwischen Simulation und Aufzeichnung im Bereich von extremen Ereignissen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei solchen Situationen die Harzwasserwerke GmbH in Abstimmung mit der Talsperrenaufsicht den realen Betrieb abweichend von den Standard-Betriebsregeln gesteuert hatten.

Eine Auffälligkeit bei der Kalibrierung des Speicherverbundmodells sind die Ergebnisse der Speicherfüllstände von Grane- und Okertalsperre über den Zeitraum. In der Simulation gibt es eine Vielzahl von Tagen, an denen in der Granetalsperre mehr Wasser als in Wirklichkeit gespeichert wurde. Im Gegensatz dazu ist in der Okertalsperre weniger Wasser vorhanden, als gemessen wurde. Die wahrscheinliche Ursache dafür ist die kontinuierliche Einhaltung der Betriebsregeln im Modell. Im Gespräch mit den Harzwasserwerken GmbH wurde bestätigt, dass die Überleitung aus der Okertalsperre nicht zu jedem Zeitpunkt nach den Betriebsregeln durchgeführt wurde.

Außerdem wurde durch Recherchen deutlich, dass auch der Radaustollen über den Kalibrierungszeitraum nicht ständig nach den Betriebsregeln betrieben wurde. Die monatlichen Überleitungsmengen von Gose, Radau und Okertalsperre sind in der Abbildung 4-2 dargestellt. An den Überleitungsmengen der Gose ist zu erkennen, dass diese Überleitung im Modell weniger beansprucht wird als in der Realität. Dies ist das Resultat dessen, dass in der Granetalsperre schon der gewünschte Wasserstand von 310,00 m über NN erreicht wurde und die Wassermengen aus der Gose nicht mehr benötigt werden. Anhand des Vergleichs der simulierten und gemessenen Überleitungsmengen der Okertalsperre sind die Unterschiede hinsichtlich der Speicherfüllstände nachvollziehbar. Das Modell leitet mehr Wasser in die Granetalsperre ab, was ein geringeres Wasservolumen in der Okertalsperre zur Folge hat. Dies führt wiederum dazu, dass die Granetalsperre im Modell mehr Wasser aufweist.

Es gilt festzuhalten, dass in der ersten Kalibrierungsphase das Modell IGOmod den Betrieb des Speicherverbundsystems auf Tagesbasis exakt nach den vorgegebenen Regeln durchführte. Die Abweichungen zwischen Modellsimulation und Beobachtung sind erklärbar. Sie beruhen auf Abweichungen von den Betriebsregeln während besonderer Situationen im realen Speicherbetrieb. Solche Abweichungen lassen sich natürlich nicht in einer Modellsimulation, für die die vorhandenen Regeln kontinuierlich anzuwenden sind, nachbilden.

In Übereinstimmung mit der Harzwasserwerke GmbH wurden die Ergebnisse des ersten Kalibrierungszeitraumes als gut befunden. Das Speicherverbundmodell ist generell in der Lage, diesen Zeitraum unter Einhaltung der Betriebsregeln nachvollziehbar zu simulieren. Mit dem zweiten Zeitraum der Kalibrierung soll die Funktionalität des Modells mit der aktiven der Innerste-Grane Überleitung nachgewiesen werden.

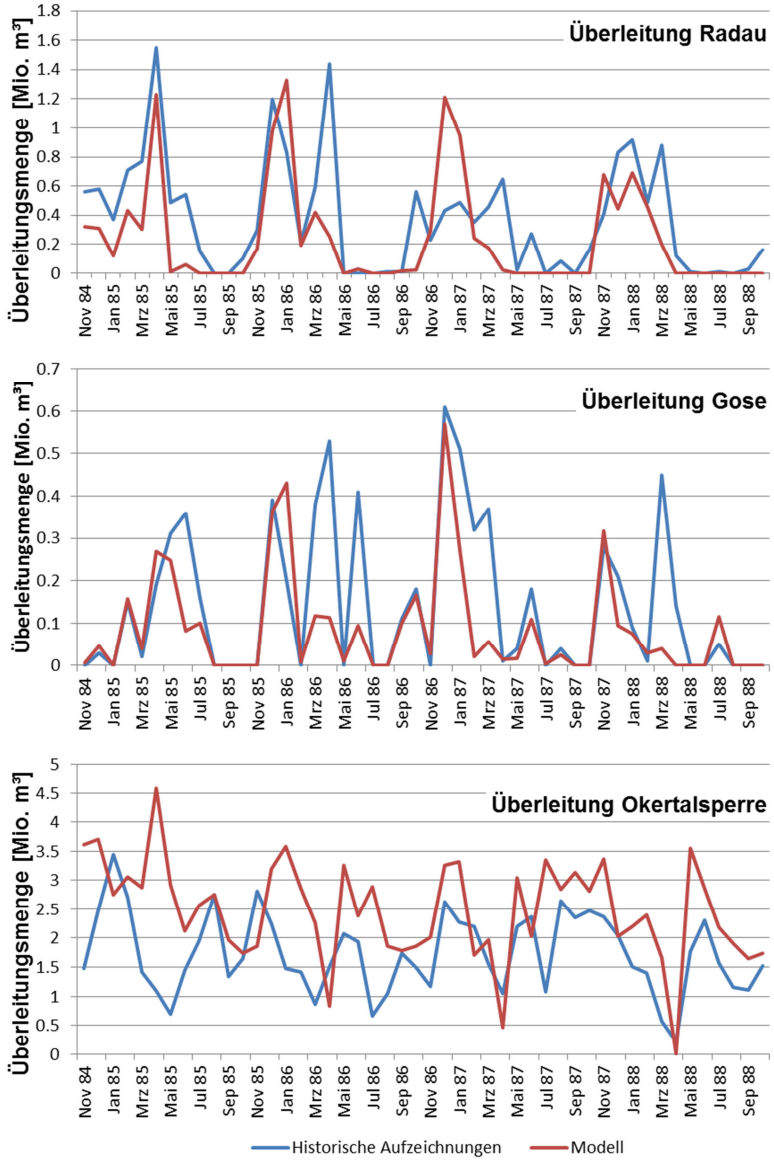


Abbildung 4-2: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Radau, Gose und Okertalsperre für den Kalibrierungszeitraum von November 1985 bis Oktober 1988.

4.1.2 1996-1997 – Überleitung Innerste-Grane aktiv

Für den zweiten Kalibrierungszeitraum wurde das vollständige Speicherverbundmodell des Nordharzverbundsystems verwendet. Innerhalb des aufgestellten Speicherverbundmodells ist die Überleitung von der Innerste- zur Granetalsperre nach allen anderen Überleitungen geschaltet. Dies bedeutet, dass die Ableitung von der Innerstetalsperre nur dann stattfindet, wenn alle anderen Überleitungen voll ausgelastet sind. Die Simulation über diesen Zeitraum zeigt beim direkten Vergleich von Wasserständen in den Talsperren und den Abflüssen im Unterlauf sichtbare Unterschiede. Besonders stark sind die Abweichungen von

Realität und Modell bei Abflüssen unterhalb der Innerstetalsperre zu sehen (Abbildung 4-3). Zu fast keinem Zeitpunkt erreicht die simulierten Abflüsse das Modell die damaligen aufgezeichneten Abflüsse.

Diese Unstimmigkeit steht scheinbar im Widerspruch mit dem beobachteten und simulierten Speicherinhalt der Innerstetalsperre, denn dort ist eine Annäherung des Modells an die Realität erkennbar. Beispielsweise in den Monaten März und April im Jahr 1997 gibt das Modell den Wasserstand von damals sehr gut wieder, jedoch ist der Abfluss im Unterlauf viel geringer im Modell. Die größten Abweichungen hinsichtlich des Speicherinhaltes treten im Winter 1996 und in den Herbstmonaten 1997 auf. In diesen beiden Zeiträumen wird in der Talsperre ein geringerer Wasserstand angenommen als damals wirklich festgestellt wurde.

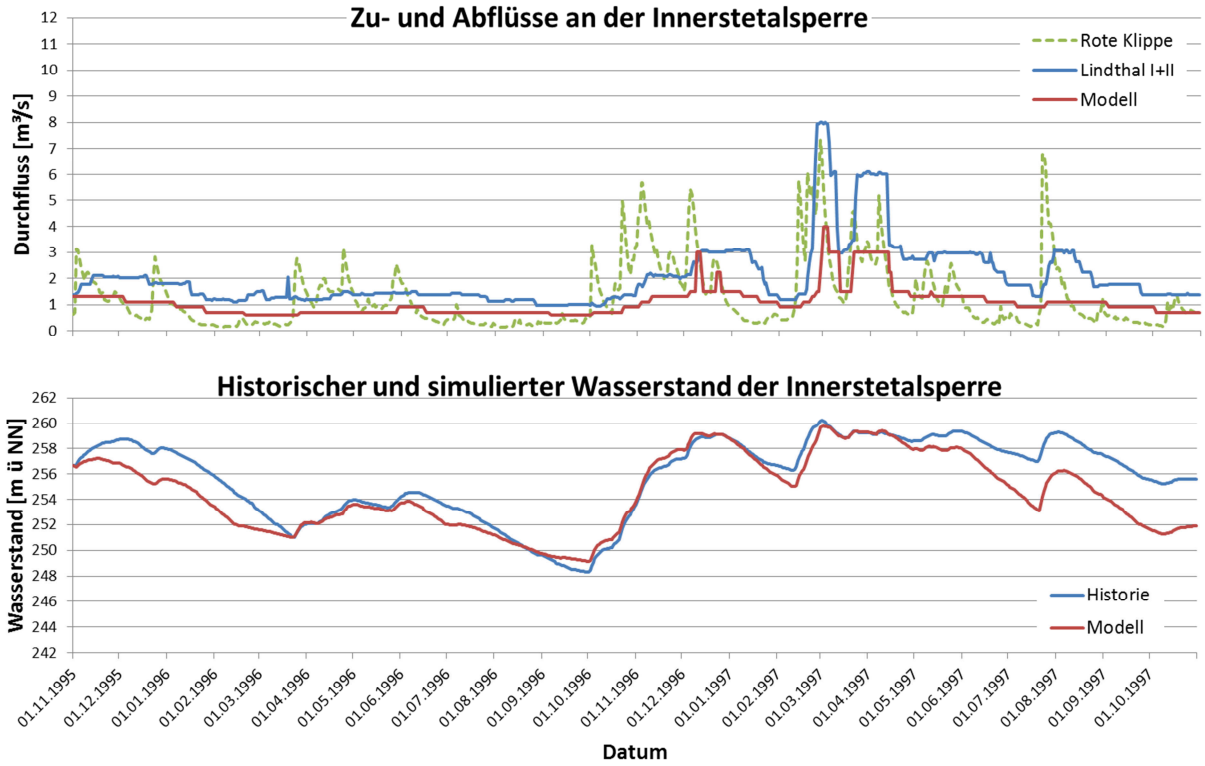


Abbildung 4-3: Simulationsergebnisse des zweiten Kalibrierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot).

Die unterschiedlichen Verläufe der Wasserstände zu Beginn des zweiten Kalibrierungszeitraumes lassen sich nach Rücksprache mit den Harzwasserwerken wie folgt erklären: Im Winter 1994-1995 fand eine Art Entleerung an der Okertalsperre statt, wodurch mehr Wasser in die Granetalsperre abgeleitet wurde. Die Darstellungen von den Abflüssen und Wasserständen von der Oker- und Granetalsperre sind im Anhang 10 einsehbar. Diese Entleerung hatte zur Folge, dass der Speicherinhalt der Granetalsperre stärker anstieg und gleichzeitig der Speicherinhalt in der Okertalsperre abnahm. Dieses Verhalten zeigt sich auch in Abbildung 4-4 mit den monatlichen Überleitungsmengen der Oker- und der Innerstetalsperre. In den ersten fünf Monaten des zweiten Kalibrierungszeitraumes wurde mehr Wasser aus der Okertalsperre in die Granetalsperre abgeleitet als im Modell. Besonders im Januar 1996 war die tatsächliche Abgabe von der Okertalsperre in die Granetalsperre sichtbar höher als im Modell. Die Überleitungsmenge von 3,83 Mio. m³ wäre rein nach den Betriebsregeln nicht

möglich gewesen. Denn nach dem Ableitungsplan der Okertalsperre (Anhang 4.4) dürfte bei einem mittleren Inhalt von 13,88 Mio. m³ nur eine Menge von 0,7-0,8 Mio. m³ übergeleitet werden.

Mit diesen Informationen ist anzunehmen, dass die Überleitung der Innerstetalsperre im November 1995 mit dem Wissen der späteren Entleerung der Okertalsperre gezielt nicht in Betrieb genommen wurde. Im Modell wurde regelgemäß in die Granetalsperre übergeleitet, somit nahm der Speicherinhalt in der Innerstetalsperre ab. Dadurch wurde auch eine geringere Menge dem Stausee entnommen und in dem Unterlauf abgegeben. Für den Verlauf der Okertalsperre bedeutet das Fehlen des Absenkungsereignisses, dass im Modell der Stausee mehr Wasser enthielt. Dies hatte zur Folge, dass in der Simulation mehr Wasser in den Unterlauf abgegeben wurde als in der Wirklichkeit (siehe Anhang 10). Aus diesem Grund kann die Auffüllung der Granetalsperre im ersten Halbjahr 1996 nicht reproduziert werden.

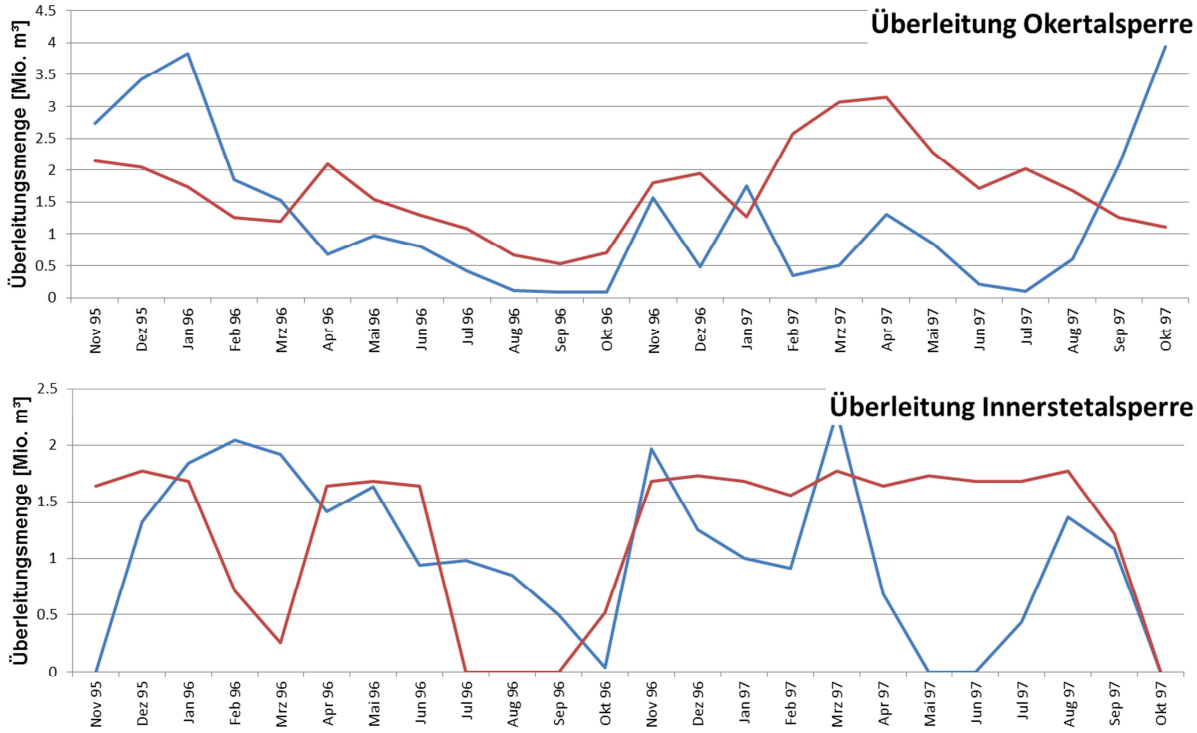


Abbildung 4-4: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Okertalsperre und Innerstetalsperre für den zweiten Kalibrierungszeitraum von November 1995 bis Oktober 1997.

Zum späteren Zeitpunkt der Kalibrierung zeigt das Modell eine sichtbare Annäherung zur Realität bezüglich der Wasserstände bei den Talsperren Oker und Innerste (die ersten 6 Monate im Kalenderjahr 1997). In dieser Zeitspanne ist auch eine Ähnlichkeit zwischen den historischen und simulierten Abflüsse im Unterlauf der Okertalsperre erkennbar. Bei der Innerstetalsperre kann dieses Verhalten nicht beobachtet werden, da wie schon angeführt, das Modell zu keinem Zeitpunkt an die historischen Abflüsse am Pegel Lindthal herankommt. Eine mögliche Ursache für die Unterschätzung des Modells könnte das Vorhandensein des kleinen Einzugsgebietes unterhalb der Innerstetalsperre sein, welches nicht vom Modell erfasst wird, der Innerste aber oberhalb des Abgabepegels Lindthal zufließt. Bei der Granetalsperre ist nur eine Ähnlichkeit im Verlauf erkennbar, wegen des Fehlens eines Entleerungsereignisses in der Okertalsperre im Vorjahr.

Gegen Ende dieses Untersuchungszeitraumes kommt es zu wachsenden Abweichungen zwischen Modell und Realität hinsichtlich der Speicherinhalte. Dies ist im Modell mit dem kontinuierlichen Ableitungsbetrieb von den Überleitungen Oker und Innerste begründbar, da die auftretenden Zustände im System die Überleitung von beiden Talsperren zulässt. Die Ableitung aus der Innerstetalsperre endete erst, als der Wasserstand von 252,50 m über NN unterschritten wurde. In der Okertalsperre kommt es wegen der Ableitungen in die Granetalsperre zu einer verstärkten Abnahme des Speicherinhaltes.
Es kann davon ausgegangen werden, dass der reale Überleitungsbetrieb der Okertalsperre in diesen Monaten eingeschränkt wurde, um die Absenkung zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen. Ein Indiz dafür ist auch die Überleitungsmenge von 3,94 Mio m³ im Oktober 1997. Im Gegensatz dazu wurde damals die Überleitung der Innerstetalsperre im letzten Monat komplett abgeschaltet. Im Modell hingegen resultiert die Abschaltung der Überleitung regelkonform nur aus der Unterschreitung des Wasserstandes in der Innerstetalsperre von 252,5 m über NN.

Die Überleitungsmengen der Gose und der Radau sind im Anhang 11 zu finden.

Obwohl der Vergleich von Modell und Realität für diesen Zeitraum sichtbare Unterschiede zeigt, wird gefolgert, dass das Speicherverbundmodell regelkonform operiert. Die Abweichungen in den Abgaben im Unterlauf und den Speicherfüllständen sind primär begründbar mit dem realen historischen Betrieb, der vom Regelbetrieb abweichen kann und nicht vom Modell nachvollzogen werden kann.

4.2 Validierung

Für die Validierung wird das kalibrierte Modell IGOmod nochmals auf einen anderen historischen Zeitraum angesetzt. Bei einem hydrologischen Modell werden bei der Validierung die zuvor in der Kalibrierung optimierten Modellparameter beibehalten, die Aussagekraft des kalibrierten Modells wird nochmals für eine andere historische Periode untersucht. Das Speicherbetriebs- und Bilanzierungsmodell IGOmod benötigt jedoch keine solchen Parameter. In der Kalibrierung wurde schon getestet, ob die vorgegebenen (komplexen) Betriebsregeln korrekt eingegeben und vom Modell verwendet werden, und ob die simulierten Kenngrößen (Speicherwasserstände, Ausflüsse usw.) den beobachteten Kenngrößen bei regelkonformem Betrieb in der Vergangenheit entsprechen.

Mit der Validierung soll das nach den oben genannten Kriterien kalibrierte Modell IGOmod lediglich nochmals getestet werden, um ggf. noch nicht erkannte Programmierfehler, Dateneingabefehler sowie Fehler in den eingegebenen Betriebsregeln zu beheben.

4.2.1 2001-2005 – Überleitung Innerste-Grane nicht aktiv

Während dieser von den Harzwasserwerken GmbH empfohlenen Zeitspanne wurde die Überleitung Innerste-Grane nicht betrieben. Zusätzlich wurden Sanierungsarbeiten an der Innerstetalsperre durchgeführt. Schon wie beim ersten Kalibrierungszeitraum festgestellt, kann das Modell den regelkonformen Talsperrenbetrieb gut wiedergeben. In der Abbildung 4-5 ist der Verlauf des Wasserstandes und der Abgabe in den Unterlauf der Innerstetalsperre dargestellt. Bis zu dem Zeitpunkt, wo der Speicher der Innerstetalsperre gezielt für die Sanierungsarbeiten entleert wurde, gibt das Modell verhältnismäßig gut den historischen Speicherwasserstand wieder. Ausnahmen dabei bilden die Monate Juni und Juli im Jahr 2002. In dieser Zeit fand – abweichend vom Betriebsplan - eine erhöhte Abgabe in den Unterlauf statt. Das Extremereignis am 18.07.2002 konnte durch die Vorabsenkung besser abgemindert werden. An diesen Tag wurde am Pegel Rote Klippe oberhalb der Innerstetalsperre ein Zufluss von 34,1 m³/s gemessen. Zusätzlich wurde am Folgetag ein Wert von 30,9 m³/s verzeichnet. Durch die realen erhöhten Abgaben in der Vergangenheit in den Wochen zuvor konnte die Überschreitung des Vollstaus verhindert werden, welche im Modell erwartungsgemäß eintrat. Durch die zusätzliche Abgabe des Einlaufturmes wurde im Modell ein Abfluss von 14,71 m³/s im Unterlauf simuliert.

Eine vergleichbare Situation ist zu Beginn des Jahres 2003 zu sehen. In der Vergangenheit wurde in den Tagen zuvor real eine größere Menge in den Unterlauf abgeben, wodurch der Speicherinhalt des Stausees abnahm. Am 3. Januar 2003 wurde ein Zufluss von 20,8 m³/s am Pegel oberhalb der Talsperre gemessen. Diese Wassermengen konnten in der Vergangenheit, ohne Überschreitung des Vollstaus, in den Stausee fließen und zu einem späteren Zeitpunkt in den Unterlauf abgegeben werden. Im Modell kam es auch aufgrund der hohen Speicherinhaltes des Stausees regelkonform zur Überschreitung des Vollstaus und somit zur Abgabe der überschüssigen Wassermengen über den Einlaufturm. Dies resultierte in einen Abfluss von 18,8 m³/s unterhalb der Talsperre.

Für die Durchführung der Sanierungsarbeiten wurde im Verlauf des Jahres 2003 ein großer Teil des Speicherinhaltes in den Unterlauf abgegeben. Über den Zeitraum der Arbeiten an der Talsperre wurde der Talsperrenzufluss direkt in den Unterlauf weitergeleitet. Nach dem Abschluss der Sanierung wurde der Stausee wiederaufgefüllt. Gegen Ende des Monats Februar 2005 waren die simulierten und beobachteten Wasserstände fast identisch. Auch die simulierten und beobachteten Abflüsse sind ab Ende Februar 2005 bis zum Ende des Validierungszeitraumes ähnlich. Die Darstellungen der Wasserstände, Zu- und Abflüsse für die Oker- und Granetalsperre sind im Anhang 12 aufgeführt.

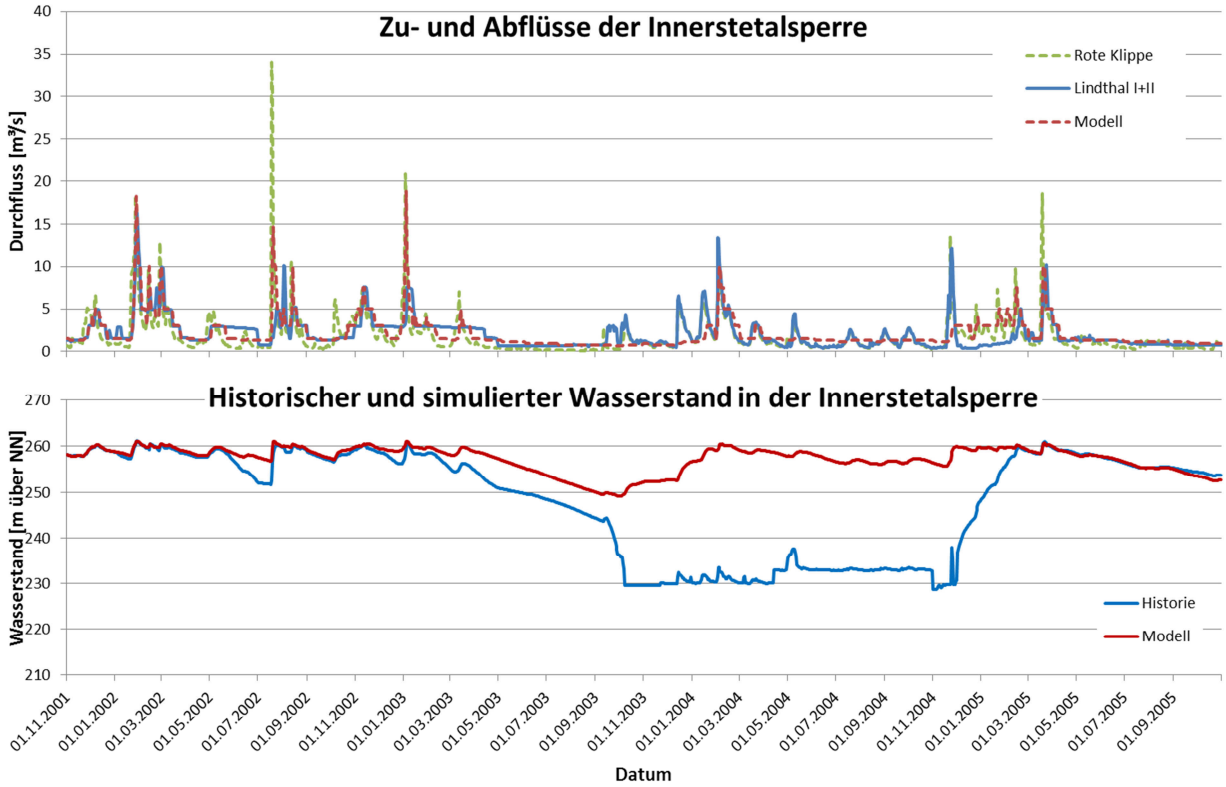


Abbildung 4-5: Simulationsergebnisse des Validierungszeitraumes an der Innerstetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot).

Bei den anderen beiden Talsperren wird im Validierungszeitraum die von den Betriebsregeln abweichende reale Steuerung der Entnahmen deutlich. Beispielsweise findet zu Beginn der Simulation im Januar 2002 die Abgabe von großen Wassermengen von der Okertalsperre in die Granetalsperre statt, um in der Granetalsperre den gewünschten Wasserstand von 310,00 m über NN zu erreichen. Veranschaulicht ist dies in der Abbildung 4-6, welche die monatlichen Überleitungsmengen der Oker, der Radau und der Gose zeigt. Bei Betrachtung der monatlichen Ableitungsmengen der Gose ist ersichtlich, dass das Modell in den ersten Monaten mit den historischen Aufzeichnungen übereinstimmt. Eine Auffälligkeit bei dem Radaustollen und seiner übergeleiteten Wassermengen ist der Unterschied zwischen Modell und Wirklichkeit im Februar 2002. In diesem Monat wurde damals mehr Wasser in die Granetalsperre abgeleitet als im Modell. Nach Kontrolle der Eingangsdaten und der Modellergebnisse konnte kein Fehler innerhalb des Modells gefunden werden. Die Betriebsregeln für diesen Bereich des Nordharzverbundsystems wurden für jeden Zeitschritt korrekt durchgeführt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass in diesem Zeitraum real mehr Wasser in die

Überleitung abgegeben wurde, als dies nach bei Einhalten der Regeln der Fall wäre. Diese Unterschiede lassen sich auch im Februar 2004 und März 2005 wiederfinden.

Durch die hohen Ableitungsmengen der Okertalsperre zu Beginn der Simulation kommt es im Modell schnell zum Erreichen des gewünschten Wasserstandes von 310,00 m über NN in der Granetalsperre, abweichend von den historischen Aufzeichnungen. In der Simulation wurden folgerichtig in den Folgemonaten die Überleitungen der Gose und Radau weniger in Anspruch genommen. Für die Okertalsperre führte die modellierte höhere Ableitung in den ersten Monaten zu einem geringeren Speicherinhalt des Stausees als in der Realität.

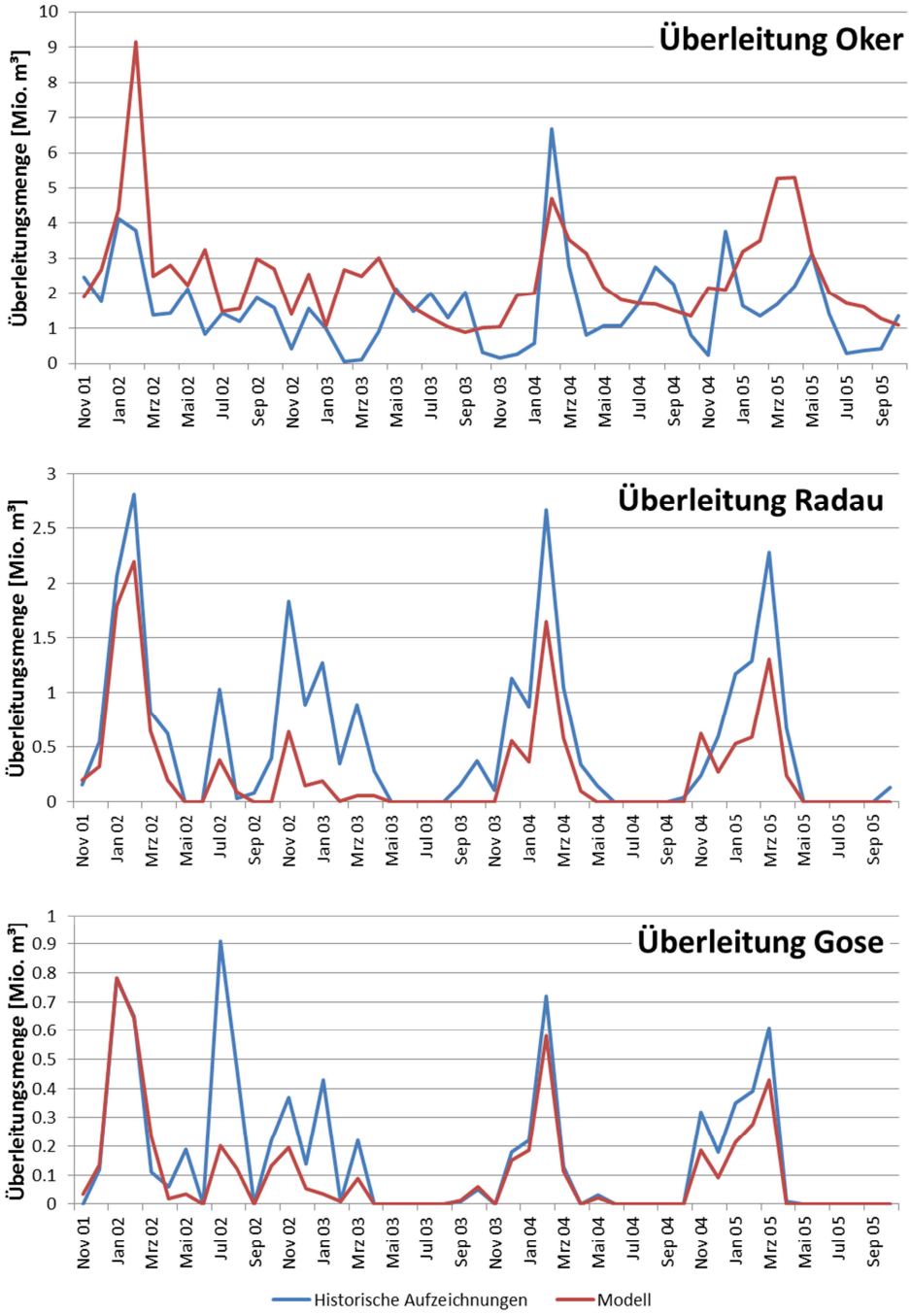


Abbildung 4-6: Die monatliche Abgabe der Überleitungen Radau, Gose und Okertalsperre für den Validierungszeitraum von November 2001 bis Oktober 2005.

Mit der Einhaltung der Betriebsregeln wurde der Wasserstand der Granetalsperre im Modell über lange Zeit auf dem gewünschten Niveau gehalten. Dies bedeutet nach dem Lamellenplan, dass die Abgabe in den Unterlauf 0,35 m³/s beträgt. Am Pegel Herzog-Julius-Hütte, welcher sich unterhalb der Granetalsperre befindet, wurden aber im Zeitraum von August 2002 bis April 2003 im Mittel etwa 0,57 m³/s aufgezeichnet. Dieser Abfluss lässt sich aber nicht mit dem Lamellenplan der Granetalsperre erklären. Es wird davon ausgegangen, dass die Talsperrenaufsicht eingeschaltet wurde und die Entnahme auch manuell festgelegt wurde. Eine weitere Auffälligkeit beim Vergleich der historischen und simulierten Werte ist der Verlauf des Speicherinhaltes der Granetalsperre ab dem Februar 2004. Die Betrachtung der Wasserstandsganglinie in der Abbildung 4-7 lässt vermuten, dass von Februar bis April 2004 die Granetalsperre gezielt aufgefüllt wurde.

Dies ist auch in den abgeleiteten Wassermengen der Überleitungen in der Abbildung 4-6 erkennbar. Wie schon angeführt, fällt besonders der Radaustollen mit seinen übergeleiteten Wassermengen auf. Jedoch wurden im Speicherverbundmodell die Abgaben in die Granetalsperre strikt nach den bekannten Betriebsregeln durchgeführt.

Bei Berücksichtigung des Sachverhaltes, dass im Modell die Auffüllung der Granetalsperre nicht stattgefunden hat, spiegelt das Modell den Verlauf des Wasserstandes bis zum Ende des Validierungszeitraumes gut wieder. Dies trifft auch größtenteils auf den Abfluss unterhalb der Talsperre zu. Einzig die erhöhte Abgabe der Granetalsperre vom März bis Juli 2005 wird nicht vom Modell wiedergegeben. Die mögliche Ursache liegt vermutlich wieder beim nicht regelkonformen realen Betrieb.

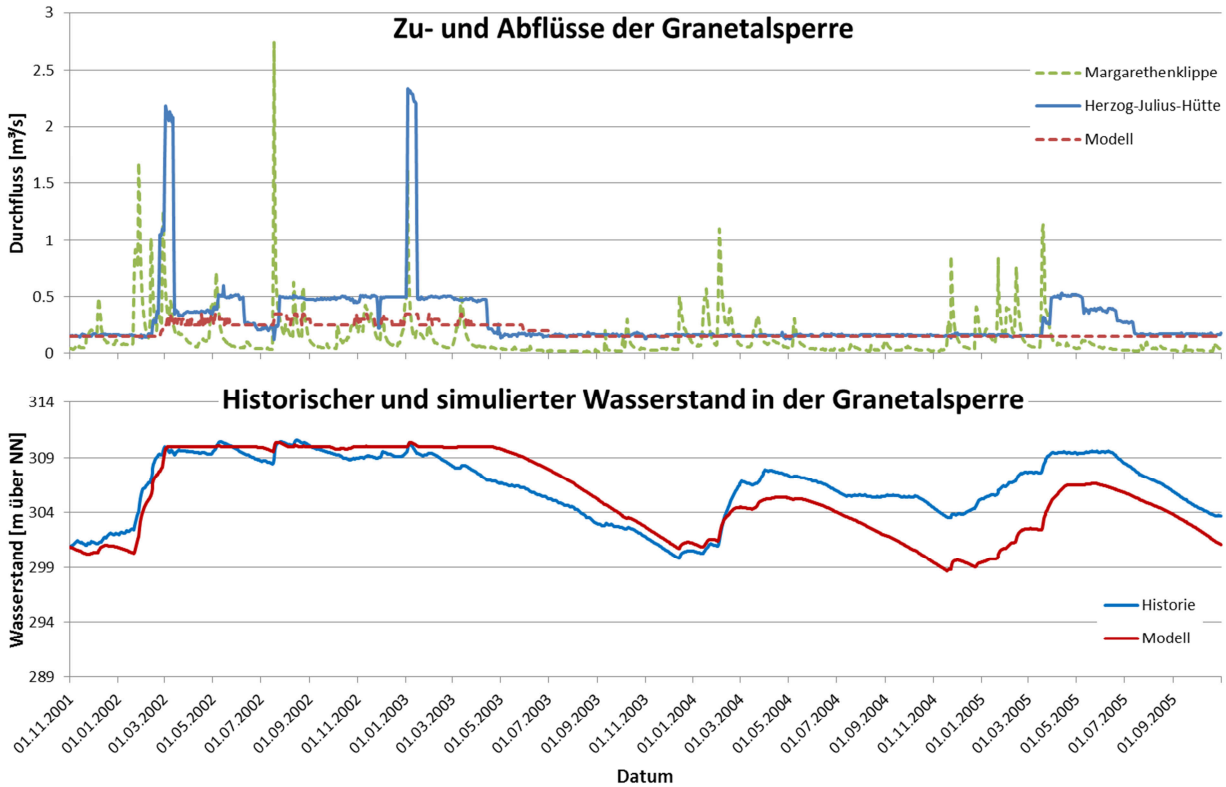


Abbildung 4-7: Simulationsergebnisse des Validierungszeitraumes an der Granetalsperre. Gegenüberstellung der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den simulierten Daten (rot).

Durch die Simulationen der drei unterschiedlichen Zeiträumen wurde deutlich, dass das Modell die Fähigkeit besitzt, die Betriebsregeln des Nordharzverbundsystems richtig umzusetzen. Viele Abweichungen in der Kalibrierung und Validierung sind auf die damalige reale Steuerung der Abgaben, abweichend von den Betriebsregeln, zurückzuführen. Am häufigsten traten die Unterschiede zwischen Modell und Wirklichkeit dann auf, wenn der Wasserstand in den Talsperren den Wert überschritt, ab dem die Talsperrenaufsicht eingeschaltet worden ist.

Für das Neubewilligungsverfahren des Nordharzverbundsystems erfüllt dieses entwickelte Modell die benötigten Anforderungen, um eine Bewertung der aktuellen Betriebsregeln durchzuführen. Die einzigen Abstriche müssen an der Simulation der Überleitung Innerste-Grane gemacht werden, da diese Überleitung im Modell rein nach den Betriebsregeln operiert und nicht den Kostenaspekt berücksichtigt.

5 Simulationslauf für die reale verlängerte Vergangenheit ohne Klimaänderung nach aktuellem Betriebsplan

5.1 Überblick

Nach erfolgreicher Kalibrierung und Validierung wurde mit dem Modell und den vorhandenen Betriebsregeln eine Simulation mit Zuflusszeitreihen von Haberlandt (2013) über 10.000 Jahre auf Tagesbasis für die Vergangenheit bis heute durchgeführt und ausgewertet. Die Zuflussreihen repräsentieren die “echte“ Vergangenheit im Zeitraum 1961 bis 2000 – somit im Sinne der Klimaforschung noch ohne signifikante Klimaänderung, wie sie für das 21. Jahrhundert prognostiziert wird. Für die Generierung der Zuflussserien an den fünf maßgebenden Pegeln wurden keine Daten aus Klimamodellen, sondern nur die beobachteten historische Daten verwendet (Haberlandt, 2013).

Nachfolgend wird dieser Simulationslauf als “reale verlängerte Vergangenheit“ bezeichnet.

IGOmod benötigt für einen Simulationslauf über 10.000 Jahre auf Tagesbasis auf einem PC mit höherer Leistungsfähigkeit derzeit ca. 6 h.

Im Anschluss wurden die umfangreichen Simulationsergebnisse mit dem am LWI entwickelten Auswertetool, dass in MATLAB programmiert wurde, ausgewertet. Die wichtigsten Kenngrößen sind in Tabelle 5-1 und im Anhang 13 zusammengefasst. Die Tabelle ist direkt dem Auswertetool entnommen. Die Ergebnisse dienen auch zum Vergleich mit der künstlichen Vergangenheit (20C-Lauf der WETTREG-Realisation 18) und der Zukunft unter Klimaänderung (WETTREG-Realisation 18 für die nahe und ferne Zukunft). Hierzu wird auf Kapitel 6 verwiesen.

Bei der Zählung der Tage, wo die Überleitung von der Innerstetalsperre zur Granetalsperre aktiv ist, dienen Schwellwerte als Orientierung. Beispielhaft wurden bei dem Schwellwert von 20 l/s nur die Tage gezählt, an denen die Abgabe in die Granetalsperre größer 20 l/s ist. Im Vergleich mit dem zweiten Schwellwert von 10 l/s ist ersichtlich, dass an vielen Tagen über die 10.000 Jahre nur sehr geringe Mengen an Wasser aus der Innerstetalsperre in die Granetalsperre übergeleitet wurden.

Im Anschluss wird auf relevante Kenngrößen eingegangen.

Tabelle 5-1: Ergebnisse des Simulationslaufes “reale verlängerte Vergangenheit“

Granetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 309.19 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 42.62 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 0.45 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 0.23 m³/s
Mittlere potenzielle Energieerzeugung über ein Jahr: 0.64 MWh
Kontinuierliche Entnahme durch die Trinkwasserpumpstation: 1,20 m³/s
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 465 Tage über den Simulationszeitraum (465 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 0 Tage über den Simulationszeitraum
(0 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 21.41 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 3
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 2
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 1

Okertalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 408.50 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 31.88 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.68 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 2.02 m³/s
Mittlere potenzielle Energieerzeugung über ein Jahr: 13.66 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 13717 Tage über den Simulationszeitraum
(6533 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 4154 Tage über den Simulationszeitraum
(2963 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 83.18 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Einsatz der Oker-Grane Überleitung: 3.30e+06 Tage über den Simulationszeitraum
mittlere Abgabe der Okertalsperre zur Granetalsperre: 0.74 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Okertalsperre über ein Jahr: 20.96 Mio. m³
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 9456
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 9984
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 9760

Innerstetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 256.19 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 13.54 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.11 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.85 m³/s
Mittlere potenzielle Energieerzeugung über ein Jahr: 5.45 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 16215 Tage über den Simulationszeitraum
(8853 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 3357 Tage über den Simulationszeitraum
(2554 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 51.19 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 3507 Tage
Einsatz der Innerste-Grane Überleitung: 1.77e+06 Tage über den Simulationszeitraum
(Schwellwert: 10 l/s)
Einsatz der Innerste-Grane Überleitung: 1.73e+06 Tage über den Simulationszeitraum
(Schwellwert: 20 l/s)
mittlere Abgabe der Innerstetalsperre zur Granetalsperre: 0.24 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Innerstetalsperre über ein Jahr: 7.49 Mio. m³

Überleitungen (Zeitraum: 1 Jahr)
mittleres Überleitungsvolumen der Gose: 0.66 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen des Wintertalbach: 0.50 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Radau: 1.45 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Romke: 1.08 Mio. m³

5.2 Wasserhaushaltsgrößen

Da eine allgemeine Einschätzung des Zuflusses für alle drei Talsperren schon zu in Kapitel 2.3.3 durchgeführt wurde, wird nachfolgend auf die simulierte Abgabe in den Unterlauf eingegangen. Zur Veranschaulichung ist in der Tabelle 5-2 der simulierte mittlere Abfluss mit dem des Zeitraumes 1984 bis 2002 gegenübergestellt. Da der Umfang der historischen Aufzeichnungen nur einen kleinen Teil der generierten Zeitreihe darstellt, sind die Abweichungen in den Mittelwerten nicht unbedingt repräsentativ. Sie vermitteln aber einen Eindruck der langjährigen Zeitreihe. Des Weiteren ist innerhalb der synthetisch verlängerten Zeitreihe die Innerste-Grane Überleitung existent. Das bedeutet, wenn die Bedingungen für den Betrieb der Überleitung erfüllt wurden, wurde Wasser von der Innerstetalsperre in die Granetalsperre abgeleitet. Dies konnte auch in den Mittelwerten beobachtet werden. Die Innerstetalsperre gab im Modell weniger Wasser in den Unterlauf ab, weil die Überleitung in die Granetalsperre häufiger aktiv war. Dies bedeutete, dass der Speicher weniger enthielt und somit weniger Wasser ins Wildbett abgeben durfte. Das hatte als Resultat, dass die Okertalsperre weniger Wasser in die Granetalsperre abgab und somit die Abgabe in den Unterlauf größer wurde. Unterhalb der Granetalsperre konnte ein Anstieg der Abgabe beobachtet werden. Dies ist das Ergebnis aller Überleitungen, welche die Granetalsperre auf einen Speicherfüllstand von 44,23 Mio. m³ halten. Dadurch wurde nach den Lamellenplan eine größere Wassermenge in den Unterlauf abgegeben.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Abflüsse unterhalb der drei Talsperren des Nordharzverbundsystems für den Zeitraum von 1984 bis 2002 (hydrologische Jahre) und der realen verlängerten Vergangenheit.

Talsperre	Innerste	Grane	Oker
Zeitreihe / Pegel (unterhalb)	Lindthal	Herzog-Julius-Hütte	Okertal
Zeitraum 1984 - 2002	1,87 m³/s	0,19 m³/s	1,89 m³/s
Reale verlängerte Vergangenheit	1,85 m³/s	0,23 m³/s	2,02 m³/s

Zu Extremereignissen liefern die historischen Aufzeichnungen der Abflüsse im Unterlauf nur wenige Informationen. Einzig am Pegel Lindthal, welcher sich unterhalb der Innerstetalsperre befindet, wurden Werte aufgezeichnet, die auf ein Erreichen des Vollstaus hinweisen. Wie schon im Kapitel 4.1.1 angeführt, wurde am 01. Januar 1987 ein Abfluss von 31,2 m³/s unterhalb der Talsperre festgestellt. Innerhalb der langjährigen Zeitreihe wurde dieses Maximum deutlich überschritten. In den 10.000 Jahren beträgt der maximale simulierte Abfluss beim Pegel Lindthal am 12. März im Modelljahr 1752 ca. 51,19 m³/s. Die Betrachtung der Inputdaten zeigt, dass in den Vortagen größere Wassermengen in die Talsperren flossen. In der Tabelle 5-3 ist der Verlauf dieses Ereignisses für die Innerstetalsperre dargestellt. Durch die erhöhten Zuflüsse an den Vortagen kam es zum starken Ansteigen des Speicherinhaltes des Stausees. Schon am Vortag, den 11. März im Modell, kam es zur Abgabe der Talsperre über den Einlaufturm. Mit dem schon hohen Speicherfüllstand und dem extremen Zufluss am 12. März simulierte das Modell den maximalen Abfluss im Unterlauf. Für die Pegel Margarethenklippe und Okertal, welche sich unterhalb der Grane- und Okertalsperre befinden, konnten keine historischen Abflüsse festgestellt werden, die auf ein Überschreiten des Vollstaus hinweisen. Die einzige Ausnahme ist eine erhöhte Abgabe der Granetalsperre im April 1995. Damals wurde bei einem Wasserstand von 310,04 m über NN eine Abgabe von 3,2 m³/s in den Unterlauf aufgezeichnet. Nach den Betriebsregeln hätte so eine hohe Abgabe nicht erfolgen

dürfen. In der langjährigen Simulation wurde an 465 Tagen an der Granetalsperre ein Überschreiten des Vollstaus festgestellt. Diese Ereignisse können vollständig mit den zwei Grundablässen bewältigt werden, ohne die Fischbauchklappe herunterzufahren. Der maximal auftretende Abfluss unterhalb der Talsperre beträgt im Modell 21,41 m³/s.

Der größte simulierte Abfluss in allen drei Unterläufen trat an der Okertalsperre auf. Am 28. Oktober im Modelljahr 437 berechnete das Modell einen Abfluss von 83,18 m³/s am Pegel Okertal. Die Umstände für dieses Ereignis waren ein Wasserstand von 416,22 m über NN am Vortag und ein Zufluss am 28. Oktober von 81,54 m³/s.

Tabelle 5-3: Ablauf des Hochwasserereignisses an der Innerstetalsperre am 12. März im Modelljahr 1752

Datum im Modell	Stauinhalt [Mio. m³]	Stauhöhe [m über NN]	Zufluss in die Talsperre [m³/s]	Abgabe in den Unterlauf [m³/s]
08.03.1752	15,16	257,83	5,68	1,30
09.03.1752	15,50	258,10	17,37	2,15
10.03.1752	16,77	259,10	29,79	6,50
11.03.1752	18,74	260,57	33,26	14,93
12.03.1752	20,23	261,64	46,79	51,19
13.03.1752	19,85	261,37	31,90	34,34
14.03.1752	19,63	261,22	19,99	21,51

Der Vergleich der mittleren jährlichen Überleitungsmengen aller Ableitungen zeigt deutlich, dass der Granestausee in den 10.000 Jahren zum größten Teil mit dem Wasser von der Okertalsperre versorgt wurde (Tabelle 5-4). Mit einem mittleren Überleitungsvolumen von 20,96 Mio. m³ pro Jahr wurde regelkonform fast doppelt so viel Wasser von der Okertalsperre in die Granetalsperre abgeleitet als aus allen anderen Überleitungen zusammen. Im historischen Zeitraum 1984 – 2002 wurden im Mittel 18,51 Mio. m³ im Jahr übergeleitet.

Diese Aussage trifft auch auf die Ableitungsmenge der Innerstetalsperre zu, welche im Modell wesentlich höher ist als in dem betrachteten Zeitraum der Vergangenheit. Jedoch muss bezüglich der Gültigkeit der historischen Aufzeichnungen Abstriche gemacht werden, da der Umfang an Daten für diese Überleitung äußerst gering ist. Innerhalb der betrachteten 19 Jahre wurde in sieben Jahren die Überleitung der Innerstetalsperre nicht in Betrieb genommen. Der Einfluss der Innerste und Oker Überleitung lässt sich an allen anderen Ableitungen beobachten. Nach vorhandenen Unterlagen wurden in dem ausgewählten Zeitraum durchschnittlich im Jahr 5,43 Mio. m³ von Radau und Romke in die Granetalsperre abgeleitet, was im Modell nicht reproduziert werden konnte (Harzwasserwerke GmbH, 2011). Hinsichtlich der historischen Aufzeichnungen der Radau muss zusätzlich noch berücksichtigt werden, dass die Abgabe in den Radaustollen zeitweise auch manuell festgelegt wurde. Schlussendlich lassen sich die Abweichungen zwischen Modell und Vergangenheit auch an der Gose erkennen. Im Modell selbst wurde weniger Wasser aus dem Fließgewässer in die Granetalsperre abgeleitet als in der Vergangenheit.

Tabelle 5-4: Mittlere jährliche Überleitungsmengen des Simulationslaufs “reale verlängerte Vergangenheit“

Überleitung	Mittleres Überleitungsvolumen [Mio. m³/ Jahr]
Okertalsperre	20,96
Innerstetalsperre	7,49
Gose	0,66
Wintertalbach	0,50
Radau	1,45
Romke	1,08

Bei der Betrachtung der mittleren Ableitungsmenge für die einzelnen Monate sind im jährlichen Verlauf deutliche Unterschiede erkennbar. Ein Beispiel dafür ist in der Abbildung 5-1 veranschaulicht, welche die durchschnittlichen Überleitungsmengen der Okertalsperre für die einzelnen Monate zeigt. Diese Grafik zeigt einen gegensätzlich Verlauf zwischen Modellsimulation und Vergangenheit. Während in der Vergangenheit im Durchschnitt mehr im Winter übergeleitet wurde, geschah der Großteil der Ableitung im Modell in den Sommermonaten. Ein Grund für diese Gegensätzlichkeit ist die Durchführung der nicht regelkonformen realen “Entleerung“ der Okertalsperre in den Wintermonaten, die beispielsweise im Jahr 1996 durchgeführt wurde. Die Entleerung hatte zur Folge, dass in den darauffolgenden Sommermonaten die Okertalsperre weniger Wasser führte und somit auch weniger Wasser in die Überleitung abgeben konnte. Außerdem ist zu erwähnen, dass in den Sommermonaten der Jahre 1994 und 1996 kein Wasser aus der Okertalsperre in die Granetalsperre abgeleitet wurde. Innerhalb der langjährigen Zeitreihe konnten zwar auch Monate festgestellt werden, wo kein Wasser von der Okertalsperre in die Granetalsperre übergeleitet wurde. Jedoch waren diese spezifischen Monate immer nur einmalige Ereignisse und traten nicht zusammenhängend auf. Besonders extrem sind die Unterschiede in den monatlichen Überleitungsmengen am Radaustollen erkennbar. Diese Abweichungen lassen sich schon wie bisher auf die manuelle Steuerung in der Vergangenheit zurückführen, wo größeren Mengen an Wasser in den Radaustollen abgeleitet wurden. Dies wurde in den 19 beobachteten Jahren häufig im Winterhalbjahr durchgeführt und fand in den 10.000 simulierten Jahren nicht statt. Einsehbar ist dies im Anhang 14 mit den mittleren Überleitungsmengen auf Monatsbasis für alle Ableitungen.

Die Hauptursache für die verschiedenen Verläufe der Überleitungsmengen ist das Einhalten des definierten Speicherinhaltes der Granetalsperre von 44,23 Mio. m³ im Modell. Dieser Zustand wurde an vielen Tagen über die 10.000 Jahre erreicht, verlangte aber eine erhöhte Ableitung in den Sommermonaten. Denn durch das kleine Einzugsgebiet ist der Granestausee nicht alleine in der Lage, alle Abgaben ohne eine Reduzierung des Speicherinhaltes zu erfüllen. Besonders in den Sommermonaten ist der Zufluss in die Granetalsperre so gering, dass der angestrebte Speicherinhalt ohne die Zuleitungen zu keinen Zeitpunkt garantiert werden konnte. Dies führte zu kontinuierlichen hohen Überleitungsmengen in den Sommerhalbjahren. Hingegen war im Winter der Zufluss am Pegel Margarethenklippe im Durchschnitt größer als im Sommer. Als Folge musste im Modell weniger Wasser im Winter übergeleitet werden. Die Zuflüsse an den Pegeln oberhalb der Talsperren sind im Anhang 15 dargestellt. Dort ist dieses Verhalten mit den höheren Zuflüssen im Winterhalbjahr und den geringeren Zuflüssen im Sommerhalbjahr an allen drei Pegeln deutlich erkennbar.

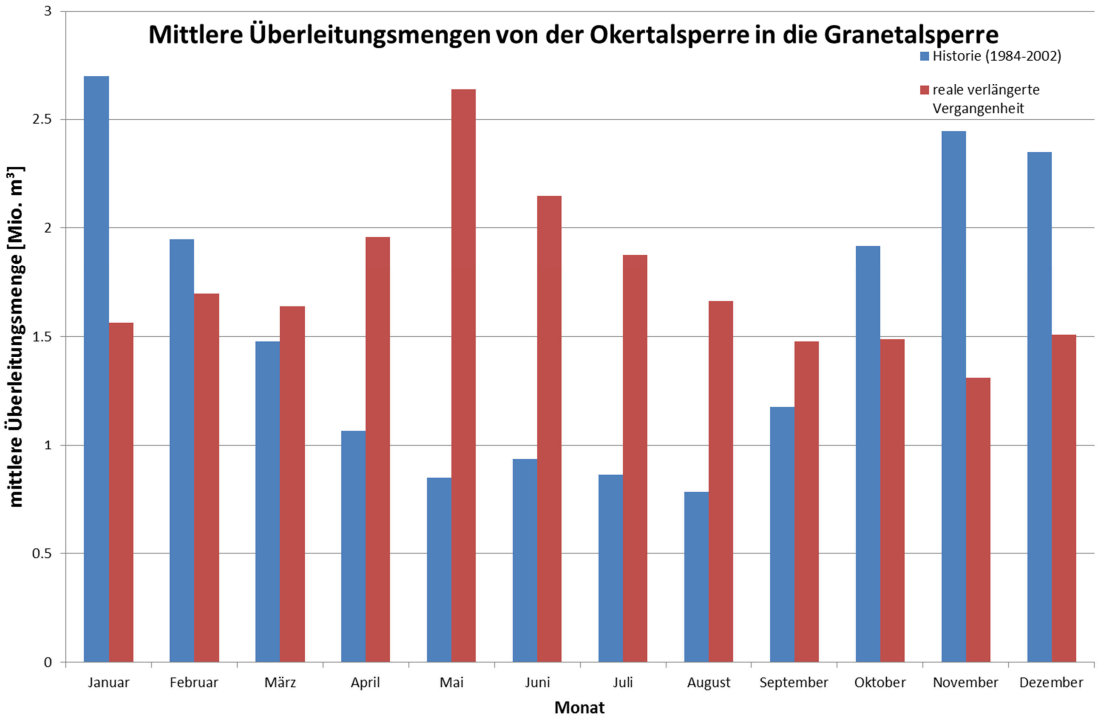


Abbildung 5-1: Vergleich der Monatsmittelwerte der abgeleiteten Wassermengen von der Okertalsperre in die Granetalsperre

Abschließend für die Betrachtung der Wasserhaushaltsgrößen wurden die Verläufe der Speicherinhalte in den drei Talsperren untersucht. Im Falle der Granetalsperre konnte positiv festgestellt werden, dass im Mittel über die simulierten 10.000 Jahre ein Speicherfüllstand von 42,62 Mio. m³ berechnet wurde. Dieser entspricht einem Wasserstand von 309,19 m über NN in der Granetalsperre. Eine Darstellung der Überschreitungsdauerlinie für die simulierten Speicherfüllstände zeigt die Abbildung 5-2. Der gewünschte exakte Speicherfüllstand von 44,23 Mio. m³ konnte in der Granetalsperre an ca. 47 % aller Simulationstage gehalten werden. In 2/3 der Zeit lag die Speicherfüllung bei mindestens 43,53 Mio m³. In der Abbildung ist auch erkennbar, dass in den 10.000 Jahren der Speicherinhalt der Granetalsperre zu keinem Zeitpunkt auf das Niveau des eisernen Bestandes zurückgeht, welches bei 2,50 Mio. m³ liegt.

An den anderen beiden Talsperren verlaufen die Dauerlinien der Speicherwasserstände ähnlich. Die im Anhang 16 dargestellten Überschreitungs-dauerlinien zeigen für die zwei Talsperren eine sichtbare Abnahme des Speicherinhaltes mit steigendem Anteil. An der Innerstetalsperre ging der Speicherinhalt an 3507 Tage auf den eisernen Bestand zurück, der bei 5,26 Mio. m³ liegt. Am Okerstausee ist dieser Zustand nicht eingetreten, jedoch kommen in der langjährigen Zeitreihe einzelne Tage vor, an denen der Speicherinhalt der Okertalsperre sehr niedrig war.

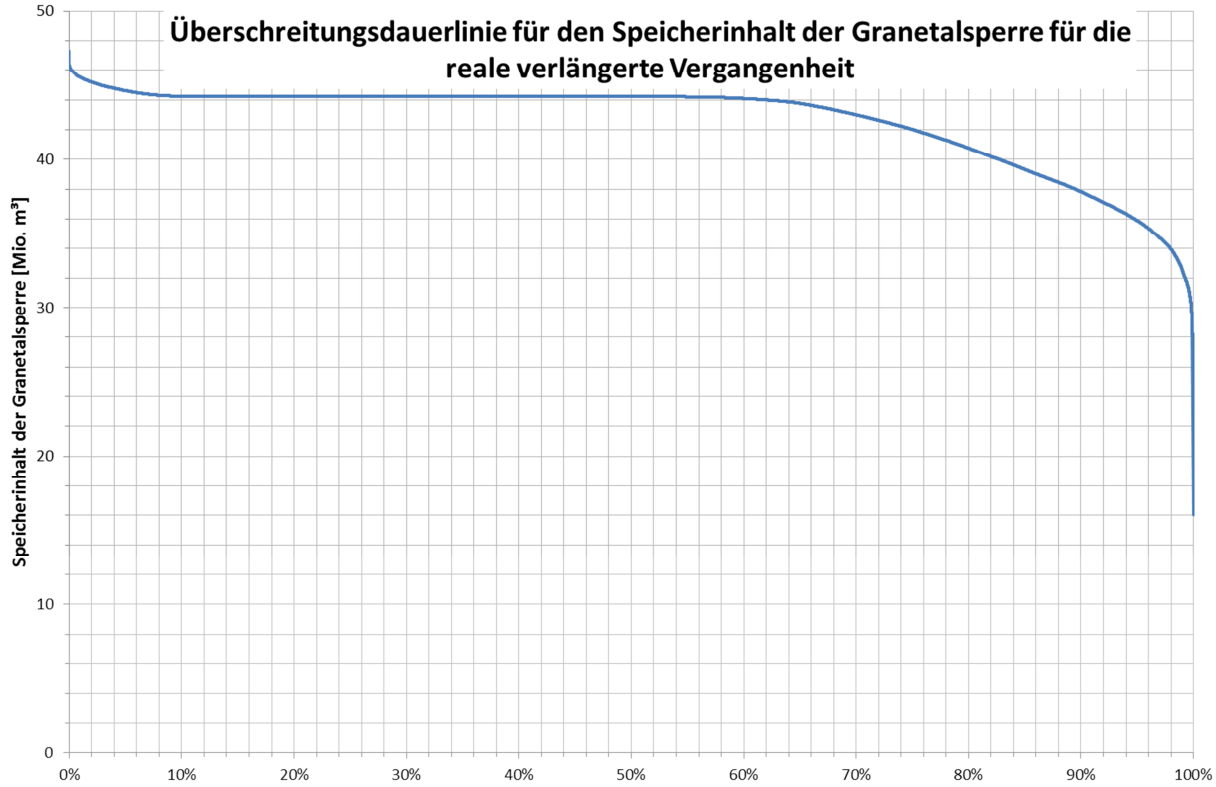


Abbildung 5-2: Überschreitungsdauerlinie des Speicherinhaltes der Granetalsperre für die langjährige Zeitreihe über 10.000 Jahre

5.3 Trinkwassergewinnung

Über den gesamten Simulationszeitraum konnte mit den heutigen Betriebsregeln die geforderte Menge an Rohwasser für die Trinkwassergewinnung bereitgestellt werden. Mit der vorgegebenen Abgabe vom 1,2 m³/s wurden jährlich 37,84 Mio. m³ Rohwasser für die Entnahme bereitgestellt. Somit erfüllen die Betriebsregeln in diesem Simulationslauf die Forderung, immer ausreichend Wasser für die Trinkwassergewinnung zu garantieren.

5.4 Energieerzeugung

Für die potenzielle Energieerzeugung der Turbinen waren keine festen Beziehungen zwischen Energieerzeugung und Abflussmengen durch die Turbine verfügbar. Anhand der historischen Daten wurde für die Turbine an der Okertalsperre und die Turbine unterhalb des Grundablasses der Granetalsperre die historische Jahresenergieerzeugung in Abhängigkeit vom jährlichen Turbinenzufluss als lineare Funktion aufgestellt. Mit Hilfe dieser Funktionen und der simulierten Wassermengen, die über ein Jahr in die Turbinen abgegeben wurden, konnte die potenzielle Energieerzeugung vereinfacht abgeschätzt werden. Dies ist beispielhaft für die Turbine der Okertalsperre in Abbildung 5-3 dargestellt. Über die 10.000 Jahre erzeugt diese Anlage in einem Jahr im Mittel potenziell ca. 13,66 MWh. Für die Turbine am Granestausee ist die potenzielle Energieerzeugung deutlich geringer. Denn nach dem Systemplan ist der maximale Zufluss in der Turbine auf 0,4 m³/s limitiert. Zusätzlich wird diese Anlage nur für 6-8 Stunden am Tag betrieben. Die Darstellung der jährlichen potenziellen Energieerzeugung für die langjährige Zeitreihe ist im Anhang 17 aufgeführt.

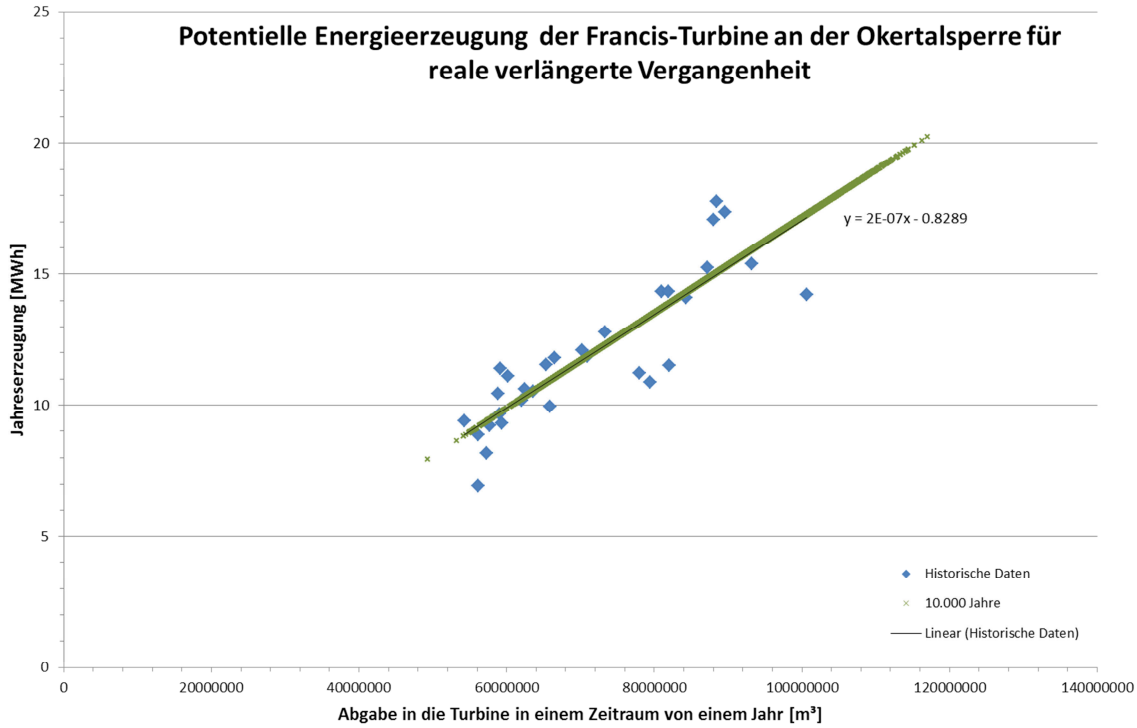


Abbildung 5-3: Jährliche potenziellen Energieerzeugung an der Francis-Turbine an der Okertalsperre in Abhängigkeit vom Jahreszufluss in die Turbine

Da die Energieerzeugung an der Innerstetalsperre nicht von den Harzwasserwerken betrieben wird, waren die Informationen zu dieser Anlage vergleichbar gering. Nach Informationen der Eigentümer werden unterhalb der Innerstetalsperre zwei Turbinen für die Energiegewinnung verwendet. Die Verwendung der jeweiligen Turbine ist abhängig von der Abgabe der Innerstetalsperre in den Betriebsauslass. Bis zu einer Abgabe von 1,3 m³/s leistet die kleinere Turbine bis zu ca. 320 KW am Tag. Die größere Turbine wird ab einer Abgabe von 1,5 m³/s hinzugeschaltet (maximal ca. 430 KW). Bei einer Abgabe in die Turbinen von insgesamt 3,0 m³/s werden etwa 650 KW produziert. Mit diesen Informationen wurde eine vereinfachte Berechnung der Energieerzeugung durchgeführt. Für jeden Tag wurde, anhand der Abgabe in die Turbine, die potenzielle Energieerzeugung berechnet. Für die Bestimmung der potenziellen Jahreserzeugung wurden diese Werte über das jeweilige Jahr aufaddiert. Die Veranschaulichung der erzeugten Jahresmengen ist im Anhang 17 zu finden.

5.5 Gütebestimmender Mindeststau

Für die Untersuchung des Mindeststau gab die Harzwasserwerke GmbH drei Betrachtungszeiträume vor: 01. Mai bis 15. Oktober, 15. Mai bis 15. Oktober und 01. Juni bis 15. Oktober. Die Auswertung für den gütebestimmenden Mindeststau zeigte für die Grane- und Okertalsperre sehr unterschiedliche Ergebnisse. Bei einem Beginn der Sommerstagnation am 01. Mai unterschreitet der simulierte Wasserstand in der Granetalsperre nur in drei von 10.000 Jahren den Grenzwasserstand des gütebestimmenden Mindeststaus am 01. Mai. Im Okerstausee trat diese Situation in 9456 Jahren auf. Die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Talsperren sind auch bei den verbleibenden zwei Betrachtungszeiträumen zu beobachten. Startet die Sommerstagnation am 15. Mai, wird der gütebestimmenden Mindeststau an diesem Tag in der Granetalsperre in zwei Jahren und in der Okertalsperre an 9984 Jahren unterschritten. Bei einem Einsetzen der Stagnation ab dem 01. Juni wurde nur in

einem Jahr in der Granetalsperre eine Unterschreitung am 01. Juni festgestellt. Jedoch wurden an der Okertalsperre 9760 Jahre gezählt, an denen der Speicherinhalt am 01. Juni unter dem des gütebestimmenden Mindeststau lag.

Die Ursache für diese unterschiedlichen Ergebnisse liegt im verstärkten Überleitungsbetrieb in den Sommermonaten bei regelkonformem Betrieb. Durch das kontinuierliche Halten des Speicherfüllstandes von 44,23 Mio. m³ in der Granetalsperre kam es zu einem seltenen Unterschreiten des gütebestimmenden Mindeststaus. Da jedoch die Okertalsperre besonders im Sommer viel Wasser die Granetalsperre ableitete, nahm der Wasserstand der Okertalsperre in diesen Monaten deutlich ab. An vielen Tagen des Beginns der Sommerstagnation im Rahmen der 10.000 simulierten Jahre, wurde an der Okertalsperre eine vergleichsweise große Menge Wasser in die Überleitung und den Unterlauf abgegeben. Das hatte zur Folge, dass der Ausgangswert für den Mindeststau häufig größer war als der simulierte Wasserstand.

Als Beispiel dient der 01. Mai im ersten Jahr der langjährigen Simulation. Der Wasserstand in der Okertalsperre war 414,49 m über NN, die Abgabe in den Unterlauf betrug 1,9 m³/s und die Ableitung in die Granetalsperre lag bei 1,22 m³/s. Die Bestimmung des gütebestimmenden Mindeststaus erfolgt an den beiden Abflüssen der Talsperre an diesem Tag und lag bei dieser Konstellation bei 423,55 m über NN. Der simulierte Wasserstand an diesem Tag lag somit deutlich unter dem gütebestimmenden Mindeststau und wurde somit gezählt. Durch die hohen Überleitungsmengen im Monat Mai, siehe Abschnitt Wasserhaushaltsgrößen, liegt der Wasserstand fast kontinuierlich in Monat Mai unter dem Wert des Mindeststaus. Erst zu späteren Zeitpunkten in den Sommerhalbjahren überschritt der simulierte Wasserstand in der Okertalsperre den stagnierenden Mindeststau.

5.6 Zusammenfassende Bewertung des Simulationslaufes “real verlängerte Vergangenheit“

Die Analyse des Simulationslaufes “**reale verlängerte Vergangenheit**“ zeigt deutlich, dass die Granetalsperre die gewünschte Entnahme von Rohwasser für die Trinkwasserversorgung immer erfüllen konnte. Die simulierten Abgaben der drei Talsperren nach Unterstrom entsprachen weitgehend den Abgaben aus der Kalibrierung und Validierung. Während im Modell der Großteil der Wassermengen im Sommerhalbjahr aus der Okertalsperre in die Granetalsperre übergeleitet wurde, geschah dies in der Vergangenheit vor allem im Winterhalbjahr. Zu erwähnen ist die verringerte Überleitungsleistung der Ableitung Radau im Modell. Durch die erhöhte Abgabe im Sommer von der Oker- in die Granetalsperre wurde in der Modellsimulation bei der Okertalsperre der gütebestimmende Mindeststau häufig unterschritten, besonders zu Beginn der Sommerstagnation. Bei der Granetalsperre wurde der Mindeststau sehr selten unterschritten, da bei Einhaltung der Überleitungsregeln die Talsperre über die 10.000 Jahre kontinuierlich mit Wasser versorgt wurde. Das hatte auch den positiven Effekt, dass der Speicherinhalt der Granetalsperre immer die Entnahme von Rohwasser für die Trinkwassergewinnung garantieren konnte und nie auf den eisernen Bestand zurückging. Jedoch trat dieser Zustand an der Innerstetalsperre an 3507 Tagen, das heißt im Mittel einmal pro 1040 Betriebstagen oder einmal in ca. drei Jahren, ein. Hinsichtlich der Überleitung Innerste-Grane konnte festgestellt werden, dass sie im Modell an vielen Tagen Wasser in die Granetalsperre abgeleitet hatte.

6 Simulationsläufe für die Realisationen ohne und mit Klimaänderung nach aktuellem Betriebsplan

6.1 Überblick

Zur Bewertung der Realisationen für die Zukunft unter Klimaänderung wird noch einmal auf den folgenden Sachverhalt hingewiesen. Es wurde die WETTREG-Realisation 18 mit dem dazugehörenden 20C Kontrolllauf der künstlichen Vergangenheit (repräsentiert die historische Periode 1961-2000 ohne Klimaänderung) und den beiden Läufen für die nahe Zukunft (2021-2050 mit Klimaänderung) und ferne Zukunft (2071-2100 mit Klimaänderung) als repräsentativ für die Zukunft ausgewählt wurde. Um den Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit und den Speicherbetrieb zu quantifizieren, müssen die beiden Zukunftsrealisationen zwingend mit dem 20C-Lauf aus der gleichen Realisation und nicht mit dem Lauf “reale verlängerte Vergangenheit“ verglichen werden.

Die Simulationsläufe mit IGOmod wurden mit Hilfe des LWI-Auswertetools statistisch ausgewertet. Die tabellarischen Darstellungen der einzelnen Läufe dazu sind im Anhang 18 zusammengestellt. In der nachfolgenden Tabelle 6-1 sind die wesentlichen Kenngrößen der simulierten Realisationen mit denen der realen verlängerten Vergangenheit verglichen.

Die Simulationsergebnisse mit den Zeitreihen aus den drei WETTREG-Realisationen 18 zeigen bei der ersten Betrachtung eine Abnahme der Talsperrenabgaben in den Unterlauf. Es wurden an den Pegeln Lindthal und Okertal Extremereignisse festgestellt, die erheblich größer waren als in dem Simulationslauf „reale verlängerte Vergangenheit“.

Tabelle 6-1: Simulationen mit Modell IGOmod: Vergleich der Ergebniskenngrößen aus allen Simulationsläufen über 10.000 Jahre auf Tagesbasis

		Real verlängerte Vergangenheit	Künstliche Vergangenheit (20C)	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Innerstetalsperre	Mittlerer Zufluss [m³/s]	2,11	2,09	1,95	1,83
	Mittlere Abfluss [m³/s]	1,85	1,84	1,66	1,53
	Mittlerer Speicherfüllstand [Mio. m³]	13,54	14,00	13,37	12,63
	Mittlerer Wasserstand [m über NN]	256,19	256,63	256,08	255,35
	Mittlere potenzielle Jahresarbeit [MWh]	5,45	5,65	5,23	4,85
	Jährliches Überleitungsvolumen [Mio. m³]	7,49	7,28	8,54	8,63
Okertalsperre	Mittlerer Zufluss [m³/s]	2,68	2,66	2,49	2,43
	Mittlere Abfluss [m³/s]	2,02	1,97	1,83	1,78
	Mittlerer Speicherfüllstand [Mio. m³]	31,88	32,90	31,19	29,42
	Mittlerer Wasserstand [m über NN]	408,50	409,19	408,20	407,00
	Mittlere potenzielle Jahresarbeit [MWh]	13,66	13,69	12,90	12,51
	Jährliches Überleitungsvolumen [Mio. m³]	20,96	21,89	20,99	20,17
	Häufigkeit der Unterschreitung des gütebestimmenden Mindeststaus				
	Beginn: 1.Mai	9456	9400	9816	9806
	Beginn: 15.Mai	9984	9901	9998	9970
	Beginn: 1.Juni	9760	9579	9765	9709
Granetalsperre	Mittlerer Zufluss [m³/s]	0,45	0,45	0,42	0,40
	Mittlere Abfluss [m³/s]	0,23	0,24	0,23	0,22
	Mittlerer Speicherfüllstand [Mio. m³]	42,62	43,14	42,95	41,65
	Mittlerer Wasserstand [m über NN]	309,19	309,44	309,36	308,68
	Mittlere potenzielle Jahresarbeit [MWh]	0,64	0,66	0,65	0,6
	Jährliche Rohwasser-entnahme [Mio. m³]	37,86	37,86	37,86	37,86
	Häufigkeit der Unterschreitung des gütebestimmenden Mindeststaus				
	Beginn: 1.Mai	3	55	14	79
	Beginn: 15.Mai	2	30	4	42
	Beginn: 1.Juni	1	20	3	30
Über-leitungen		Mittleres Überleitungsvolumen [Mio. m³/Jahr]			
	Gose	0,66	0,57	0,62	0,79
	Wintertalbach	0,5	0,44	0,48	0,58
	Radau	1,45	1,14	1,36	1,92
	Romke	1,08	1,06	1,08	1,14

6.2 Wasserhaushaltsgrößen

Ein genereller Vergleich der mittleren Zuflüsse in die Talsperren wurde schon im Kapitel 2.3.3 durchgeführt. Danach konnte der 20C-Lauf von WETTREG 18 die mittleren jährlichen Zuflüsse im Vergleich mit dem Kalibrierungszeitraum und dem Lauf „reale verlängerte Vergangenheit“ verhältnismäßig gut nachbilden. Ein weiterer Grund für die Verwendung der WETTREG-Realisation 18 ist, dass im Forschungsprojekt KliBiW die beiden REMO-Realisationen, die mit ihren 20C-Läufen die mittleren Zuflüsse ebenfalls sehr gut nachbildeten, zum Teil physikalisch wenig glaubwürdige zeitliche und räumliche Verteilungen des Niederschlags über das Jahr lieferten.

In Abbildung 6-1 wurden die mittleren monatlichen Zuflüsse am Beispiel des Pegels Altenau dargestellt. Die Werte für die künstliche Vergangenheit (20C-Lauf) weichen von denen der realen verlängerten Vergangenheit nur minimal ab.

Beim Vergleich des 20C-Laufes mit der nahen und fernen Zukunft ist ersichtlich, dass der mittlere monatliche Zufluss im Winter (Januar-März) zur fernen Zukunft hin zunimmt und im Frühjahr und Sommer zum Teil deutlich abnimmt. Im Herbst (Oktober-Dezember) nimmt der Zufluss zur fernen Zukunft hin leicht ab. Die Darstellungen für die Pegel Margarethenklippe (oberhalb der Granetalsperre) und Rote Klippe (oberhalb der Innerstetalsperre) sind im Anhang 19 zu finden.

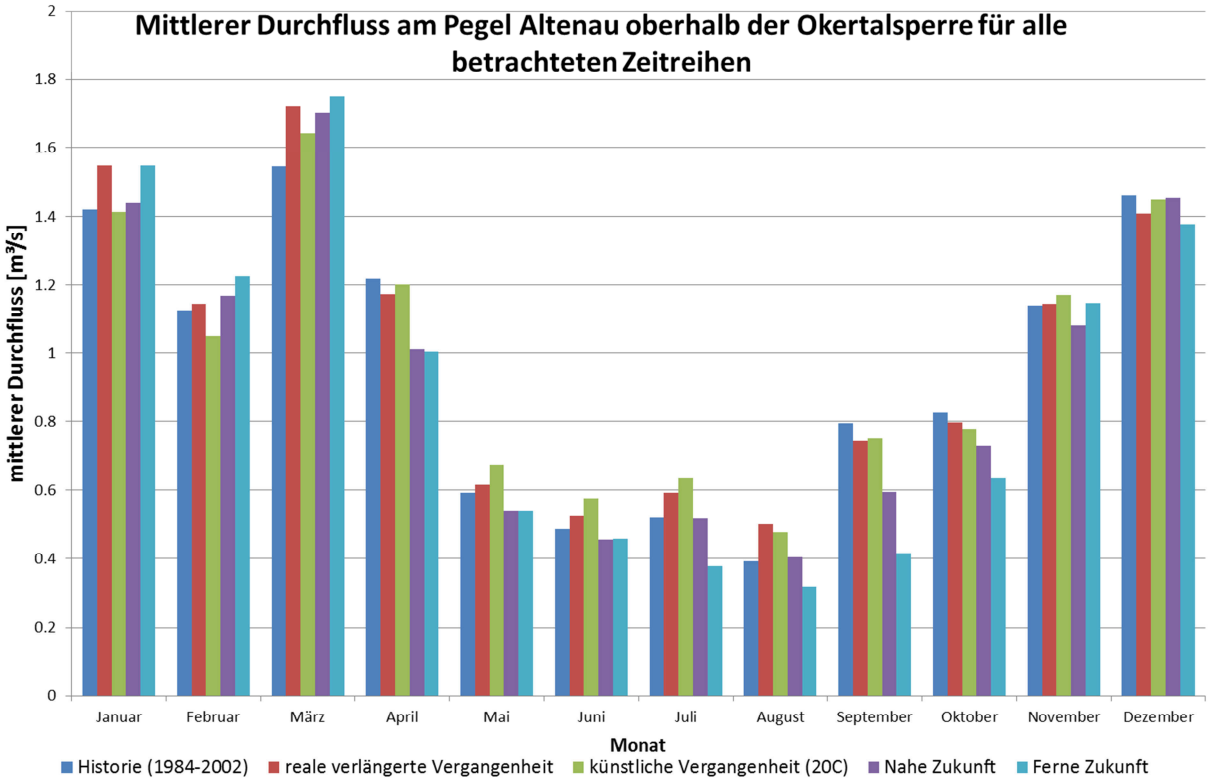


Abbildung 6-1: Mittlerer Monatszufluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre aus der Kalibrierung und aus generierten 10.000 jährlichen Serien von Haberlandt (2013 und 2014); für die Klimaprojektionen wurde die WETTREG-Realisation 18 verwendet

Die mittleren jährlichen Talsperrenabgaben sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

Bei der Oker- und Innerstetalsperre sind die Abgaben aus dem 20C-Lauf geringfügig kleiner als beim Lauf mit der realen verlängerten Vergangenheit. In dieser Tabelle ist zusätzlich sichtbar, dass die tägliche Abgabe der Granetalsperre in der Klimarealisation im Mittel minimal größer ist. In der nahen und fernen Zukunft ist zu beobachten, dass der simulierte Abfluss in Unterlauf im Durchschnitt etwas abnimmt. Da die Granetalsperre durch den Überleitungsbetrieb kontinuierlich aufgefüllt wird, sind Veränderungen dort äußerst gering.

Da das arithmetische Mittel nur eine grobe Aussage bezüglich der Veränderungen der Talsperrenabgabe zulässt, wurden die täglichen Abflüsse der Talsperren als Überschreitungsdauerlinien dargestellt. Für den Pegel Lindthal sind die Dauerlinien für die vier betrachteten langjährigen Zeitreihen in der Abbildung 6-2 gezeigt. Die niedrigeren Abflüsse der Dauerlinien wurden nochmals mit größerem Maßstab dargestellt. Anhand der Verläufe ist deutlich sichtbar, dass in der realen verlängerten Vergangenheit häufiger größere Talsperrenabgaben in den Unterlauf stattfanden als in dem 20C-Lauf. Beim Vergleich des 20C-Laufes mit der nahen und fernen Zukunft zeigt sich eine leichte Abnahme der Abgabemengen. Beispielsweise wurde in der nahen Zukunft an 252976 Tagen ein Abfluss größer als 3 m³/s simuliert, in der fernen Zukunft wurden die 3 m³/s nur noch an 232108 Tagen überschritten. Dieser abnehmende Verlauf ist auch an den anderen Talsperren zu beobachten. Die Überschreitungsdauerlinien für die beiden Stauanlagen sind im Anhang 20 dargestellt.

Tabelle 6-2: Vergleich der langjährigen Zeitreihen hinsichtlich der mittleren Talsperrenabgabe in den Unterlauf für alle drei Stauanlagen des Nordharzverbundsystems

	MQ im Unterlauf der Talsperren [m³/s]		
Talsperre	Innerste	Grane	Oker
Reale verlängerte Vergangenheit	1,85	0,23	2,02
Künstliche Vergangenheit (20C)	1,84	0,24	1,98
Nahe Zukunft	1,66	0,23	1,83
Ferne Zukunft	1,53	0,22	1,78

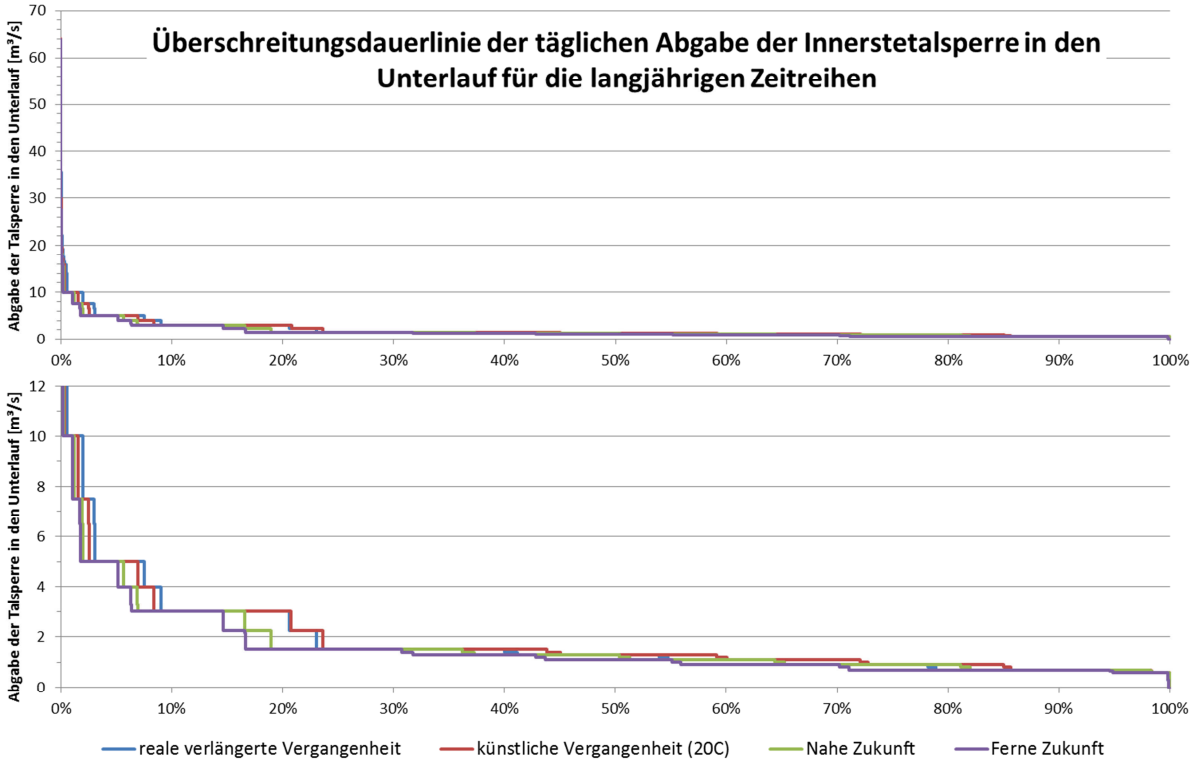


Abbildung 6-2: Überschreitungsdauerlinie der täglichen Abgaben der Innerstetalsperre in den Unterlauf für die vier Zeitreihen über 10.000 Jahre

Zur Hochwassersituation ergaben sich folgende Erkenntnisse: Die Auswertung der Abflüsse unterhalb der Sperren zeigte, dass höhere extreme Hochwasserereignisse im 20C-Lauf als im Lauf der realen verlängerten Vergangenheit auftraten. Eine Aufstellung der simulierten Maximalabflüsse ist in der Tabelle 6-3. An den beiden Zeitreihen der Vergangenheit ist ersichtlich, dass in der 20C-Realisation das Maximum größer ist als in der realen verlängerten Vergangenheit. Die größten Unterschiede ergaben sich an der Okertalsperre, bei der das Modell am 13. April im Modelljahr 1029 einen Tagesabfluss von 127,32 m³/s nach unterstrom simulierte. Dieser hohe Abfluss ergab sich aus einem hohen Speicherfüllstand der Okertalsperre von 45,51 Mio. m³ (entspricht einem Wasserstand von 416,00 m über NN) am Vortag und einem Zufluss in die Talsperre von 134,42 m³/s an dem betrachteten Tag. Der Großteil des Zuflusses entstand aus der Multiplikation von dem generierten Zufluss 49,75 m³/s mit dem Faktor 2,7 für den Talsperrenzufluss. Ein kleiner Teil der zufließenden Wassermenge kam von der Beileitung des Dammgrabens. Viele dieser Extremereignisse treten gegen Ende des Winterhalbjahres ein, wo die Talsperren häufig einen hohen Speicherfüllstand unter dem Vollstau aufweisen. Das hat zur Folge, dass die hohen Zuflüsse im Modell dann über die Hochwasserentlastung und den Grundablass in den Unterlauf abfließen.

Tabelle 6-3: Aufgetretene maximale Abgaben der Talsperren in den Unterlauf für alle langjährigen Zeitreihen (oft im Frühjahr, unterschiedliche Zeitpunkte des Auftretens)

	HHQ im Unterlauf der Talsperren [m³/s]		
Talsperre	Innerste	Grane	Oker
Reale verlängerte Vergangenheit	51,19	21,41	83,18
Künstliche Vergangenheit (20C)	64,12	22,15	127,32
Nahe Zukunft	58,91	14,01	124,75
Ferne Zukunft	63,90	15,42	124,79

In der Tabelle 6-4 wird das Hochwasserpotential der Zukunftsrealisationen mit dem der künstlichen Vergangenheit verglichen. Es werden die Tage, an denen die Hochwasserentlastung ohne volle Auslastung oder mit voller Auslastung des Grundablasses anspringt, gegenübergestellt. Der letztere Fall ist ein Indikator für größere Hochwasserereignisse. Es ist ersichtlich, dass bei der Innerste- und Okertalsperre Abflüsse über die Hochwasserentlastungsanlage mit voller Nutzung des Grundablasses in der Zukunft deutlich weniger auftreten. Diese Angaben sagen nichts über die Höhe der maximalen Abflüsse aus, können jedoch grundsätzlich mit der Klimaänderung in Verbindung gebracht werden. Wegen geringeren Zuflusses im Frühjahr und Sommer in der Zukunft sind die Speicher in den Herbst hinein weniger gefüllt und haben zu Beginn des Winters etwas mehr Puffer für Hochwasserzuflüsse.

In der Wirklichkeit würden extremere Hochwässer – wie in der Vergangenheit geschehen – vermutlich durch die Kooperation von der Harzwasserwerke GmbH mit der Talsperrenaufsicht durch vorab geänderten Betrieb auf der Basis von Hochwasservorhersagen abgedämpft werden können.

Tabelle 6-4: Vergleich der untersuchten Realisationen hinsichtlich der Anzahl der Tage, wo die Hochwasserentlastung eingesetzt wurde ohne voller Auslastung oder mit voller Auslastung des Grundablasses.

Talsperre	Zukunfts-realisation	Einsatz der Hochwasser-entlastung in Tagen und in Anzahl von Ereignissen (zum Teil über mehrere Tage)	Einsatz der Hochwasser-entlastung bei voller Nutzung des Grundablasses in Tagen und in Anzahl von Ereignissen (zum Teil über mehrere Tage)
Innerste	20C	9292 (5840)	1960 (1449)
	Nahe Zukunft	6922 (4319)	1431 (1177)
	Ferne Zukunft	5607 (3421)	1394 (1092)
Grane	20C	126 (126)	1 (1)
	Nahe Zukunft	42 (42)	0
	Ferne Zukunft	26 (26)	0
Oker	20C	10331 (4902)	2253 (1645)
	Nahe Zukunft	4377 (2206)	1358 (1006)
	Ferne Zukunft	4911 (2444)	1174 (899)

Die Analyse der jährlichen Überleitungsmengen zeigte, dass im 20C-Lauf mehr Wasser aus der Okertalsperre für die Einhaltung des Speicherfüllstandes der Granetalsperre verwendet wurde (Tabelle 6-5), als dies im Lauf reale verlängerte Vergangenheit der Fall war. Daraus ergaben sich verringerte Ableitungsmengen der verbleibenden Gewässer. Ausgehend von dem 20C-Lauf hin zur fernen Zukunft ist an der Oker-Überleitung eine Verringerung der jährlichen Ableitungsmengen zu beobachten. Diese Abnahme kann mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Okertalsperre begründet werden. In der Abbildung 6-3 sind die gemittelten Überleitungsmengen der Okertalsperre auf Monatsbasis dargestellt. Die anderen Überleitungen und ihre monatliche Abgabe in die Granetalsperre sind Anhang 21 beigefügt. Auffällig bei den monatlichen Überleitungsmittelwerten der Okertalsperre ist der Übergang vom Winter- zum Sommerhalbjahr in den Zukunftsrealisationen. In der fernen Zukunft ist die mittlere Überleitung in dem Monat April größer als beim 20C-Lauf.

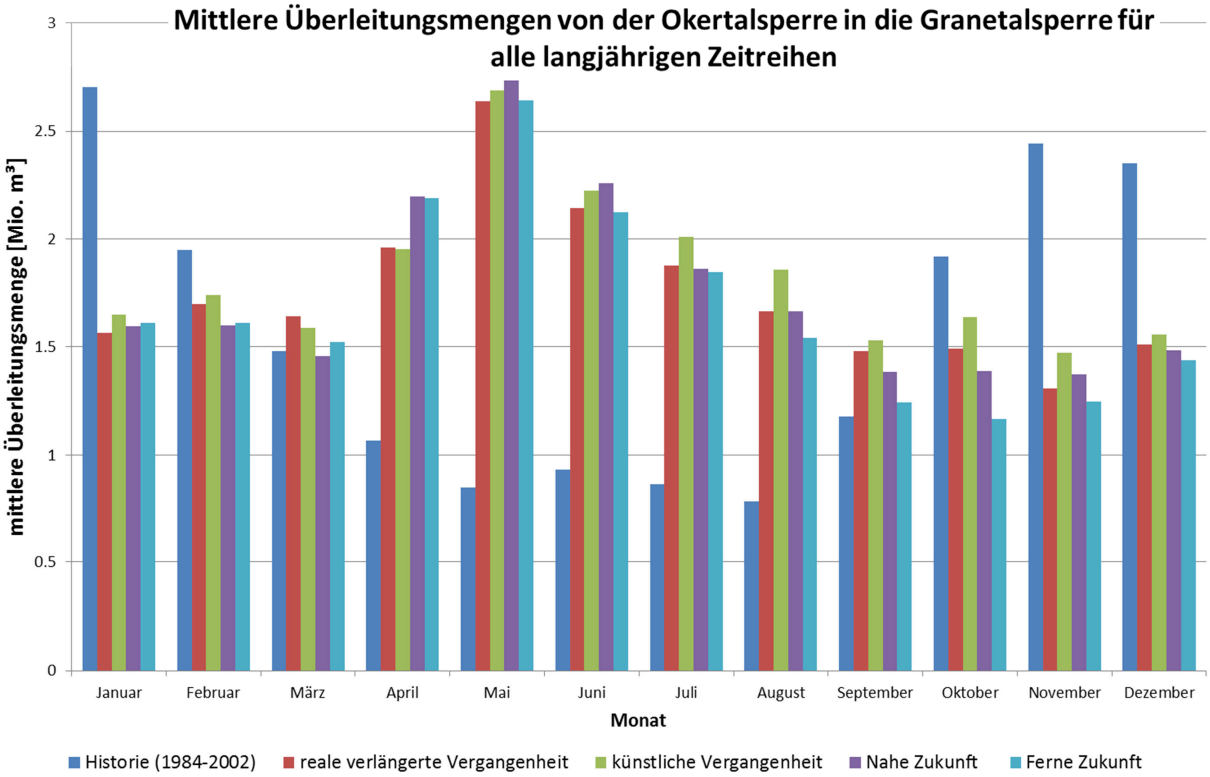


Abbildung 6-3: Vergleich der mittleren Ableitungsmengen der Okertalsperre in die Granetalsperre für alle Zeitreihen auf Monatsbasis

Im Verlauf des Sommers ändert sich diese Situation deutlich und die Okertalsperre besitzt in der fernen Zukunft nicht den Speicherfüllstand, um die Granetalsperre mit mehr Wasser zu versorgen. Denn bei der Betrachtung des Talsperrenzuflusses wurde schon festgestellt, dass der Zufluss für die Okertalsperre in den Sommermonaten in der Zukunft deutlich abnimmt. Das hat wiederum zur Folge, dass im Verlauf des Sommerhalbjahres der Speicherinhalt der Okertalsperre sich intensiver verringert als in der künstlichen Vergangenheit oder nahen Zukunft. Aufgrund dieses Zustandes kommt es zur immer geringeren Ableitungsmengen gegen Ende des Sommerhalbjahres. Häufig wurde dann in den Monaten November und Dezember die Okertalsperre wieder soweit aufgefüllt, dass danach (Januar – März) wieder mehr Wasser in die Granetalsperre abgeleitet werden konnte.

Tabelle 6-5: Vergleich der jährlichen Überleitungsmengen aller Ableitungen für alle langjährigen Simulationen.

	Mittlere Überleitungsmengen [Mio. m³/Jahr]			
Überleitung	Real verlängerte Vergangenheit	Künstliche Vergangenheit (20C)	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Okertalsperre	20,96	21,89	20,99	20,17
Innerstetalsperre	7,49	7,28	8,54	8,63
Gose	0,66	0,57	0,62	0,79
Wintertalbach	0,5	0,44	0,48	0,58
Radau	1,45	1,14	1,36	1,92
Romke	1,08	1,06	1,08	1,14

Durch diese Veränderungen im Ableitungsbetrieb der Okertalsperre kam es zur verstärkten Ableitungen aus den anderen Fließgewässern. Besonders die Überleitung Innerste-Grane musste in der fernen Zukunft immer mehr Wasser in die Granetalsperre abgeben, speziell in den Monaten, wo die Okertalsperre einen geringen Wasserstand aufwies und deshalb die Granetalsperre nicht auf 310 m über NN gehalten werden konnte.

Bezüglich der Speicherfüllstände der Talsperren kamen im 20C-Lauf Zeiträume vor, in denen der Speicherinhalt der Granetalsperre auf das Niveau des eisernen Bestandes zurückging. In der Summe sind dies aber nur 5 Tage über den ganzen Simulationszeitraum von 10.000 Jahren. Die Rohwasserentnahme ist jedoch an diesen Tagen immer noch gewährleistet. In der Regel wurde ein Wasserstand von 310 m über NN in der künstlichen Vergangenheit des Speicherinhaltes der Granetalsperre an vielen Tagen simuliert. Abbildung 6-4 zeigt die Dauerlinien der Speicherinhalte für die Langzeitsimulationen. Die Überschreitungsdauerlinie nimmt zur fernen Zukunft hin ab. In der fernen Zukunft konnte “nur noch“ an 37 % aller Tage ein Speicherfüllstand gleich oder größer als 44,23 Mio. m³ festgestellt werden. Für die anderen beiden Talsperren sind die Beziehungen zwischen den Szenarien vergleichbar mit der Granetalsperre. Jedoch muss bei der Innerstetalsperre erwähnt werden, dass der Rückgang des Speicherinhaltes dem eisernen Bestand erheblich näher kommt. Im 20C-Lauf wurden 988 Tagen gezählt, an denen der Speicherfüllstand 5,26 Mio. m³ erreichte. Innerhalb der nahen Zukunft stieg die Häufigkeit auf 1094 Tage. In der fernen Zukunft waren 5267 Tage nachweisbar, an denen der Speicherinhalt der Innerstetalsperre so stark zurückging. Die Unterschreitungsdauerlinien des Speicherfüllstandes für die beiden Talsperren Oker und Innerste sind im Anhang 22 dargestellt.

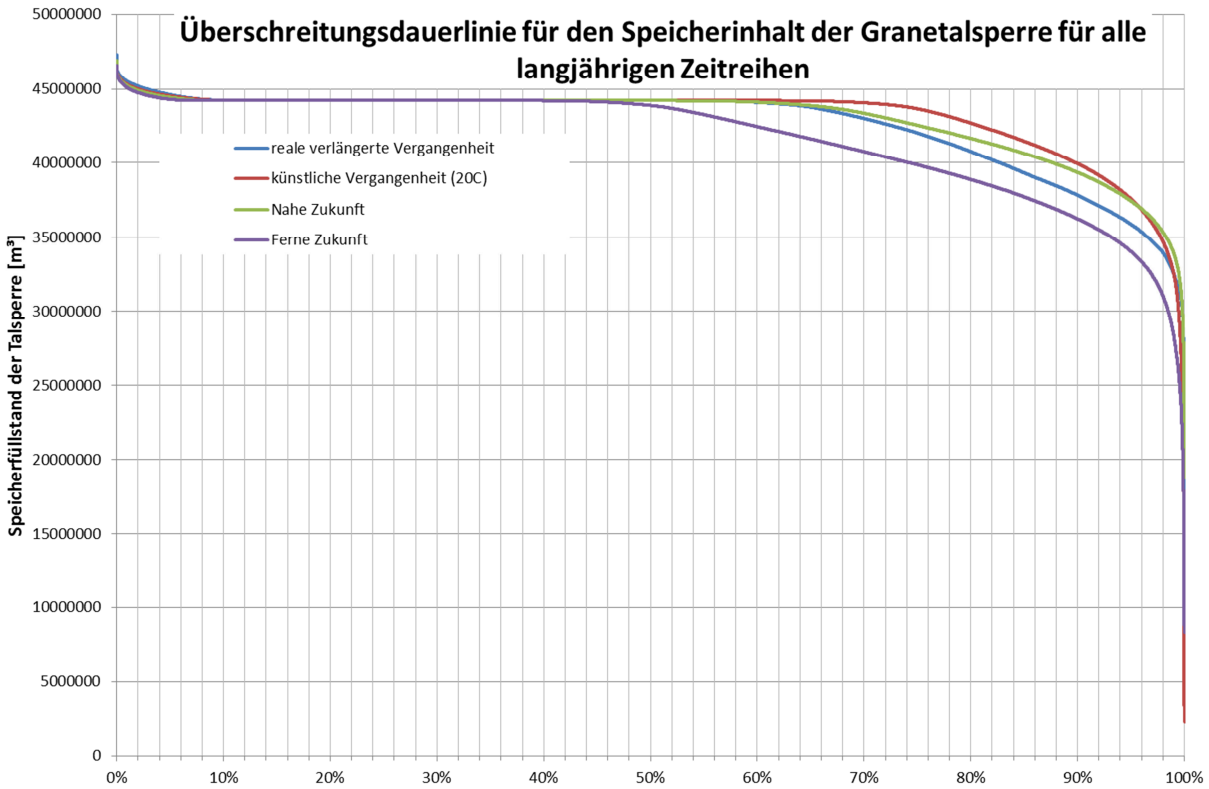


Abbildung 6-4: Überschreitungsdauerlinie des Speicherfüllstandes der Granetalsperre für alle Langzeitsimulationen

6.3 Trinkwassergewinnung

Die Auswertung der Langzeitsimulationen der WETTREG-Realisation 18 ergab, dass die gefordert Abgabe der Trinkwasserpumpstation an jedem Tag erfüllt werden konnte. Das bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt in den Simulationen kontinuierlich 1,2 m³/s aus der Granetalsperre entnommen wurden. Auch an den insgesamt fünf kritischen Tagen aus der Simulation der künstlichen Vergangenheit, an denen die Granetalsperre einen sehr niedrigen Speicherwasserstand hatte, konnte immer noch genügend Rohwasser für die Trinkwasserversorgung bereitgestellt werden.

6.4 Energieerzeugung

Es wurde mehr Energie jährlich produziert, da in der künstlichen Vergangenheit der WETTREG-Realisation 18 die mittlere Abgabe in den Unterlauf bei allen drei Talsperren einen größeren Wert einnimmt als in der synthetisch verlängerten Vergangenheit. Explizit wurde in der künstlichen Vergangenheit der WETTREG-Realisation 18 im Durchschnitt 13,69 MWh im Jahr an elektrischer Energie abgegeben, in der verlängerten Vergangenheit lag dieser Wert bei 13,66 MWh. Die potenzielle Jahreserzeugung in Form einer Überschreitungsdauerlinie für die Turbine der Okertalsperre ist in der Abbildung 6-5 dargestellt. Die beiden Zeitreihen der Vergangenheit weisen Ähnlichkeiten in deren Wertigkeiten und Häufigkeiten auf. In den Rechenläufen der nahen und fernen Zukunft ist eine Abnahme der durchschnittlichen Jahreserzeugung erkennbar. Dieses Verhalten lässt sich auch an den anderen beiden Turbinen im Nordharzverbundsystem beobachten (siehe Anhang 23).

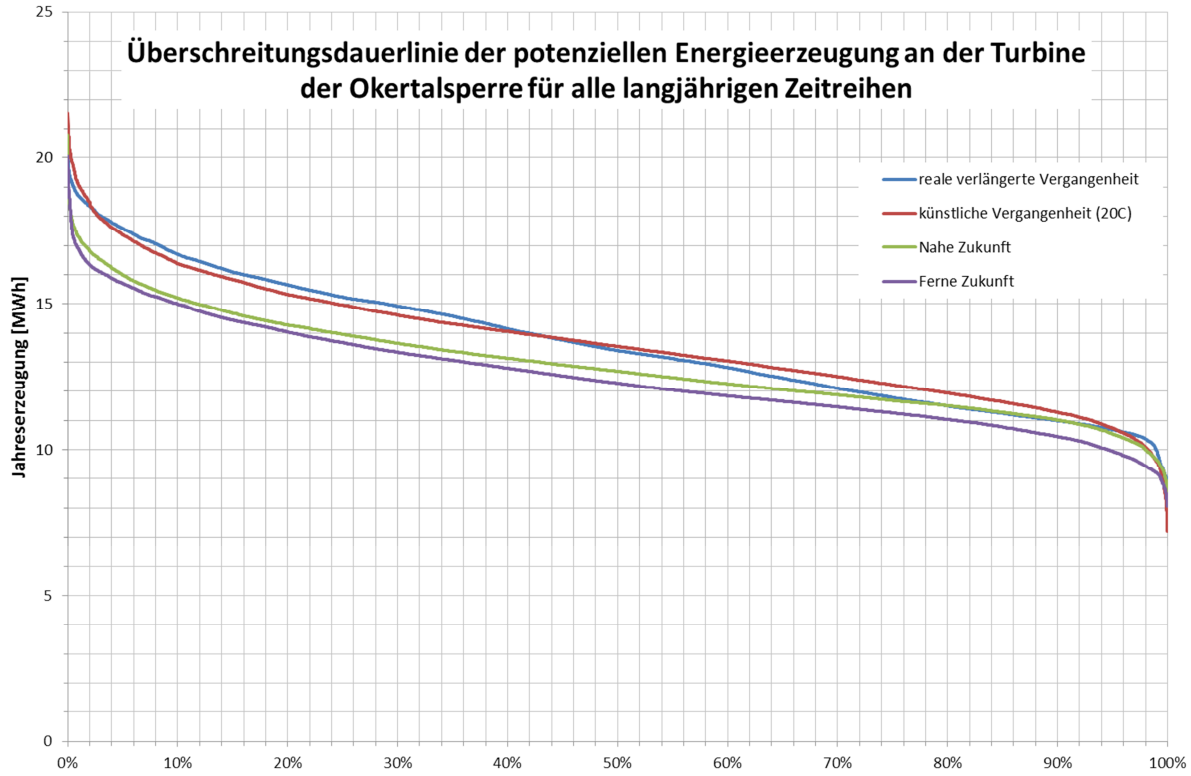


Abbildung 6-5: Überschreitungsdauerlinie der potenzielle Energieerzeugung für die Turbine an der Okertalsperre

6.5 Gütebestimmender Mindeststau

Die Untersuchung der Modellergebnisse zum gütebestimmenden Mindeststau ergab, dass in der fernen Zukunft der Speicherinhalt der Okertalsperre häufiger unter dem Wert des Mindeststaus lag als in der nahen Zukunft. Dies wurde bei jedem der drei Zeiträume der Sommerstagnation festgestellt. Der Vergleich der Langsimulationen ist in Tabelle 6-6 dargestellt. Die Ursache für die ansteigende Unterschreitungshäufigkeit an der Okertalsperre ist, dass zu Beginn der Sommerstagnation der Speicherinhalt der Okertalsperre einen sehr hohen Wert annimmt. Wie schon bei der Betrachtung der Wasserhaushaltsgrößen erwähnt, fand in den Sommerhalbjahren der Zukunftsrealisationen eine starke Abnahme des Speicherfüllstandes der Okertalsperre statt. Ursache dafür war, dass verstärkt Wasser in die Granetalsperre übergeleitet werden musste. Aus diesem Anlass wurde im Winterhalbjahr primär der Speicherfüllstand der Okertalsperre wieder aufgefüllt. Diese gute Speicherfüllung hatte dann zur Folge, dass der Startwert für den Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation in der Regel deutlich über dem damaligen Speicherinhalt lag. Durch die geringen Zuflüsse und den hohen Ableitungsmengen in die Granetalsperre in den ersten Sommermonaten befand sich der Wasserstand des Stausees kontinuierlich unter dem Mindeststau.

Bezüglich der Granetalsperre ist auffällig, dass in der künstlichen Vergangenheit des WETTREG-18-Laufes an vielen Tagen der Mindeststau unterschritten wurde. Innerhalb der 10.000 Jahre der künstlichen Vergangenheit existierten Zeiträume, in denen sich der Speicherinhalt der Granetalsperre zu Beginn der Sommerstagnation am 1. Mai bei rund 20 Mio. m³ (Wasserstand bei rund 295 m über NN) befand. Die Berechnung des Startwertes setzt sich zusammen aus dem jährlichen Entnahmevolumen der Trinkwasserpumpstation, die bei 38 Mio. m³ liegt und der Abgabe in den Unterlauf. Die Entnahme in den Unterlauf entspricht bei diesem Speicherfüllstand der Granetalsperre 0,15 m³/s. Anhand dieser Werte liegt der Startwert des gütebestimmenden Mindeststaus bei 304,80 m über NN. Aufgrund dieser Differenz lag an einigen Tagen der Wasserstand der Granetalsperre zu Beginn der Sommerstagnation am 1. Mai unter dem des Mindeststaus. In der nahen Zukunft wurden die Ereignisse seltener. Jedoch war in der fernen Zukunft bei einem Beginn der Sommerstagnation am 1. Mai die Häufigkeit der Unterschreitung im Vergleich zu allen anderen Zeitreihen am größten.

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Rechenläufe hinsichtlich der Unterschreitungshäufigkeit des gütebestimmenden Mindeststaus in den Talsperren Oker und Grane am ersten Tag der Sommerstagnation

Talsperre	Beginn Sommerstagnation	Synthetische Vergangenheit	Künstliche Vergangenheit	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Grane	1.Mai	3	55	14	79
	15.Mai	2	30	4	42
	1.Juni	1	20	3	30
Oker	1.Mai	9456	9400	9816	9806
	15.Mai	9984	9901	9998	9970
	1.Juni	9760	9579	9765	9709

6.6 Zusammenfassende Bewertung der simulierten Zukunfts-realisationen

Die Auswertung der Klimarealisationen lässt den Schluss zu, dass in der Zukunft die Okertalsperre in den Sommermonaten den Überleitungsbetrieb im bisherigen Umfang nicht beibehalten kann. Dies hatte in dem Modell die Folge, dass die anderen Ableitungen stärker beansprucht wurden. Besonders die Überleitung der Innerstetalsperre führte mehr Wasser in die Granetalsperre ab. Das geschah vorwiegend von Dezember bis Mai, weil die Okertalsperre aufgrund ihres eigenen Speicherfüllstandes weniger Wasser in die Granetalsperre ableiten konnte. Die Ursache für den geringeren Speicherfüllstand der Okertalsperre, ebenfalls auch bei den anderen Stauseen zu beobachten, ist der etwas geringere Talsperrenzufluss in den Sommerhalbjahren. Diese Veränderungen, die durch den Klimawandel verursacht werden, sind auch in der Abgabe ins Wildbett erkennbar. Daraus folgt, dass die durchschnittliche potenzielle Jahreseenergierzeugung durch die Turbinen an den Talsperren über die nahe und ferne Zukunft etwas abnimmt. Positiv festzustellen war, dass in allen langjährigen Zeitreihen zu jedem Zeitpunkt die Rohwasserentnahme für die Trinkwassergewinnung gewährleistet werden konnte. Zum gütebestimmenden Mindeststau wurde festgestellt, dass die Häufigkeit der Unterschreitung am ersten Tag der Sommerstagnation in den Zukunftsrealisationen anstieg. Bei der Granetalsperre trat jedoch dieser Zustand über die 10.000 Jahre vergleichsweise selten auf.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Harzwasserwerke GmbH steht die Beantragung der Neubewilligung des Betriebs des Nordharzspeicherverbundsystems an. Dieses besteht aus den drei Talsperren Innerste, Grane und Oker. Die Sperren werden kombiniert über abgestimmte Betriebsregeln und ein Stollensystem betrieben. Zu dem Verbundsystem gehören noch kleinere Fließgewässer, die an das Stollensystem angeschlossen sind.

Für die Neubewilligung soll die Wirksamkeit des Verbundsystems bezüglich Versorgungssicherheit, Hochwasserschutz, Wasserkraftpotential und weiterer - auch ökologischer - Kriterien überprüft werden. Hierfür sind Langzeitsimulationen des Betriebes mit einem numerischen Speicherbetriebsmodell vorgesehen. Mit der Durchführung der Arbeiten beauftragte die Harzwasserwerke GmbH die Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig.

Das Nordharzspeicherverbundsystem ist mit seinen Randbedingungen, Überleitungen und vernetzten Betriebsregeln für die unterschiedlichen Betriebsziele als hochkomplex einzustufen. Eine numerische Nachbildung war deshalb mit am LWI vorhandener oder externer Software aus der Wasserwirtschaft nicht machbar.

Die Aufgabe erforderte die Entwicklung und Programmierung eines neuen Betriebs- und Bilanzierungsmodells. Mit der Softwareentwicklung beauftragte das LWI in Abstimmung mit der Harzwasserwerke GmbH die Firma Ingenieure für Wasser, Umwelt und Datenverarbeitung IWUD GmbH, Höxter.

Für die Bearbeitung wurde zuerst ein umfassender Systemplan des Nordharzspeicherverbundsystems mit allen Betriebsregeln aufgestellt. Basierend auf diesem Plan wandte das LWI die neue Modellsoftware auf das gesamte Speicherverbundsystem an. Das aufgebaute Modell wird als IGOmod (“Innerste-Grane-Oker-Modell“) bezeichnet. Es ermöglicht Simulationen auf Tagesbasis und kann wegen der modularen und objektorientierten Struktur der Software leicht erweitert oder modifiziert werden.

Im Anschluss wurde IGOmod über zwei historische Perioden kalibriert und über eine historische Periode validiert. Hierfür wurden die Zuflusszeitreihen und andere Daten von den Harzwasserwerken GmbH zur Verfügung gestellt. Durch die Simulationen der drei unterschiedlichen Zeiträume wurde deutlich, dass das Modell die Betriebsregeln des Nordharzverbundsystems richtig umsetzt. Abweichungen in der Kalibrierung und Validierung sind auf die damalige reale Steuerung der Abgaben in Abweichung von den Betriebsregeln zurückzuführen. Am häufigsten traten die Unterschiede zwischen Modell und Wirklichkeit auf, wenn der Wasserstand in den Talsperren den Wert überschritt, ab dem die Talsperrenaufsicht eingeschaltet worden ist. Die Bewertung der Kalibrierung und Validierung erfolgte in enger Kooperation mit der Harzwasserwerke GmbH. Das kalibrierte IGOmod wurde als geeignet beurteilt, das Verbundsystem nach vorgegebenen Betriebsregeln realistisch zu simulieren.

Anschließend wurde mit IGOmod eine Simulation über 10.000 Jahre für die “reale Vergangenheit bis heute“ durchgeführt und ausgewertet. Diese Simulation repräsentiert die echte, auf lokalen Stationsdaten basierende Vergangenheit bis zum Jahr 2000 – somit im Sinne der Klimaforschung noch ohne signifikante Klimaänderung. Für die Generierung der Zuflussserien an fünf maßgebenden Zuflusspegeln in das System wurden hier nur beobachtete historische Daten verwendet (Haberlandt, 2013).

Die Auswertung des Simulationslaufes “reale verlängerte Vergangenheit“ zeigte, dass die Granetalsperre die gewünschte Entnahme von Rohwasser für die Trinkwasserversorgung immer erfüllen konnte. Der vorgegebene Mindeststau wurde in der Granetalsperre sehr selten unterschritten, da durch die Einhaltung der Überleitungsregeln die Talsperre über die 10.000 Jahre kontinuierlich mit Wasser versorgt wurde. Die Simulation lieferte keinen Rückgang des Speicherinhaltes auf den eisernen Bestand. Eine solche Absenkung kam aber gelegentlich bei der Innerstetalsperre vor.

Die simulierten Abgaben der drei Talsperren nach unterstrom entsprachen weitgehend den Abgaben aus der Kalibrierung und Validierung. Das meiste Wasser wurde im Sommerhalbjahr aus der Okertalsperre in die Granetalsperre übergeleitet. Durch diese erhöhte Abgabe wurde in der Modellsimulation bei der Okertalsperre der gütebestimmende Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation relativ häufig unterschritten. Im Vergleich mit der Kalibrierung und Validierung wurden im regelkonformen Betrieb der Modellsimulation an der Überleitung der Radau geringere Wassermengen abgeleitet. Die simulierten Abgaben der drei Talsperren nach unterstrom entsprachen weitgehend den Abgaben aus der Kalibrierung und Validierung.

Für die Simulationen der Zukunft mit Klimaänderung verwendete Haberlandt (2014) Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben KliBiW (Klimaänderungsfolgen für die binnenländische Wasserwirtschaft in Niedersachsen). Daraus entwickelte er für fünf Zukunftsrealisationen zahlreiche langjährige Zeitreihen über 10.000 Jahre, jeweils für die fünf Zuflusspegel, wie folgt:

- Serie aus 20C-Lauf: dieser repräsentiert die “künstliche Vergangenheit“ (1961-2000) ohne Klimasignal
- Serie für die Zeitscheibe “Nahe Zukunft (2021-2050)“ mit Klimasignal
- Serie für die Zeitscheibe “Ferne Zukunft (2071-2100) mit Klimasignal.

Aus den fünf Realisationen wählte das LWI die WETTREG-Realisation 18 als repräsentative Zukunftsrealisation für die Speicherbetriebsmodellierung aus. Die Auswahl basierte auf statistischen Analysen. Mit den drei dazugehörenden WETTREG-18-Serien über 10.000 Jahre wurde der Speicherbetrieb mit IGOmod simuliert. Bei der Auswertung wurden die Ergebnisse der nahen und fernen Zukunft mit den Ergebnissen des 20C-Laufes verglichen, da alle drei Realisationen aus demselben Downscaling-Modell (WETTREG) und globalen Klimamodell (ECHAM5) hergeleitet wurden.

Der Vergleich des 20C-Laufes mit den beiden Zukunftsrealisationen zeigte, dass in der Zukunft die Okertalsperre in den Sommermonaten den Überleitungsbetrieb nicht im bisherigen Umfang beibehalten kann. Als Folge wurden die anderen Überleitungen bzw. Ableitungen stärker beansprucht. Besonders die Überleitung

Innerste-Grane wurde stärker beansprucht. Das geschah vorwiegend von Dezember bis Mai, weil in diesem Zeitraum die Okertalsperre aufgrund ihres eigenen Speicherfüllstandes weniger Wasser in die Granetalsperre ableiten konnte. Die Ursache für den geringen Speicherfüllstand der Okertalsperre – dies war auch bei den anderen Stauseen zu beobachten - ist der geringere Talsperrenzufluss in den Sommerhalbjahren. Diese Veränderungen, die laut WETTREG-Realisation 18 durch den Klimawandel verursacht werden, waren auch in der Abgabe nach unterstrom erkennbar. Als Folge nahm die potenzielle Jahresenergieerzeugung durch die Turbinen an den Talsperren in der Zukunft ab. Bezüglich Hochwasserbelastung zeigte sich bei der Oker- und Innerstetalsperre eine Abnahme der Beanspruchung der Hochwasserentlastung mit voller Nutzung des Grundablasses in der Zukunft. Dieser Sachverhalt sagt nichts über die Höhe der maximalen Abflüsse aus, kann aber grundsätzlich mit der Klimaänderung in Verbindung gebracht werden. Wegen geringeren (mittleren) Zuflusses im Frühjahr und Sommer in der Zukunft sind die Speicher in den Herbst hinein weniger gefüllt und haben zu Beginn des Winters etwas mehr Puffer für Hochwasserzuflüsse. Positiv festzustellen war, dass in allen langjährigen Zeitreihen zu jedem Zeitpunkt die Rohwasserentnahme für die Trinkwassergewinnung gewährleistet werden konnte. Außerdem konnte an der Granetalsperre nur selten eine Unterschreitung des gütebestimmenden Mindeststaus festgestellt werden.

Literaturverzeichnis

Haase, H., Schmidt, M., & Lenz, J. (1970). *Der Wasserhaushalt des Westharzes - Hydrologische Untersuchung 1941-1965.* Göttingen - Hannover: kommissionsverlag Gebrüder Wurm KG, Göttingen.

Haberlandt, P. D.-I. (2013). *Multivariate Abflussgenerierung für Harztalsperrenzuflüsse auf Tageswertbasis für die Gegenwart.* Hannover.

Haberlandt, P. D.-I. (2014). *Multivariate Abflussgenerierung für Harztalsperrenzuflüsse auf Tageswertbasis für die Zukunft (QGEN-II).* Hannover.

Harzwasserwerke GmbH. (2004). *Innerstetalsperre - Sanierungsvorbereitungen laufen auf Hochtouren.*

Harzwasserwerke GmbH. (2011). *Der Wasserhaushalt des Westharzes - Hydrologische Untersuchungen 1941-2010.*

NLWKN. (2012).: *Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht Phase 1+2. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Band 33.* Norden: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

NLWKN. (2014).: *Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland Abschlussbericht - Phase 3. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, im Druck.* Norden: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

Anhang

Anhang 1: Informationen der existierenden Pegelmessstationen im Nordharzverbundsystem. Seite 73

Anhang 2: Der vollständige Systemplan des Nordharzverbundsystems. Aufgestellt von Dr. Andreas Koch vom dem Ingenieurbüro IWUD. Seite 74

Anhang 3.1: Die Beschreibung der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage. Seite 75

Anhang 3.2: Die Beschreibung der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage. Seite 76

Anhang 3.3: Die Beschreibung der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage. Zum Zwecke der Übersichtlichkeit wurde die Tabelle vereinfacht. Seite 78

Anhang 4.1: Der Lamellenplan der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH. Seite 80

Anhang 4.2: Der Lamellenplan der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH. Seite 81

Anhang 4.3: Der Lamellenplan der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH. Seite 82

Anhang 4.4: Der Ableitungsplan der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH. Seite 83

Anhang 5.1: Die Beschreibung des Grundablasses an der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre. Seite 86

Anhang 5.2: Die Beschreibung des Grundablasses an der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre. Seite 88

Anhang 5.3: Die Beschreibung eines Grundablasses an der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre. Der zweite Grundablass an dem Stausee hat die gleichen Vorgaben bezüglich der erlaubten Abgaben wie der erste Grundablass. Seite 88

Anhang 6: Die mittleren Zuflüsse für die Pegel Margarethenklippe (Granetalsperre) und Rote Klippe (Innerstetalsperre) für alle langjährigen Zeitreihen, welche die künstliche Vergangenheit wiedergeben. Das Element „Ohne Klimaänderung“ entspricht der realen verlängerten Historie mit einem Umfang von 10.000 Jahren. Seite 90

Anhang 7: Die mittleren Zuflüsse für die Pegel Margarethenklippe (Granetalsperre) und Rote Klippe (Innerstetalsperre) für alle langjährigen Zeitreihen der WETTREG- 18 Realisation. Das Element „Ohne Klimaänderung“ entspricht der verlängerten Historie mit einem Umfang von 10.000 Jahren. Die Zukunftsrealisation „20C“ beschreibt die künstliche Vergangenheit, „nah“ die nahe Zukunft und „fern“ die ferne Zukunft dieser Klimavariante. Seite 91

Anhang 8: Aufführung aller verwendeten Modellelemente, welche zur Wiedergabe des Nordharzverbundsystems in der Modellsoftware Gecko verwendet wurden. Seite 92

Anhang 9: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den ersten Kalibrierungszeitraum vom 01.November 1984 bis 31.Oktober 1988. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot). Seite 96

Anhang 10: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den zweiten Kalibrierungszeitraum vom 01.November 1995 bis 31.Oktober 1997. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot). Seite 97

Anhang 11: Gegenüberstellung der monatlichen Überleitungsmengen der Oker, der Innerste, der Gose und der Radau für den zweiten Kalibrierungszeitraum vom 1.November 1995 bis zum 3.Oktober 1997. Die historischen Aufzeichnungen sind blau dargestellt und die modellierten rot. Seite 98

Anhang 12: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den Validierungszeitraum vom 01.November 2001 bis 31.Oktober 2005. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot). Seite 99

Anhang 13: Statistische Auswertung des Speicherverbundmodells mit der realen verlängerten Vergangenheit ohne Klimaänderung. Die Erstellung dieser Auswertung wurde mit der Software MATLAB durchgeführt. Seite 100

Anhang 14: Darstellung der mittleren Überleitungsmengen den Ableitungen Innerste, Radau, Romke und Gose auf Monatsbasis für die betrachtete Historie und die künstlich verlängerte Vergangenheit. Seite 101

Anhang 15: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Monatszuflüsse an den Pegel oberhalb der drei Talsperren des Nordharzverbundsystems. Seite 103

Anhang 16: Überschreitungsdauerlinien der Speicherinhalte für die Oker- und Innerstetalsperre für die langjährige Zeitreihe ohne Klimaänderung. Seite 105

Anhang 17: Darstellung der jährlichen potenziellen Energieerzeugung der Francis-Turbine unterhalb des Grundablasses der Granetalsperre für die langjährige Zeitreihe ohne Klimaänderung. Seite 106

Anhang 18.1: Statistische Auswertung der künstlichen Vergangenheit der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB. Seite 107

Anhang 18.2: Statistische Auswertung der nahen Zukunft der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB. Seite 108

Anhang 18.3: Statistische Auswertung der fernen Zukunft der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB. Seite 109

Anhang 19: Veranschaulichung der monatlichen mittleren Zuflüsse oberhalb der Talsperren Grane und Innerste für alle betrachteten Zeitreihen. Seite 110

Anhang 20: Darstellung der Überschreitungsdauerlinien hinsichtlich der Abgabe in den Unterlauf von der Oker- und Granetalsperre für alle langjährigen Zeitreihen. Seite 111

Anhang 21: Darstellungen der mittleren Überleitungsmengen für die Überleitungen Innerste, Gose, Wintertalbach, Romke und Radau für alle langjährigen Simulationen. Seite 112

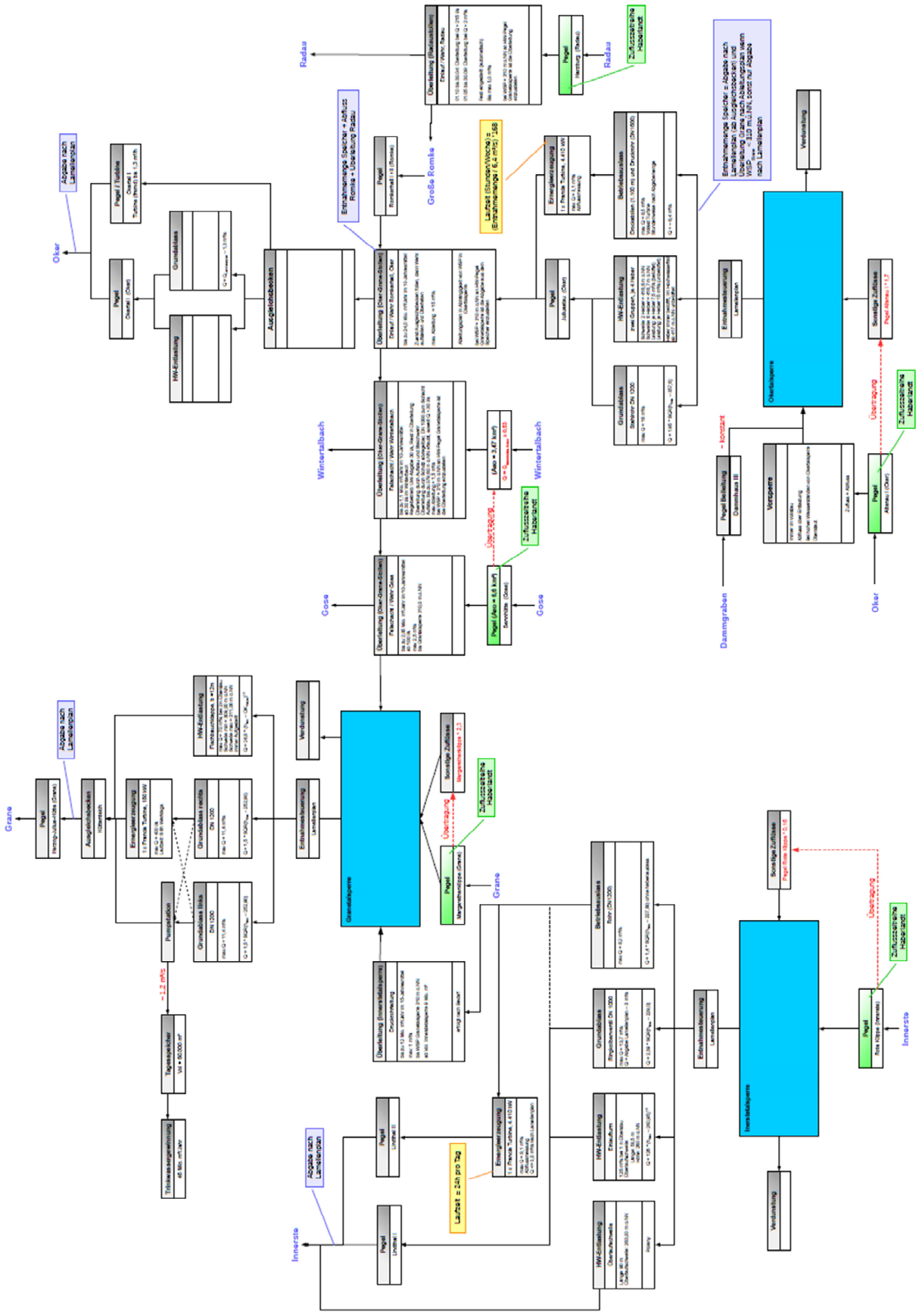
Anhang 22: Überschreitungsdauerlinien der Speicherfüllstande der Talsperren Innerste und Oker für alle langjährigen Zeitreihen. Seite 114

Anhang 23: Überschreitungsdauerlinien der potenziellen Energieerzeugung für die Turbinen an Grane- und Innerstetalsperre für alle Zeitreihen über 10.000 Jahre. Seite 115

Anhang 1: Informationen der existierenden Pegelmessstationen im Nordharzverbundsystem. (Harzwasserwerke GmbH, 2011)

Pegel	Rote Klippe	Margarethen-klippe	Altenau	Sennhütte	Harzburg
Messbeginn	01.11.1963	01.11.1979	01.11.1948	01.11.1971	01.01.1925
Pegelnummer	4886111	4886103	4821103	4821115	4821122
Fließgewässer	Innerste	Grane	Oker	Gose	Radau
Einzugs-gebietsgröße [km²]	85	6,7	31,2	6,6	18,3

Anhang 2: Der vollständige Systemplan des Nordharzverbundsystems. Aufgestellt von Dr. Andreas Koch vom dem Ingenieurbüro IWUD.



Anhang 3.1: Die Beschreibung der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage.

Wasserstand [m über NN]	Speicherinhalt [m³]	Speicheroberfläche [m²]
222	0	0
223	10	80
224	470	1100
225	1840	1610
226	3750	2230
227	6490	3320
228	10333	4290
229	15080	5230
230	20890	6460
231	28130	8100
232	37550	11040
233	53270	25980
234	96940	64110
235	184100	110280
236	319680	160120
237	503300	208960
238	738600	260830
239	1025743	314170
240	1363478	362730
241	1755253	418770
242	2196863	462460
243	2680708	507950
244	3210283	548400
245	3778313	589550
246	4387938	627210
247	5035233	666920
248	5719908	702990
249	6445228	750200
250	7224383	807600
251	8059338	861660
252	8945998	911610
253	9883223	961840
254	10867803	1009710
255	11905028	1067110
256	13002108	1126870
257	14158143	1188510
258	15376793	1254230
259	16643568	1290800
260	17959163	1338700
261	19321848	1391070
262	20742678	1448700

Anhang 3.2: Die Beschreibung der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage.

Wasserstand [m über NN]	Speicherinhalt [m³]	Speicheroberfläche [m²]
358	0.05	400
359	25000	11000
360	60000	22000
361	105000	32000
362	165000	43000
363	233000	54000
364	315000	66000
365	420000	78000
366	508000	90000
367	625000	105000
368	760000	118000
369	900000	135000
370	1046000	152000
371	1245000	168000
372	1430000	186000
373	1635000	206000
374	1854000	228000
375	2115000	250000
376	2380000	272000
377	2670000	296000
378	2963000	320000
379	3300000	346000
380	3665000	372000
381	4055000	400000
382	4469000	432000
383	4920000	464000
384	5400000	496000
385	5920000	530000
386	6494000	570000
387	7110000	610000
388	7746000	652000
389	8405000	694000
390	9120000	736000
391	9925000	780000
392	10770000	824000
393	11645000	868000
394	12530000	912000
395	13415000	958000
396	14307000	1006000
397	15370000	1056000
398	16460000	1106000

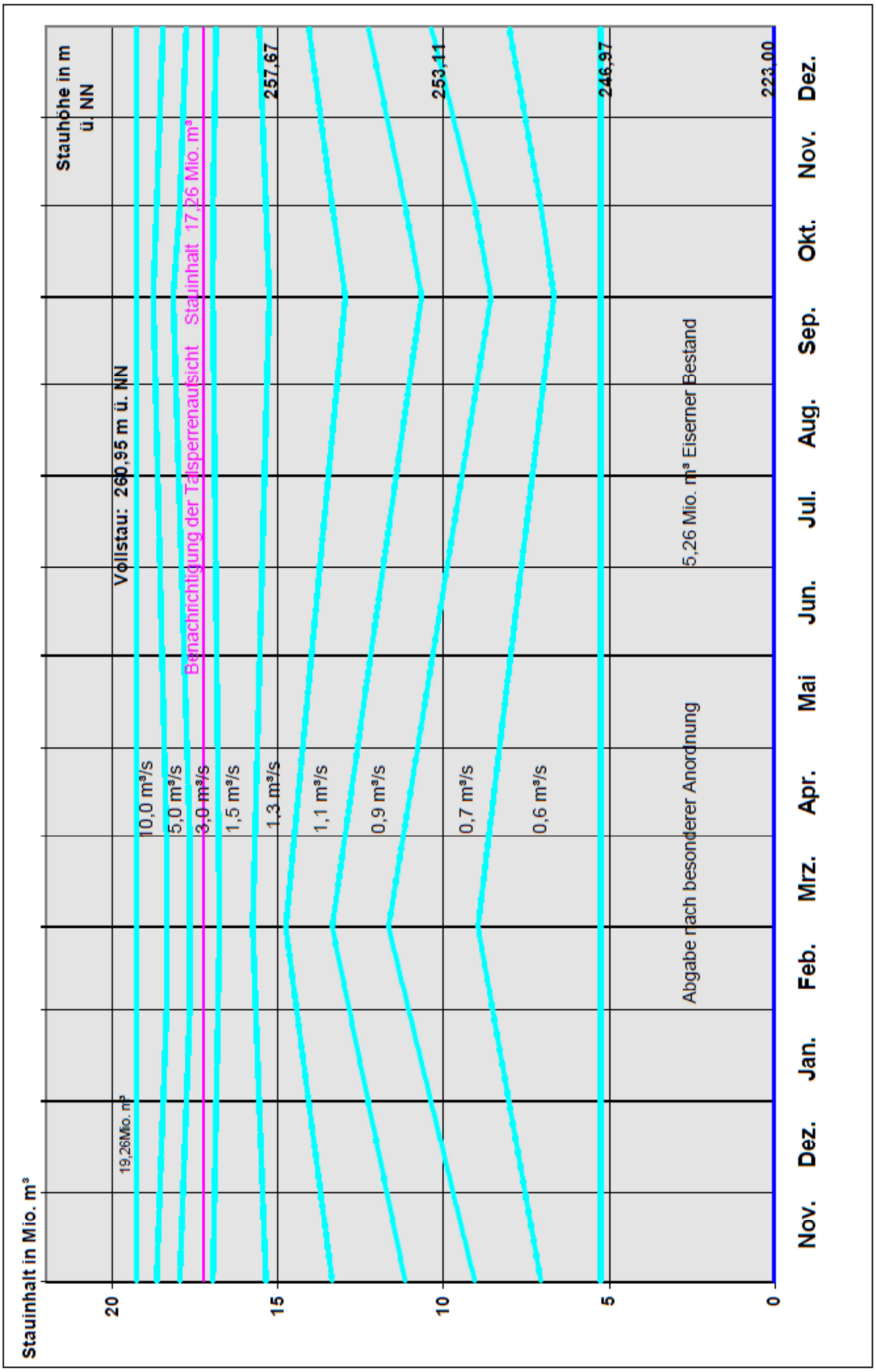
Wasserstand [m über NN]	Speicherinhalt [m³]	Speicheroberfläche [m²]
399	17580000	1158000
400	18735000	1210000
401	19920000	1264000
402	21160000	1318000
403	22555000	1372000
404	24039000	1430000
405	25565000	1488000
406	27111000	1546000
407	28665000	1604000
408	30217000	1662000
409	31800000	1720000
410	33516000	1778000
411	35372000	1836000
412	37319000	1894000
413	39282000	1952000
414	41281000	2010000
415	43300000	2070000
416	45500000	2130000
417	47750000	2190000
418	50100000	2252000

Anhang 3.3: Die Beschreibung der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem hinsichtlich des Speicherinhaltes und der Speicheroberfläche in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der Stauanlage. Zum Zwecke der Übersichtlichkeit wurde die Tabelle vereinfacht.

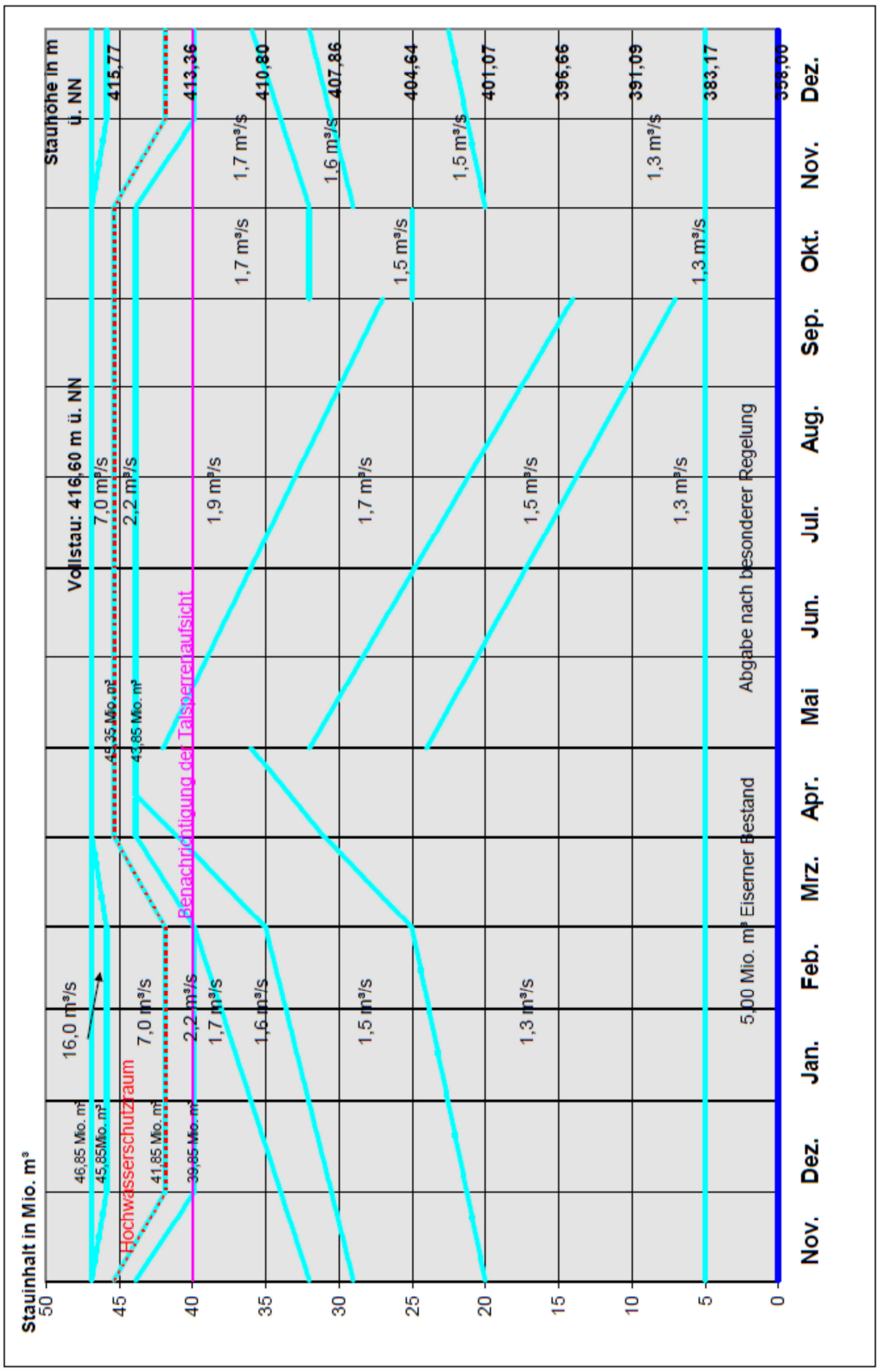
Wasserstand [m über NN]	Speicherinhalt [m³]	Speicheroberfläche [m²]
252	0	2400
253	10000	3000
254	13000	4000
255	20000	9900
256	41000	32200
257	82000	49000
258	140000	68100
259	215000	81600
260	305000	96700
261	406000	106400
262	518000	117200
263	641000	128800
264	778000	144900
265	932000	163500
266	1107000	185800
267	1303000	206100
268	1520000	228900
269	1762000	255200
270	2030000	280800
271	2322000	302400
272	2638000	331000
273	2983000	357500
274	3355000	388000
275	3762000	424300
276	4204000	460400
277	4679000	490700
278	5188000	526400
279	5733000	564300
280	6317000	603800
281	6939000	639400
282	7599000	679800
283	8296000	716000
284	9032000	754500
285	9804000	789900
286	10613000	828200
287	11460000	866300
288	12347000	906500
289	13273000	946500
290	14242000	992000
291	15257000	1036300
292	16316000	1082100

Wasserstand [m über NN]	Speicherinhalt [m³]	Speicheroberfläche [m²]
293	17420000	1126000
294	18569000	1172400
295	19763000	1216200
296	21003000	1264200
297	22293000	1315200
298	23634000	1366600
299	25028000	1421300
300	26477000	1476300
301	27979000	1528800
302	29538000	1587800
303	31155000	1647700
304	32832000	1705800
305	34569000	1768100
306	36369000	1830900
307	38231000	1894000
308	40159000	1961700
309	42158000	2025000
310	44233000	2109100
311	46389000	2182800

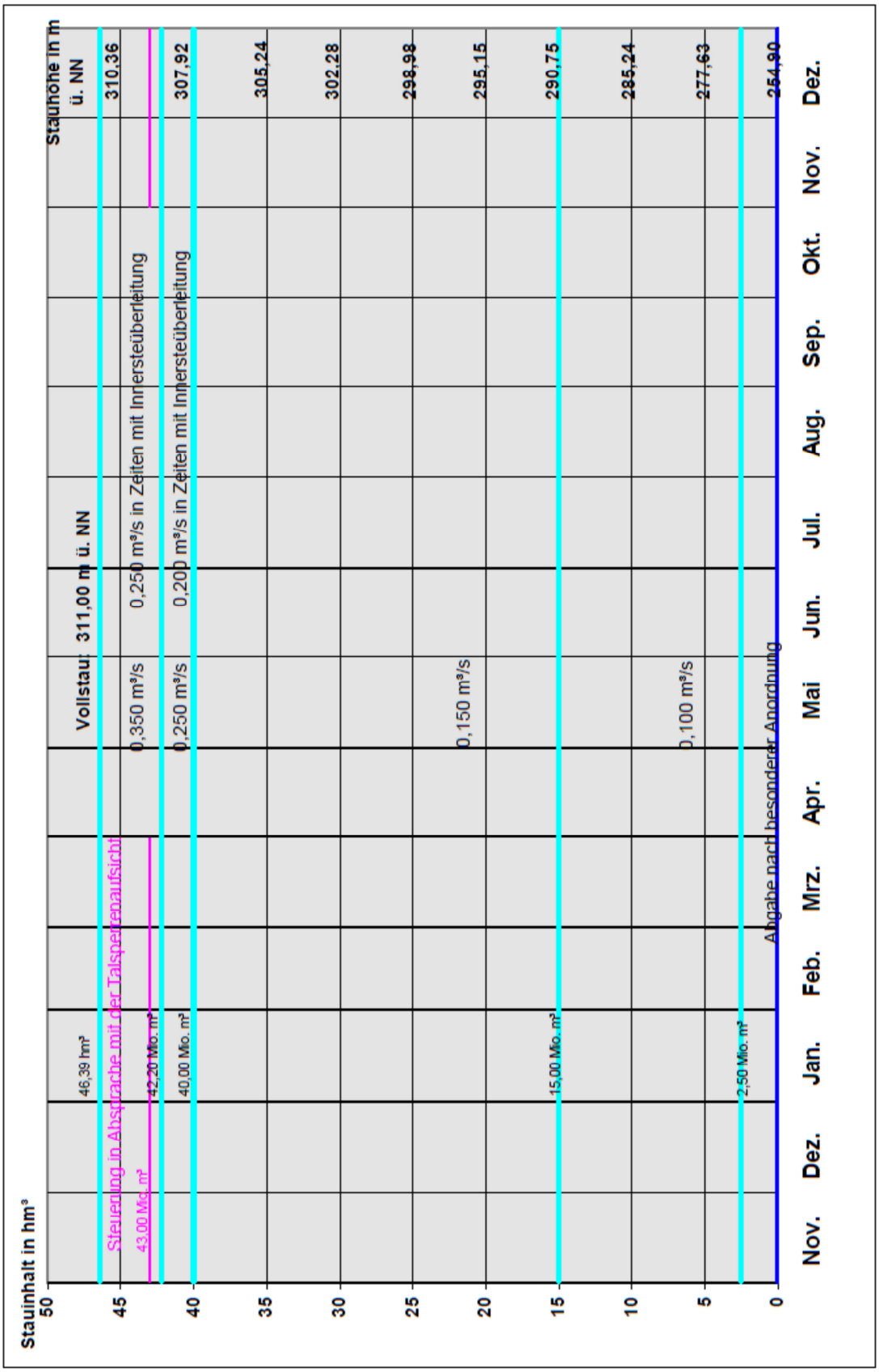
Anhang 4.1: Die Lamellenpläne der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem. Die Talsperrenabgabe ist abhängig vom betrachteten Zeitpunkt (Abszisse) und des auftretenden Speicherinhaltes der Talsperre (Ordinate). Die Sekundärachse der Ordinate gibt für den Speicherinhalt den zugehörigen Wasserstand in der Talsperre wieder. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH.



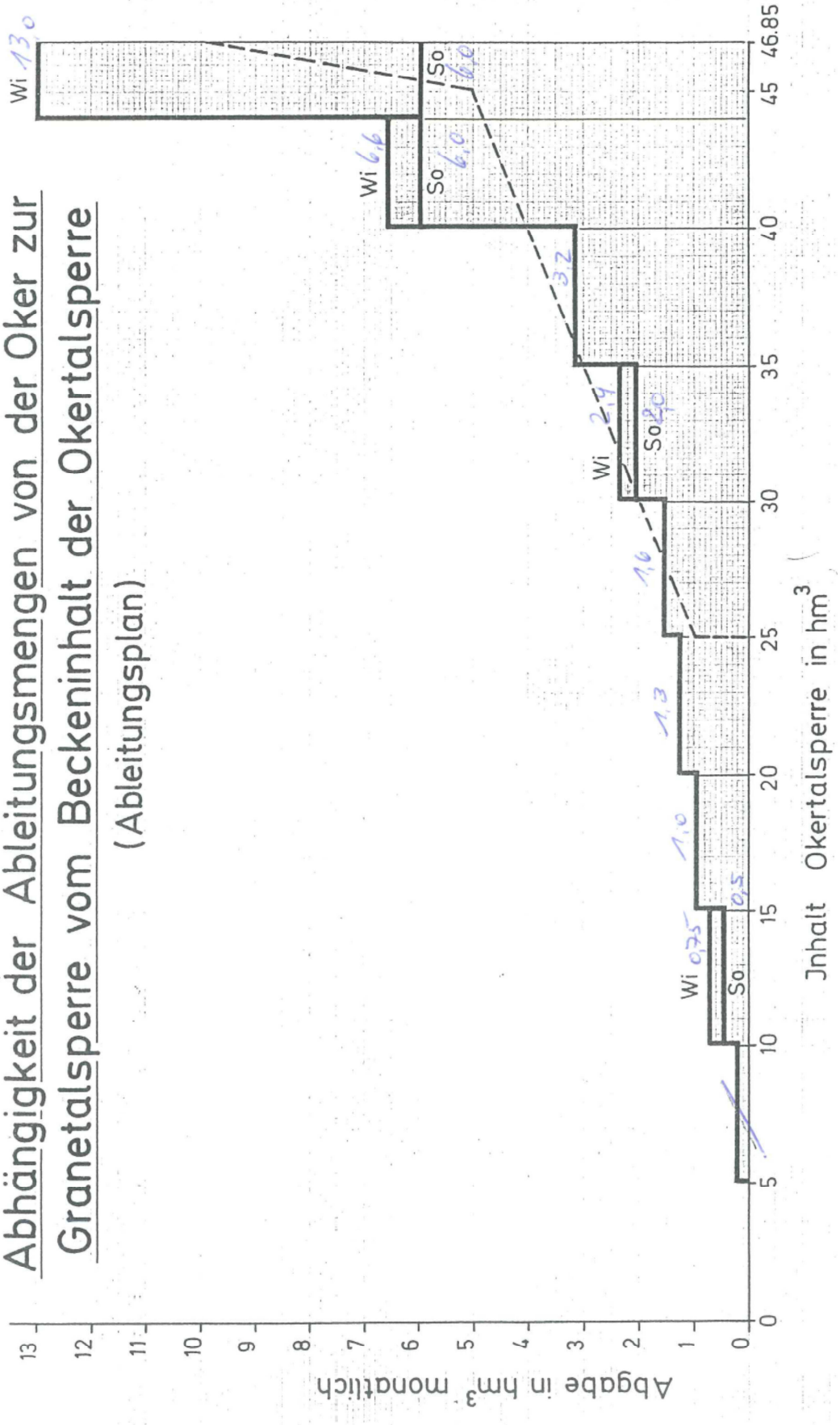
Anhang 4.2: Die Lamellenpläne der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem. Die Talsperrenabgabe ist abhängig vom betrachteten Zeitpunkt (Abszisse) und des auftretenden Speicherinhaltes der Talsperre (Ordinate). Die Sekundärachse der Ordinate gibt für den Speicherinhalt den zugehörigen Wasserstand in der Talsperre wieder. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH.



Anhang 4.3: Die Lamellenpläne der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem. Die Talsperrenabgabe ist abhängig vom betrachteten Zeitpunkt (Abszisse) und des auftretenden Speicherinhaltes der Talsperre (Ordinate). Die Sekundärachse der Ordinate gibt für den Speicherinhalt den zugehörigen Wasserstand in der Talsperre wieder. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH.



Anhang 4.4: Der Ableitungsplan der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem. Die Überleitung in die Grane ist abhängig vom Halbjahr (Sommer oder Winter) und dem Speicherinhalt der Okertalsperre. Bereitgestellt von der Harzwasserwerken GmbH.



Anhang 5.1: Die Beschreibung des Grundablasses an der Innerstetalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre.

Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m³/s]
229.00	0
230.00	2.39
231.00	3.38
232.00	4.14
233.00	4.78
234.00	5.344
235.00	5.854
236.00	6.323
237.00	6.76
238.00	7.17
239.00	7.558
240.00	7.927
241.00	8.279
242.00	8.617
243.00	8.943
244.00	9.256
245.00	9.56
246.00	9.854
247.00	10.14
248.00	10.418
249.00	10.688
250.00	10.952
251.00	11.21
252.00	11.462
253.00	11.709
254.00	11.95
255.00	12.187
256.00	12.419
257.00	12.647
258.00	12.871
259.00	13.091
260.00	13.307
261.00	13.52
261.10	13.541
261.20	13.562
261.30	13.583
261.40	13.604
261.50	13.625
261.60	13.646
261.70	13.667
261.80	13.688

Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m³/s]
261.90	13.709
262.00	13.73
262.10	13.75
262.20	13.771
262.30	13.792
262.40	13.812
262.50	13.833
262.60	13.854
262.70	13.874
262.80	13.895
262.90	13.915
263.00	13.936
263.10	13.956
263.20	13.977
263.30	13.997
263.40	14.018
263.50	14.038
263.60	14.058
263.70	14.079
263.80	14.099
263.90	14.119
264.00	14.139

Anhang 5.2: Die Beschreibung des Grundablasses an der Okertalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre.

Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m^3/s]
358	1.233
359	2.307
360	3.021
361	3.596
362	4.09
363	4.531
364	4.933
365	5.305
366	5.652
367	5.979
368	6.289
369	6.584
370	6.867
371	7.138
372	7.4
373	7.652
374	7.897
375	8.134
376	8.365
377	8.589
378	8.807
379	9.021
380	9.229
381	9.433
382	9.632
383	9.828
384	10.019
385	10.207
386	10.392
387	10.573
388	10.752
389	10.927
390	11.1
391	11.27
392	11.437
393	11.602
394	11.765
395	11.925
396	12.084
397	12.24

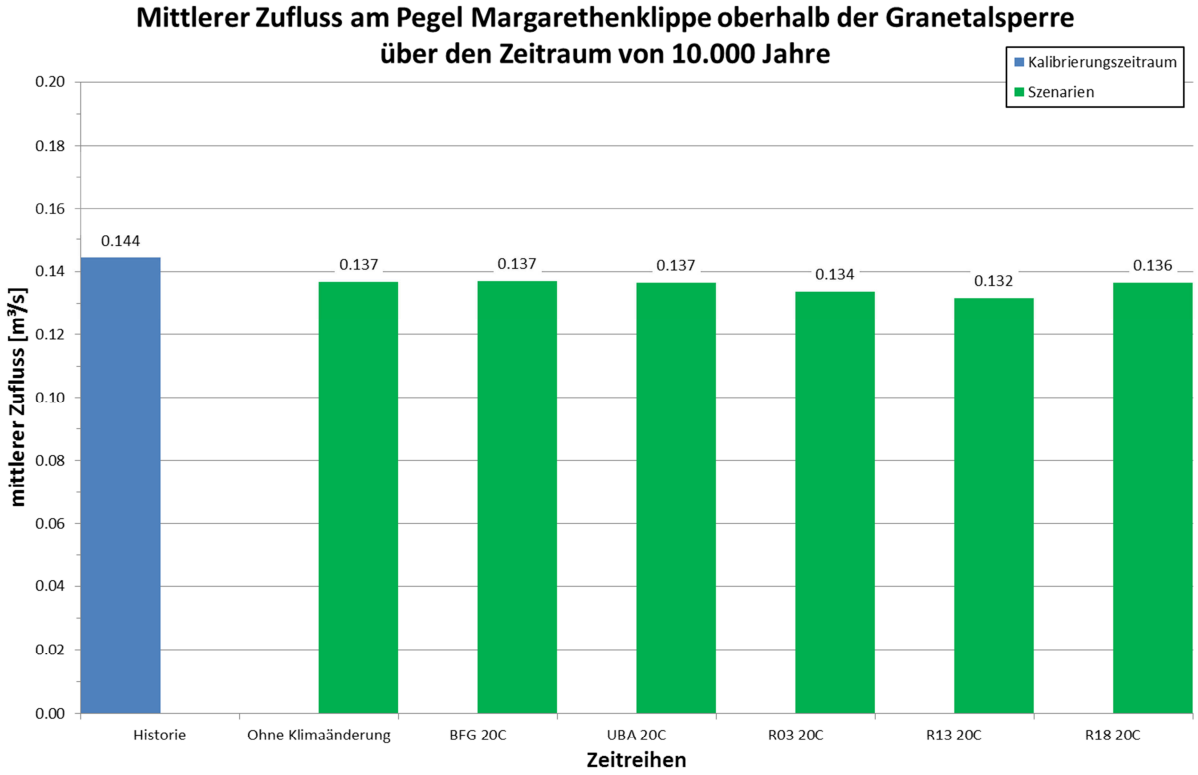
Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m³/s]
398	12.394
399	12.547
400	12.697
401	12.846
402	12.993
403	13.139
404	13.283
405	13.425
406	13.566
407	13.706
408	13.844
409	13.98
410	14.116
411	14.25
412	14.382
413	14.514
414	14.644
415	14.774
416	14.902
416.1	14.915
416.2	14.927
416.3	14.94
416.4	14.953
416.5	14.966
416.6	14.978
416.7	14.991
416.8	15.004
416.9	15.016
417	15.029
417.1	15.042
417.2	15.054
417.3	15.067
417.4	15.079
417.5	15.092
417.6	15.105
417.7	15.117
417.8	15.13
417.9	15.142
418	15.155

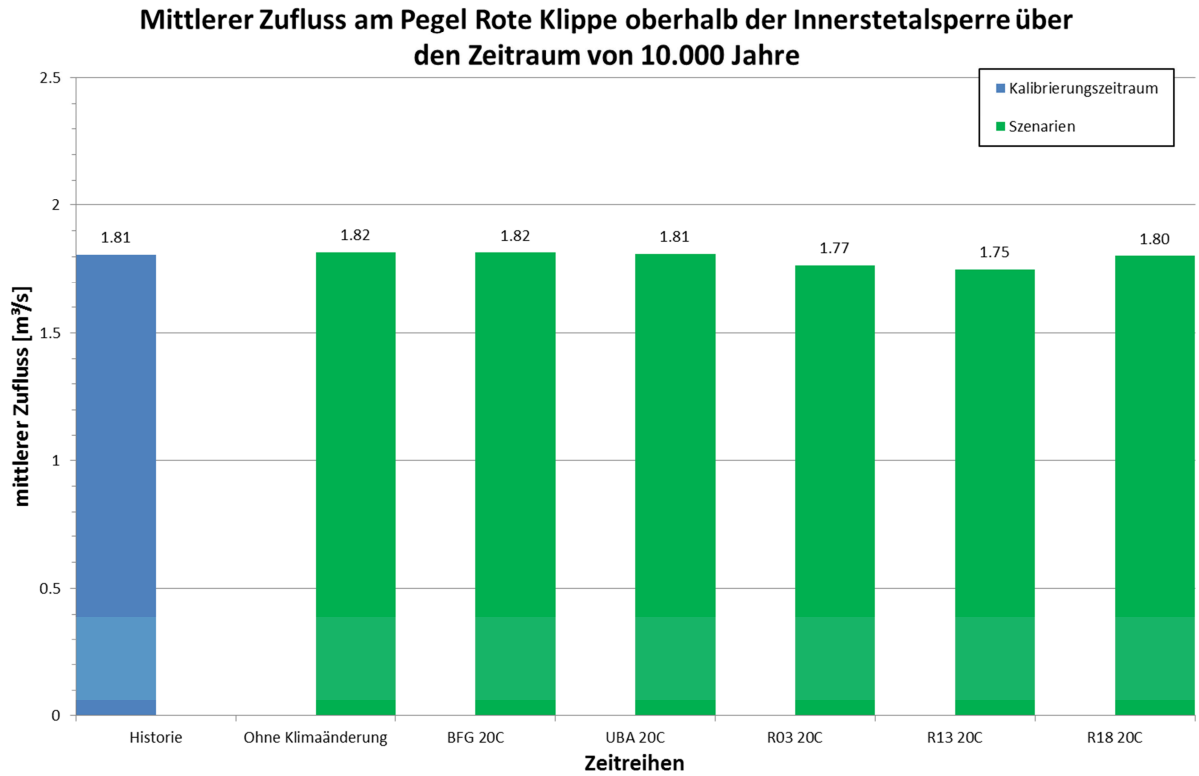
Anhang 5.3: Die Beschreibung eines Grundablasses an der Granetalsperre im Nordharzverbundsystem in Abhängigkeit vom dem Wasserstand in der betreffenden Talsperre. Der zweite Grundablass an dem Stausee hat die gleichen Vorgaben bezüglich der erlaubten Abgaben wie der erste Grundablass.

Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m^3/s]
252	0
253	0.474
254	1.573
255	2.174
256	2.641
257	3.037
258	3.387
259	3.705
260	3.997
261	4.269
262	4.525
263	4.767
264	4.997
265	5.218
266	5.429
267	5.632
268	5.829
269	6.019
270	6.203
271	6.382
272	6.556
273	6.725
274	6.89
275	7.052
276	7.209
277	7.364
278	7.515
279	7.663
280	7.809
281	7.951
282	8.092
283	8.23
284	8.365
285	8.499
286	8.63
287	8.759
288	8.887
289	9.012
290	9.136
291	9.259

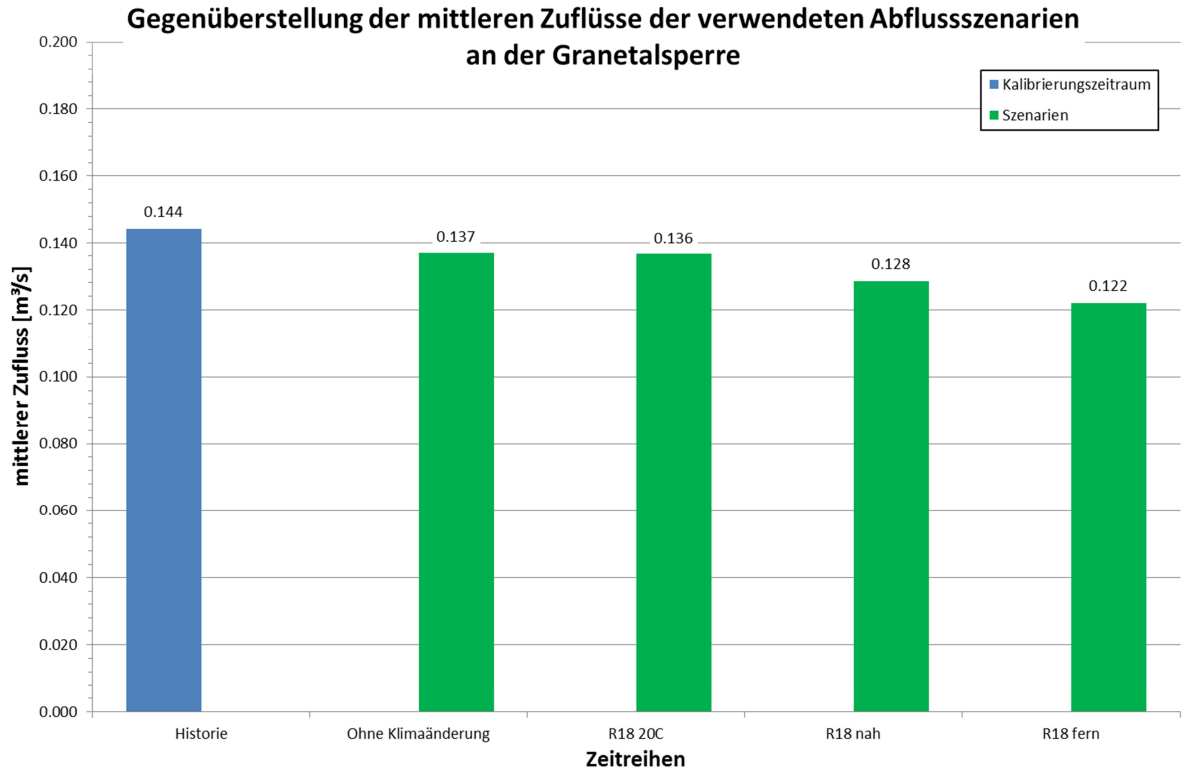
Wasserstand [m über NN]	Erlaubte Abgabe über den Grundablass [m³/s]
292	9.379
293	9.499
294	9.616
295	9.733
296	9.848
297	9.961
298	10.073
299	10.185
300	10.294
301	10.403
302	10.511
303	10.617
304	10.723
305	10.827
306	10.93
307	11.033
308	11.134
309	11.235
310	11.335
311	11.434

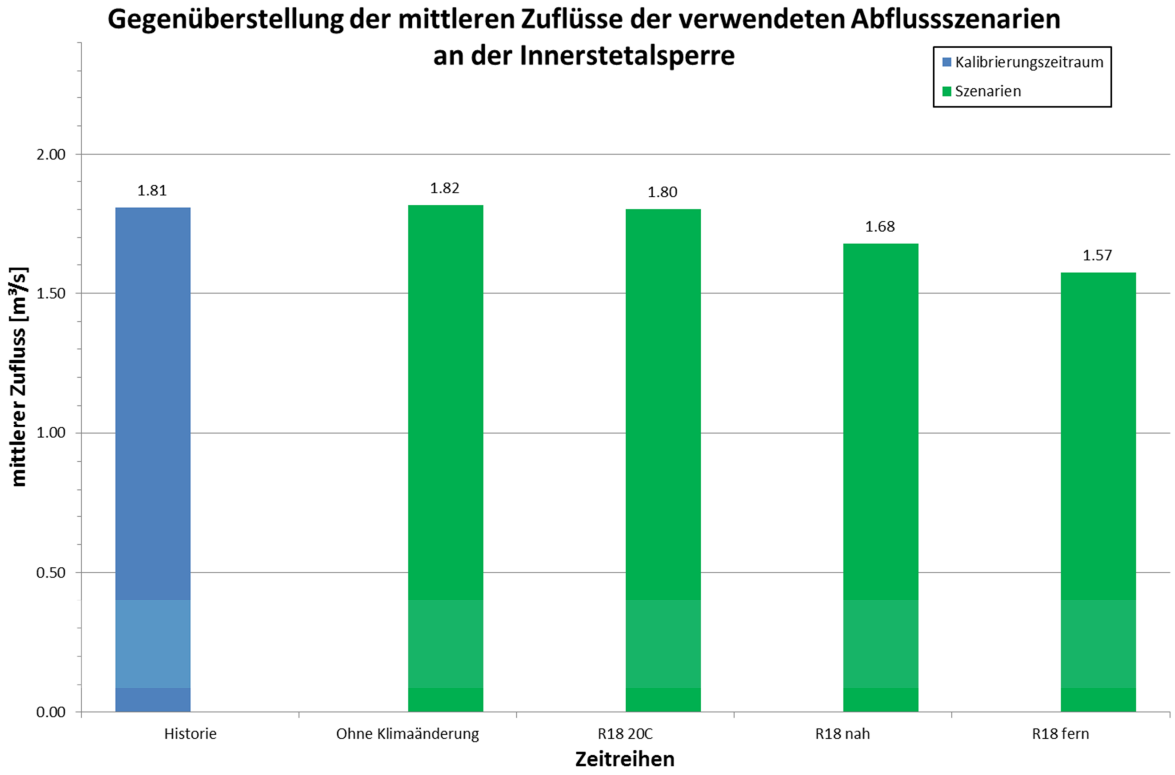
Anhang 6: Die mittleren Zuflüsse für die Pegel Margarethenklippe (Granetalsperre) und Rote Klippe (Innerstetalsperre) für alle langjährigen Zeitreihen, welche die künstliche Vergangenheit wiedergeben. Das Element „Ohne Klimaänderung“ entspricht der “realen verlängerten Vergangenheit“ mit einem Umfang von 10.000 Jahren.



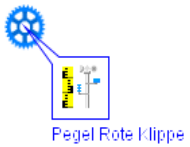


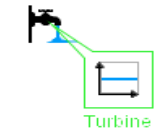
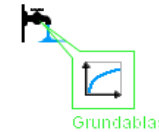
Anhang 7: Die mittleren Zuflüsse für die Pegel Margarethenklippe (Granetalsperre) und Rote Klippe (Innerstetalsperre) für alle langjährigen Zeitreihen des WETTREG-Realisation 18. Das Element „Ohne Klimaänderung“ entspricht der “realen verlängerten Vergangenheit“ mit einem Umfang von 10.000 Jahren. Die Zukunftsrealisation „20C“ beschreibt die künstliche Vergangenheit, „nah“ die nahe Zukunft und „fern“ die ferne Zukunft dieser Klimavariante.



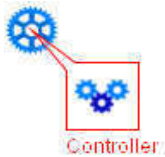


Anhang 8: Aufführung aller verwendeten Modellelemente, welche zur Wiedergabe des Nordharzverbundsystems in IGOmod verwendet wurden.

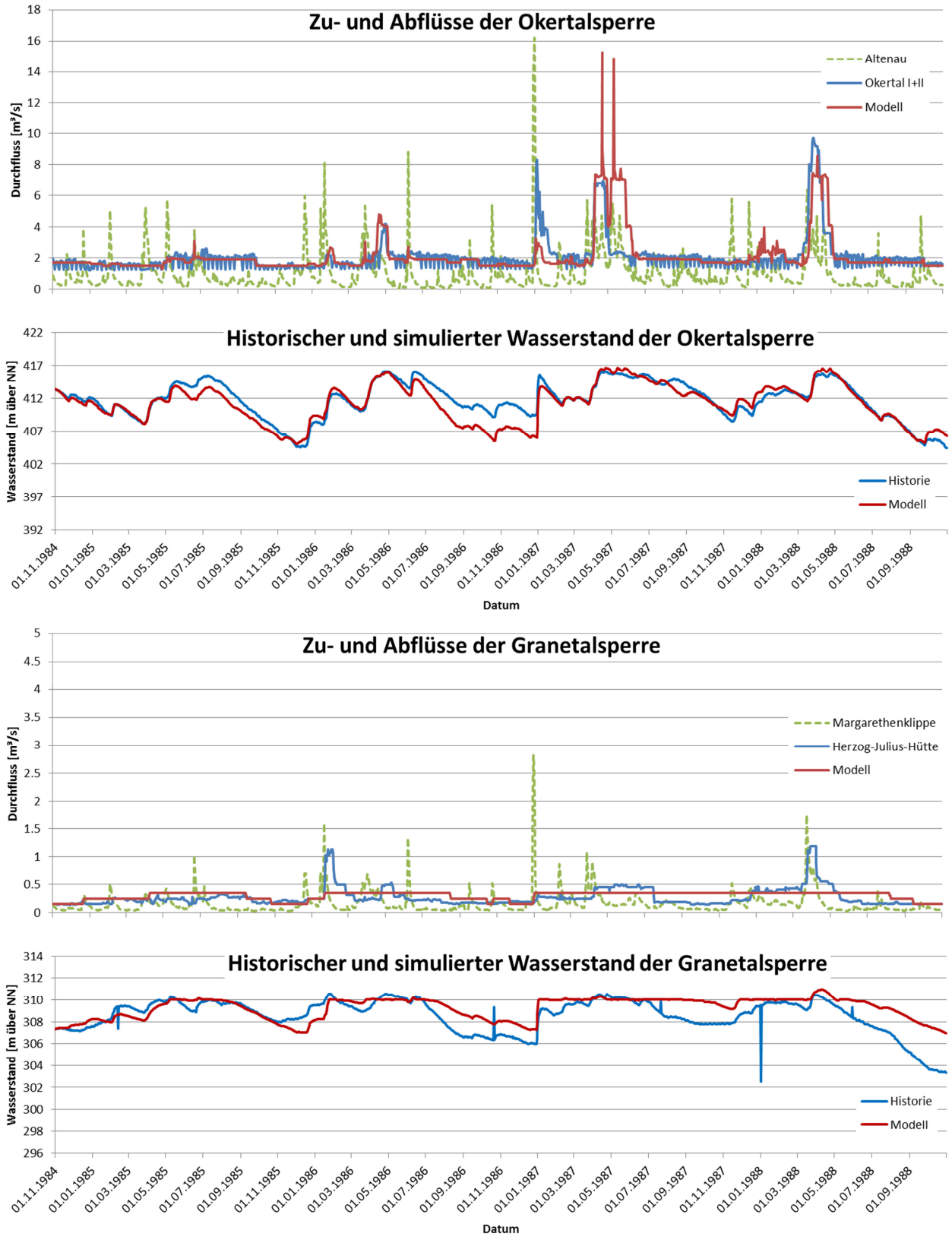
Symbol	Bezeichnung im Modell	Funktion innerhalb des Nordharzverbundsystems	Benötigte Informationen und Einstellungen für ein rechenfähiges Speicherverbundmodell
	Messstation	- zum Einem als Inputelement für die jeweiligen Zuflüsse des Nordharzverbundsystem - als Auswertestation von gewünschten Kenngrößen innerhalb der Modellsoftware	- Als Inputelement: Zuflusszeitreihen auf Tagesbasis - Als Auswertestation von Kenngrößen: Verknüpfung mit den Elementen, welche die gewünschten Informationen enthalten
	Reservoir	- Bestandteil der Talsperre - liefert Informationen bezüglich Speichervolumen und Speicheroberfläche der einzelnen Talsperren	- Beziehung von der Speicheroberfläche [m²] zum Wasserstand [m über NN] (siehe Anhang 3) - Beziehung von Speicherfüllstand [m³] zum Wasserstand in der Talsperre [m über NN] (siehe Anhang 3) - Wasserstand zu Beginn der Simulation in der Talsperre [m über NN] - Verknüpfung mit einen Entnahmeverteiler - Verknüpfung mit einer Messstation, die als Zuflusspegel deklariert ist
	Entnahmeverteiler	- Bestandteil der Talsperre - Steuerung und Verteilung der Entnahmen aus der Talsperre auf die existierenden Bauwerke	- Verknüpfung mit allen relevanten Bauanlagen nach dem Systemplan - Deklarierung nach welchen Lamellenplänen die Abgaben der Talsperren erfolgen soll - Festlegung der Abfolge, welche Entnahmeelemente zuerst Wasser aus der Talsperre abgeben - Ausweisung der Entnahmeelemente, welche außerhalb des Lamellenplan der Talsperre Wasser entnehmen (Hochwasserentlastungsanlagen, Verdunstung, Rohwasserentnahme)
	Verdunstung	- Bestimmung des Wasserverlustes der Talsperre durch Evaporation	- Verdunstungszeitreihe auf Tagesbasis für die drei Talsperren [mm/d] - Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler der jeweiligen Talsperre

Symbol	Bezeichnung im Modell	Funktion innerhalb des Nordharzverbundsystems	Benötigte Informationen und Einstellungen für ein rechenfähiges Speicherverbundmodell
	Konstante Entnahme	- Element für die Rohwasserentnahme an der Granetalsperre - Element für die Turbinen	- Angabe der kontinuierlichen Entnahme durch die Anlage - Deklarierung des Start- und Enddatums der Entnahme [Tag.Monat.Jahr] - Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler der jeweiligen Talsperre
	Entnahme nach linearer Funktion	- Element für die Grundablässe an den Talsperren - Element für die Hochwasserentlastung an der Okertalsperre (Hebersystem)	- Beziehung vom Wasserstand in der Talsperre [m über NN] zu maximalen Abfluss an dem betrachteten Bauwerk [m³/s] (siehe Anhang 5) - Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler der jeweiligen Talsperre
	Wehr	- Element für die Hochwasser-entlastungsanlagen (Überlaufschwelle, Fischbauchklappe und Einlaufturm)	- Deklarierung der Parameter für die Poleni-Gleichung: o Wehrbreite [m] o Abflussbeiwert nach Poleni [-] o Überfallhöhe [m über NN] - für die Charakterisierung der Fischbauchklappe an der Granetalsperre: o Unterscheidung zwischen minimaler und maximaler Überfallhöhe [m über NN] o Angabe zum Zielwasserstand in der Talsperre [m über NN] - Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler der jeweiligen Talsperre
	Konstanter Zufluss	- Element der kontinuierlichen Beileitung des Dammgrabens	- Deklarierung des kontinuierlichen Zuflusses [m³/s] - Deklarierung des Start- und Enddatums der kontinuierlichen Beileitung [Tag.Monat.Jahr] - Verknüpfung mit dem Reservoir der Okertalsperre
	Abschlag in den Speicher	- Element für die Überleitung an den Fließgewässern Radau, Gose und Wintertalbach	- Verknüpfung mit dem Entnahmeverteiler der Granetalsperre oder Oker Überleitung - Deklarierung des Mindestzuflusses im Fließgewässer, ab dem die Überleitung einsetzt [m³/s] - Deklarierung des Zuflusses am Fließgewässer, an dem die maximale Ableitung erreicht wird [m³/s] - Deklarierung des Wasserstandes in der Zieltalsperre, ab dem nicht mehr übergeleitet werden soll [m über NN]

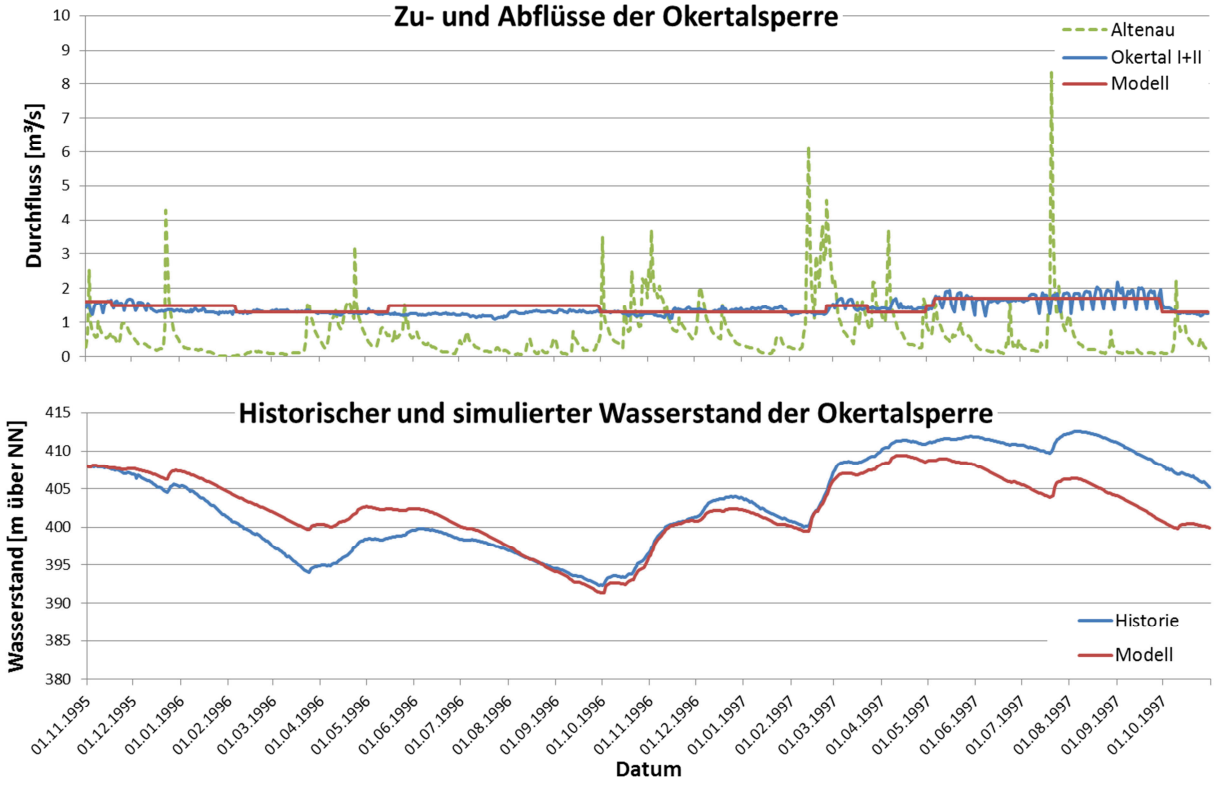
Symbol	Bezeichnung im Modell	Funktion innerhalb des Nordharzverbundsystems	Benötigte Informationen und Einstellungen für ein rechenfähiges Speicherverbundmodell
	Abflussaufteilung	- Darstellung der Überleitung an der Radau	- Dreimalige Implementierung dieses Elementes in das Modell für die drei Zeiträume: 01.Januar - 30.April, 01.Mai – 30.September, 1.Oktober – 31.Dezember - Deklarierung des Mindestzuflusses im Fließgewässer zum Einsetzen der Überleitung [m³/s] - Deklarierung des Zuflusses am Fließgewässer, an dem die maximale Ableitung erreicht wird [m³/s] - Definition des Restabflusses, welcher in den Unterlauf abfließt - Einstellung, dass die Überleitungen jedes Jahr innerhalb der Simulation aktiv ist
	Zusammenfluss	- Element für die Abflüsse unterhalb der Talsperren und der Radau-Überleitung	- Verknüpfungen mit allen Entnahme- oder Abflussaufteilungselementen, die den Abfluss unterhalb der Talsperren oder Überleitungen (Radau) definieren
	Überleitung	- Element für die Überleitungen Innerste-Grane und Oker-Grane	- Angabe bezüglich des Start- und Zielspeichers - Angaben zum Abschalten der Überleitung bei Erreichen eines Zielwasserstandes in der Granetalsperre [m über NN] - Maximalanzahl an Iterationen [-] Besonderheiten Überleitung Oker-Grane: - Verknüpfung mit allen Entnahmeelemente der Okertalsperre (Ausnahme: Verdunstung), der Überleitung der Radau, dem Zufluss der Romke und dem Entnahmeverteiler der Grane - Deklarierung des Lamellenplanes für die Abgabe der Talsperre in den Unterlauf - Deklarierung des maximalen Ableitungsabflusses [m³/s] Besonderheiten Überleitung Innerste-Grane: - Verknüpfung mit den Entnahmeverteilern der Innerste und Grane - Deklarierung des Wasserstandes in der Innerste, ab dem abgeleitet werden darf - Ausweisung der Überleitungsmenge in Abhängigkeit vom Wochentag [m³/s]

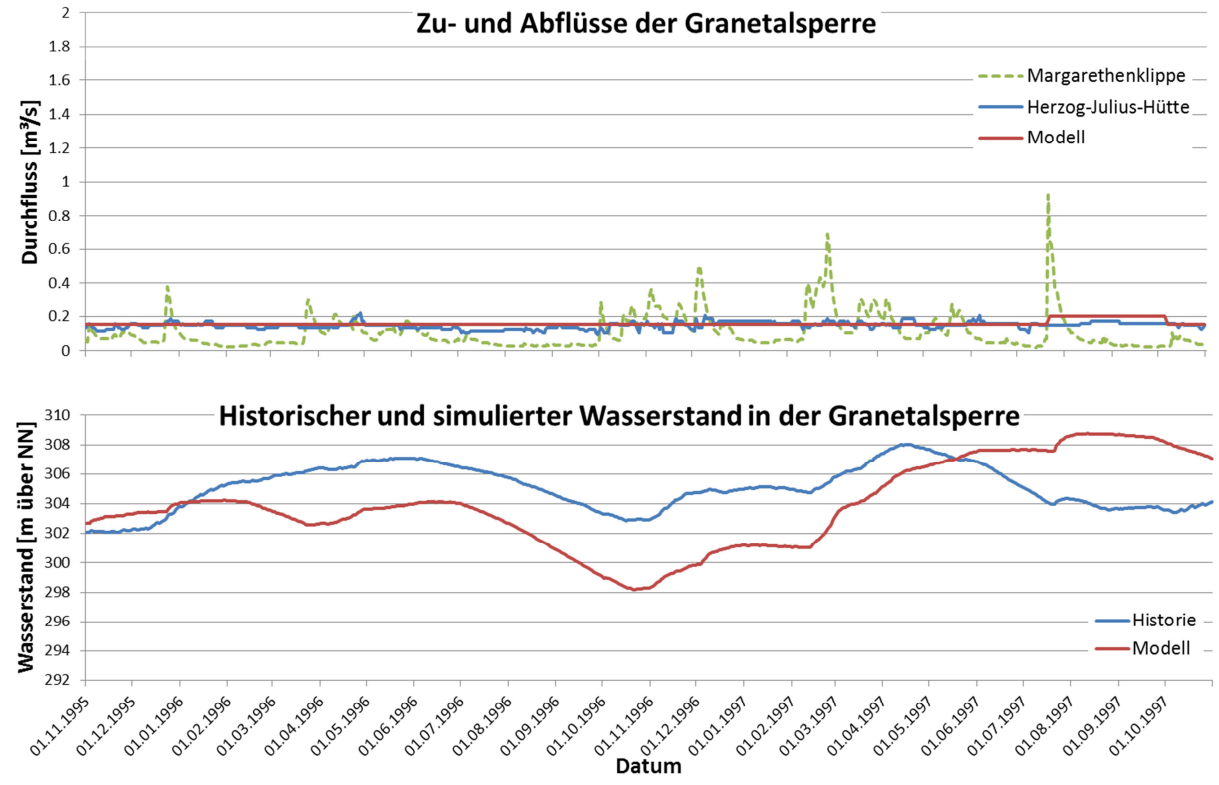
Symbol	Bezeichnung im Modell	Funktion innerhalb des Nordharzverbundsystems	Benötigte Informationen und Einstellungen für ein rechenfähiges Speicherverbundmodell
	Controller der Überleitung	- Steuerungselement, welche die Überleitung Oker-Grane vor der Innerste-Grane priorisiert	- Verknüpfung mit der Überleitung Oker-Grane und Innerste-Grane - Deklarierung der primären Überleitung: Oker-Grane und sekundären Überleitung: Innerste-Grane
	Export	- Ausschreiben der gewünschten Kenngrößen in einer .csv-Datei für jeden Zeitschritt der Simulation	- Verknüpfung mit allen Elementen, welche die gewünschten Größen enthalten - Deklarierung des Zielverzeichnis und Namen der Ausgabedatei

Anhang 9: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den ersten Kalibrierungszeitraum vom 01.November 1984 bis 31.Oktober 1988. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot).

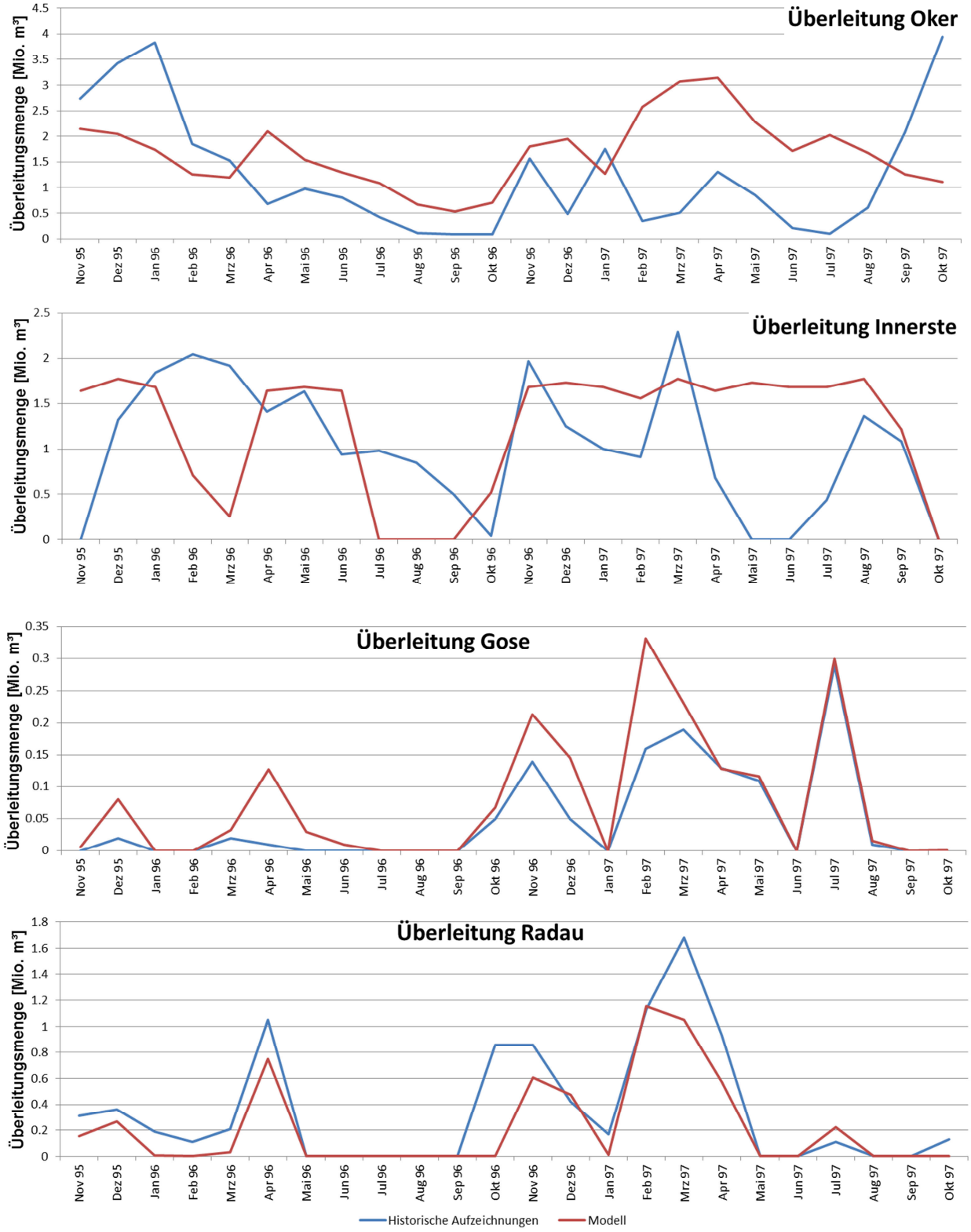


Anhang 10: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den zweiten Kalibrierungszeitraum vom 01.November 1995 bis 31.Oktober 1997. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot).

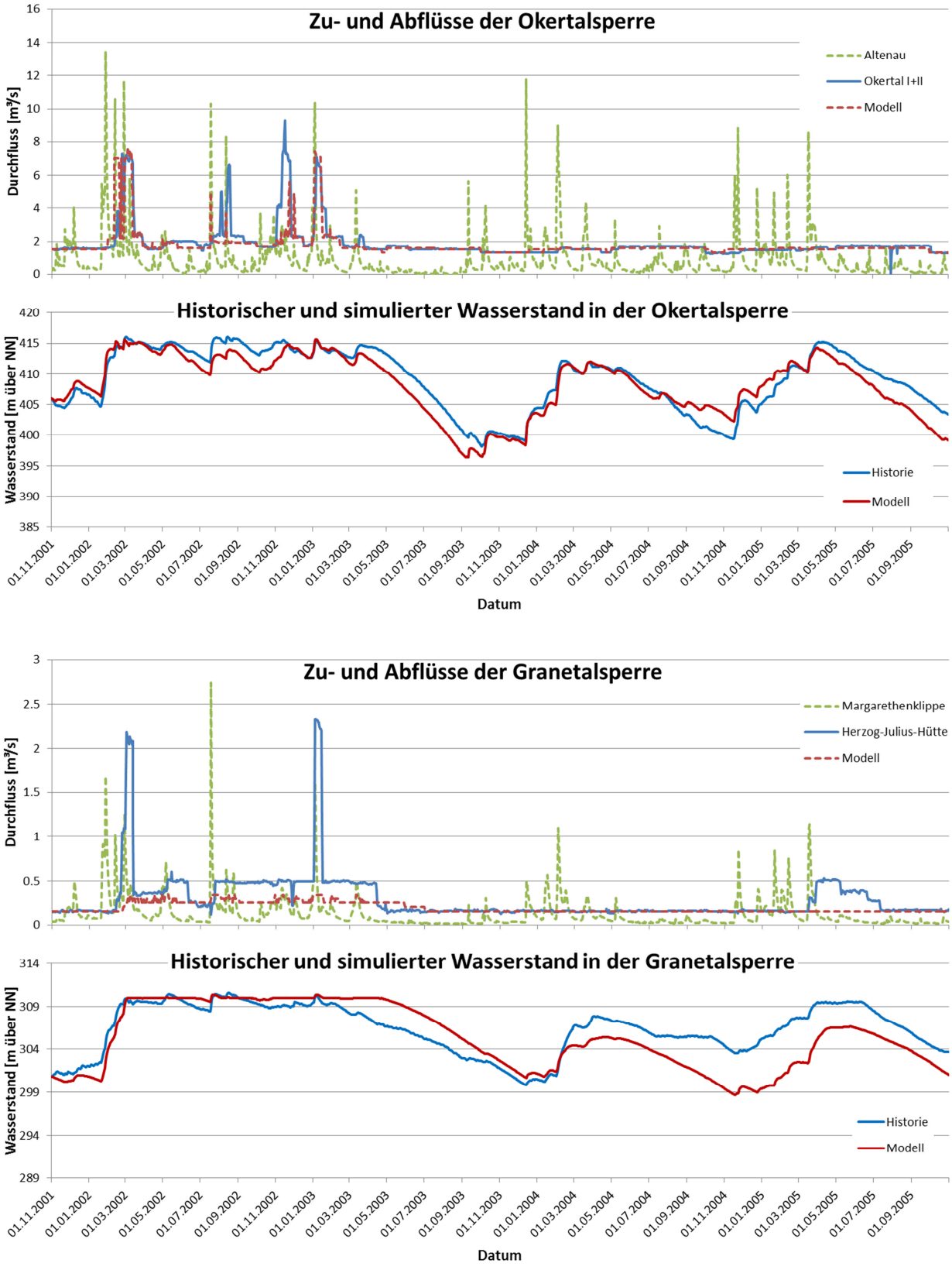




Anhang 11: Gegenüberstellung der monatlichen Überleitungsmengen der Oker, der Innerste, der Gose und der Radau für den zweiten Kalibrierungszeitraum vom 1.November 1995 bis zum 3.Oktober 1997. Die historischen Aufzeichnungen sind blau dargestellt und die modelliert rot.



Anhang 12: Die Wasserstände, Zu- und Abflüsse der Oker- und Granetalsperre für den Validierungszeitraum vom 01.November 2001 bis 31.Oktober 2005. Vergleich der historischen Aufzeichnungen (blau) mit den berechneten Modellergebnissen (rot).



Anhang 13: Statistische Auswertung des Speicherverbundmodells mit der realen verlängerten Vergangenheit ohne Klimaänderung. Die Erstellung dieser Auswertung wurde mit der Software MATLAB durchgeführt.

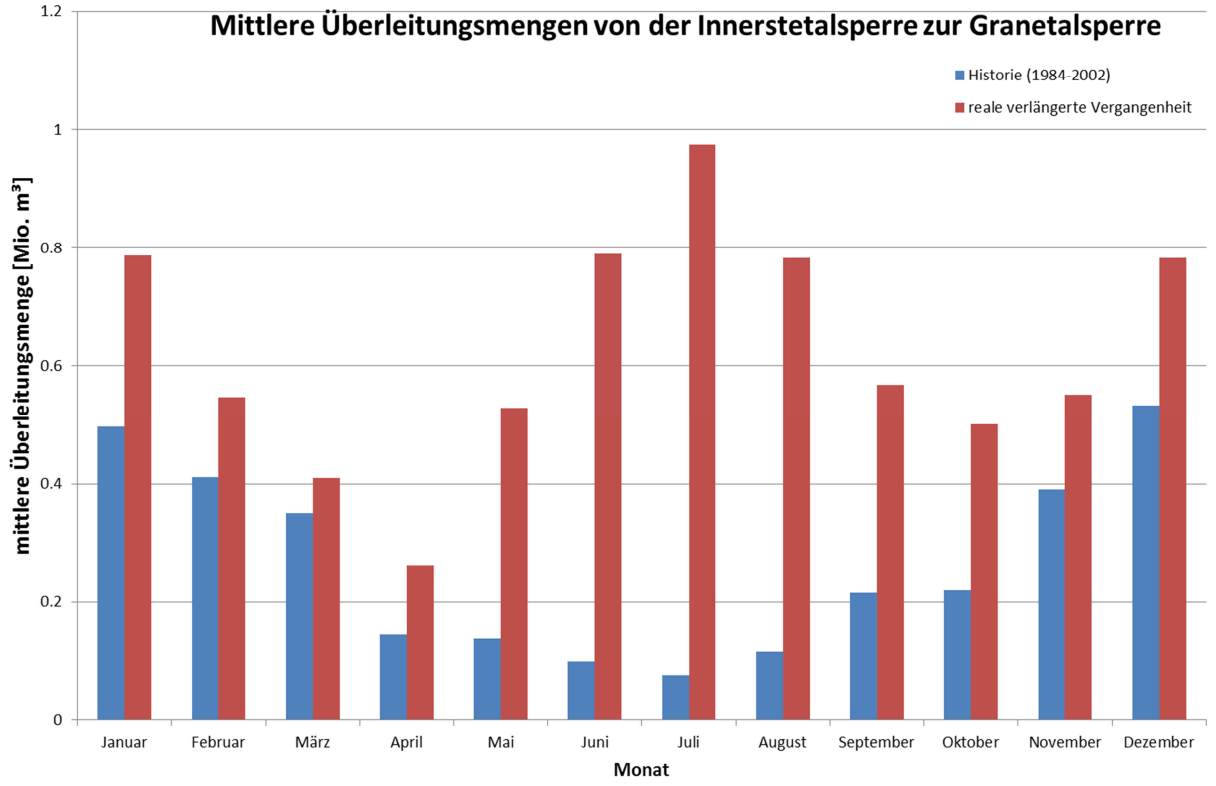
Granetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 309.19 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 42.62 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 0.45 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 0.23 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 0.64 MWh
Kontinuierliche Entnahme durch die Trinkwasserpumpstation: 1,20 m³/s
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 465 Tage über den Simulationszeitraum (465 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 0 Tage über den Simulationszeitraum (0 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 21.41 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 3
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 2
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 1

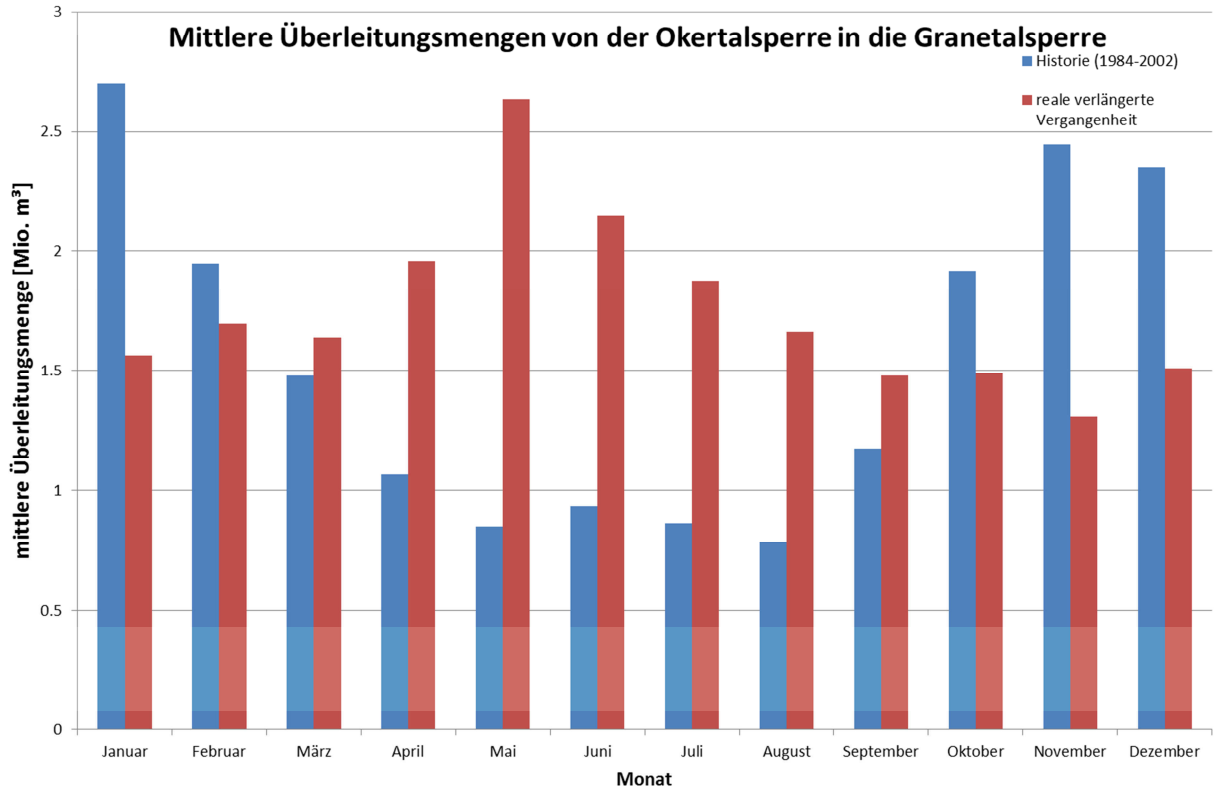
Okertalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 408.50 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 31.88 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.68 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 2.02 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 13.66 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 13717 Tage über den Simulationszeitraum (6533 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 4154 Tage über den Simulationszeitraum (2963 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 83.18 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Einsatz der Oker-Grane Überleitung: 3.30e+06 Tage über den Simulationszeitraum
mittlere Abgabe der Okertalsperre zur Granetalsperre: 0.74 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Okertalsperre über ein Jahr: 20.96 Mio. m³
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 9456
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 9984
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 9760

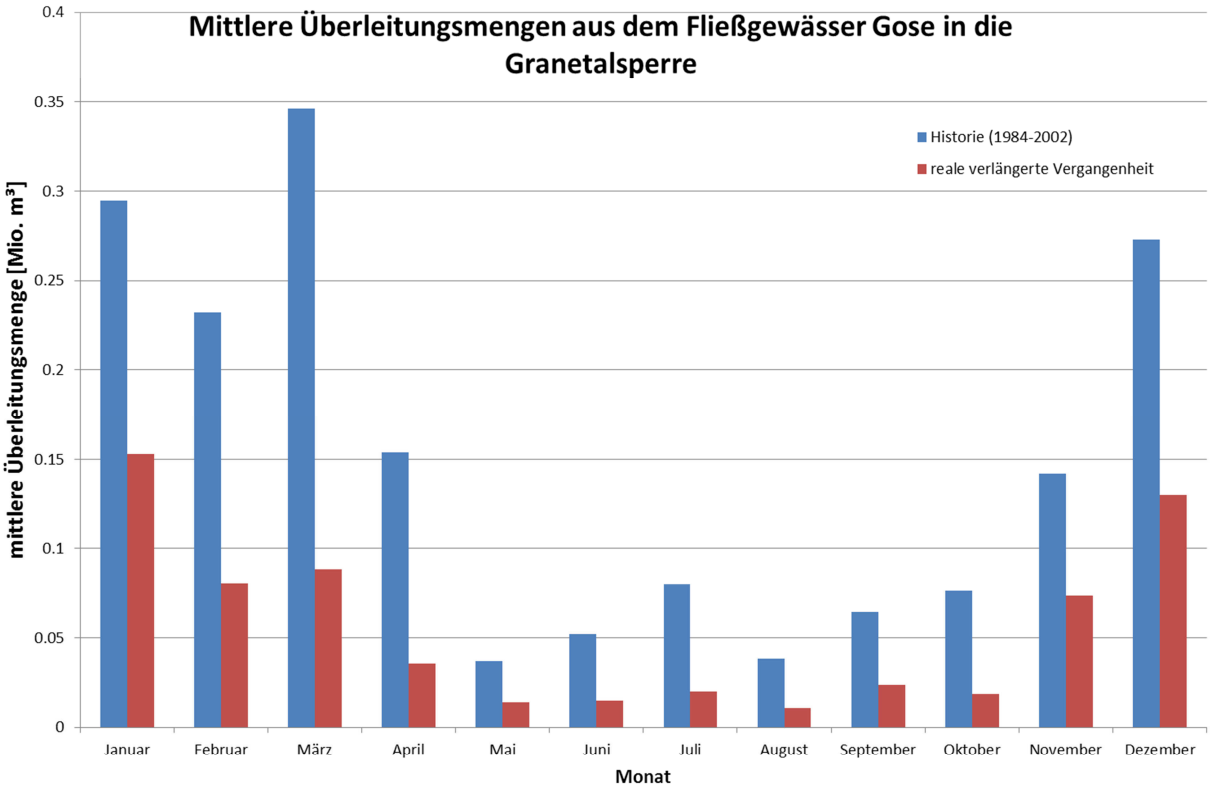
Innerstetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 256.19 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 13.54 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.11 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.85 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 5.45 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 16215 Tage über den Simulationszeitraum (8853 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 3357 Tage über den Simulationszeitraum (2554 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 51.19 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 3507 Tage
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.77e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 10 l/s)
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.73e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 20 l/s)
mittlere Abgabe der Innerstetalsperre zur Granetalsperre: 0.24 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Innerstetalsperre über ein Jahr: 7.49 Mio. m³

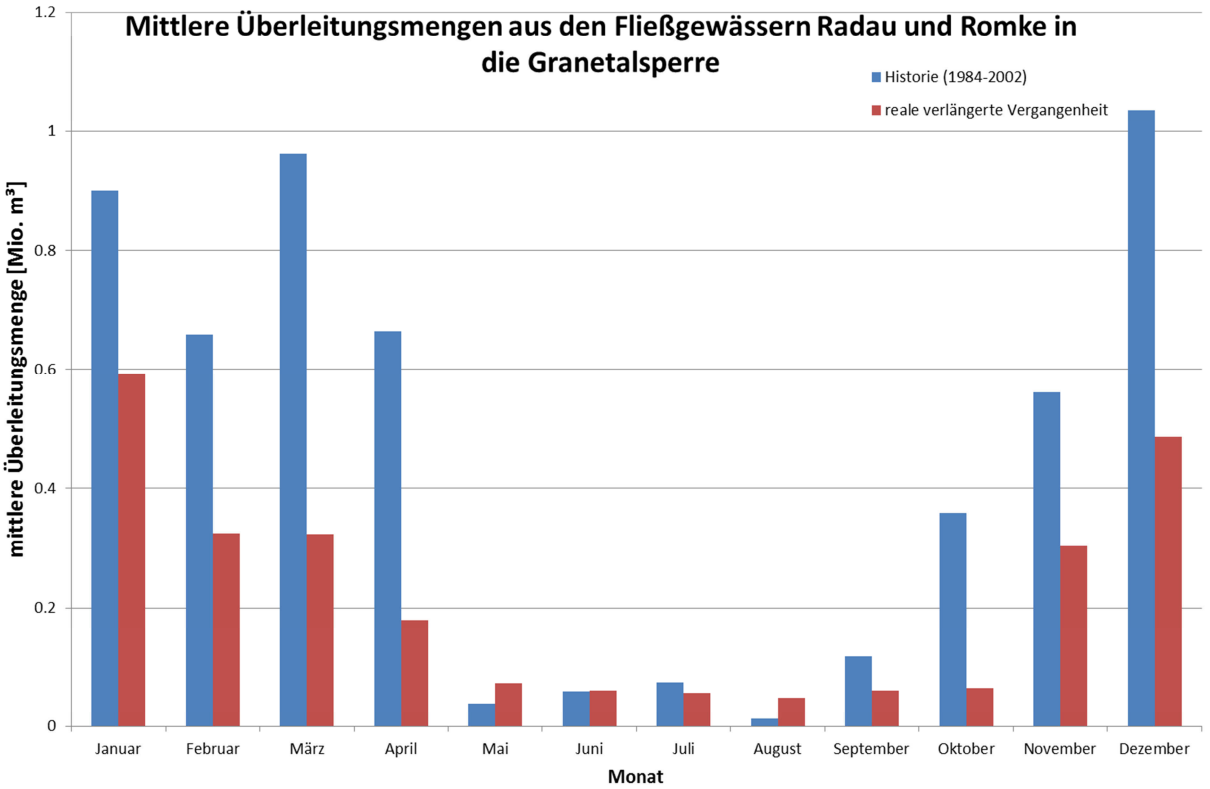
Überleitungen (Zeitraum: 1 Jahr)
mittleres Überleitungsvolumen der Gose: 0.66 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen des Wintertalbach: 0.50 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Radau: 1.45 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Romke: 1.08 Mio. m³

Anhang 14: Darstellung der mittleren Überleitungsmengen den Ableitungen Innerste, Radau, Romke und Gose auf Monatsbasis für die betrachtete Historie und die künstlich verlängerte Vergangenheit.

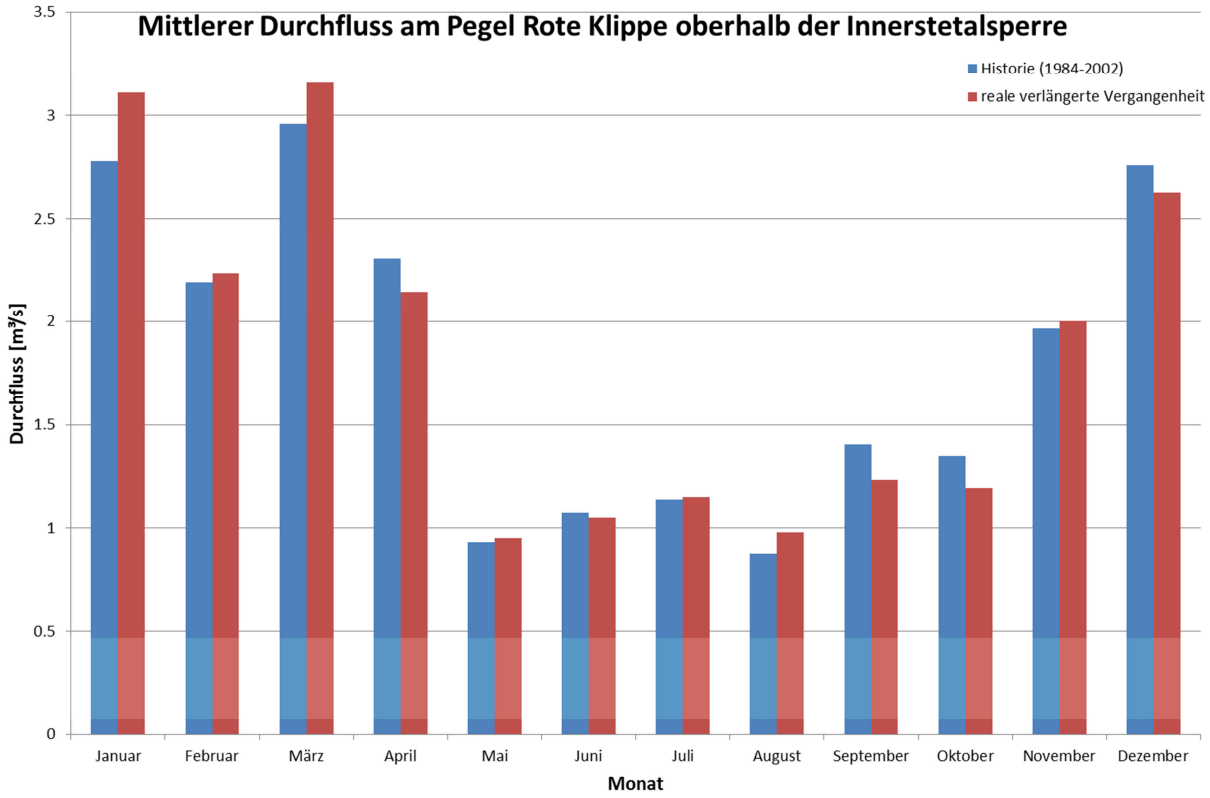


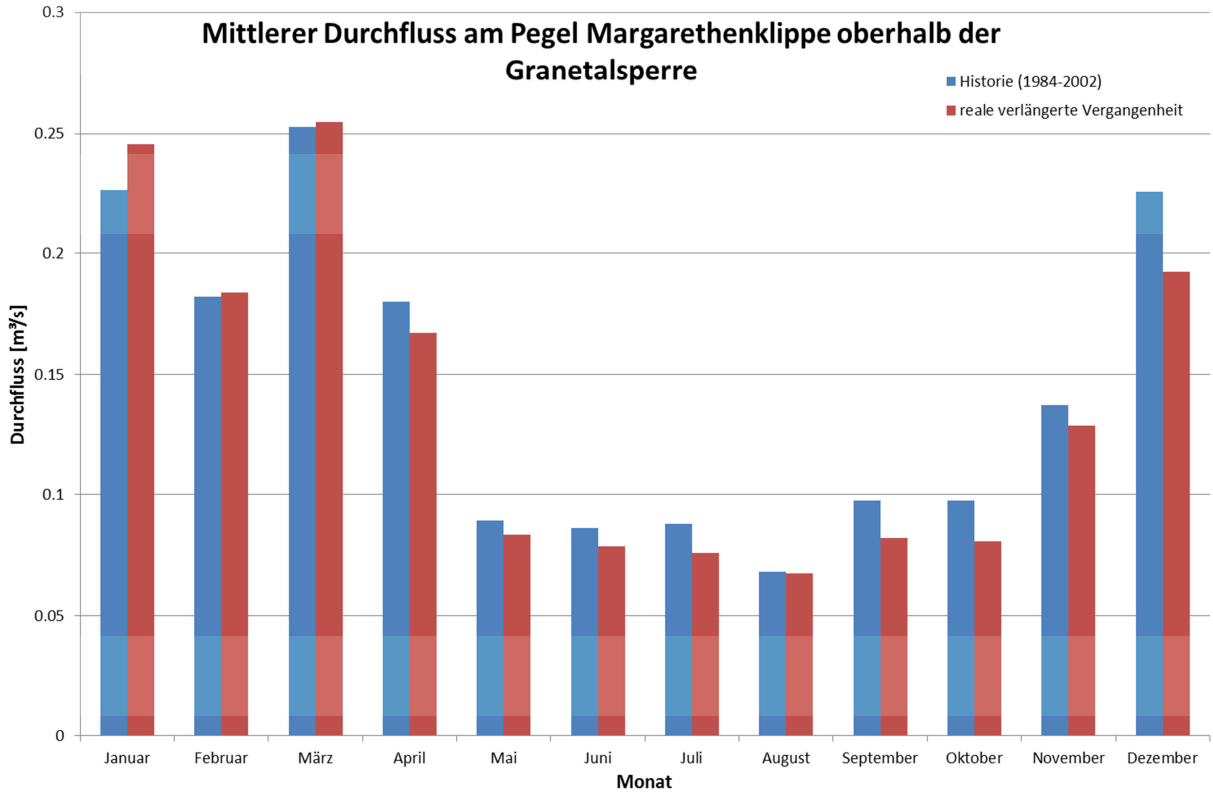


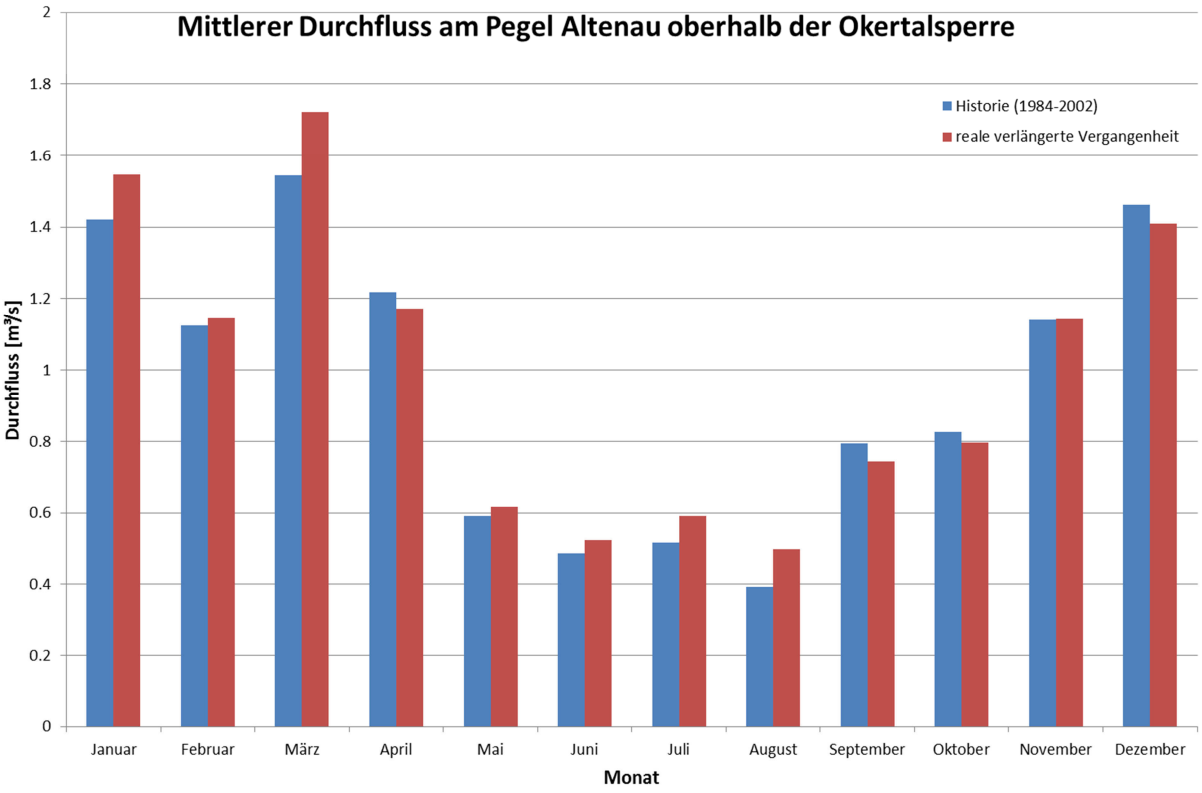

Mittlere Überleitungsmengen aus dem Fließgewässer Gose in die Granetalsperre
Historie (1984-2002)
reale verlängerte Vergangenheit
mittlere Überleitungsmenge [Mio. m³]
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Monat


Mittlere Überleitungsmengen aus den Fließgewässern Radau und Romke in die Granetalsperre
Historie (1984-2002)
reale verlängerte Vergangenheit
mittlere Überleitungsmenge [Mio. m³]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Monat

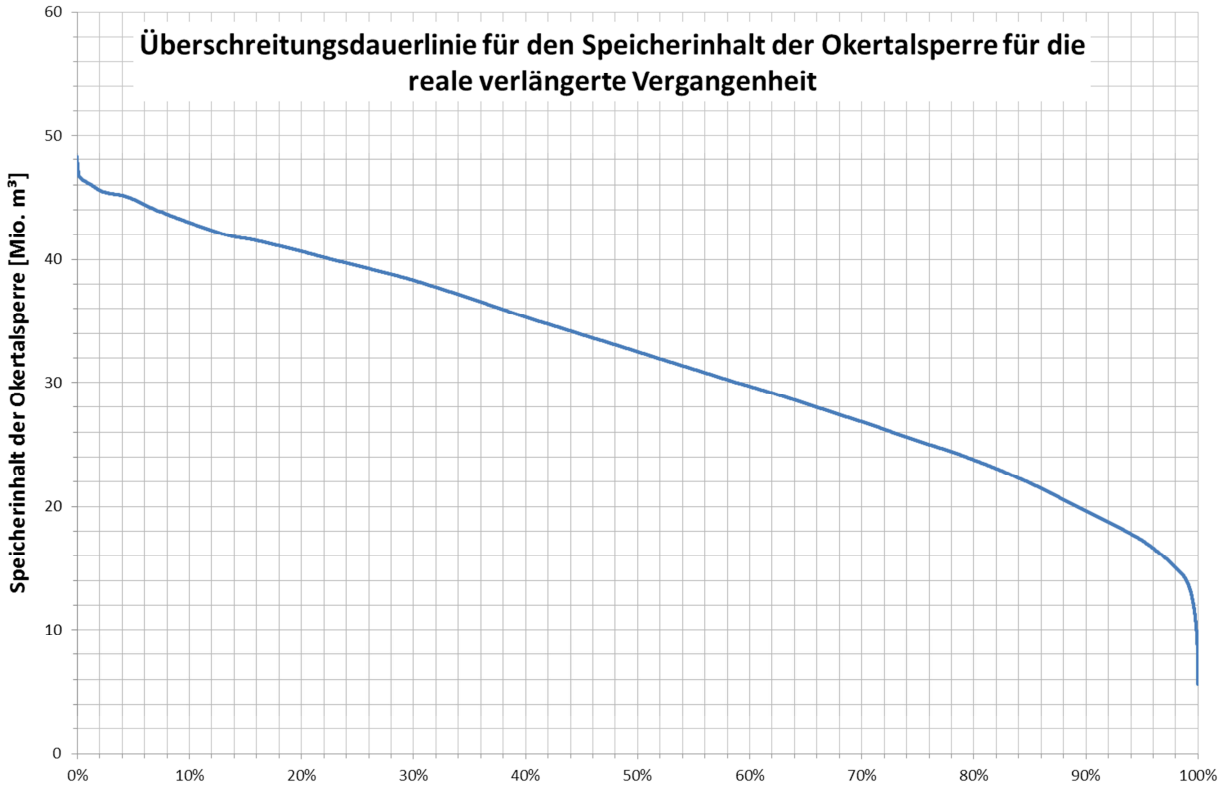
Anhang 15: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Monatszuflüsse an den Pegel oberhalb der drei Talsperren des Nordharzverbundsystems.

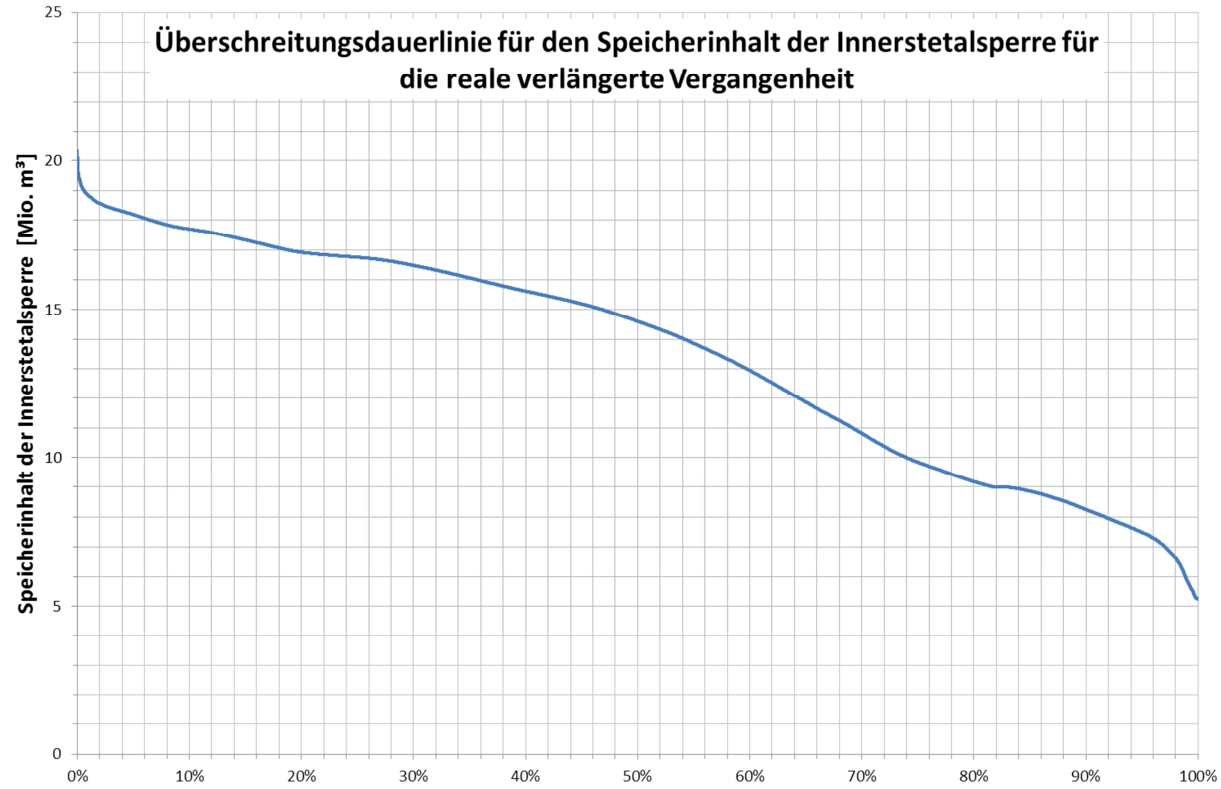




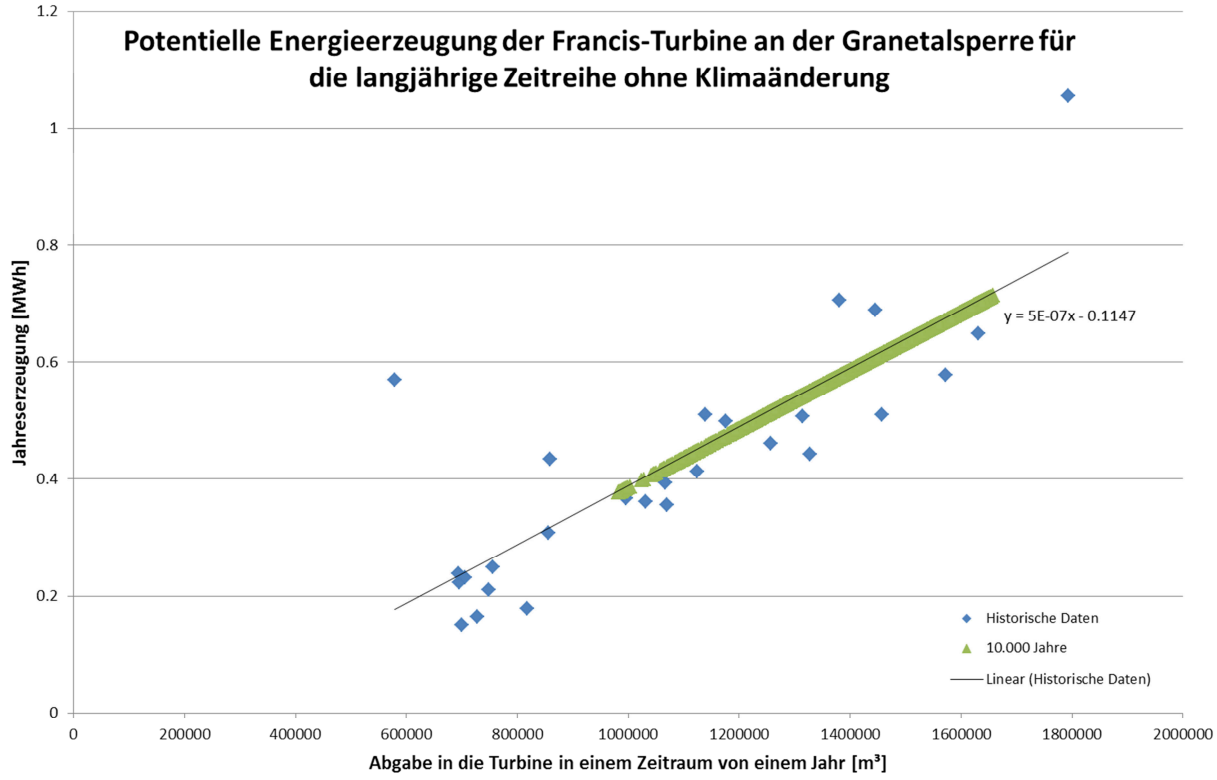

Mittlerer Durchfluss am Pegel Altenau oberhalb der Okertalsperre
Historie (1984-2002)
reale verlängerte Vergangenheit
Durchfluss [m³/s]
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Monat

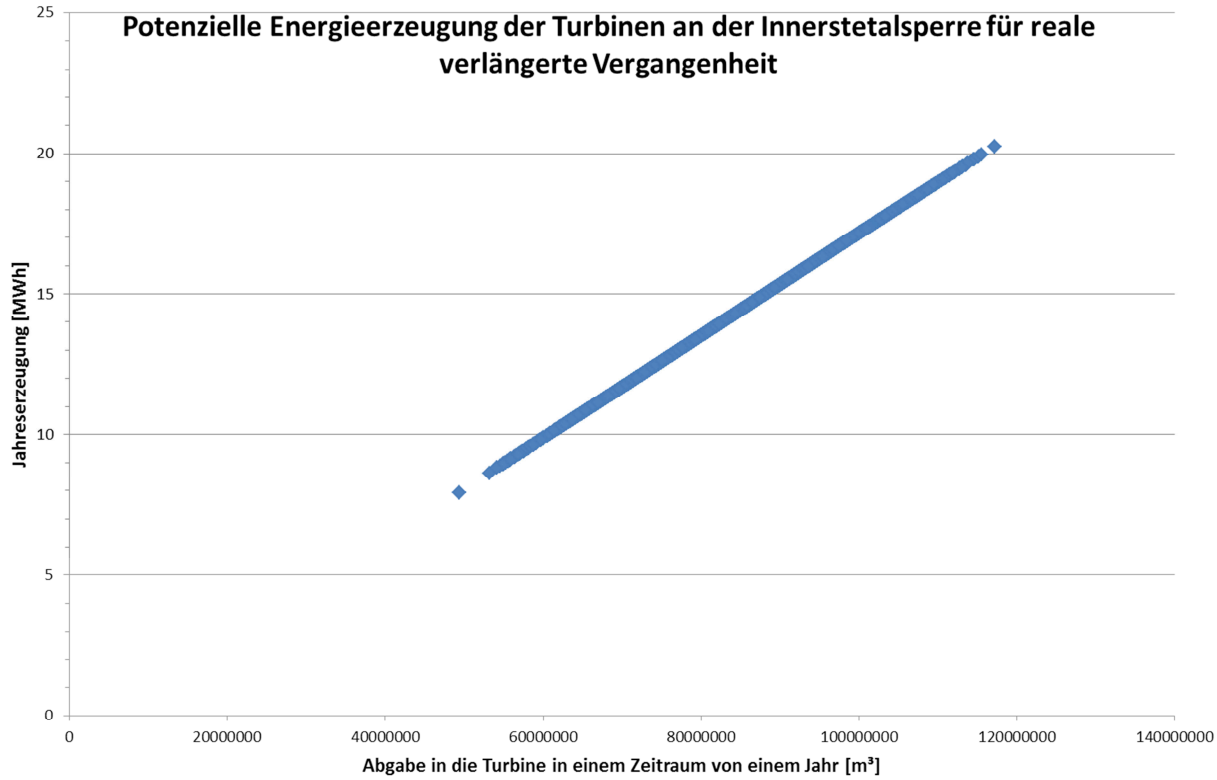
Anhang 16: Überschreitungsdauerlinien der Speicherinhalte für die Oker- und Innerstetalsperre für die langjährige Zeitreihe ohne Klimaänderung.





Anhang 17: Darstellung der jährlichen potenziellen Energieerzeugung der Francis-Turbine unterhalb des Grundablasses der Granetalsperre für die langjährige Zeitreihe ohne Klimaänderung.





Anhang 18.1: Statistische Auswertung der künstlichen Vergangenheit der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB.

Granetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 309.44 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 43.14 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 0.45 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 0.24 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 0.66 MWh
Kontinuierliche Entnahme durch die Trinkwasserpumpstation: 1,20 m³/s
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 126 Tage über den Simulationszeitraum (126 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1 Tage über den Simulationszeitraum (1 Ereignisse).
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 22.15 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 5 Tage
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 55
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 30
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 20

Okertalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 409.19 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 32.90 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.66 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.97 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 13.69 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 10331 Tage über den Simulationszeitraum (4902 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 2253 Tage über den Simulationszeitraum (1645 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 127.32 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 44 Tage
Einsatz der Oker-Grane Überleitung: 3.29e+06 Tage über den Simulationszeitraum
mittlere Abgabe der Okertalsperre zur Granetalsperre: 0.76 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Okertalsperre über ein Jahr: 21.89 Mio. m³
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 9400
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 9901
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 9579

Innerstetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 256.63 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 14.00 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.09 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.84 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 5.65 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 9292 Tage über den Simulationszeitraum (5840 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1960 Tage über den Simulationszeitraum (1449 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 64.12 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 988 Tage
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.83e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 10 l/s)
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.79e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 20 l/s)
mittlere Abgabe der Innerstetalsperre zur Granetalsperre: 0.23 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Innerstetalsperre über ein Jahr: 7.28 Mio. m³

Überleitungen (Zeitraum: 1 Jahr)
mittleres Überleitungsvolumen der Gose: 0.57 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen des Wintertalbach: 0.44 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Radau (korrigiert): 1.14 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Romke: 1.06 Mio. m³

Anhang 18.2: Statistische Auswertung der nahen Zukunft der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB.

Granetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 309.36 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 42.95 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 0.42 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 0.23 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 0.65 MWh
Kontinuierliche Entnahme durch die Trinkwasserpumpstation: 1,20 m³/s
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 42 Tage über den Simulationszeitraum (42 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 0 Tage über den Simulationszeitraum (0 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 14.01 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 14
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 4
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 3

Okertalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 408.20 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 31.19 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.49 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.83 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 12.90 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 4377 Tage über den Simulationszeitraum (2206 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1358 Tage über den Simulationszeitraum (1006 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 124.75 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 5 Tage
Einsatz der Oker-Grane Überleitung: 3.36e+06 Tage über den Simulationszeitraum
mittlere Abgabe der Okertalsperre zur Granetalsperre: 0.74 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Okertalsperre über ein Jahr: 20.99 Mio. m³
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 9816
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 9998
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 9765

Innerstetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 256.08 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 13.37 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 1.95 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.66 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 5.23 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 6922 Tage über den Simulationszeitraum (4319 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1431 Tage über den Simulationszeitraum (1177 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 58.91 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 1094 Tage
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 2.00e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 10 l/s)
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.96e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 20 l/s)
mittlere Abgabe der Innerstetalsperre zur Granetalsperre: 0.27 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Innerstetalsperre über ein Jahr: 8.54 Mio. m³

Überleitungen (Zeitraum: 1 Jahr)
mittleres Überleitungsvolumen der Gose: 0.62 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen des Wintertalbach: 0.48 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Radau: 1.36 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Romke: 1.08 Mio. m³

Anhang 18.3: Statistische Auswertung der fernen Zukunft der WETTREG-Realisation 18. Auswertung erfolgte mit MATLAB.

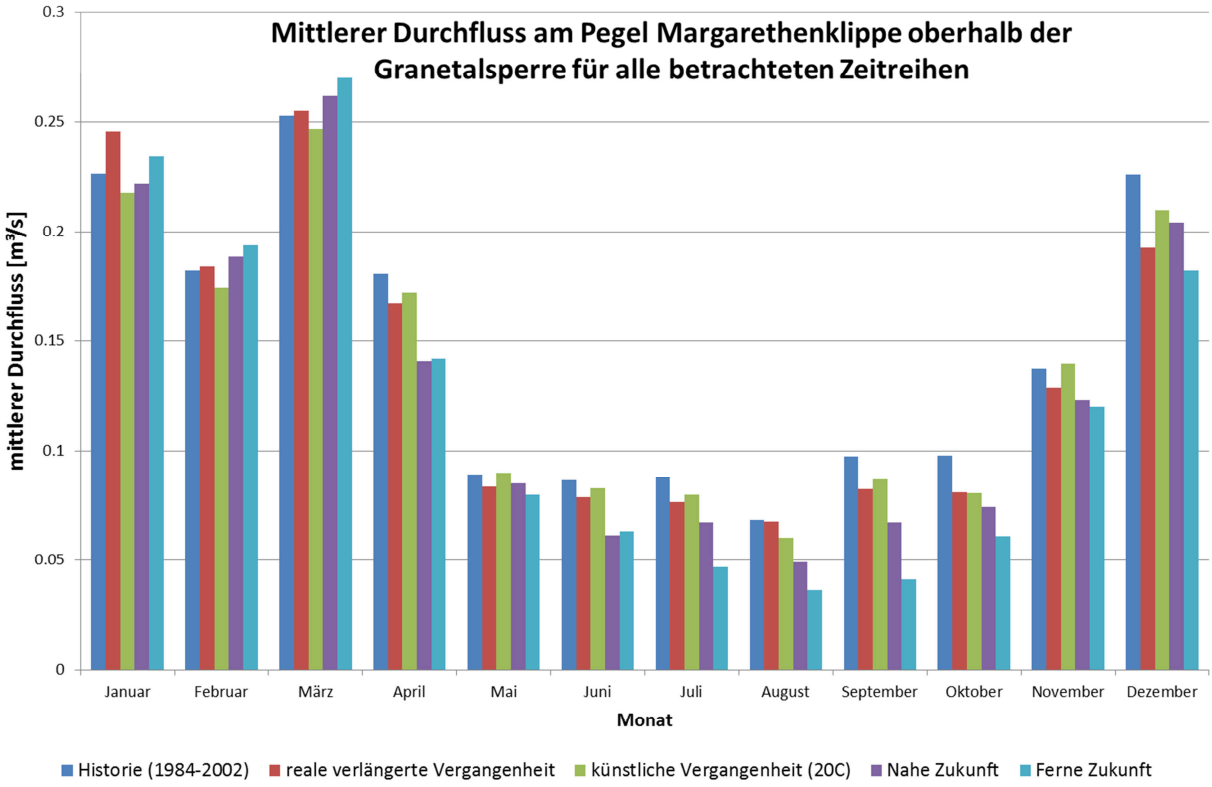
Granetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 308.68 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 41.65 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 0.40 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 0.22 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 0.60 MWh
Kontinuierliche Entnahme durch die Trinkwasserpumpstation: 1,20 m³/s
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 26 Tage über den Simulationszeitraum (26 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 0 Tage über den Simulationszeitraum (0 Ereignisse).
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 15.42 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 0 Tage
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 79
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 42
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 30

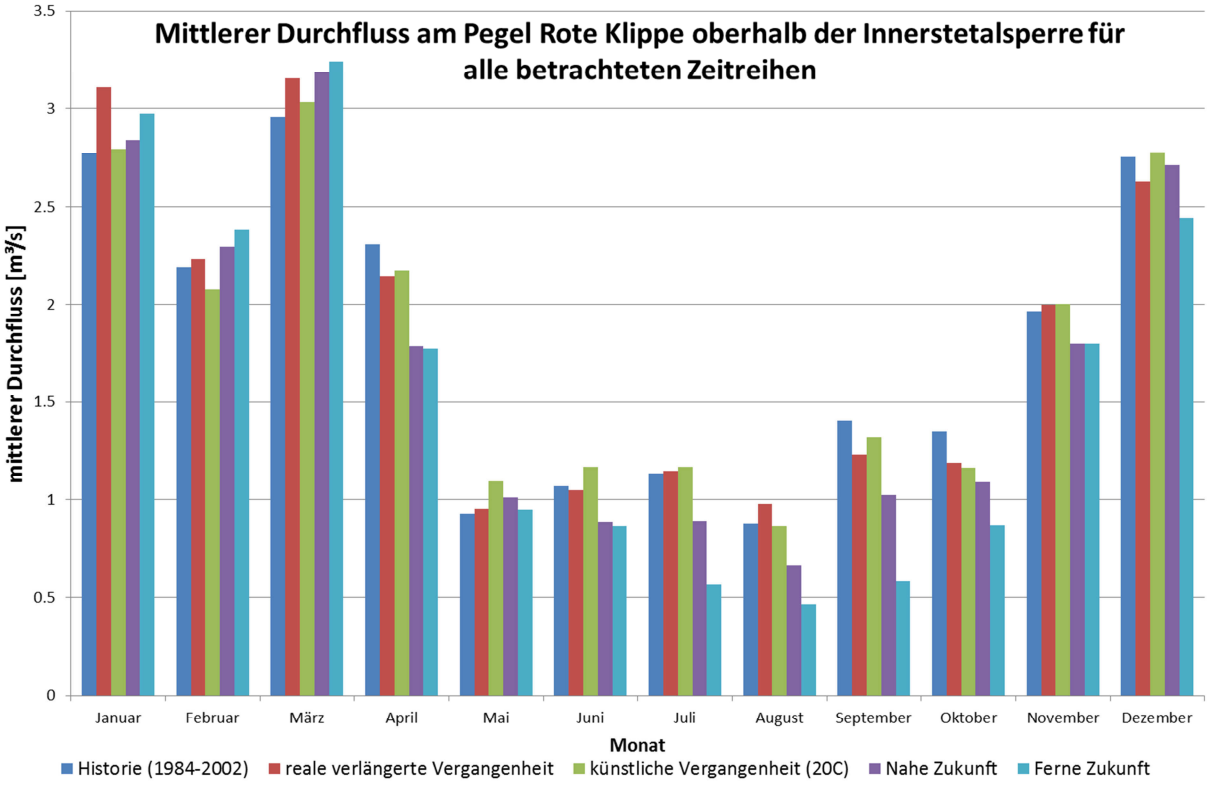
Okertalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 407.00 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 29.42 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 2.43 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.78 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 12.51 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 4911 Tage über den Simulationszeitraum (2444 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1174 Tage über den Simulationszeitraum (899 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 124.79 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 4 Tage
Einsatz der Oker-Grane Überleitung: 3.43e+06 Tage über den Simulationszeitraum
mittlere Abgabe der Okertalsperre zur Granetalsperre: 0.73 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Okertalsperre über ein Jahr: 20.17 Mio. m³
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Mai): 9806
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (15. Mai): 9970
Unterschreitung Mindeststau zu Beginn der Sommerstagnation (1. Juni): 9709

Innerstetalsperre
Mittlerer Wasserstand in der Talsperre: 255.35 Meter über NN
Mittlerer Speicherfüllstand in der Talsperre: 12.63 Mio. m³
Mittlerer Zufluss in die Talsperre: 1.83 m³/s
Mittlere Abgabe in den Unterlauf: 1.53 m³/s
Mittlere potentielle Energieerzeugung über ein Jahr: 4.85 MWh
Einsetzen der Hochwasserentlastung: 5607 Tage über den Simulationszeitraum (3421 Ereignisse)
HWE mit voller Auslastung des Grundablasses: 1394 Tage über den Simulationszeitraum (1092 Ereignisse)
Größter auftretender Abfluss im Unterlauf: 63.90 m³/s
Rückgang des Speicherinhaltes auf eisernen Bestand: 5267 Tage
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.90e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 10 l/s)
Einsatz der Innersten-Grane Überleitung: 1.88e+06 Tage über den Simulationszeitraum (Schwellwert: 20 l/s)
mittlere Abgabe der Innerstetalsperre zur Granetalsperre: 0.27 m³/s
mittleres Überleitungsvolumen der Innerstetalsperre über ein Jahr: 8.63 Mio. m³

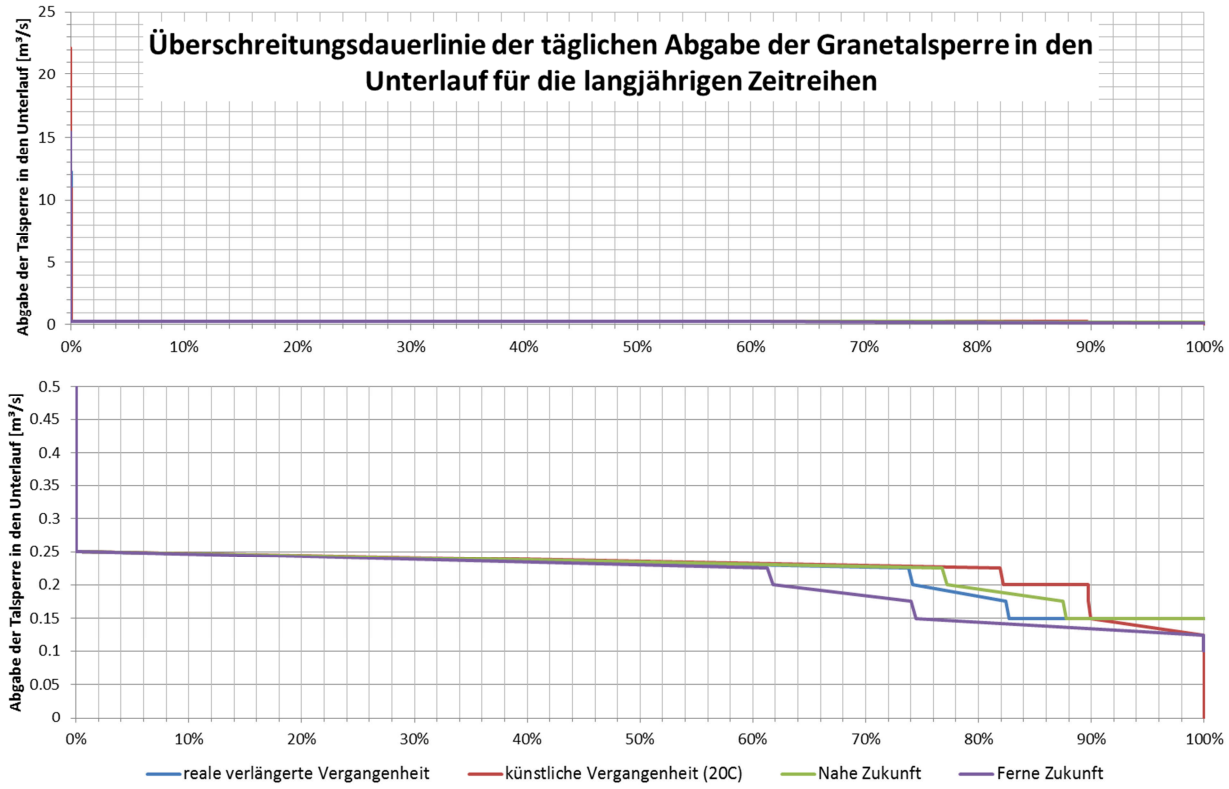
Überleitungen (Zeitraum: 1 Jahr)
mittleres Überleitungsvolumen der Gose: 0.79 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen des Wintertalbach: 0.58 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Radau: 1.92 Mio. m³
mittleres Überleitungsvolumen der Romke: 1.14 Mio. m³

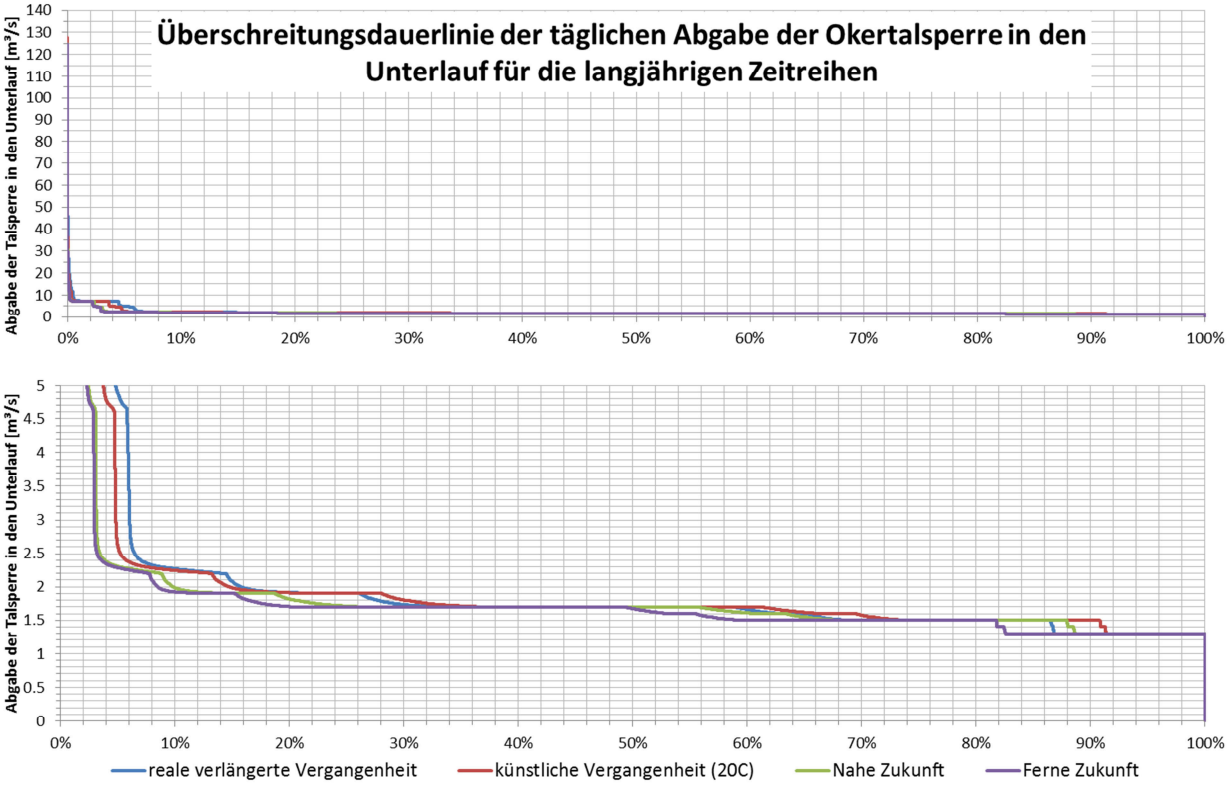
Anhang 19: Veranschaulichung der monatlichen mittleren Zuflüsse oberhalb der Talsperren Grane und Innerste für alle betrachteten Zeitreihen.



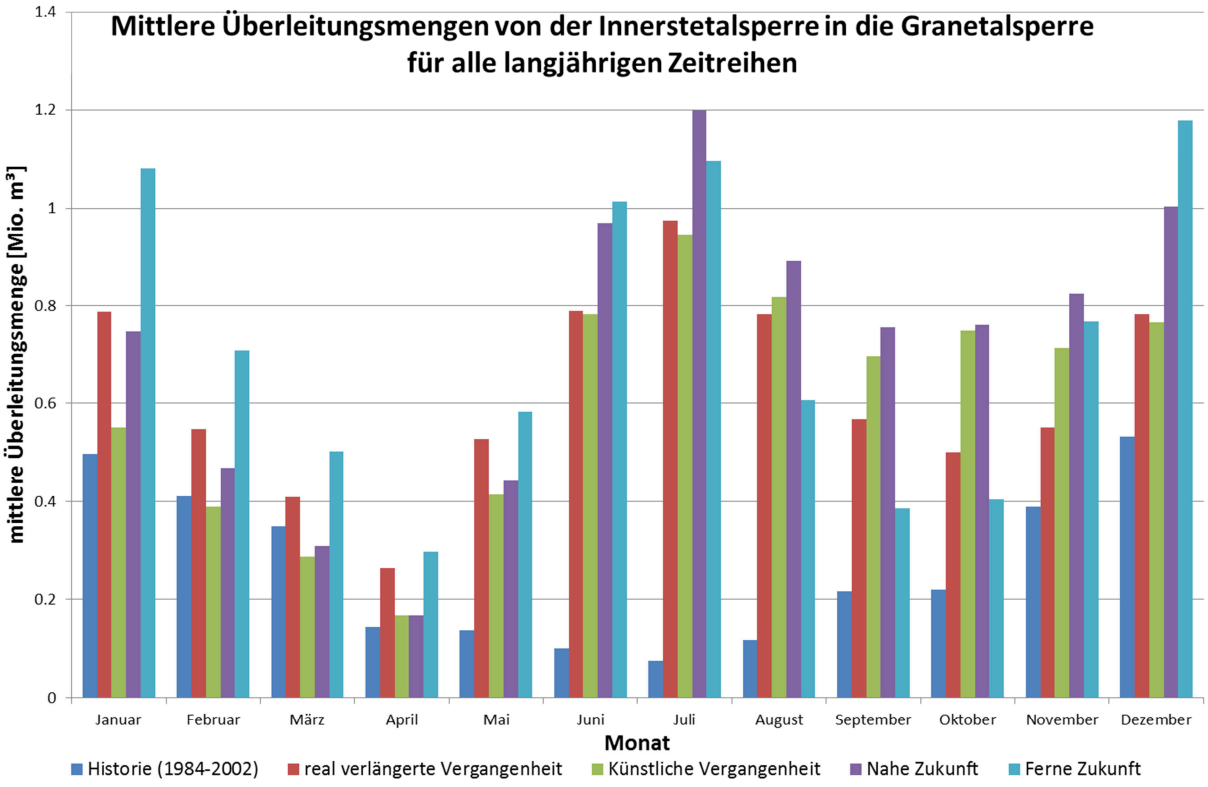


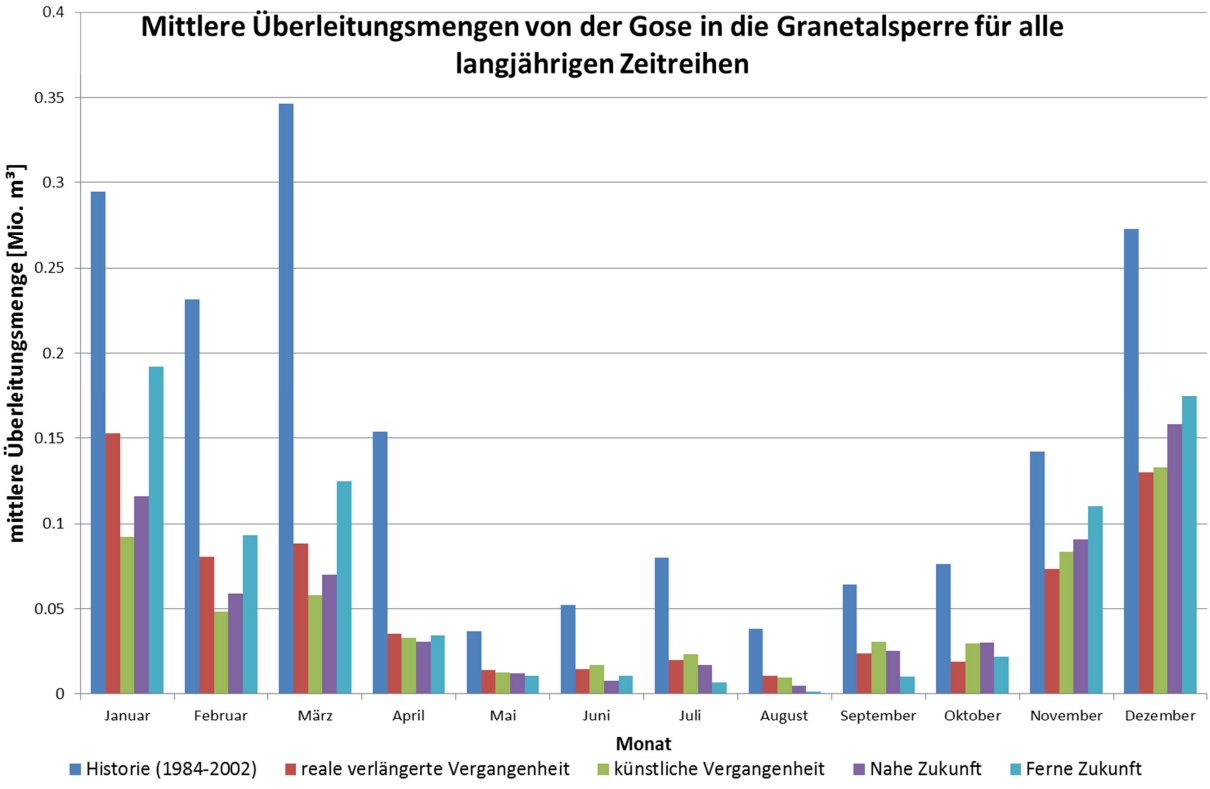
Anhang 20: Darstellung der Überschreitungsdauerlinien hinsichtlich der Abgabe in den Unterlauf von der Oker- und Granetalsperre für alle langjährigen Zeitreihen.

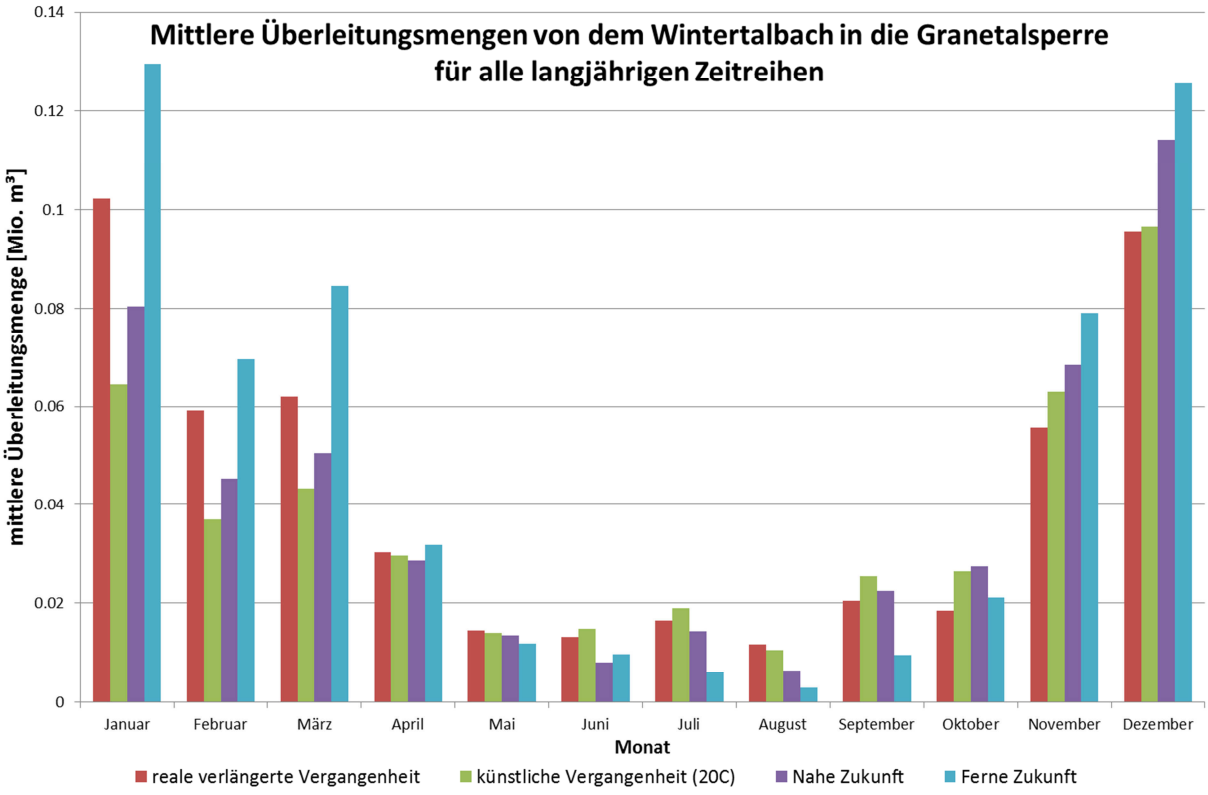


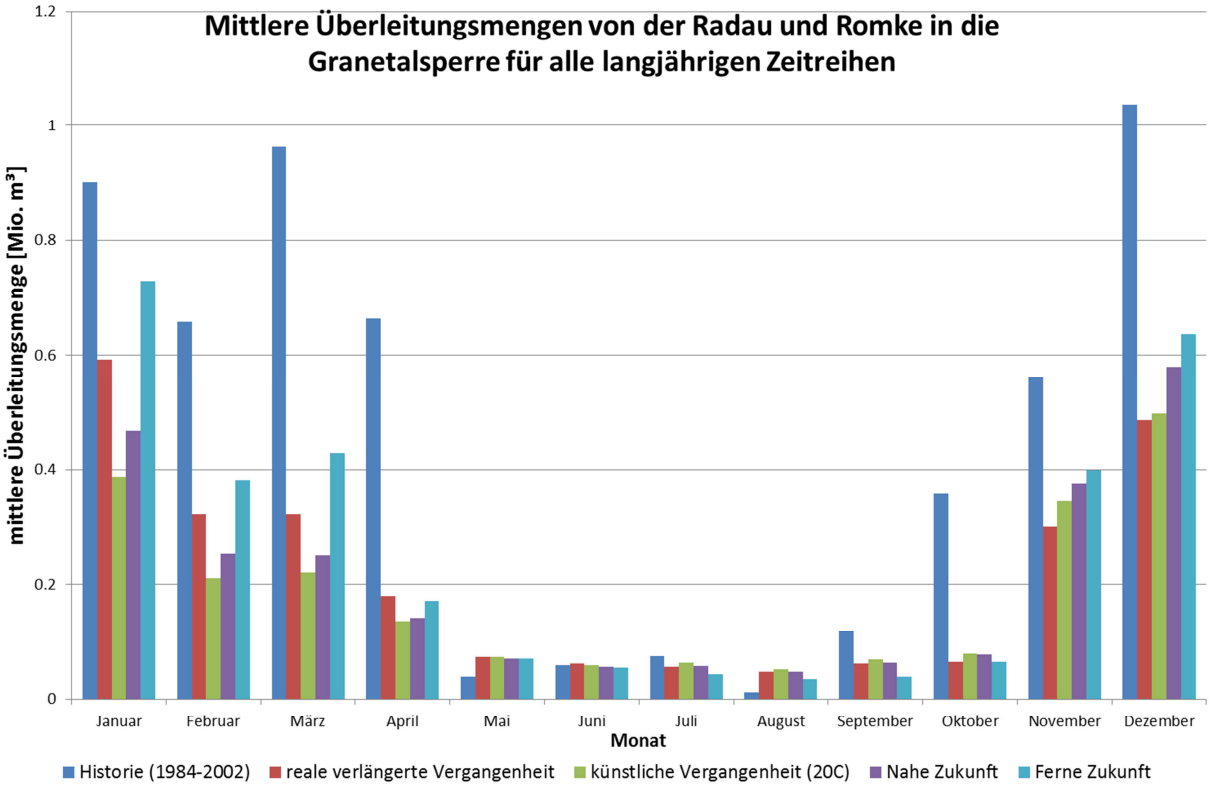


Anhang 21: Darstellungen der mittleren Überleitungsmengen für die Überleitungen Innerste, Gose, Wintertalbach, Romke und Radau für alle langjährigen Simulationen.

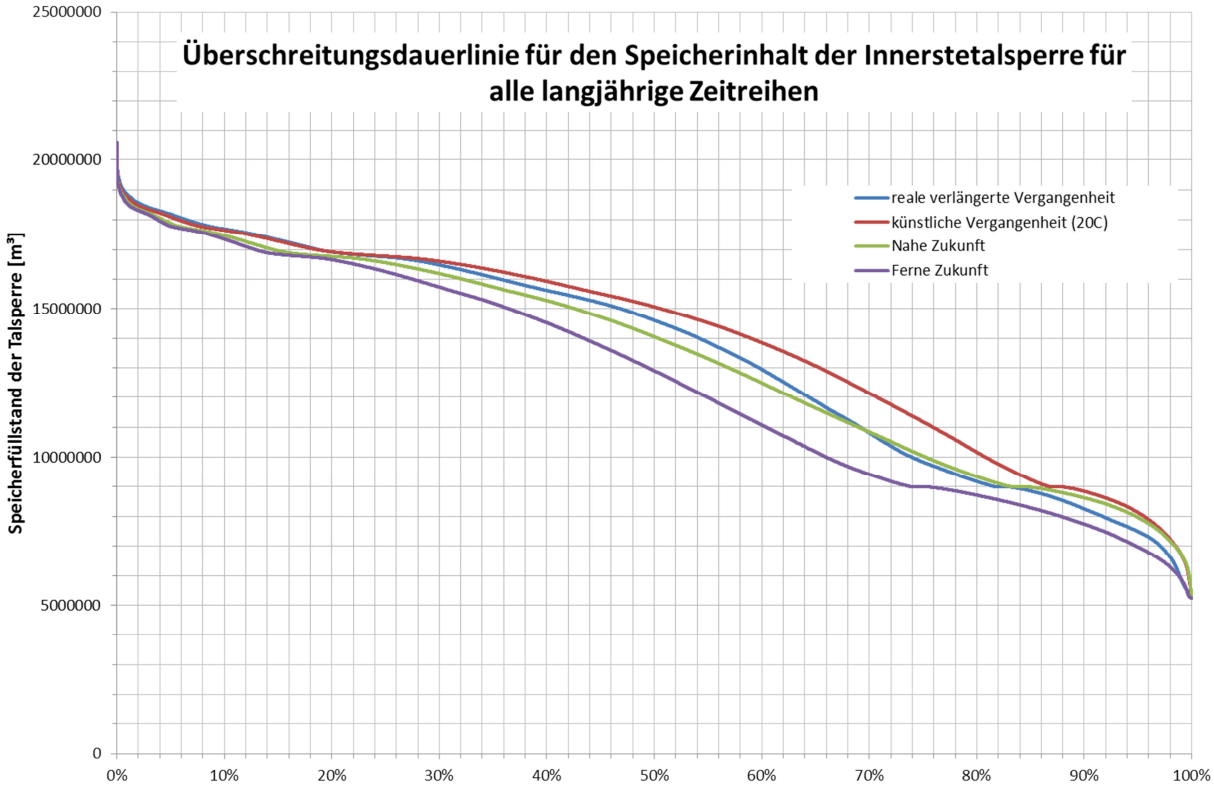


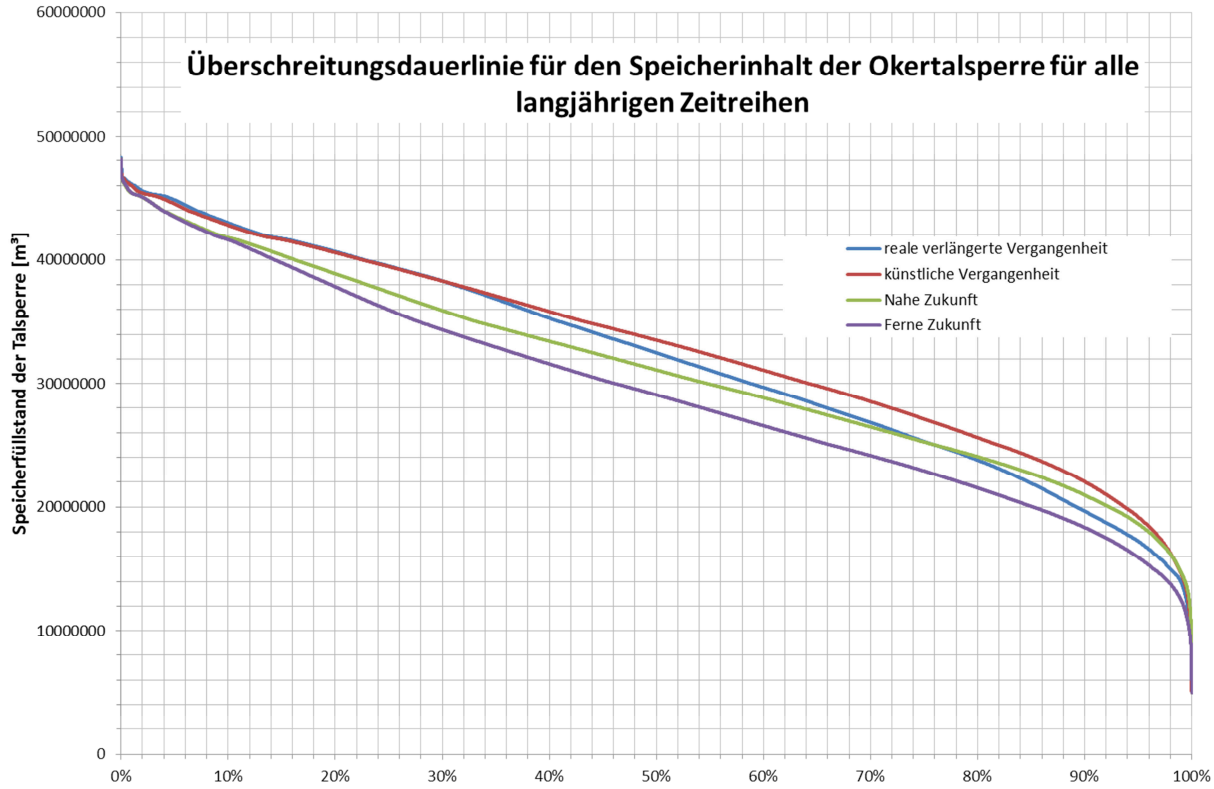
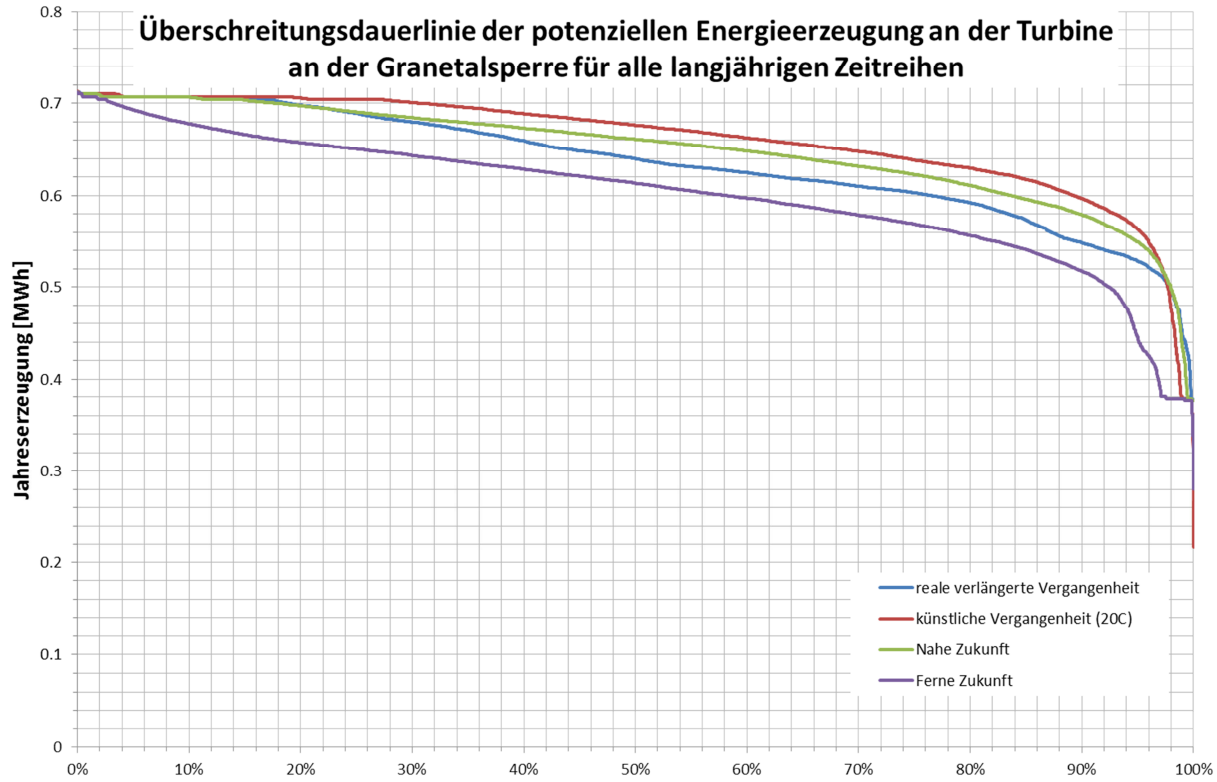
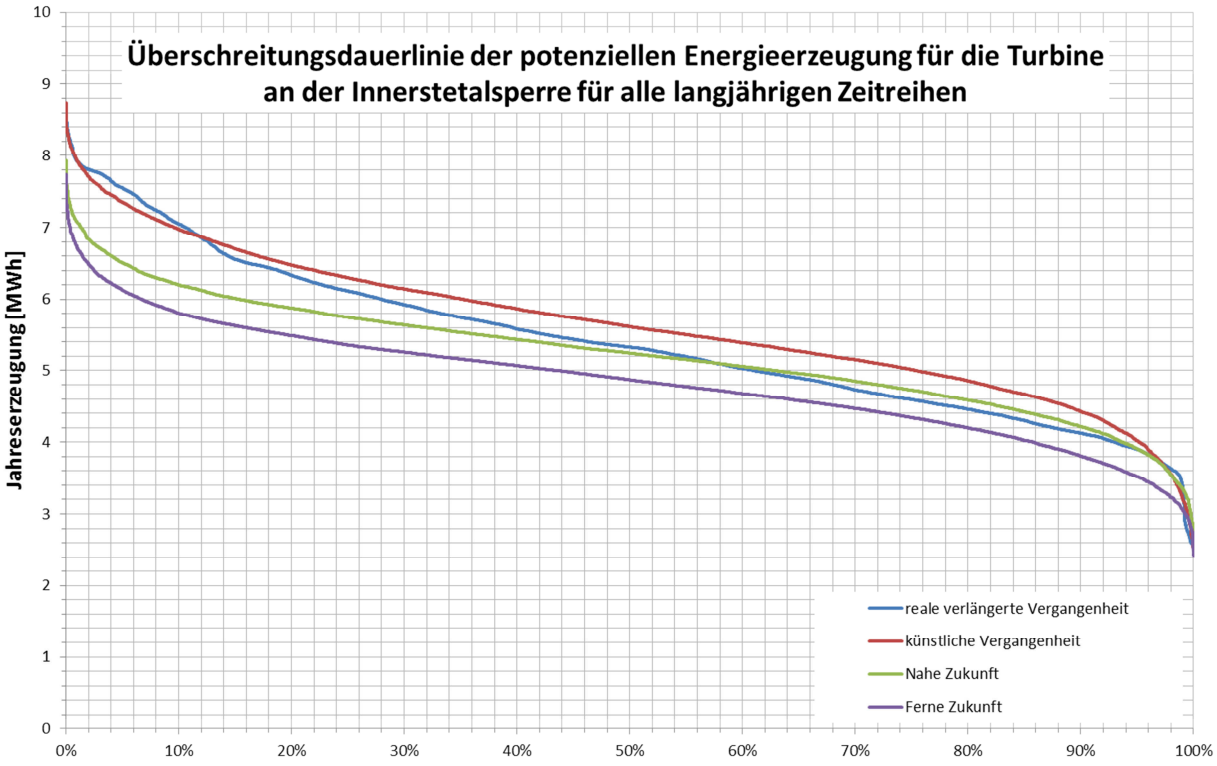



Mittlere Überleitungsmengen von dem Wintertalbach in die Granetalsperre für alle langjährigen Zeitreihen
mittlere Überleitungsmenge [Mio. m³]
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Monat
reale verlängerte Vergangenheit
künstliche Vergangenheit (20C)
Nahe Zukunft
Ferne Zukunft


Mittlere Überleitungsmengen von der Radau und Romke in die Granetalsperre für alle langjährigen Zeitreihen
mittlere Überleitungsmenge [Mio. m³]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Monat
Historie (1984-2002)
reale verlängerte Vergangenheit
künstliche Vergangenheit (20C)
Nahe Zukunft
Ferne Zukunft

Anhang 22: Überschreitungsdauerlinien der Speicherfüllstande der Talsperren Innerste und Oker für alle langjährigen Zeitreihen.





Anhang 23: Überschreitungsdauerlinien der potenziellen Energieerzeugung für die Turbinen an Grane- und Innerstetalsperre für alle Zeitreihen über 10.000 Jahre.