

Auftraggeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

**Bayerisches Flutpolderprogramm; weitergehende
Untersuchungen zu Flutpoldern an der Donau –
Hydrologische Modellierung und Auswertung im
Donaeinzugsgebiet mit Wirkungsanalyse großer
Hochwasserrückhaltebecken an Seitengewässern
der Donau**

- Schlussbericht -

Bearbeiter:

Martin Hunger

Dr. Christian Elpers

Karlsruhe, Juli 2021



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Zusammenfassung	1
3	Datengrundlage und Datenaufbereitung	4
3.1	LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle	4
3.2	Meteorologische Antriebsdaten.....	5
3.2.1	Konvertierung der Daten	5
3.2.2	Datenprüfung und -korrektur	6
3.3	Abflussdaten.....	6
3.4	Standorte für Hochwasserrückhaltebecken.....	7
3.5	Bezeichnungen der Ein- und Ausgabedaten	7
4	Modellumgebung.....	8
4.1	Anpassung der Modelle	8
4.1.1	Allgemeine Anpassungen	8
4.1.2	Modellspezifische Anpassungen	10
4.1.2.1	WHM Donau bis Lech (D1)	10
4.1.2.2	WHM Lech (LE)	11
4.1.2.3	WHM Donau, Altmühl und Naab (D2).....	12
4.1.2.4	WHM Regen (RE)	12
4.1.2.5	WHM Isar (IS)	12
4.1.2.6	WHM Donau ab Regensburg (D3)	13
4.2	Berechnungsumgebung.....	13
4.3	Hinweise zu regelmäßig auftretenden LARSIM-(Warn-)Meldungen	15
5	Simulationen für den Ist-Zustand	16
5.1	Auswahl der Ereignisse	16
5.2	Niederschlagsskalierung.....	17
5.3	Ereignisanalyse	18
5.3.1	Methodik	19
5.3.2	Ergebnisse.....	21
6	Auswahl von Ereignissen für die Wirkungsanalyse	22
6.1	Kennwerte für die Ereignisauswahl.....	22
6.2	Auswahlvorschlag geeigneter Ereignisse.....	24
6.3	Endgültige Auswahl	25
6.3.1	Lech.....	25
6.3.2	Naab/Regen.....	27



7	Rückhaltebeckenstandorte für die Wirkungsanalyse.....	28
7.1	Datengrundlage: potenzielle HRB-Standorte	28
7.2	Vorauswahl von HRB-Standorten	29
7.3	Abschätzung des effektiven Rückhaltepotenzials der HRB-Standorte.....	29
7.3.1	Korrektur der Beckenvolumina	30
7.3.2	Berechnung des Abflussvolumens an den HRB-Standorte mit LARSIM.....	30
7.3.3	Berechnung des effektiven Rückhaltevolumens.....	31
7.4	Eignungsbewertung und Auswahl geeigneter HRB-Standorte	31
7.5	HRB-Kombinationen für die Wirkungsanalyse	36
8	Wirkungsanalyse großer HRB in den Einzugsgebieten von Lech sowie Naab und Regen.....	39
8.1	Umsetzung der HRB-Kombinationen in den Modellen	39
8.1.1	HRB im Nebenschluss	42
8.1.2	HRB im Hauptschluss	43
8.1.3	Optimierte Steuerung der HRB	43
8.1.4	Alternative Steuerungsvariante V1a für ein Nebenschluss-HRB am Lech.....	45
8.1.5	Simulationsläufe	45
8.2	Darstellung der Ergebnisse.....	46
8.3	Wirkungsanalyse für das Einzugsgebiet des Lech	46
8.3.1	Variante V0 (Flutpolder Bertoldsheim)	47
8.3.2	Varianten V1 bis V4 (einfaches HRB-Gesamtvolumen)	48
8.3.3	Variante V1a	54
8.3.4	Varianten V5 bis V7 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen)	55
8.3.5	Zusammenfassung	58
8.4	Wirkungsanalyse für die Einzugsgebiete Naab und Regen.....	59
8.4.1	Variante V0 (Flutpolder Eltheim und Wörthhof)	59
8.4.2	Varianten V1 bis V5 (einfaches HRB-Gesamtvolumen)	59
8.4.3	Variante V6 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen)	68
8.4.4	Zusammenfassung	70



Anlagenverzeichnis

Anlage A Tabellen

- Anlage A.1 Für die Simulation des Ist-Zustands ausgewählte Ereignisse
- Anlage A.2 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Lech
 - Anlage A.2.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Lech oberhalb der Mündung
 - Anlage A.2.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau
 - Anlage A.2.3 Volumen über HQ_{100} und Volumenreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau
- Anlage A.3 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Naab/Regen
 - Anlage A.3.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten an der Naab oberhalb der Mündung
 - Anlage A.3.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Regen oberhalb der Mündung
 - Anlage A.3.3 Summierte Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten für die Ausgabepunkte an Naab und Regen
 - Anlage A.3.4 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau
 - Anlage A.3.5 Volumen über HQ_{100} und Volumenreduktion der HRB-Varianten unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau

Anlage B Abbildungen

- Anlage B.1 Ereignisanalyse für die Simulationsläufe des Ist-Zustands – exemplarische Darstellung der Auswertung
 - Anlage B.1.1 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Rang der Hochwasserscheitel nach Ereignis und Pegel (beispielhafter Ausschnitt)
 - Anlage B.1.2 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Überschreitung der HQ_T -Abflüsse nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)
 - Anlage B.1.3 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klassifizierte Hochwasserdauer in Stunden nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)
 - Anlage B.1.4 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klassifiziertes Hochwasservolumen in Mio. m^3 nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)
 - Anlage B.1.5 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Längsschnitte der Hochwasserscheitel und -Zeitpunkte (Beispiel für ein Ereignis)
- Anlage B.2 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Lech
 - Anlage B.2.1 Ereignis E031



Anlage B.2.2 Ereignis E036

Anlage B.2.3 Ereignis E042

Anlage B.2.4 Ereignis E136

Anlage B.2.5 Ereignis E138

Anlage B.2.6 Ereignis E168

Anlage B.2.7 Ereignis E245

Anlage B.2.8 Ereignis E250

Anlage B.2.9 Ereignis E276

Anlage B.2.10 Ereignis E303

Anlage B.3 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Naab/Regen

Anlage B.3.1 Ereignis E031

Anlage B.3.2 Ereignis E057

Anlage B.3.3 Ereignis E081

Anlage B.3.4 Ereignis E083

Anlage B.3.5 Ereignis E136

Anlage B.3.6 Ereignis E144

Anlage B.3.7 Ereignis E158

Anlage B.3.8 Ereignis E249

Anlage B.3.9 Ereignis E258

Anlage B.3.10 Ereignis E309



1 Veranlassung und Zielsetzung

Im Rahmen des bayerischen Flutpolderprogramms wurden in den vergangenen Jahren entlang der Donau zehn Standorte ermittelt, an denen Flutpolder geplant und umgesetzt werden sollen. Drei dieser Standorte wurden im Koalitionsvertrag zwischen CSU und FREIEN WÄHLERN (05.11.2018) in Frage gestellt. Dabei handelt es sich um die Flutpolder Bertoldsheim unterhalb der Lechmündung, sowie Eltheim und Wörthhof, die beide rund 20 km unterhalb der Mündung des Regen geplant sind. Für diese Standorte wurden vor einer endgültigen Entscheidung über ihre Weiterverfolgung nochmals weitergehende Untersuchungen zu ihrer Wirksamkeit und ein Wirkungsvergleich mit Rückhaltemaßnahmen an maßgeblichen Donauzuflüssen gefordert.

Aus diesem Anlass wurde die Aquantec GmbH (AN) vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU, AG) mit dem Projekt „Bayerisches Flutpolderprogramm; weitergehende Untersuchungen zu Flutpoldern an der Donau – Hydrologische Modellierung und Auswertung im Donaeinzugsgebiet mit Wirkungsanalyse großer Hochwasserrückhaltebecken an Seitengewässern der Donau“ beauftragt.

Ziel der Untersuchung war es, mit Hilfe der in der bayerischen Hochwasservorhersage eingesetzten LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle zu beurteilen, inwieweit große Hochwasserrückhaltebecken (HRB) an maßgeblichen Seitenzuflüssen den Abfluss in der Donau bei repräsentativen Überlastfallereignissen reduzieren können. Weiterhin sollte die Wirksamkeit ausgewählter Rückhaltebecken im Vergleich zur Wirksamkeit der betreffenden Flutpolder bewertet werden.

Zu diesem Zweck sollten an den Seitengewässern Lech, Naab und Regen, die oberhalb der in Frage stehenden Flutpolder in die Donau münden, die Rückhaltebeckenstandorte identifiziert werden, die den größten Einfluss auf das Hochwassergeschehen an der Donau haben können. Als Grundlage für die Auswahl wurde eine große Anzahl potenzieller Rückhaltebeckenstandorte, die im Rahmen einer parallel laufenden Studie (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) ermittelt wurden, bereitgestellt.

Als meteorologische Antriebsdaten für die Modelle dienten vorab ausgewählte synthetische Ereignisdaten für das gesamte bayerische Donaeinzugsgebiet aus einer mehrtausendjährigen Klimasimulation. Daraus sollten durch Simulationsläufe mit den LARSIM-Modellen hydrologische Ereignisse generiert werden und jene ausgewählt werden, die einen Überlastfall entlang der Donau repräsentieren. Diese bildeten die Grundlage für die Auswahl repräsentativer Ereignisse für die Wirkungsanalysen.

2 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden HRB-Wirkungsanalysen für zwei separate Teileinzugsgebiete der bayerischen Donau durchgeführt. Zum einen wurden dezentral angeordnete große Rückhaltebecken (> 1 Million m^3) im Einzugsgebiet (EZG) des Lech betrachtet, der oberhalb des in Frage stehenden Donaupolders Bertoldsheim mündet. Zum anderen wurden



große HRB in den Einzugsgebieten von Naab und Regen im Vergleich zu den unterhalb an der Donau geplanten Flutpoldern Eltheim und Wörthhof untersucht.

Die Wirkungsanalysen wurden auf Grundlage von Wasserhaushaltssimulationen für ausgewählte synthetische Hochwasserereignisse durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Modellumgebung aufgebaut, die insgesamt sechs separate LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (WHM) im bayerischen Donaueinzugsgebiet umfasst. Die für den operationellen Betrieb der Hochwasservorhersage konfigurierten WHM wurden zunächst für die kontinuierliche Berechnung der Szenarien angepasst und in eine automatisierte Berechnungsumgebung integriert, die es ermöglichte, die Modelle als gekoppeltes System im Sinne einer Modellkette zu betreiben.

Aus Klimasimulationen (Projekt ClimEx, LMU) standen insgesamt 321 meteorologische Antriebsdatensätze zur Verfügung, die aus 50 Simulationsläufen jeweils innerhalb der Zeitreihe 1981-2050 die größten Ereignisse entlang der Donau darstellten. Die Auswertung erster Simulationsrechnungen in LARSIM zeigte eine unerwartete Verteilung der Extremabflüsse, die auf in Teilen unplausible Niederschlagsmengen zurückgeführt wurde. Diese Ungenauigkeiten waren für die ClimEx-Studie selbst unerheblich, verhindern jedoch eine zuverlässige Einordnung der resultierenden absoluten Abflüsse in die geltende Pegelstatistik. Da diese Einordnung für die vorliegenden Wirkungsanalysen entscheidend ist, wurden die Niederschlagsdaten unter Berücksichtigung des Unterschieds im Wertebereich von beobachteten und simulierten Abflüssen so korrigiert, dass sie die natürliche Variabilität der entstehenden Abflüsse auf Basis der gültigen Pegelstatistik wiedergeben. Im Zuge dessen wurde zudem eine Vorauswahl von 88 grundsätzlich für die Untersuchungen geeigneten Hochwasserereignissen getroffen. Für die Wirkungsanalysen der beiden untersuchten Gebiete wurden daraus schließlich jeweils zehn Ereignisse ausgewählt. Die Auswahl zielte darauf ab, dass einerseits unterhalb der Lech- und Naab-/Regenmündung geeignete Abflüsse auftreten, um die Wirkung der Flutpolder an der Donau mit der der Becken in den seitlichen Einzugsgebieten vergleichen zu können. Andererseits sollten unterschiedliche Hochwassercharakteristika, Genesetypen und Niederschlagsverteilungsmuster repräsentiert werden. Als Grundlage für die Auswahl wurden sowohl die meteorologischen Daten als auch die Ergebnisse der LARSIM-Simulationen für den Istzustand analysiert. Für die Simulation des Ist-Zustands wurden ausschließlich die tatsächlich existierenden, in den Modellen implementierten Speicher berücksichtigt.

Aus einer großen Anzahl potenzieller HRB-Standorte (Standortsuche, Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) in den Einzugsgebieten von Lech, Naab und Regen wurden 23 für die Wirkungsanalysen geeignete Standorte ausgewählt. Als Kriterien dienten die Lage, die Einzugsgebietsfläche und das spezifische Speichervolumen der HRB. Zudem wurden LARSIM-Berechnungen für den Ist-Zustand und die 88 vorausgewählten Ereignisse durchgeführt, um zu bestimmen, welche Standorte durch ein großes effektives Rückhaltevolumen einen möglichst hohen Einfluss auf das Hochwassergeschehen an der Donau haben könnten - wo also zum einen relevante Hochwasserabflüsse auftreten und zum anderen ausreichende Rückhaltevolumina in den HRB zur Verfügung stehen.



Das zentrale Ziel der Wirkungsanalysen war es, die Auswirkungen verschiedener Rückhalteszenarien auf das Hochwassergeschehen an der Donau vergleichend zu beurteilen. Zu diesem Zweck wurden für die beiden Untersuchungsgebiete Lech und Naab/Regen jeweils verschiedene Speicherszenarien berücksichtigt. Zum einen ein Flutpolderszenario, das nur die jeweils zum Vergleich stehenden Flutpolder an der Donau (Bertoldsheim unterhalb Lech, Eltheim und Wörthhof unterhalb Naab/Regen) umfasst. Zum anderen dezentrale Speicherszenarien, die verschiedene Kombinationen aus den ausgewählten HRB in den Seitengewässern beinhalten und jeweils das gleiche bzw. doppelte Gesamtrückhaltevolumen aufweisen wie die Flutpolder. Um die Wirkung des dezentral im Einzugsgebiet der Donauzuflüsse angeordneten Hochwasserrückhalts umfassend beurteilen zu können, wurden für die beiden Untersuchungsgebiete jeweils mehrere, möglichst unterschiedliche HRB-Kombinationen (Varianten) festgelegt. Der Ist-Zustand diente als Referenz für die Wirkungsvergleiche.

Für beide Untersuchungsgebiete wurden Simulationsläufe mit den zehn ausgewählten Ereignisdaten für alle festgelegten Speicherszenarien durchgeführt. Die Rückhaltebecken und Flutpolder wurden dabei im Allgemeinen auf eine ereignisoptimierte lokale Scheitelkappung gesteuert. Nur für einen vergleichsweise donau nahen Rückhaltestandort am Lech war es sinnvoll möglich, zusätzlich für ein Ereignis eine alternative, auf die Donau ausgerichtete Steuerung exemplarisch umzusetzen. Die berechneten Hochwasserabflüsse an den Unterläufen von Lech, Naab und Regen und unterhalb der betrachteten Flutpolder an der Donau wurden anschließend analysiert und bewertet.

In beiden Untersuchungsgebieten erwiesen sich die dezentralen Rückhaltevarianten im Vergleich zur Flutpoldervariante als deutlich weniger wirksam. An der Donau unterhalb der geplanten Flutpolderstandorte ergab sich für den dezentral angeordneten Rückhalt im Lecheinzugsgebiet bei gleichem Rückhaltevolumen eine rund 60 % geringere Scheitelreduktion. Mit rund 64 % lag dieser Wert für den Bereich Naab/Regen noch etwas schlechter. Auch bei einer Verdoppelung des Speichervolumens in den Einzugsgebieten der Seitengewässer im Vergleich zum Flutpoldervolumen konnte in fast allen Fällen die Wirkung der Flutpolder nicht erreicht werden. Die im Variantenvergleich besten Resultate zeigten sich in beiden Gebieten für die Rückhaltevarianten, die das größte Einzugsgebiet abdecken. Dagegen schnitten die Varianten, in denen die Einzelbecken nach größtem effektiven Rückhaltevolumen ausgewählt wurden, in den meisten Fällen schlechter ab. Zudem zeigte sich, dass die Wirkung der dezentral an den Seitengewässern angeordneten HRB in höherem Maß ereignisabhängig ist, als dies für die Wirkung der Flutpolder gilt. Die besten Ergebnisse wurden jeweils bei ausgeprägten Hochwasserereignissen mit kurzen, steilen Scheiteln und nahezu gleichzeitigem Eintreffen der Wellen aus der Donau und den Seitengewässern beobachtet. Auch können die Rückhaltevarianten an den Donauzuflüssen bei solchen Ereignissen eine größere Wirkung entfalten, bei denen der Anteil des Abflusses aus dem jeweils betrachteten Einzugsgebiet am Gesamtabfluss an der Donau vergleichsweise hoch ist. Die Ergebnisse zeigten daneben, dass die dezentralen Speicher, durch ihre abflussmindernde Wirkung, die natürliche Retention an den Seitenzuflüssen flussabwärts der Becken verringern können. Hierdurch



kann das theoretische Gesamtrückhaltepotential der Rückhaltemaßnahmen in den Seitengewässern abnehmen. Besonders stark ausgeprägt ist dieser Effekt am Lech durch Grundwasserrückhalt im Vorland des Unterlaufs.

3 Datengrundlage und Datenaufbereitung

3.1 LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle

Vom AG wurden insgesamt sechs LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (WHM) übergeben, die das bayrische Donaeinzugsgebiet zwischen den Donauegeln Berg (Baden-Württemberg) und Passau Ilzstadt mit Ausnahme des Inneinzugsgebiets abdecken (siehe Tabelle 1 und Abbildung 1 in Kap. 4.2). Die WHM wurden in der aktuellen Konfiguration für den operationellen Betrieb zusammen mit allen benötigten System- und Steuerdateien bereitgestellt. Sie wurden vom AN einzeln auf Vollständigkeit und Lauffähigkeit geprüft. Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer räumlichen Diskretisierung: die WHM Isar und Donau mit Paar, Altmühl und Naab sind Teileinzugsgebietsmodelle, während die übrigen WHM als Rastermodelle (1x1 km²) vorliegen.

Tabelle 1: Im Projekt verwendete LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle mit ihrer räumlichen Diskretisierung und der zuständigen Behörde sowie dem im Projekt verwendeten Kürzel

Kürzel	Modell	Räuml. Diskretisierung	Zuständigkeit
D1	WHM Donau von Berg bis Lechmündung (inkl. Iller)	1x1 km ² -Raster	HVZ Iller-Lech (WWA Kempten)
D2	WHM Donau mit Paar, Altmühl und Naab (DPAN)	Teileinzugsgebiete	HVZ Donau (LfU)
D3	WHM Donau unterhalb Regensburg bis zur bayerischen Landesgrenze	1x1 km ² -Raster	HVZ Donau (LfU)
LE	WHM Lech	1x1 km ² -Raster	HVZ Iller-Lech (WWA Kempten)
IS	WHM Isar	Teileinzugsgebiete	HVZ Isar (WWA Weilheim)
RE	WHM Regen	1x1 km ² -Raster	HVZ Donau (LfU)

Das WHM Isar ist für die vorliegende Wirkungsanalyse nur mittelbar relevant, da die Isar erst unterhalb der untersuchten Rückhaltestandorte in die Donau mündet. Das WHM wurde dennoch in die Modellkette integriert. Zum einen, weil Simulationsergebnisse für den unterhalb gelegenen Donauabschnitt bei der Auswahl geeigneter Ereignisse für die Wirkungsanalyse berücksichtigt werden sollten (siehe Kap. 6). Zum anderen wurden die Zuflüsse aus der Isar für die ergänzende Überprüfung der Flutpolderwirkung durch die TUM (Technische Universität München 2021) als Eingangsdaten für die 2D-Modellierung benötigt.



3.2 Meteorologische Antriebsdaten

Die meteorologischen Antriebsdaten für insgesamt 321 selektierte Szenario-Ereignisse aus dem synthetischen Zeitraum 1981 bis 2050 wurden vom AG bereitgestellt. Die Daten aus dem Projekt ClimEx resultieren aus einer mehrtausendjährigen Klimasimulation mit 50 transienten Läufen des regionalen Klimamodells CRCM5. Die Ereignisse wurden so selektiert, dass sie die jeweils 150 größten Abflussereignisse an den sieben repräsentierten Donaupegel (Neu-Ulm, Donauwörth, Ingolstadt, Kelheimwinzer, Schwabelweis, Hofkirchen und Achleiten) umfassen, die in hydrologischen WaSiM-Simulationen im ClimEx-Projekt auf Grundlage der Klimadatenzeitreihe 1981-2050 auftraten. Die dreistündigen meteorologischen Daten wurden im Vorlauf des Projekts vom Department für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität, München (LMU) zu stündlichen Werten disaggregiert (Ludwig et al. 2019). Pro Ereignis und Variable (Niederschlag, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, relative Feuchte) wurde eine NetCDF-Datei übergeben. Jede Datei umfasst einen Zeitraum von mindestens einem vollständigen hydrologischen Jahr vor Auftreten des Abflussmaximums am ersten beteiligten Donaupegel in den WaSiM-Simulationen und einem Monat Nachlaufzeit nach Scheiteldurchgang des jeweiligen Ereignisses. Die geraster-ten Daten decken das komplette Projektgebiet ab und besitzen eine räumliche Auflösung von etwa 12,5 x 12,5 km. Daten für den Luftdruck lagen nicht vor, so dass für die Berechnungen Default-Werte verwendet werden mussten.

3.2.1 Konvertierung der Daten

Für die Verwendung in LARSIM wurden die NetCDF-Daten in das LARSIM-spezifische LILA-Format konvertiert. Nach Abstimmung mit dem AG wurde nicht das ursprünglich vorgesehene KALA-Format verwendet. Aufgrund der großen Anzahl von Rasterzellen der Eingangsdaten und der beschränkten Anzahl von Spalten im KALA-Format, hätten die Daten in zahlreiche Datenblöcke aufgeteilt werden müssen, was die Lesbarkeit mit einem Texteditor oder Excel deutlich verschlechtert hätte. Zur Konvertierung in LILA wurde ein vom AN entwickeltes Java-Programm eingesetzt, das unter anderem auf die NetCDF-Java library version 5.2.0 von unidata (www.unidata.ucar.edu) zurückgreift. Beim Konvertieren wurden die Daten jeweils auf die einzelnen Modellgebiete zugeschnitten (unter Verwendung eines räumlichen Puffers von 18 km), um die Einlesezeiten der Modelle zu minimieren. Die resultierenden LILA-Dateien enthalten jeweils die Daten für eine Variable, ein Ereignis und ein Teilmodell (Dateiname beispielsweise „N_E188_re.lila“ für Niederschlag, Ereignisnummer 188, WHM Regen; Details zu den Kürzeln siehe Kap. 3.5). Die in den Originaldateien enthaltenen Koordinaten (WGS84) wurden in das Bezugssystem der Modelle (Gauß-Krüger, Zone 4) transformiert. Höheninformationen für die Rasterzellen der NetCDF-Daten wurden vom AG in einer separaten Datei (HYD_BAY_oro-graphie_25km_buffer.nc) bereitgestellt und ebenso wie die transformierten Koordinaten in die LILA-Dateien übernommen.

In den bereitgestellten Daten sind grundsätzlich keine Schalttage (29. Februar) berücksichtigt. LARSIM erwartet diese allerdings in Schaltjahren. Um Probleme mit den so gegebenenfalls auftretenden Datenlücken, die insbesondere im zeitlichen Umfeld eines Hochwassers kritisch wären, zu vermeiden wurden alle Klimazeitreihen auf einen fiktiven Zeitraum ohne Schaltjahr verschoben.



Die Originaldaten beginnen jeweils am 1. November eines Jahres. In den konvertierten Zeitreihen wurde der Beginn pauschal auf den 1. November 2060 verschoben.

3.2.2 Datenprüfung und -korrektur

Die Kontrolle der gelieferten Daten ergab für die **Globalstrahlung** und den **Niederschlag** durchgängig unplausibel hohe Werte. Nach Rücksprache mit dem AG und der LMU wurde festgestellt, dass bei der Disaggregation der genannten Summenwerte jeweils versehentlich dreistündige Werte ausgegeben wurden. Die betreffenden Eingangsdaten wurden von der LMU korrigiert und vom AN erneut konvertiert. Auch nach der Korrektur zeigten sich bei der **Globalstrahlung** teilweise zu hohe Werte, die über der von LARSIM berechneten extraterrestrischen Strahlung lagen. Nach Auskunft der LMU finden sich diese bereits in den bias-adjustierten Ausgangsdaten. Zudem können die Spitzen durch die von der LMU angewandte Interpolationsmethode noch verstärkt werden. Nach Abstimmung mit dem AG wurde beschlossen, diesbezüglich keine weitere Korrektur vorzunehmen. Bei der Berechnung mit LARSIM werden die unplausiblen Werte automatisch auf Fehlwerte gesetzt.

Im Gegensatz zu den übrigen Variablen wurden die Stundenwerte der **Windgeschwindigkeit** im Zuge der zeitlichen Disaggregation der ursprünglichen Klimamolldaten durch die LMU nicht interpoliert, sondern durch Linearverschiebung ermittelt, so dass die Werte jeweils über einen Zeitraum von drei Stunden konstant sind.

3.3 Abflussdaten

Für das oberstrom der Illermündung liegenden Donaeinzugsgebiet (Baden-Württemberg), für das dem AG keine eigenen LARSIM Modelle vorliegen, wurden Abflussdaten für den Pegel Berg, Donau als Eingangsdaten genutzt. Die Zulaufganglinien stammen aus den WaSiM-Simulationen der LMU im Rahmen des ClimEx-Projekts und wurden vom AG bereitgestellt. Die dreistündlichen Zeitreihen liegen für alle 321 Ereignisse vor. Sie decken jeweils einen Zeitraum von zwei Monaten vor bis einen Monat nach dem Ereigniszeitraum ab. Für die Berechnungen mit LARSIM wurden die Zeitreihen ins LILA-Format konvertiert und durch lineare Interpolation auf stündliche Werte disaggregiert. Um den kompletten Simulationszeitraum inklusive der Einschwingphase abzudecken, mussten die Zeitreihen zudem am Anfang erweitert werden. In Abstimmung mit dem AG wurde dabei konstant der MQ des jeweiligen Pegels angesetzt. Analog zu den Klimadaten wurden alle Daten auf den fiktiven Zeitraum ab 2060 verschoben.

Für das Inneinzugsgebiet liegt kein gesamtes LARSIM-Modell vor, sondern eine Vielzahl kleiner LARSIM-Teilmodelle gekoppelt an ein Fließgewässermodell für das Abflussrouting des Inns. Aufgrund der zeitkritischen Umsetzung der Untersuchungen wurde vom AG darauf verzichtet, für das Innegebiet eine aufwändige Kopplung und Simulation der einzelnen Teilmodelle in LARSIM zu beauftragen. In den wenigen Simulationen der weitergehenden Wirkungsanalysen (TUM, 2021), in denen Abflussdaten des Inns benötigt wurden, wurde vom AG auf die Abflussdaten aus den WaSiM-Simulationen der LMU aus dem ClimEx-Projekt zurückgegriffen.



3.4 Standorte für Hochwasserrückhaltebecken

Vom AG wurden GIS-Datensätze (Punktshapefiles) mit insgesamt rund 660 möglichen HRB-Standorten (Haupt- und Nebenschluss) in den Einzugsgebieten von Lech, Naab und Regen bereitgestellt. Die potenziellen Standorte stammen aus einer vorab von der Firma Tractebel (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) durchgeführten Studie. Aus diesen Daten wurden in der vorliegenden Untersuchung 23 für die Wirkungsanalysen geeignete Standorte ausgewählt. Details zu den Daten und zur Auswahl der Standorte finden sich in Kap.7.

3.5 Bezeichnungen der Ein- und Ausgabedaten

Um die Handhabung von Ein- und Ausgabedaten zu erleichtern, wurden einheitliche Kennungen für die Modelle, Ereignisse und HRB-Szenarien definiert.

Für die im Projekt verwendeten **Modelle** werden die in Tabelle 1 (siehe Kap. 3.1) angegebenen Kennungen (Kürzel) verwendet.

Die meteorologischen Daten für die bereitgestellten **Ereignisse** wurden mit fortlaufenden Nummern von eins bis 321 versehen. In den Projektdaten sind die Ereignisse mit einem Kürzel gekennzeichnet, das sich aus dem Buchstaben „E“ und der dreistelligen Ereignisnummer zusammensetzt (z. B. „E034“).

Für die verschiedenen **Rückhalteszenarien** (verschiedene HRB-Kombinationen) wurden ebenfalls eindeutige Kürzel vergeben, z. B. „ist“ für den Ist-Zustand (siehe Tabelle 2). Es ist zu beachten, dass beim Lech die Nummern der Kürzel von der Nummerierung der Variantenbezeichnung abweicht (siehe auch Kap. 7.5 und 8.1.5). Die eindeutige Bezeichnung der **Berechnungsläufe** ergibt sich aus der Kombination der Kennung des jeweils verwendeten Ereignisses mit der Kennung des zugrundeliegenden HRB-Szenarios (z. B. „E034_ist“).



Tabelle 2: Für die untersuchten Rückhalteszenarien (HRB-Kombinationen, siehe Kap.7) verwendete Dateikürzel und Bezeichnungen nach Gebiet

Gebiet	Dateikürzel	Bemerkung	Bezeichnung Variante
alle	ist	Ist-Zustand	IST
Lech	skle00	Flutpoldervariante	V0
	skle01	einfaches FP-Volumen	V1
	skle02	einfaches FP-Volumen, Sondersteuerung	V1a
	skle03	einfaches FP-Volumen	V2
	skle04	einfaches FP-Volumen	V3
	skle05	einfaches FP-Volumen	V4
	skle06	doppeltes FP-Volumen	V5
	skle07	doppeltes FP-Volumen	V6
Naab/Regen	sknr00	Flutpoldervariante	V0
	sknr01	einfaches FP-Volumen	V1
	sknr02	einfaches FP-Volumen	V2
	sknr03	einfaches FP-Volumen	V3
	sknr04	einfaches FP-Volumen	V4
	sknr05	einfaches FP-Volumen	V5
	sknr06	doppeltes FP-Volumen	V6

4 Modellumgebung

Die Modellumgebung zur Berechnung der Szenarien umfasst sechs separate LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (siehe Kap. 3.1). Die für den operationellen Betrieb konfigurierten WHM wurden zunächst für die kontinuierliche Berechnung der Szenarien angepasst (Kap. 4.1). Im Rahmen des Projekts wurde eine automatisierte Berechnungsumgebung entwickelt, die es ermöglicht, die einzelnen Modelle als gekoppeltes System zu berechnen (Kap. 4.2).

4.1 Anpassung der Modelle

Die Umstellung für die Simulation der Szenarien erforderte einige allgemeine Anpassungen, die alle Modelle betreffen (Kap. 4.1.1). Daneben waren einige modellspezifische Anpassungen notwendig (Kap. 4.1.2.1 bis 4.1.2.6).

4.1.1 Allgemeine Anpassungen

Da die meteorologischen Eingangsdaten aus Klimasimulationen und nicht von Messstationen stammen, wurden in Abstimmung mit dem AG alle Optionen zur Korrektur des systematischen Fehlers bei der Niederschlagsmessung ausgeschaltet. Der gebietsabhängige Korrekturfaktor für den Niederschlag (KG) wurde zunächst für alle Pegelkontrollbereiche auf 1.0 gesetzt. Im Zuge



des Projekts war in bestimmten Teileinzugsgebieten eine Anpassung der KG-Faktoren zur Niederschlagskorrektur notwendig (siehe Kap. 5.2).

Da für das Projekt keine Luftdruckdaten zur Verfügung standen, wurde die Option LUFTDRUCK DEFAULT aktiviert. Dadurch wird durchgängig ein an die Höhenlage der Teilgebiete angepasster Default-Luftdruck (1013 hPa auf Meereshöhe) verwendet.

Für die Modellläufe zur Erzeugung von Zustandsdateien (siehe Kap. 4.2) werden Startabflüsse als Initialisierungsgrundlage für die Pegelkontrollbereiche benötigt. Da die entsprechenden Angaben im Tape 35 nicht für alle Modelle vorlagen bzw. ihr Ursprung nicht eindeutig geklärt werden konnte, wurden neue Werte auf Basis der jeweiligen Einzugsgebietsgröße und einer pauschalen Abflussspende von $0,01 \text{ m}^3/(\text{s} * \text{km}^2)$ abgeleitet.

In den operationellen Modellen werden z. T. an definierten Punkten im Gewässersystem gemessene Ganglinien eingelesen, die dort die simulierten Werte ersetzen. Da für die in dieser Untersuchung verwendeten synthetischen Szenarien entsprechende Messwerte naturgemäß nicht vorliegen, wurde das Einlesen von Ganglinien mit Ausnahme von konstanten Einleitungen deaktiviert.

In mehreren WHM (Donau bis Lechmündung, Lech, Isar) werden verschiedene Speicher im operationellen Betrieb der Hochwasservorhersagezentralen über das LARSIM-Modul SPEMO gesteuert. SPEMO erfordert in der Regel manuelle Eingriffe zur Anpassung der Steuerung im Verlauf eines Hochwassers, die auf der Expertise des Bearbeiters und aktuellen Vorhersagen beruhen. Da diese Vorgehensweise im vorliegenden Projekt nicht umzusetzen war, wurde zusammen mit dem AG und den zuständigen Hochwasservorhersagezentralen an den Wasserwirtschaftsämtern (WWA) Kempten und Weilheim abgestimmt, SPEMO nicht zu verwenden, sondern die betreffenden Speicher als herkömmliche LARSIM-Speicher (Talsperren, Rückhaltebecken) zu berücksichtigen und bei allen simulierten Ereignissen nach einheitlichen Vorgaben zu steuern. Die zugehörigen Steuerungen wurden in die Tape 10 der Modelle eingebaut. Informationen zu W-Q- bzw. V-Q-Beziehungen, zur Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlagen und zum Steuerreglement der Speicher wurden von den WWA bereitgestellt. Modellspezifische Details dazu finden sich in den folgenden Abschnitten.

In allen Modellen wurden für Speicher mit relevantem Volumen Anfangsinhalte gesetzt, sofern diese nicht bereits in den operationellen Modellen definiert waren. Dies ist bei der Berechnung der Zustandsdateien mit Startabflüssen erforderlich, um zu vermeiden, dass größere Seen leer initialisiert werden und zunächst gefüllt werden müssen.

Die Funktion der Steuerung der Speicher wurde zunächst anhand des Ereignisses E208 (eines der größten Ereignisse) kontrolliert und plausibilisiert. Im Laufe der weiteren Bearbeitung wurde die Funktion der Speichersteuerung bei den einzelnen Simulationen der Szenarien kontrolliert.



4.1.2 Modellspezifische Anpassungen

4.1.2.1 WHM Donau bis Lech (D1)

Im Modell befindet sich direkt nach dem Zulaufpegel Berg, Donau ein sehr großes **Behelfselement (Nr. 2537)**, das das baden-württembergische Zwischeneinzugsgebiet bis zur Illermündung abbildet. Mit 1.500 km² entspricht es gut einem Viertel des Donaeinzugsgebiets oberhalb der Iller. Testrechnungen ergaben für dieses Element im Einschwingjahr einen unrealistisch niedrigen und gedämpften Abfluss. Bei der Analyse dieses Verhaltens zeigte sich eine extrem hohe Retention innerhalb des Elements, die aus seiner Parametrisierung resultierte. Dies hatte zu Folge, dass der gebildete Abfluss so verzögert in die Donau gelangte, dass sich innerhalb des Simulationszeitraumes nie ein plausibler Abfluss einstellte. Um dies zu beheben, wurde der Gebietsparameter TAL (Vorfluterlänge) von 40 auf 1,4 herabgesetzt und zusätzlich die Retentionskonstante für den Basisabfluss EQB von 50.000 auf 13.500 (entsprechend Pegel Leipheim, Donau) reduziert. Mit der angepassten Parametrisierung ergab sich eine deutlich plausiblere Simulation. So wurde gewährleistet, dass sich die Gebietsspeicher innerhalb des Simulationszeitraums einschwingen können.

Im operationellen WHM Donau bis Lech sind zwei Speicher über SPEMO implementiert. Sie wurden in Abstimmung mit dem WWA Kempten in herkömmliche LARSIM-Speicher überführt.

Der bestehende **Flutpolder Weidachwiesen** liegt im Nebenschluss an der Iller und hat ein Gesamtvolumen von rund 6,3 Mio. m³. Der Zulauf aus der Iller beträgt maximal rund 140 m³/s. Für das vorliegende Projekt (ohne SPEMO, siehe Kap. 4.1.1) wurde der Flutpolder als Rückhaltebecken im Nebenschluss (Element 867) in das Modell eingebaut. Die Ausleitung (Element 862) aus der Iller erfolgt gestaffelt ab einem Iller-Abfluss von 420 m³/s mit 10 m³/s bis zu einem Iller-Abfluss von 570 m³/s mit 140 m³/s. Oberhalb von 570 m³/s bleibt die Ausleitung konstant bei 140 m³/s (abgestimmt mit WWA Kempten). Der Abfluss aus dem Flutpolder wurde mit 10 m³/s angesetzt. Er wird wieder in die Iller geleitet (Element 868). Dies bewirkt bei der kontinuierlichen Simulation, dass der Flutpolder nach Hochwasserereignissen, die vor dem Zielereignis ablaufen, wieder geleert wird. Der Abfluss wurde mit 10 m³/s (etwa 2,4 % bezogen auf einen Abfluss von 420 m³/s in der Iller) so gering gewählt, dass er für die Bewertung der Hochwassersituation der Donau keine wesentliche Rolle spielt. Sollte das ausgeleitete Volumen aus der Iller größer als 6,3 Mio. m³/s werden, so erfolgt ein Abfluss über die Hochwasserentlastung des Flutpolders zurück in die Iller. Dieser Abfluss wäre bei einer zeitlich anders gestalteten Flutpoldersteuerung faktisch in der Iller geblieben. Die Rückführung über die Hochwasserentlastung in die Iller entspricht damit näherungsweise der Abflusssituation vor Ort. Die umgesetzte Flutpoldersteuerung ist als Pauschalsteuerung anzusehen. Eine ereignisspezifische Steuerung, wie sie in der Realität vorgenommen wird, war im Rahmen der automatisierten Berechnung der Vielzahl von Ereignissen des vorliegenden Projekts nicht umsetzbar.

Die Talsperre **Rottachsee** liegt im Hauptschluss der Rottach und besitzt ein Einzugsgebiet von 30,2 km². Über eine Turbine werden im Mittel weitgehend kontinuierlich 2,4 m³/s abgegeben. Die Mindestabgabe liegt bei 0,07 m³/s, die maximale Abgabe beträgt 25 m³/s. Der Speicher wurde



als LARSIM-Rückhaltebecken (Element 953) mit einem Regelabfluss von 2,4 m³/s implementiert. Das Volumen wurde so groß gewählt, dass der See nicht überlastet und die Hochwasserentlastung nie aktiv wird.

4.1.2.2 WHM Lech (LE)

Im operationellen WHM sind zehn **Staufstufen** (modelltechnisch als Talsperren) an der Wertach implementiert. Bei der aktuell laufenden Überarbeitung des Modells wurde festgestellt, dass diese mit den vorhandenen Steuerungsregeln keine Auswirkungen auf die Simulation haben und deshalb nicht in das aktualisierte Modell übernommen werden (nach Auskunft vom WWA Kempten). Vor diesem Hintergrund wurden die Staufstufen auch für das vorliegende Projekt deaktiviert.

Das WHM Lech beinhaltet zwei Talsperren, die operationell über SPEMO gesteuert werden. Diese wurden in Abstimmung mit dem WWA Kempten durch herkömmliche LARSIM-Talsperren ersetzt.

Die Talsperre **Forggensee** am Lech wurde als LARSIM-Talsperre (TALS) implementiert (Element 1897). Der Anfangsinhalt wurde auf das Winterstauziel von 90 Mio. m³ gesetzt, da die Simulationläufe jeweils im November beginnen. Das Speichervolumen wurde im Modell fiktiv soweit erhöht, dass eine Überlastung unwahrscheinlich ist, weil im Realfall so gesteuert wird, dass keine Abflussspitzen unkontrolliert nach unterstrom weitergeben werden. Bei der Steuerung auf einen Sollwasserstand wird unterschieden in Sommer- und Winterstauziel mit jeweils vorgegebenen minimalen und maximalen Abgaben. Das Sommerstauziel (gültig vom 15.04. bis 15.10.) liegt bei 780,5 m ü. NN oder rund 136,2 Mio. m³, das Winterstauziel (16.10. bis 14.04.) wurde auf 777,0 m ü. NN (rund 90 Mio. m³) festgelegt. Die Speicherabgabe wird in der Realität abhängig vom gemessenen oder prognostizierten Abfluss gesteuert. Um die Ereignisabhängigkeit zumindest grob abzubilden, wurden im Modell in Abstimmung mit dem WWA Kempten drei Varianten für die minimale und maximale Abgabe implementiert (Tabelle 3). Als Kriterium für die Zuordnung der Steuerungsvarianten zu den simulierten Ereignissen diente dabei der Scheitelabfluss am Pegel Füssen (Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand). In der Berechnungsstruktur wurden für den Lech drei entsprechende Varianten der Steuerdatei (Tape 10) bereitgestellt und verwendet.

Tabelle 3: Im Lech-Modell berücksichtigte Steuerungsvarianten des Foggensees: Zufluss-abhängige Abgabe für Sommer- und Winterhalbjahr

Steuerungs- variante	Zufluss (Pegel Füssen) [m ³ /s]	Abgabe Sommer (15.04. bis 15.10.) [m ³ /s]		Abgabe Winter (16.10. bis 14.04.) [m ³ /s]	
		maximal	minimal	maximal	minimal
V0	bis 550	250	1	150	1
V1	> 550 bis 900	450	1	300	1
V2	> 900	650	1	450	1

Die Talsperre **Grüntensee**, im Hauptschluss an der Wertach, wurde ebenfalls als Talsperre (TALS) im Modell berücksichtigt (Element 2870). Der Anfangsinhalt des Grüntensees wurde auf



das Normalstauziel 876,5 m+NN (4,759 Mio. m³) gesetzt, der letzte Abflusswert der Hochwasserentlastung wurde so dimensioniert, dass keine Beckenüberlastung eintreten kann. Über das ganze Jahr wird mit einer minimalen Abgabe von 0,5 m³/s und einer maximalen Abgabe von 35 m³/s auf die Einhaltung des Normalstauziels gesteuert. Die Werte wurden aus den Angaben der SPEMO-Steuerung (Tape 39) abgeleitet (Zwischenwert aus Abgabe Normalstau und Schwelle Abgabe bei Schwelle Hochwasserentlastung).

Beim Ereignis E208, einem der größten Ereignisse am Lech, wird der Hochwasserschutzraum vollständig gefüllt und die Hochwasserentlastungsanlage springt an. Insgesamt ergibt sich ein maximaler Abfluss aus dem Grüntensee von rund 58 m³/s. Dabei werden 35 m³/s als maximaler permanenter Abfluss abgegeben. Die restlichen maximalen 23 m³/s werden über die Hochwasserentlastungsanlage abgeführt.

4.1.2.3 WHM Donau, Altmühl und Naab (D2)

Am WHM Donau, Altmühl und Naab wurden im Vergleich zur operationellen Konfiguration nur geringfügige spezifische Anpassungen vorgenommen. Unterhalb des Altmühlsees werden über eine zusätzlich implementierte **Verzweigung** bis zu 70 m³/s zum Brombachsee (außerhalb des Modells) ausgeleitet. Daneben wurde die maximale **Absenkgeschwindigkeit des Altmühlsees** (gesteuerter See, SEEG) von 0,008 auf 8 cm/d korrigiert. Beide Anpassungen wurden vom LfU Bayern umgesetzt und getestet.

4.1.2.4 WHM Regen (RE)

Am WHM Regen wurden außer den allgemeinen Anpassungen (Kap. 4.1.1) keine spezifischen Änderungen vorgenommen.

4.1.2.5 WHM Isar (IS)

Die spezifischen Anpassungen für das WHM Isar wurden in Abstimmung mit dem WWA Weilheim vorgenommen (zur Relevanz des WHM Isar im Modellverbund siehe Kap. 3.1). Unter anderem wurden drei operationell mit SPEMO gesteuerte Speicher in LARSIM-Talsperren bzw. Rückhaltebecken umgewandelt.

Im Bereich der oberen Isar befinden sich im operationellen Modell mehrere **Verzweigungen**, über die Wasser zum Walchensee geleitet wird. Diese wurden für die Szenarienberechnung ebenso deaktiviert wie die Überleitung vom Walchensee in den Kochelsee (Walchensee-Kraftwerk).

Der **Syivensteinspeicher** an der oberen Isar wurde als Talsperre (TALS) im Element 766 eingebaut. Die implementierte Steuerung wurde mit dem WWA Weilheim erarbeitet. Der Anfangsinhalt wurde auf das Sommerstauziel von 750 m ü. NN (rund 32 Mio. m³) gesetzt. Die maximale Abgabe wurde auf 230 m³/s festgelegt und entspricht dem Abfluss über den Triebwerksstollen, die minimale Abgabe wurde auf 10 m³/s gesetzt. Eine jahreszeitliche Differenzierung der Sollganglinie wurde nicht vorgenommen.



Der **Walchensee** wurde stark vereinfacht als Rückhaltebecken (RUEC, Element 909) implementiert. Durch die Deaktivierung der künstlichen Zuleitungen (siehe oben) wird er im Modell nur noch durch sein, vergleichsweise kleines, natürliches Einzugsgebiet gespeist. Der Abfluss aus dem See in die Jachen (natürlicher Auslass) wurde auf 0,01 m³/s begrenzt, da an dieser Stelle in der Realität kaum Wasser abgegeben wird. Das Volumen des Walchensees wurde so weit vergrößert, dass er innerhalb des Simulationszeitraumes nicht überlastet wird.

Der vergleichsweise kleine **Windachspeicher** (3 Mio. m³), eine Talsperre an der Windach, wurde ebenfalls als Rückhaltebecken (RUEC, Element 4648) berücksichtigt. Die im Tape 10 bereits vorhandenen, operationell deaktivierten, Steuerungsangaben wurden übernommen und anhand von Testläufen plausibilisiert.

4.1.2.6 WHM Donau ab Regensburg (D3)

Am WHM Donau ab Regensburg wurden außer den allgemeinen Anpassungen (Kap. 4.1.1) keine spezifischen Änderungen vorgenommen

4.2 Berechnungsumgebung

Zur Simulation der Szenarien für das gesamte Bearbeitungsgebiet mit LARSIM wurde eine Berechnungsumgebung aufgebaut, die es ermöglicht, die einzelnen Modelle automatisiert als Modellkette in gewässersystematischer Reihenfolge zu berechnen. In Abbildung 1 sind die zugrundeliegende räumliche Struktur und die Übergabepegel zwischen den einzelnen Modellen dargestellt. In der Umgebung werden zunächst die WHM Donau bis Lech (D1), Lech (LE) und Regen (RE) berechnet. Die Ganglinien der Übergabepegel Donauwörth und Mertingen (D1), Augsburg (LE) sowie Marienthal (RE) werden an das WHM Donau mit Paar, Altmühl und Naab (D2) übergeben. Im Anschluss an D2 wird das WHM Isar (IS) gestartet. Das WHM Donau ab Regensburg (D3) schließlich erhält Zufluss an den Pegeln Schwabelweis (D2) und Plattling (IS).

Das System stellt die jeweils benötigten Eingabe-, Steuer- und Systemdateien in Abhängigkeit von HRB-Szenario, Ereignis und Modell bereit und startet sukzessive die einzelnen Modelle. An den Übergabepegeln werden die simulierten Abflussganglinien nach Berechnung des Oberliegermodells ausgelesen und als Eingabedatei an das Unterliegermodell weitergegeben.

Die Berechnungen werden, entsprechend den Eingangsdaten, im Stundenzeitschritt durchgeführt. Der Beginn der Simulationsläufe wurde pauschal auf einen fiktiven Zeitpunkt (01.11.2060 00:00) gesetzt, um Probleme mit dem in den Eingangsdaten fehlenden Schalttagen zu vermeiden (siehe dazu Kap. 3.2.1). Da auch die Originaldaten grundsätzlich am 01.11. eines bestimmten Jahres beginnen, bedeutet dies lediglich eine Verschiebung um vollständige Jahre. Die relevanten Niederschlags- bzw. Abflussereignisse liegen zeitlich jeweils nach dem 01.11.2061, so dass in jedem Fall ein Vorlauf von mindestens einem Jahr gegeben ist (Einschwingjahr).

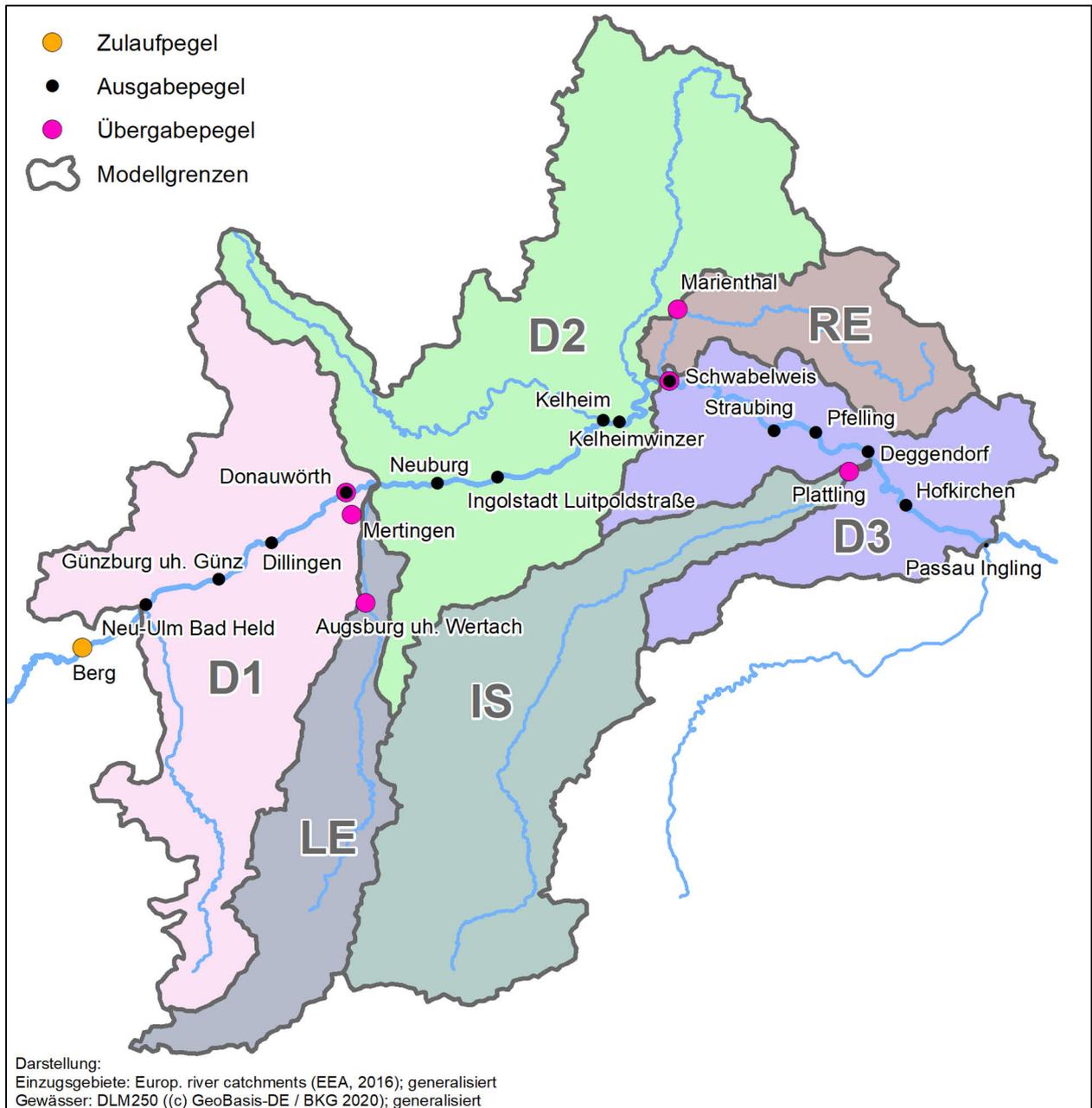


Abbildung 1: Übersicht über die LARSIM-Teilmodelle und relevanten Pegel des Bearbeitungsgebiets

Alle Simulationsläufe werden mit demselben Zustand (Füllung der Gebietsspeicher) initialisiert. Die dafür benötigten Zustandsdateien wurden auf Basis des Ereignisses 205 für das Einschwingjahr (01.11.2060 bis 31.10.2061) berechnet und anschließend wieder als Zustand für den 01.11.2060 verwendet. Das Ereignis 205 wurde gewählt, da es zum Ende des Einschwingjahres keine nennenswerten Niederschlagsereignisse und vergleichsweise geringe Abflüsse aufweist. Die Verwendung der Zustandsdateien gewährleistet, dass alle Speicher zu Beginn der Läufe eine plausible Füllung aufweisen und ein Einschwingen innerhalb eines Jahres ermöglicht wird.

Für die Berechnungsläufe der Wirkungsanalyse (Kap. 8) wurde der Simulationszeitraum nicht, wie bei den Simulationen für den Ist-Zustand (Kap. 5), in einem, sondern in zwei Teilschritten berechnet. Die Umstellung erfolgte, um einen bis dahin noch nicht bekannten Fehler in LARSIM



zu vermeiden, der regelmäßig nach etwa 22,5 Monaten (2^{14} Zeitschritte) Simulationszeit auftritt. Durch den Fehler kann zum genannten Zeitpunkt ein unrealistischer Versatz in den simulierten Ganglinien auftreten. Die Abweichung ist in den meisten Fällen sehr gering und auf wenige Zeitschritte nach dem Versatz beschränkt. Bei wenigen Berechnungsszenarien, bei denen der Fehler zeitlich genau auf ein Hochwasserereignis fällt, zeigten sich jedoch erhebliche Abweichungen. Aus diesem Grund wurde für die bei der Wirkungsanalyse verwendeten Ereignisse auch der Ist-Zustand erneut berechnet.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt für jedes Modell als separate LILA-Ergebnisdatei, die die modellspezifisch angeforderten Ausgabeganglinien enthält (definiert in der LARSIM-Steuerdatei punktausgaben.str). Die Benennung der Ergebnisdateien erfolgt nach dem Schema `ergebnis_[Modellkürzel]_[Berechnungslauf].lila` (siehe auch Kap. 3.5).

Die Berechnungsumgebung wurde in der Programmiersprache Java entwickelt. Um dem hohen Berechnungs- und Zeitaufwand der Simulationen gerecht zu werden, wurde sie so konzipiert, dass auf Rechnern mit Mehrkernprozessoren mehrere Szenarien parallel berechnet werden können.

4.3 Hinweise zu regelmäßig auftretenden LARSIM-(Warn-)Meldungen

Bei den Modellläufen wurden regelmäßig bestimmte (Warn-)Meldungen in das Tape 11 ausgegeben, die sich nicht ohne umfangreiche Anpassung der Modelle beheben lassen bzw. deren Bedeutung z. T. nicht abschließend geklärt werden konnte. In Abstimmung mit dem AG und den zuständigen WWA wurden die unten aufgeführten Warnmeldungen nach einer anfänglichen Analyse nicht weiterverfolgt. Auf Grundlage der angestellten Nachforschungen und mit Rücksicht auf die Tatsache, dass es sich nicht um Fehlermeldungen handelt, wird davon ausgegangen, dass sich keine negativen Auswirkungen auf die Plausibilität der Modellierungsergebnisse ergeben.

- *Bei Berechnung des Abflusses aus Speicher [bzw. See] in TGB [...] wurde nach 500 Iterationsschritten keine Volumenschätzung mit Genauigkeit bis auf 10 cbm [bzw. 1 %] erreicht:* Die Warnmeldung tritt bei mehreren Speichern im Untersuchungsgebiet gelegentlich, in verschiedenen Abflussbereichen auf. Sie deutet darauf hin, dass LARSIM die Kontinuitätsgleichung der Seeretention iterativ nicht mit der angestrebten Genauigkeit lösen kann. Es wird vermutet, dass dies auf die Wahl der V-Q-Stützstellen der implementierten Speicher zurückzuführen ist. Bei stichprobenartigen Kontrollen der Zulauf-, Ablauf- und Inhaltsganglinien konnte kein unplausibles Verhalten der betroffenen Speicher festgestellt werden.
- *Gemessene Globalstrahlung > berechnete extraterrestrische Strahlung:* In den bereitgestellten Eingangsdaten finden sich teilweise unplausibel hohe Strahlungswerte, die in Abstimmung mit dem AG nicht korrigiert wurden (siehe dazu Kap. 3.2.2).
- *Qsim > Qmax der dV/dQ-Beziehung aus Tape29 für Element [...]:* Für einzelne Elemente (vor allem im Modell D2, z.T. auch RE) ist der Wertebereich der implementierten



dV/dQ-Beziehung nicht ausreichend für die auftretenden Spitzenabflüsse. Bei Abflüssen, die über der obersten Stützstelle liegen, wird die Beziehung vom Modell extrapoliert.

- *WAS01: Wasserbilanz [mm], Element [...]*: Für vereinzelte Elemente tritt eine Meldung auf, die evtl. auf eine unausgeglichene (standörtliche) Wasserbilanz des Elements im Simulationszeitraum hindeutet. Eine Reihe von Elementen wurden diesbezüglich überprüft. In den meisten Fällen waren die Abweichungen gering (1 - 3 %). Größere prozentuale Abweichungen zeigten sich nur bei sehr kleinen Elementen, so dass die Auswirkungen auf die Abflussberechnungen an der Donau insgesamt als vernachlässigbar eingeschätzt wurden.

5 Simulationen für den Ist-Zustand

Um eine ausreichende Datengrundlage für die Auswahl repräsentativer Ereignisse als hydrologische Szenarien für die Wirkungsanalyse großer HRB im Donaeinzugsgebiet (siehe Kap. 8) und die weitergehenden Wirkungsanalysen der Flutpolderstandorte entlang der Donau (Technische Universität München 2021) bereitzustellen, wurden für insgesamt 120 Ereignisse Simulationsläufe für den Ist-Zustand der Modelle (ohne zusätzliche Speicher) durchgeführt.

5.1 Auswahl der Ereignisse

Zur Auswahl von Ereignissen zur Simulation des Ist-Zustands stand eine große Schar von 321 meteorologischen Datensätzen zur Verfügung, die entlang der Donau große Abflussereignisse hervorrufen (siehe Kapitel 3.2). Um die hieraus entstehenden Abflüsse im LARSIM-Modell besser beurteilen zu können, wurden vorab Simulationen für eine Auswahl von 20 Ereignissen berechnet, die bei den von der LMU im Rahmen des ClimEx-Projektes durchgeführten WaSiM-Simulationen entweder die größten Abflüsse an der Donau produzierten oder Abflüsse im Bereich eines HQ_{100} . Erwartungsgemäß treten zwischen zwei verschiedenen hydrologischen Modellen, wie dem hier verwendeten LARSIM-Modell und dem WaSiM-Modell der LMU, anhand dessen die Ereignisvorauswahl getroffen wurde, gewisse Abweichungen in den generierten Abflüssen auf. Auf Grundlage dieser Voruntersuchung konnten vom AG aus den 321 vorliegenden Ereignissen die 120 ausgewählt werden, die auch im LARSIM-Modell entlang der verschiedenen Donauabschnitte Abflussereignisse im Überlastfall erwarten lassen. Statistisch betrachtet enthält die Ereignisvorauswahl für jeden Donaupegel 35 Ereignisse größer HQ_{100} (in zu Grunde liegender Klimazeitreihe von 3.500 Jahren), sie umfasst jedoch die 150 größten Ereignisse an den betrachteten Donaupegeln aus WaSiM. Mit der Voranalyse konnten zuverlässig Ereignisse mit eindeutig zu kleinen Abflüssen aussortiert und die Anzahl notwendiger Simulationen deutlich reduziert werden. Für die ausgewählten 120 Ereignisse wurde der Ist-Zustand simuliert und die Ergebnisse ausgewertet.

Mit Vorliegen der Simulationsergebnisse der 120 Ereignisse und einer zusätzlichen Analyse der Abflussscheitel seitlicher Donauzuflüsse zeigte sich, dass bei einer Reihe von Pegeln (vor allem unterhalb Regensburg) auffällig wenige Abflüsse über HQ_{100} auftraten, bei anderen (vor allem



oberhalb Ingolstadt) jedoch sogar deutlich mehr als erwartet. Dieses Verhalten wurde als nicht plausibel bewertet. Genauere Analysen des AG zum ClimEx-Datensatz zeigten, dass aufgrund verschiedener modellbedingter Einflüsse im Klimamodell in einigen Teilgebieten die modellierten absoluten Niederschlagsmengen und der daraus entstehende Abfluss offenbar zu hoch, in anderen Teilgebieten zu niedrig simuliert wurden. Beispielsweise führte die geringe Dichte an Niederschlagsmessstationen im alpinen Bereich dort zu einer Unterschätzung der Niederschläge. Dieser Sachverhalt stellte im ClimEx-Projekt selbst keine Problematik dar und war entsprechend wenig erforscht, da hier die Niederschlagsentwicklung über die Zeit anhand relativer Vergleiche untersucht wurde, um die Einflüsse des Klimawandels zu quantifizieren. Für die vorliegende Studie ist eine zuverlässige Einordnung der absoluten Abflüsse in die geltende Pegelstatistik jedoch wesentlich. Um eine ausreichende Zahl plausibler Ereignisse für die HRB-Wirkungsanalysen zu erhalten, wurde in Abstimmung mit dem AG beschlossen, zum einen die Ereignisauswahl zu überarbeiten und zum anderen die Niederschlagsdaten für die neu gewählten Ereignisse durch Skalierung in einzelnen Teilgebieten so zu korrigieren, dass sie die natürliche Variabilität der entstehenden Abflüsse auf Basis der gültigen Pegelstatistik wiedergeben (siehe Kapitel 5.2).

Die Neuauswahl resultierte in insgesamt 88 Ereignissen, von denen 71 bereits Bestandteil der ersten 120 simulierten Ereignisse waren. Aussortiert wurden diejenigen Ereignisse, die zu geringe Abflüsse an der Donau aufwiesen und an keinem der betrachteten Pegel einen Abfluss im Bereich HQ_{100} erreichten. Neu aufgenommen wurden zusätzliche Ereignisse mit Schwerpunkt in Gebieten, die in ClimEx einen systematisch zu geringen Niederschlag aufwiesen und somit nach der Korrektur möglicherweise doch einen ausreichend großen Abfluss erreichen könnten. Eine Auflistung der final gewählten Ereignisse findet sich in Anlage A.1.

5.2 Niederschlagsskalierung

Mit Rücksicht auf die in Kapitel 5.1 beschriebenen Erkenntnisse wurde der Niederschlag der 88 ausgewählten Ereignisse für die Einzugsgebiete der in Tabelle 4 aufgeführten Pegel skaliert. Die Skalierung des Niederschlags wurde in LARSIM über den Parameter KG (Korrekturfaktor Niederschlag) einheitlich für alle Ereignisse vorgenommen.

Als Grundlage für die Ermittlung von KG-Faktoren für die definierten Einzugsgebiete an Donauzuflüssen wurde jeweils ein spezifisches Referenzereignis herangezogen. Für dieses wurden vom AG Zielscheitelabflüsse berechnet und bereitgestellt (Tabelle 4). Die Berechnung der Zielscheitel basierte auf der Relation der bisherigen LARSIM-Ergebnisse zu den Ergebnissen der WaSiM-Berechnungen, sowie dem Vergleich der Grundgesamtheit der WaSiM-Abflüsse aus dem ClimEx-Ensemble mit der Grundgesamtheit der beobachteten Abflüsse (jeweils HQ_{100}).

Die KG-Faktoren in den Pegelkontrollbereichen der betroffenen Einzugsgebiete wurden so optimiert, dass am Auslass jeweils der vorgegebene Zielscheitel erreicht wurde. Als Ausgangspunkt dienten die bei der Modellkalibrierung ermittelten KG-Werte, die im Zuge der Optimierung jeweils um einen einheitlichen Faktor erhöht oder verringert wurden. Die so ermittelten KG-Faktoren wurden anschließend fixiert und im Projektfortlauf für die Berechnung aller Ereignisse verwendet.



Tabelle 4: Pegel Einzugsgebiete mit Niederschlagsskalierung, spezifisches Referenzereignis der Skalierung, simulierter Scheitelabfluss vor Skalierung (KG 1,0) und Ziel-Scheitel der Skalierung

Pegel (Einzugsgebiet)	Ereignis	Scheitel KG 1,0 [m ³ /s]	Ziel-Scheitel [m ³ /s]
Waldstetten, Günz	E076	375	158
Offingen, Mindel	E139	292	162
Pfaffenhofen, Zusam	E167	138	81
Druisheim, Schmutter	E288	220	113
Manching Bahnbrücke, Paar	E216	170	141
Beilngries o.d. Sulz, Altmühl	E026	158	289
Deuerling, Schwarze Laaber	E136	73	93
Heitzenhofen, Naab	E182	477	775
Marienthal, Regen	E041	583	802
Sylvenstein Gesamtzufluss, Isar	E006	571	1068

5.3 Ereignisanalyse

Auf Grundlage der 88 ausgewählten Antriebsdatensätze wurden mit der vollständigen LARSIM-Modellkette (siehe Kap. 4.2) 88 Simulationsläufe durchgeführt. Für jeden Lauf wurden simulierte Ganglinien an jeweils rund 480 Modellstützstellen ausgegeben und in digitaler Form bereitgestellt. Zudem wurden für die 13 Analysepegel an der Donau (siehe Abbildung 1) jeweils Ganglinien für den betreffenden Hochwasserzeitraum visualisiert. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 2.

Die Simulationsergebnisse der 88 Ereignisse zeigen eine deutliche Verbesserung der statistischen Einordnung der Abflüsse. Entlang der Donau sind in dieser Auswahl in allen Abschnitten in etwa so viele HQ₁₀₀-Ereignisse vertreten, wie statistisch erwartet. Naturgemäß treten häufig an mehreren Pegeln gleichzeitig große Abflüsse auf.

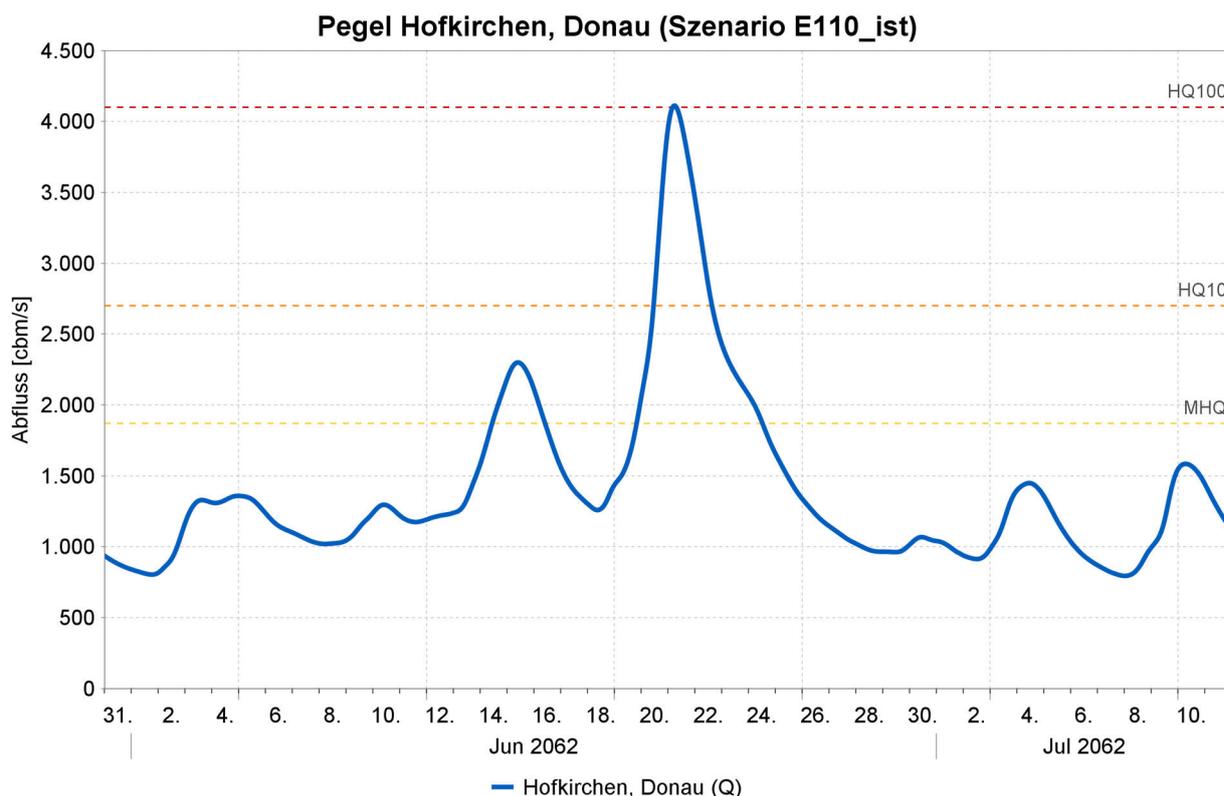


Abbildung 2: Abflussganglinie am Pegel Hofkirchen bei Ereignis E110 im Ist-Zustand, als Beispiel für die bereitgestellten Gangliniendarstellungen für die 13 Analysepegel an der Donau

Bei 72 der 88 Ereignisse tritt mindestens an einem Donaupegel ein Abfluss über HQ_{100} auf. Diese Ereignisse stellen die Grundmenge der Ereignisse dar, die an der Donau einen Überlastfall repräsentieren und bilden die Datengrundlage für die weiteren Analysen. Die simulierten Ganglinien des Ist-Zustands dieser 72 Rechenläufe wurden für 13 Donaupegel im Detail analysiert (zur Lage der Pegel siehe Abbildung 1). Im Zuge der Analyse wurden für die Pegel folgende Kennwerte berechnet:

- Zeitpunkt und Abfluss des Hauptscheitels
- Anzahl sekundärer (Neben-) Scheitel
- ggf. Zeitpunkt und Abfluss der sekundären (Neben-) Scheitel
- Anfangs- und Endzeitpunkt sowie Dauer des Hochwassers
- Anstiegszeit
- Gesamtfülle (Volumen) des Hochwassers
- Füllen über den HQ_T -Werten ($HQ_2 - HQ_{1000}$) und zugehörige Überschreitungsdauern

5.3.1 Methodik

In die Analyse gingen die simulierten Ganglinien für die letzten drei Monate des jeweiligen Szenarios ein. Der Zeitraum der meteorologischen Antriebsdaten (siehe Kap.3.2) und der Simulation wurde so gewählt, dass das Zielereignis jeweils im vorletzten Monat liegt.



Einige der Simulationsläufe weisen in dem 3-Monatszeitraum mehrere Wellen auf. Um sicherzustellen, dass bei der automatisierten Auswertung das eigentliche Zielereignis analysiert wird, wurde aus der Ganglinie zunächst ein vorläufiger Ereignisscheitel ermittelt. Dieser entspricht dem Maximum der Ganglinie innerhalb von sieben Tagen vor bis sieben Tage nach dem erwarteten Ereigniszeitpunkt (entnommen aus den Untersuchungen der LMU).

Die Ermittlung der **Hochwasserdauer** basiert auf einem Schwellenwert (MHQ) und einem vordefinierten Zeitraum von sieben Tagen vor dem vorläufigen Scheitel bis 14 Tage nach dem vorläufigen Scheitel. Der asymmetrische Zeitraum reflektiert den typischen Verlauf von Hochwasser-Wellen mit steilem Anstieg und flacherem Auslaufen. Innerhalb dieses Zeitraumes wurden alle relevanten Maxima der Ganglinie (Abfluss \geq MHQ) bestimmt. Der Anfangszeitpunkt des Hochwassers ergibt sich aus der zeitnah ersten Überschreitung von MHQ vor dem ersten relevanten Maximum, der Endzeitpunkt aus der zeitnah letzten Überschreitung von MHQ nach dem letzten relevanten Maximum. Der endgültige **Hochwasserscheitel** (Hauptscheitel) wurde jeweils als das höchste Maximum der Ganglinie innerhalb der Hochwasserdauer ermittelt.

Als **Sekundäre Scheitel** (bei mehrgipfligen Ereignissen) wurden relevante Maxima der Ganglinie ausgewiesen, wenn folgende Kriterien erfüllt waren:

- Wert des Maximums mindestens zwei Drittel des Hauptscheitelwerts
- Wert des größeren der beiden benachbarten Minima höchstens drei Viertel des Scheitelwerts des sekundären Maximums

Die **Anstiegszeit** wurde als der Zeitraum zwischen Anfangszeitpunkt und Zeitpunkt des Hauptscheitels ermittelt.

Bei der Berechnung der **Gesamtfülle**, der **Füllen über den HQ_T -Werten** und den zugehörigen **Überschreitungsdauern** wurde jeweils der komplette Hochwasser-Zeitraum (siehe oben) zugrunde gelegt.



5.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analysen wurden anschließend tabellarisch und visuell ausgewertet. Beispielhafte Darstellungen der Analysen finden sich in Anlage B.1 (für die Ereignisse der Wirkungsanalysen, siehe Kap. 6.3). Die Auswertungen umfassen die im Folgenden aufgeführten Inhalte:

- Tabellarische Zusammenstellung **aller Ergebnisse** pro Ereignis und Pegel (Scheitel, Volumen über HQ_T (MHQ, $HQ_2 - HQ_{1000}$), Hochwasserbeginn, Scheitelzeitpunkt, Hochwasserende, Anstiegszeit, Gesamtdauer, Dauer über HQ_T und gegebenenfalls sekundäre Scheitel)
- **Scheitelabflüsse** nach Ereignis und Pegel sowie **Rang** des Scheitels nach Pegel (Bsp. in Anlage B.1.1)
- **Überschreitung der HQ_T** ($HQ_{100} - HQ_{1000}$) nach Ereignis und Pegel (Bsp. in Anlage B.1.2)
- **Hochwasserdauer** in Stunden (klassifiziert) nach Ereignis und Pegel (Bsp. in Anlage B.1.3)
- **Anstiegszeit** (Dauer bis zum Scheitel) in Stunden (klassifiziert) nach Ereignis und Pegel
- **Hochwassergesamtvolumen** (klassifiziert) nach Ereignis und Pegel (Bsp. in Anlage B.1.4)
- **Hochwasservolumen über HQ_{100}** (klassifiziert) nach Ereignis und Pegel
- **Längsschnitte** der Hochwasserscheitel und -Zeitpunkte (Diagramme) pro Ereignis jeweils für 13 Analysepegel entlang der Donau (Bsp. in Anlage B.1.5)



6 Auswahl von Ereignissen für die Wirkungsanalyse

Für die Wirkungsanalyse von HRB in den Einzugsgebieten von Lech und Naab/Regen wurden aus den 72 Ereignissen, die für die Simulationen im Ist-Zustand verwendet wurden und einen Überlastfall an der Donau repräsentieren (Kap. 5.1 und 5.3), jeweils 10 repräsentative Ereignisse ausgewählt.

Die Auswahl zielte darauf ab, neben einer geeigneten Abflusskonstellation an der Donau im Bereich des Überlastfalls, die einen Flutpoldereinsatz wahrscheinlich macht, auch unterschiedliche Hochwasserjährlichkeiten in den Seiteneinzugsgebieten sowie verschiedene Genesetypen und Niederschlagsverteilungsmuster der Ereignisse so gut wie möglich zu repräsentieren. Als Grundlage wurden verschiedene Analysen zu den genannten Kriterien durchgeführt. Details dazu sind im folgenden Kapitel 6.1 beschrieben. Es ist zu berücksichtigen, dass die Analysen auf Basis der 120 zuerst ausgewählten Ereignisse durchgeführt wurden (siehe Kap. 5.1). Auf Basis dieser Auswertungen erfolgte ein Auswahlvorschlag möglichst verschiedenartiger Ereignisse vom AN (Kap. 6.2). Nach der Überarbeitung der Ereignisauswahl (Reduzierung auf 72 Ereignisse, Niederschlagsskalierung) wurde in Abstimmung mit dem AG aus Zeitgründen darauf verzichtet, die Analysen diesbezüglich zu aktualisieren, da sie weiterhin als Hintergrundinformation Gültigkeit beielten. Die endgültige Ereignisauswahl für die Wirkungsanalysen wurde schließlich durch den AG vorgenommen (Kap. 6.3). Sie konnte vornehmlich anhand der Abflusskonstellationen an der Donau und zusätzlicher Abflussanalysen in den seitlichen Einzugsgebieten (Lech und Naab/Regen) vorgenommen werden, da für die beiden Untersuchungsbereiche nicht so viele Ereignisse im geeigneten Überlastfallbereich vorlagen, dass diese weiter ausgedünnt werden mussten. Die Analyseergebnisse wurden dazu herangezogen, zu überprüfen, dass die gewählten Ereignisse verschiedenartige Charakteristika (Genesetypen, Niederschlagsverteilung, Sommer-/Winterereignisse, eingipflige und mehrgipflige Wellen) repräsentieren.

6.1 Kennwerte für die Ereignisauswahl

Als Grundlage für die Auswahl geeigneter Ereignisse wurde eine Reihe von Kennwerten abgeleitet, die auf verschiedenen zur Verfügung stehenden Datensätzen basieren.

Aus der in Kap. 5.3 beschriebenen Ereignisanalyse wurden folgende Kriterien übernommen:

- **Scheitelzeitpunkt** (Pegel Hofkirchen), klassifiziert nach Winter- und Sommerhalbjahr
- **Jährlichkeit** des Hochwasserscheitels in 4 Klassen (HQ₁₀₀ - HQ₂₀₀, HQ₂₀₀ - HQ₅₀₀, HQ₅₀₀ - HQ₁₀₀₀, >HQ₁₀₀₀)
- **Hochwasserdauer** unterteilt in 5 Klassen



Als Information zur Genese der Ereignisse standen Auswertungen aus der Studie der LMU (Ludwig et al. 2019) zur Verfügung. Daraus wurden folgende Kennwerte abgeleitet:

- **Niederschlagsintensität** für einen Zeitraum von 7 Tagen vor dem Ereignis, klassifiziert (5 Klassen)
- **Intensität der Schneeschmelze** für einen Zeitraum von 7 Tagen vor dem Ereignis, klassifiziert (5 Klassen)
- **relativer Anteil der Schneeschmelze** für einen Zeitraum von 7 Tagen vor dem Ereignis, klassifiziert (5 Klassen)

Die zugrundeliegenden Werte wurden den von der LMU bereitgestellten Auswertungs-Textdateien entnommen. Diese beinhalten 7-Tagessummen des Niederschlags und der Schneeschmelze für am Hochwassergeschehen beteiligte Teileinzugsgebiete des WaSiM-Modells (Ludwig et al. 2019) für jedes Ereignis und jeden Pegel, der bei dem betrachteten Ereignis ein HQ_{100} erreicht. Für die vorliegende Analyse wurden pro Ereignis die Ergebnisse für den am weitesten Donau-abwärts gelegenen Pegel verwendet. Die Teileinzugsgebietswerte wurden jeweils flächengewichtet gemittelt und anschließend in 5 Klassen unterteilt. Als Schwellenwerte für die Klasseneinteilung dienten die Quantile 0,2; 0,4; 0,6 und 0,8 auf Basis der Werte für alle Ereignisse.

Aus der o.g. Studie lagen auch Rasterdaten des Niederschlags vor, die Hinweise auf dessen räumliche und zeitliche Verteilung liefern. Da die Daten nicht georeferenziert waren, wurde in Abstimmung mit dem AG auf deren Verwendung verzichtet. Stattdessen wurden die im Folgenden aufgeführten Kriterien aus den meteorologischen Antriebsdaten (Niederschlag) für die LAR-SIM-Modellierung (Kap.3.2) abgeleitet.

- **räumliche Varianz des Niederschlags** für einen Zeitraum von 7 Tagen vor dem Ereignis (5 Klassen)
- **zeitliche Varianz des Niederschlags** für einen Zeitraum von 7 Tagen vor dem Ereignis (5 Klassen)
- **Niederschlagsschwerpunkt** bezogen auf vier Niederschlagsbereiche des Untersuchungsgebiets (Abbildung 3)

Als Grundlage zur Ermittlung dieser Kennwerte dienten Stundenwerte des Niederschlags für die Rasterzellen ($12,5 \times 12,5 \text{ km}^2$) des Donaeinzugsgebiets bis Hofkirchen. Aus den 7-Tagessummen für die Zellen wurde der Variationskoeffizient als Maß für die räumliche Varianz berechnet. Als Kriterium für die zeitliche Variation wurde der Variationskoeffizient aus den stündlichen Gebietsmitteln herangezogen. Beide Kennwerte wurden in je fünf Klassen unterteilt (Schwellenwerte: Quantile in 0,2-Schritten). Ein Niederschlagsschwerpunkt wurde dann ausgewiesen, wenn das 7-Tages-Niederschlagsmittel über einen von vier Bereichen (siehe Abbildung 3) um mindestens ein Drittel über dem Mittel des Gesamtgebiets lag.

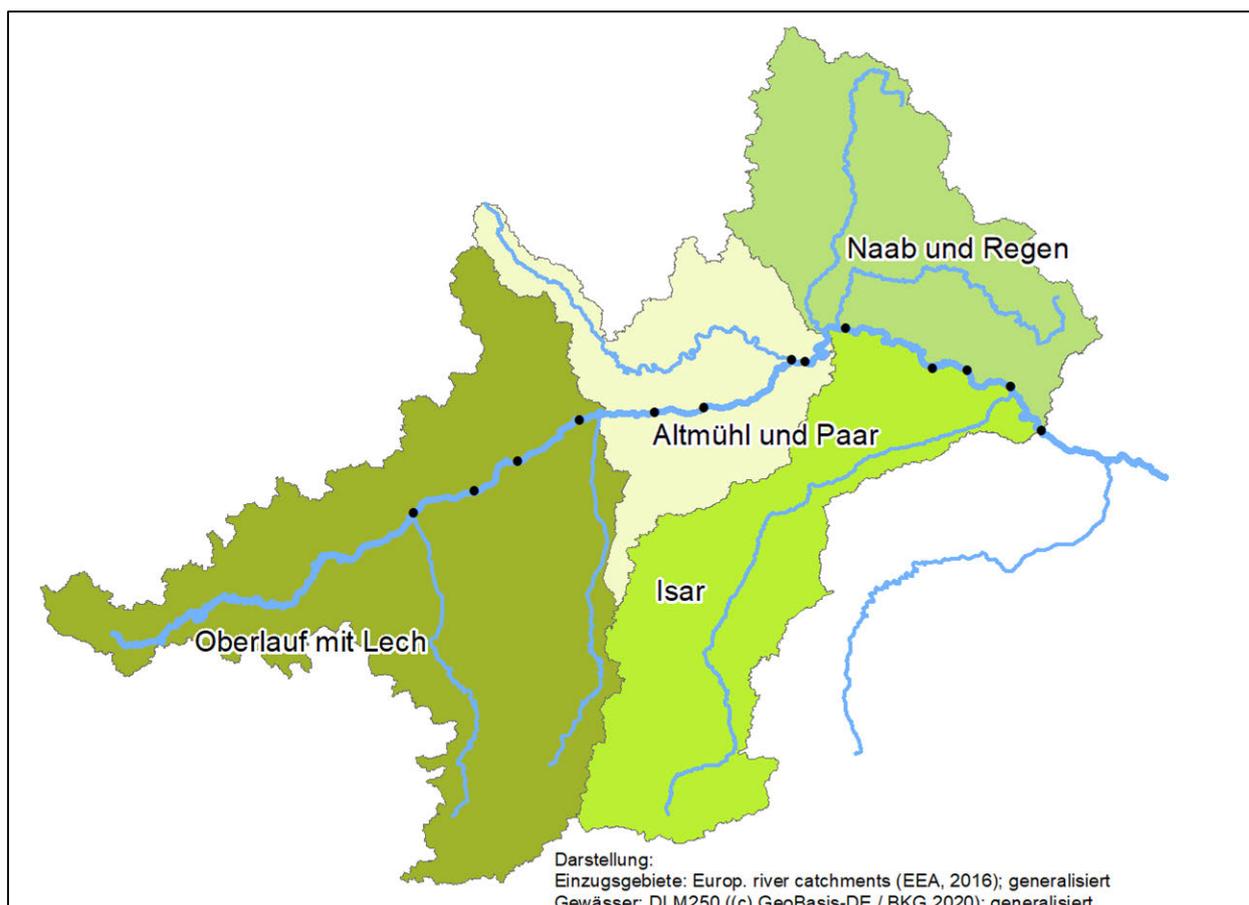


Abbildung 3: Vier Niederschlagsbereiche als Grundlage für die Ermittlung räumlicher Niederschlags-schwerpunkte im Donaeinzugsgebiet bis Pegel Hofkirchen

6.2 Auswahlvorschlag geeigneter Ereignisse

Auf Grundlage der ermittelten Kennwerte wurde ein Auswahlvorschlag der für die Wirkungsanalysen geeigneten Ereignisse getroffen, allerdings, wie einleitend erwähnt, ausgehend von den 120 zunächst simulierten Ereignissen für den Istzustand vor der Niederschlagskorrektur.

Bei dem Auswahlvorschlag lag der Fokus auf drei Donaupegeln: Neuburg und Schwabelweis, jeweils unterhalb der bei der Wirkungsanalyse zu untersuchenden Einzugsgebiete Lech bzw. Naab/Regen, sowie dem Pegel Hofkirchen. Diese Pegel wurden gewählt, um sowohl Ereignisse zu berücksichtigen, die regional zu einem Überlastfall führen, als auch Ereignisse, die in der gesamten Donau das HQ_{100} überschreiten. Die weitere Auswahl erfolgte separat für jeden dieser Pegel. Dazu wurden die Ereignisse nach Scheitelabfluss am Pegel in vier relevante Klassen ($> HQ_{100}$) unterteilt: $HQ_{100} - HQ_{200}$, $HQ_{200} - HQ_{500}$, $HQ_{500} - HQ_{1000}$, $>HQ_{1000}$. Die Ereignisse einer Klasse wurden anschließend hinsichtlich der weiteren Kriterien (Scheitelzeitpunkt, Hochwasserdauer, Niederschlagsintensität und -schwerpunkt, räumliche und zeitliche Varianz des Niederschlags, Intensität und Anteil der Schneeschmelze, siehe Kap. 6.1) verglichen. Um eine möglichst große Vielfalt unterschiedlicher Ereignistypen auszuwählen, wurden aus den Ereignissen einer HQ_T -Klasse solche in die Vorauswahl aufgenommen, die sich hinsichtlich der genannten Kriterien möglichst deutlich von den übrigen Ereignissen unterschieden. Die Entscheidung wurde dabei jeweils basierend auf einer vorwiegend qualitativen Bewertung getroffen. Auf diese Weise wurden



insgesamt 25 unterschiedliche Ereignisse vorausgewählt, wobei mehrere Ereignisse die Auswahlkriterien für zwei oder alle drei der betrachteten Pegel erfüllen.

6.3 Endgültige Auswahl

Im Zuge der Niederschlagkorrektur und Neusimulation der endgültigen 72 Ereignisse (siehe Kap. 5) wurden zusätzlich zu den 13 Donauegeln auch die Abflüsse an den seitlichen Donauzuflüssen im Ist-Zustand aus dem LARSIM-Modell ausgespielt und analysiert. Auf Grundlage dieser neuen Daten wurde die endgültige Auswahl der jeweils 10 Ereignisse für die Wirkungsanalysen an Lech und Naab/Regen vom AG getroffen. Das Hauptaugenmerk wurde dabei darauf gelegt, dass an der Donau unterhalb der Lech- und Naab/Regenmündung Abflusskonstellationen auftreten, die einen Flutpoldereinsatz erwarten lassen würden, dass also vor allem im unterhalb liegenden Donauabschnitt ein Überlastfall auftritt oder droht. Weitere Kriterien stellten eine unterschiedlich starke Beteiligung der seitlichen Donauzuflüsse am Hochwassergeschehen dar sowie die Ergebnisse der Ereignisanalyse (siehe Kap. 5.3) und die Kennwerte für die Ereignisauswahl (siehe Kap. 6.1) zur Einschätzung der Ereignischarakteristik.

6.3.1 Lech

Die für die Wirkungsanalyse Lech ausgewählten Ereignisse sind in Tabelle 5 aufgelistet. Für die Auswahl wurden in einem ersten Schritt 18 Ereignisse vorausgewählt, die bezüglich der Abflüsse in der Donau mögliche Szenarien für den Einsatz des Flutpolders Bertoldsheim darstellen und folgende Kriterien erfüllten:

- Relevantes Hochwasserereignis an der Donau unterhalb der Lech-Mündung mit einem Scheitelabfluss am Pegel Ingolstadt zwischen etwa 2.000 m³/s (etwas unter HQ₁₀₀, als Untergrenze eines möglichen drohenden Überlastfalls) und etwa 2.500 m³/s (etwas über HQ₅₀₀, als Obergrenze. Bei noch größeren Abflüssen ist mit einer Überlastung des Flutpolders Bertoldsheim alleine zu rechnen und somit keine allein stehende Wirkungsanalyse ohne Einsatz in Kombination mit anderen Flutpolderstandorten sinnvoll). Ingolstadt wurde als Referenzpegel gewählt, da seine Hochwasserstatistik besser abgesichert ist als die am Pegel Neuburg, der im Rückstaubereich der Staustufe Bergheim liegt.
- Scheitelabfluss der Donau oberhalb der Lech-Mündung (Pegel Donauwörth) unterhalb der Flutpoldereinsatzschwelle von rund 1.650 m³/s (entspricht rund HQ₁₀₀ +15 %), so dass kein lokaler Einsatz der schwäbischen Flutpolder notwendig wäre und eine allein stehende Wirkungsanalyse für Bertoldsheim möglich ist.

Geringe Abweichungen von den genannten Schwellenwerten wurden dabei im Einzelfall toleriert.

Aus dieser Vorauswahl wurden anschließend sieben Ereignisse anhand der Scheitelabflüsse in definierten Lech-Teileinzugsgebieten endgültig selektiert und zwar jeweils die drei Ereignisse mit den höchsten Scheiteln an der Wertach (Ereignisse E136, E168, E245), am Lech in Füssen (E031, E036, E138) und am Lech unterhalb der Wertachmündung (E168, E245, E303), damit Ereignisse



mit unterschiedlichen Schwerpunkten innerhalb des Lecheinzugsgebiets repräsentiert sind. Diese Ereignisse umfassen gleichzeitig auch die beiden größten Ereignisse in Lechbruck (Lech uh. Forggensee) und aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen Lechbruck und Augsburg (E036, E138 und E136, E303).

Weiterhin wurden zwei nicht Lech-betonte Hochwasser mit vergleichsweise geringem Abfluss im Lech ausgewählt (E 250, E276), um zu untersuchen, wie sich Flutpolder und Rückhaltemaßnahmen im Einzugsgebiet bei großen Abflussereignissen an der Donau ohne maßgebliche Beteiligung des Lech auswirken.

Schließlich wurde aus der Vorauswahl ein weiteres Ereignis (E042) mit geringer Niederschlagsintensität (siehe Kap. 6.1) selektiert, da diese Charakteristik ansonsten nicht in der Auswahl vertreten gewesen wäre. In der endgültigen Auswahl der 10 Ereignisse für die Wirkungsanalyse sind zudem sowohl Sommer- als auch Winterereignisse, Ereignisse mit unterschiedlicher Schneeschmelzintensität und -anteil sowie ein- und mehrgipflige Wellen enthalten.

Tabelle 5: Ereignisse für die Wirkungsanalyse Lech mit Scheitelabflüssen an ausgewählten Pegeln, Zugehörigkeit zu den drei größten Abflussscheiteln in Lech-Teileinzugsgebieten sowie weiteren Auswahlkriterien

Ereignis	Donauwörth, Donau [m³/s]	Augsburg u.d.W., Lech [m³/s]	Ingolstadt, Donau [m³/s]	Hofkirchen, Donau [m³/s]	Datum Scheitel Hofkirchen	3 größte Abflussscheitel in Teileinzugsgebieten	weitere Auswahlkriterien
E031	1529	941	2091	4164	24. Nov.	Füssen/Lech	
E036	1351	1239	1996	3185	12. Nov.	Füssen/Lech, Lechbruck/Lech	
E042	1621	974	2256	3592	06. Juni		geringe Niederschlagsintensität
E136	1363	1343	2107	4645	13. Juli	Wertach, Lech Zwischeneinzugsgebiet	
E138	1468	1166	2163	2770	26. Juli	Füssen/Lech, Lechbruck/Lech	
E168	1625	1378	2246	3379	22. Mai	Wertach, Lech uh. Wertach	
E245	1381	1480	2148	3881	18. Juni	Wertach, Lech uh. Wertach	
E250	1783	698	2129	3401	20. Feb.		geringer Lechabfluss
E276	1607	661	2071	3192	01. Juli		geringer Lechabfluss
E303	1512	1424	2550	4339	04. Aug.	Lech uh. Wertach, Lech Zwischeneinzugsgebiet	



6.3.2 Naab/Regen

Die für die Wirkungsanalyse im Bereich Naab/Regen ausgewählten Ereignisse sind in Tabelle 6 aufgelistet. Für die Auswahl wurden genau die 10 Ereignisse ausgewählt, die bezüglich der Abflüsse in der Donau mögliche Szenarien für den Einsatz der Flutpolder Eltheim und Wörthhof darstellen und folgende Kriterien erfüllen:

- Relevantes Hochwasserereignis an der Donau unterhalb der Regen-Mündung mit einem Scheitelabfluss am Pegel Schwabelweis ab etwa 3.400 m³/s (entspricht HQ₁₀₀, als Untergrenze eines möglichen drohenden Überlastfalls)
- Scheitelabfluss der Donau oberhalb der Naab-Mündung (Pegel Kelheimwinzer) nicht höher als HQ₁₀₀+15 % (rund 2.700 m³/s), ein lokaler Einsatz der oberhalb liegenden Flutpolder wurde aber auch bei Zuflüssen größer HQ₁₀₀ nicht angesetzt, um eine allein-stehende Wirkungsanalyse für Eltheim und Wörthhof durchzuführen.

Tabelle 6: Ereignisse für die Wirkungsanalyse Naab/Regen mit Scheitelabflüssen an ausgewählten Pegeln, Relation und zeitlicher Versatz der Abflussscheitel zwischen Regen und Naab

Ereignis	Kelheimwinzer, Don. [m ³ /s]	Heitzenhofen, Naab [m ³ /s]	Marienthal, Regen [m ³ /s]	Schwabelweis, Donau [m ³ /s]	Hofkirchen, Donau [m ³ /s]	Datum Scheitel Hofkirchen	Relation Abflussscheitel	Versatz [d]
E031	2431	668	971	3493	4164	24. Nov.	Regen > Naab	-1
E057	2201	755	926	3352	4107	02. Dez.	Regen > Naab	-1
E081	2069	728	785	3312	3777	22. Dez.	Regen > Naab	-1
E083	2486	491	738	3527	4396	10. Mai	Regen > Naab	-2
E136	2651	496	513	3679	4645	13. Juli	Naab = Regen	0
E144	1900	1121	522	3614	4260	16. Juli	Naab > Regen	0
E158	2171	677	557	3415	4430	27. Mai	Naab > Regen	0
E249	2528	519	779	3804	4346	21. Dez.	Regen > Naab	-2
E258	2122	897	639	3403	4214	14. Sep.	Naab > Regen	0
E309	2413	749	743	3837	4608	02. Feb.	Naab = Regen	-1

Geringe Abweichungen von den oben genannten Schwellenwerten wurden dabei im Einzelfall toleriert. Wie aus Tabelle 6 ersichtlich, repräsentieren die gewählten Ereignisse unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich der Abflussrelation zwischen Naab und Regen, der zeitlichen Abfolge der Scheitel der beiden Nebenflüsse sowie dem Beitrag zum Hochwassergeschehen an der Donau aus den Seitenzuflüssen. Anhand der Ereignisanalyse (Kap. 5.3 und 6.1) wurde zudem über-



prüft, dass die endgültige Auswahl für die Wirkungsanalyse sowohl Sommer- als auch Winterereignisse, Ereignisse mit unterschiedlicher Genese und Niederschlagsverteilung sowie ein- und mehrgipflige Wellen enthält.

7 Rückhaltebeckenstandorte für die Wirkungsanalyse

Für die Wirkungsanalyse von Hochwasserrückhaltebecken (HRB) im Donaeinzugsgebiet wurden aus der vorgegebenen Menge potenzieller Standorte (Kap.7.1) in den Einzugsgebieten von Lech, Naab und Regen solche Standorte ausgewählt, bei denen ein möglichst hoher Einfluss auf das Hochwasservolumen an der Donau zu erwarten war. Dazu wurde zunächst auf Basis der Lage und des spezifischen Speichervolumens der HRB eine Vorauswahl getroffen (Kap. 7.2). Für die verbleibenden Standorte wurden LARSIM-Berechnungen (Ist-Zustand, 88 Ereignisse) durchgeführt, um solche Standorte herauszufiltern, die potenziell einen relevanten Einfluss auf das Hochwassergeschehen an der Donau haben können (Kap. 7.3). Das sind Standorte, an denen einerseits nennenswerte Hochwasserabflüsse auftreten, und die andererseits ein ausreichendes Speichervolumen bereitstellen. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse und weiterer Kriterien wurde die Eignung ausgewählter Standorte bewertet (Kap. 7.4) und schließlich HRB-Kombinationen für die Wirkungsanalysen festgelegt (Kap. 7.5).

7.1 Datengrundlage: potenzielle HRB-Standorte

Vom AG wurden GIS-Datensätze (Punktshapefiles) mit potenziellen HRB-Standorten in den Einzugsgebieten von Lech, Naab und Regen bereitgestellt, die vorab in einer separat durchgeführten Studie durch die Firma Tractebel ermittelt wurden (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021). Beim Großteil der Standorte handelt es sich um HRB im Hauptschluss der Gewässer. Die Gesamtanzahl von Hauptschlussstandorten pro Seiteneinzugsgebiet wird aus Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: Anzahl der potenziellen HRB-Standorte im Hauptschluss nach Einzugsgebiet: insgesamt, nach der Standort-Vorauswahl (siehe Kap. 7.2) und nach der Vernetzung im LARSIM-Modell zur Abschätzung des effektiven Rückhaltevolumens (siehe Kap. 7.3)

Einzugsgebiet	HRB-Standorte HS gesamt	HRB Vorauswahl	HRB vernetzt
Lech	154	103	100
Naab	347	226	225
Regen	161	111	111

Für das Lech-Einzugsgebiet wurden aus der o. g. Standortsuche zusätzlich 23 Standorte im Nebenschluss von Lech (19 HRB) und Wertach (4 HRB) bereitgestellt, daneben ein HRB im Nebenschluss der Waldnaab im Naab-Einzugsgebiet. Zudem wurden an den bestehenden Talsperren Grüntensee (Lecheinzugsgebiet), Liebensteinspeicher, Silbersee und Eixendorfer See (alle drei Naabeinzugsgebiet) potenzielle Erweiterungsmöglichkeiten identifiziert.



Im Zuge der Bearbeitung fiel auf, dass sich die in den Eingangsdaten angegebenen Einzugsgebietsgrößen nicht auf die exakte Lage des HRB beziehen, sondern auf das Teileinzugsgebiet, in dem sie liegen. So weisen alle Standorte, die innerhalb eines Teileinzugsgebiets liegen, denselben Wert für das Einzugsgebiet auf, unabhängig davon, ob sie sich im oberen Bereich oder nahe des Auslasses befinden. Daraus können sich insbesondere für HRB-Standorte in den Oberläufen mit entsprechend kleinen Einzugsgebieten erhebliche relative Abweichungen zum realen Einzugsgebiet ergeben. Dieser Fehler nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgröße des Standorts tendenziell ab. Es ist zu berücksichtigen, dass die Unsicherheiten auch für die ebenfalls angegebenen Werte des spezifischen Speichervolumens der HRB gelten, da diese unter anderem aus der Einzugsgebietsfläche abgeleitet wurden. In Abstimmung mit dem AG wurde beschlossen, dennoch mit den vorliegenden Daten zu arbeiten. Einerseits, weil die Ableitung von punktscharfen Einzugsgebieten mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden wäre, zum anderen, weil die besonders problematischen Standorte – mit sehr kleinen Einzugsgebieten – für die vorliegende Untersuchung nicht vorrangig relevant sein dürften.

7.2 Vorauswahl von HRB-Standorten

Um den Aufwand bei der HRB-Auswahl zu reduzieren, wurden aus den Standortdatensätzen der Hauptschlussbecken solche Standorte entfernt, die mit Rücksicht auf die Zielstellung eindeutig nicht geeignet erschienen. Als Kriterien dafür dienten die Lage der HRB im Gewässernetz und ihr spezifisches Speichervolumen. Es wurden folgende zwei Fälle berücksichtigt:

- bei mehreren Standorten entlang desselben Gewässerabschnitts ohne relevantes Zwischeneinzugsgebiet wurden HRB ausgeschlossen, wenn das jeweils unterhalb liegende HRB ein höheres spezifisches Speichervolumen aufwies.
- bei HRB-Standorten, deren spezifisches Speichervolumen auch für Extremereignisse als ausreichend erachtet wurde, wurden weitere oberhalb in deren Einzugsgebiet gelegene HRB ausgeschlossen. Die dabei zugrunde gelegten Schwellenwerte des spezifischen Speichervolumens (Regen/Naab 241 mm, Lech 270 mm) wurden aus Extremniederschlägen des KOSTRA-Atlas abgeleitet (N100, Dauerstufe 72 Stunden).

Die Vorauswahl ergab eine Reduzierung der zu untersuchenden Standorte um insgesamt rund ein Drittel (siehe Tabelle 7).

7.3 Abschätzung des effektiven Rückhaltepotenzials der HRB-Standorte

Um einschätzen zu können, welchen potenziellen Einfluss die vorausgewählten HRB auf das Abflussvolumen besitzen, wurde für die Becken (Haupt- und Nebenschluss) ein sogenanntes effektives Rückhaltevolumen (V_{netto}) ermittelt. Das effektive Rückhaltevolumen wurde dabei definiert als das Minimum aus dem am jeweiligen Standort zur Verfügung stehenden Beckenvolumen (aus Standortsuche) und dem dort bei großen Hochwasserereignissen zu erwartenden Abflussvolumen.



Die Abschätzung des erwarteten Abflussvolumens an den HRB-Standorten wurde mit Hilfe von LARSIM-Modellläufen vorgenommen (Kap 7.3.2). Zur Ermittlung des effektiven Rückhaltevolumens (Kap. 7.3.3) war es vorab notwendig, die bei der Standortuntersuchung ermittelten Beckenvolumina zu korrigieren (Kap. 7.3.1).

7.3.1 Korrektur der Beckenvolumina

Bei der HRB-Standortuntersuchung (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) wurden die verfügbaren Beckenvolumina anhand von Geländemodellen ermittelt. Dabei wurde das Volumen, das das Fließgewässer im Hochwasserfall innerhalb des Staukörpers selbst beansprucht, zunächst nicht berücksichtigt. Dieses Volumen, im Folgenden als Vorfüllung bezeichnet, steht allerdings bei Becken im Hauptschluss für den Hochwasserrückhalt nicht zur Verfügung. Je nach den Gegebenheiten am Standort kann die Vorfüllung ein relevantes Ausmaß besitzen. Jedoch wird im LARSIM-Modell der Wasserspiegel des Abflusses im Gelände nicht abgebildet und somit auch keine natürlich auftretende Vorfüllung in Hauptschlussbecken simuliert. Um den Effekt trotzdem zu berücksichtigen, wurde beschlossen, eine Vorfüllung von den verfügbaren HRB-Volumina abzuziehen. Aus diesem Grund wurde auf Veranlassung des AG von der Firma Tractebel die Vorfüllung für 39 HRB-Standorte, für die hydraulische Modelle verfügbar waren, auf Basis hydraulischer 2D-Berechnungen für 100-jährliche Hochwasserereignisse berechnet. Details dazu finden sich im zugehörigen Projektbericht (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021). Bei drei Becken war die berechnete Vorfüllung so hoch, dass ihr korrigiertes Volumen die geforderte Mindestgröße von 1 Mio. m³ unterschreitet (Regen: HRB 1984 und 1372, Naab: HRB 1581). Diese Becken wurden folglich aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Die übrigen Werte der Vorfüllung liegen zwischen 0,2 % (Lech: HRB 279) und 34 % (Naab: HRB 529) des ursprünglichen Volumens. Im Mittel beträgt die ermittelte Vorfüllung dieser Becken rund 10 %. Für die weiteren Berechnungen wurden die Volumina der HRB um die berechnete Vorfüllung reduziert. Für eine Reihe von Becken war keine Vorfüllungsermittlung möglich. In Abstimmung mit dem AG wurde dort deshalb pauschal eine Vorfüllung von 10 % des zunächst ermittelten Volumens angenommen. In der weiteren Bearbeitung wurden für die Becken im Hauptschluss die so korrigierten Beckenvolumina (V_{HRB}) verwendet. Für Becken im Nebenschluss war keine Korrektur notwendig, da hier keine Vorfüllung durch den natürlichen Hochwasserabfluss stattfindet.

7.3.2 Berechnung des Abflussvolumens an den HRB-Standorte mit LARSIM

Um das Abflussvolumen an den vorausgewählten HRB-Standorten zu ermitteln, wurden LARSIM-Modellläufe im IST-Zustand der betreffenden Modelle für die 88 ausgewählten Ereignisse durchgeführt und ausgewertet.

Zu diesem Zweck war es zunächst notwendig, die HRB-Standorte den entsprechenden LARSIM-Modellelementen zuzuordnen und die für die Auswertung benötigten Hochwasserjährlichkeiten der Standorte abzuleiten.

Die **Zuordnung der HRB zu den LARSIM-Elementen** der jeweiligen Modelle erfolgte vorrangig mit Rücksicht auf ihre Lage im Gewässernetz. Die in den bereitgestellten Daten angegebene



Fläche des HRB-Einzugsgebietes wurde bei der Zuordnung mit Rücksicht auf die in Kap. 7.1 erläuterten Unsicherheiten nur zweitrangig berücksichtigt. Die Anzahl der in LARSIM vernetzten Standorte ist Tabelle 7 zu entnehmen. Vier der insgesamt 440 vorausgewählten Standorte konnten nicht sinnvoll zugeordnet werden, da das jeweilige Gewässer im betreffenden LARSIM-Modell nicht repräsentiert war, und wurden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Die **Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse (HQ_T)** an den ausgewählten HRB-Standorten wurden aus vom AG bereitgestellten Daten zur Hochwasserregionalisierung für Bayern (2016) übernommen (Polygon-Shapefile). Die räumliche Diskretisierung (Teileinzugsgebiete) dieser Daten entspricht den Teileinzugsgebieten, die bei der Parametrisierung der HRB-Standorte verwendet wurden. Insofern gelten für die Zuordnung der Werte zu den Standorten dieselben Unsicherheiten, wie sie in Kap. 7.1 beschrieben wurden. Für die Daten der Hochwasserregionalisierung gilt grundsätzlich, dass ihre Unsicherheit mit abnehmender Bezugsflächengröße steigt.

Für die vernetzten HRB-Standorte wurden **LARSIM-Berechnungen** durchgeführt. Dazu wurden die Modelle LE (Lech), D2 (Naab) und RE (Regen) im Ist-Zustand verwendet und mit den meteorologischen Daten für die 88 ausgewählten Ereignisse (siehe Kap. 5.1) angetrieben. Die resultierenden Ganglinien (88 pro HRB-Standort) wurden anschließend ausgewertet. Dabei kam dieselbe Methodik zum Einsatz wie bei der Auswertung der Rechenläufe für die Donaupegel (Kap. 5.3). Lediglich der Suchzeitraum für den Ereignisscheitel wurde um 3 Tage zurück verschoben um dem zeitlichen Vorlaufen der Hochwasserwellen in den Oberläufen Rechnung zu tragen.

7.3.3 Berechnung des effektiven Rückhaltevolumens

Das **effektive Rückhaltevolumen (V_{netto})** eines HRB wurde als ein maßgebliches Kriterium dafür betrachtet, inwieweit ein HRB zu einer Reduktion des Abflussvolumens in der Donau beitragen kann. Zum Vergleich des an den einzelnen Standorten zu erwartenden Abflussvolumens wurde aus der Auswertung der LARSIM-Läufe das Volumen über dem mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) gewählt. Um Ausreißer auszuschließen, wurde aus den 88 Werten, die pro Standort berechnet wurden, nicht das Maximum herangezogen, sondern das 0,95-Quantil ($V_{\text{üMHQ95}}$), also das Volumen über MHQ, das in 5 % der 88 Ereignisse übertroffen wird (im Folgenden als **potenzielles Hochwasservolumen** bezeichnet). Unter Berücksichtigung der Korrektur der Beckenvolumina (Kap. 7.3.1) wurde für jeden Standort das effektive Rückhaltevolumen (V_{netto}) als Minimum aus dem potenziellen Hochwasservolumen ($V_{\text{üMHQ95}}$) und dem Beckenvolumen (V_{HRB}) berechnet.

7.4 Eignungsbewertung und Auswahl geeigneter HRB-Standorte

Unter Berücksichtigung des berechneten effektiven Rückhaltevolumens (V_{netto} , siehe Kap. 7.3.3) wurde eine qualitative Bewertung der Standorte im Hauptschluss hinsichtlich ihrer Eignung für die Wirkungsanalysen vorgenommen. Dabei wurden für jedes der betrachteten Einzugsgebiete (Lech, Naab, Regen) die 15 Becken mit dem höchsten effektiven Rückhaltevolumen betrachtet. In die Bewertung gingen daneben die potenzielle Auslastung und die Lage der Becken im Ge-



wässernetz ein. Die potenzielle Auslastung beschreibt das prozentuelle Verhältnis zwischen potenziellem Hochwasservolumen (siehe Kap. 7.3.3) und Beckenvolumen und ist somit ein Maß dafür, ob bei der Ermittlung des effektiven Rückhaltevolumens das Beckenvolumen oder das Hochwasservolumen maßgebend war. Eine potenzielle Auslastung über 100 % (Überlastung) bedeutet demnach, dass das Volumen über MHQ eines erwarteten Extremereignisses größer ist als das mögliche Volumen des Beckens und insofern nicht vollständig zurückhalten werden kann. Im Anwendungsfall könnte der Wellenscheitel also nur auf einen Drosselabfluss reduziert werden, der über einem MHQ liegt. Im Gegensatz dazu verbleibt bei einer Auslastung unter 100 % bei dem erwarteten Extremereignis noch ein Puffer im verfügbaren Stauraum. Im Zweifelsfall wurden Becken mit geringerer Auslastung als besser geeignet betrachtet. Hinsichtlich der Lage der Becken wurden beispielsweise HRB als weniger geeignet eingestuft, bei denen sich am selben Gewässer, ohne erhebliches Zwischeneinzugsgebiet, ein Standort mit höherem effektiven Rückhaltepotenzial befindet.

In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind die Ergebnisse der qualitativen Bewertung und Auswahl geeigneter Standorte im Hauptschluss für die Wirkungsanalysen dargestellt. Die Auswahl wurde auf Grundlage der qualitativen Bewertung in Abstimmung zwischen dem AN, dem AG und den zuständigen WWA und Regierungen getroffen. Zudem erfolgte eine Plausibilitätsprüfung, um zu gewährleisten, dass in der automatisierten Identifikation in der Standortsuche (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) und der darauf basierenden Auswahl keine offensichtlichen Einschränkungen übersehen wurden. Dies führte dazu, dass einzelne Standorte nicht weiter berücksichtigt wurden. Dazu gehört unter anderem das HRB 1182 am Chamb (Regen), dessen Stauraum sich mit dem oberhalb gelegenen Drachensee überschneiden würde (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021).

Für Nebenschlussbecken wurden in der Standortsuche (Tractebel Hydroprojekt GmbH 2021) nur vergleichsweise wenige potenzielle Standorte identifiziert. Die Auswahl konnte daher ohne separate Vorbewertung anhand ihres effektiven Rückhaltevolumens und ihrer Lage getroffen werden. Am Lech liegen große potenzielle Nebenschlussstandorte in zwei räumlich begrenzten Bereichen unterhalb und oberhalb von Augsburg hintereinander. In jedem Bereich wurde in Abstimmung zwischen AG und den zuständigen WWA jeweils ein Standort gewählt, zusätzlich der größte Standort an der Wertach. Im Naabgebiet wurde der eine identifizierte Nebenschlussstandort in die Wirkungsanalysen aufgenommen. Die in der Standortsuche identifizierten potenziellen Erweiterungsmöglichkeiten bestehender großer Talsperren hatten für die Wirkungsanalysen keine Relevanz. Entweder wiesen zusätzliche, neue HRB am gleichen Gewässer größere effektive Rückhaltevolumina auf (Grüntensee, Eixendorfer See), oder die bestehenden Speicher reichten ohne Erweiterung aus, um das dort auftretende potenzielle Hochwasservolumen aufzunehmen (Liebensteinspeicher, Silbersee).



Tabelle 8: Eignungsbewertung der 15 HRB-Standorte (HRB-ID aus Standortsuche) im Hauptschluss mit dem größten effektiven Rückhaltevolumen (V_{netto}) im Lech-Einzugsgebiet (Bewertungsschema: + geeignet, o: bedingt geeignet in Kombination mit oder alternativ zu einem anderen HRB, - nicht geeignet); Auslastung: potenzielles Hochwasservolumen bezogen auf das Beckenvolumen) und Auswahl für die Wirkungsanalysen (fett markiert)

ID	V_{netto} [Mio.m ³]	Auslastung [%]	Bewertung	Lage	Bemerkung
1693	11,5	48	+	Wertach Oberlauf	größtes V_{netto}, ausreichend Puffer; Wahl als größtes Becken an oberer Wertach, kein zusätzliches oberhalb notwendig, da Becken nicht ausgelastet
1882	9,4	54	o	Wertach Oberlauf, direkt uh. Grüntensee	alternativ zu 1693, V_{netto} geringer
1728	9,4	90	o	Wertach Oberlauf, uh. 1759	alternativ zu 1693, V_{netto} geringer
1759	8,6	70	o	Wertach Oberlauf, oh. 1728	alternativ zu 1693, V_{netto} geringer
346	7,7	534	+	Lech, uh. Forggensee	erstes HRB uh. Forggensee, kein Puffer; Wahl als größtes Becken am Lech, Abdeckung zusätzliches Einzugsgebiet (EZG)
1747	6,5	57	+	Kirnach	ausreichend Puffer; Abdeckung seitliches Zwischen-EZG
1043	6,2	35	o	Gennach, oh. 1967	alternativ zu 1967, V_{netto} etwas höher; Abdeckung seitliches Zwischen-EZG, kein signifikantes Zwischen-EZG zu 1967, kein zusätzliches Becken notwendig, da nicht ausgelastet
1967	6,0	48	o	Gennach, uh. 1043	alternativ zu 1043, V_{netto} etwas geringer
1781	4,7	145	o	Vils, oh. Forggensee	Forggensee liegt unterhalb, daher Wirkung fraglich
374	3,7	1131	o	Wertach Unterlauf	V_{netto} gering, kein Puffer; Abdeckung Zwischen-EZG an Wertach
1606	3,6	571	o	Wertach, uh. 1693	in Kombination mit 1693, alternativ zu 1463, V_{netto} gering, kein Puffer; Abdeckung Zwischen-EZG an Wertach, EZG und V_{netto} größer als 1463
1157	3,2	1377	o	Wertach, uh. 1606	V_{netto} gering, kein Puffer; stärker überlastet und V_{netto} geringer als 1606
1267	3,0	70	o	Geltnach	ausreichend Puffer, V_{netto} gering; kleines EZG
1463	2,8	43	o	Lobach	in Kombination mit 1693, alternativ zu 1606, V_{netto} gering, ausreichend Puffer; kleineres EZG und V_{netto} als 1606
279	2,4	49	o	Wiesbach	V_{netto} gering, ausreichend Puffer; kleines EZG



Tabelle 9: Eignungsbewertung der 15 HRB-Standorte (HRB-ID aus Standortsuche) im Hauptschluss mit dem größten effektiven Rückhaltevolumen (V_{netto}) im Naab-Einzugsgebiet (Bewertungsschema: + geeignet, o: bedingt geeignet in Kombination mit oder alternativ zu einem anderen HRB, - nicht geeignet); Auslastung: potenzielles Hochwasservolumen bezogen auf das Beckenvolumen) und Auswahl für die Wirkungsanalysen (fett markiert)

ID	V_{netto} [Mio.m ³]	Auslastung [%]	Bewertung	Lage	Bemerkung
2421	8,8	144	+	Pfreimd Unterlauf	größtes V_{netto}, Wahl als größtes Becken, kein weiteres HRB im Oberlauf dazu, da nicht sehr stark überlastet und sonst mit zusätzlichem Volumen kein zusätzliches EZG abgedeckt wird
2792	8,1	118	+	Schwarzach Mittel- lauf, uh. Eixendorfer See	größtes V_{netto} an der Schwarzach, in Kombination mit anderen HRB an der Schwarzach; <i>Ausschluss in Plausibilisierung aufgrund Überlagerung mit Eixendorfer See</i>
2425	6,9	173	o	Pfreimd Mittellauf	alternativ zu 2347, kein Puffer, keine Kombination mit 2421 (siehe dort)
283	5,1	31	+	Tirschenreuther Waldnaab Unterlauf	ausreichend Puffer; Abdeckung zusätzliches EZG
3952	3,7	50	+	Lauterach	ausreichend Puffer; Abdeckung zusätzliches EZG
4035	3,0	34	o	Forellenbach, oh. 4148	in Kombination mit 4148 (direkt uh.), <i>kleines EZG</i>
4148	3,0	41	o	Forellenbach, uh. 4035	in Kombination mit 4035 (direkt oh.), <i>kleines EZG</i>
2347	2,8	307	o	Pfreimd Oberlauf	alternativ zu 2425, kein Puffer; keine Kombination mit 2421 (siehe dort)
3154	2,8	690	o	Schwarzach vor Mündung	2792 (oberhalb) mit deutlich größerem V_{netto}, aber relativ großes Zwischeneinzugsgebiet, evtl. in Kombination mit 2799, kein Puffer; Gewählt, da 2792 nicht möglich
2799	2,3	82	o	Ascha Unterlauf	in Kombination mit oder alternativ zu 3154; Kombination mit 3154 und 4430, da 2792 nicht möglich
4430	2,2	147	o	Schwarzach Ober- lauf	uh. gelegene Becken erscheinen geeigneter, evtl. in Kombination mit 2792; Kombination mit 3154 und 2799, da 2792 nicht möglich
419	2,1	6	-	Tirschenreuther Waldnaab, uh. Lie- bensteinspeicher	283 (unterhalb) ist besser geeignet
936	2,1	124	o	Haidenaab	V_{netto} gering, kein Puffer; Abdeckung zusätzliches EZG
1882	1,9	34	o	Fensterbach	V_{netto} gering, ausreichend Puffer; gewählt (Abdeckung zusätzliches EZG) aber nicht in Kombinationen verwendet wg. kleinem EZG
101	1,9	133	o	Fichtelnaab	V_{netto} gering, kein Puffer; Abdeckung zusätzliches EZG



Tabelle 10: Eignungsbewertung der 15 HRB-Standorte (HRB-ID aus Standortsuche) im Hauptschluss mit dem größten effektiven Rückhaltevolumen (V_{netto}) im Regen-Einzugsgebiet (Bewertungsschema: + geeignet, o: bedingt geeignet in Kombination mit oder alternativ zu einem anderen HRB, - nicht geeignet); Auslastung: potenzielles Hochwasservolumen bezogen auf das Beckenvolumen) und Auswahl für die Wirkungsanalysen (fett markiert)

ID	V_{netto} [Mio.m ³]	Auslastung [%]	Bewertung	Lage	Bemerkung
405	14,8	187	+	Schwarzer Regen	in Kombination mit 766 und evtl. 490, kein Puffer
766	11,9	426	+	Regen vor Mündung Weißer Regen	in Kombination mit 405 und evtl. 490, kein Puffer; <i>Alle Standorte außer 1182, 834 und 821 liegen oberhalb Standort 766; nur Kombination weniger Becken notwendig, da große V_{netto} und keine Abdeckung zusätzliches EZG</i>
490	11,7	247	o	Schwarzer Regen	in Kombination mit 405 und 766, kein Puffer
275	4,8	327	o	Schwarzer Regen Oberlauf	in Kombination mit 178 oder 211 oder alternativ zu beiden, kein Puffer
1182	3,8	55	+	Chamb, uh. Drachensee	unabhängig von den anderen Standorten, ausreichend Puffer; <i>Ausschluss in Plausibilisierung Aufgrund Überlagerung mit Drachensee</i>
178	3,5	43	o	Kleiner Regen	in Kombination mit 211 oder 275, ausreichend Puffer; <i>gewählt aber nicht in Kombinationen verwendet, da größere Becken unterstrom ausreichen, um Zielvolumen zu erreichen</i>
211	3,2	198	o	Großer Regen	in Kombination mit 178 oder 275, kein Puffer; <i>gewählt aber nicht in Kombinationen verwendet, da größere Becken unterstrom ausreichen, um Zielvolumen zu erreichen</i>
163	2,6	71	-	Kleiner Regen, oberhalb 178	178 (uh. am Kleinen Regen) besser geeignet
151	2,4	8	-	Kleiner Regen, oberhalb 163	178 (uh. am Kleinen Regen) besser geeignet
611	2,2	77	o	Röhrbach	kleines EZG, V_{netto} gering, vermutlich geringer Einfluss
364	1,8	104	-	Schwarzer Regen	uh. liegende HRB 405 und 490 besser geeignet
310	1,7	34	-	Rinchnacher Ohe	uh. liegende HRB 405 und 490 besser geeignet
834	1,7	192	-	Weißer Regen, unterhalb 821	V_{netto} etwas größer als 821 (oh.), kein Puffer; <i>Abdeckung zusätzliches EZG, etwas größeres V_{netto} und EZG als 821</i>
821	1,6	51	o	Weißer Regen, oberhalb 834	V_{netto} etwas geringer 834 (uh.), ausreichend Puffer
32	1,6	35	-	Große Deffernik, unterhalb 34	geringes V_{netto} , 211 (unterhalb am Großen Regen) besser geeignet



7.5 HRB-Kombinationen für die Wirkungsanalyse

Die HRB-Kombinationen (Varianten) für die Wirkungsanalysen im Lech-Einzugsgebiet sowie für die Einzugsgebiete von Naab und Regen wurden vom AG festgelegt (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12). Als Grundlage für die Auswahl der Kombinationen dienten das effektive Rückhaltepotenzial der Becken (siehe Kap. 7.3) und die jeweils abgedeckte Einzugsgebietsfläche.

Das Gesamtvolumen der HRB einer Variante wurde zunächst so festgelegt, dass es dem Volumen der jeweils zum Vergleich stehenden Flutpolder an der Donau entsprach. Für den Lech ist dies der Flutpolder Bertoldsheim mit 18 Mio. m³, für Naab und Regen die Flutpolder Eltheim und Wörthhof mit zusammen 30,5 Mio. m³. Daneben wurden zusätzliche Varianten mit doppeltem Speichervolumen definiert (Lech: Varianten 5 bis 7, Naab/Regen: Variante 6). Für die einzelnen HRB einer Variante wurde in der Regel das effektive Rückhaltevolumen (siehe Kap. 7.3.3) als Beckenvolumen angesetzt. Um das geforderte Gesamtvolumen genau einstellen zu können, musste das Volumen einzelner Becken angepasst werden (siehe Spalte V Var. in Tabelle 11 und Tabelle 12). Eine Erhöhung wurde dabei nur in den Grenzen der bei der Standortanalyse ermittelten Maximalvolumina vorgenommen.

Um die Wirkung des dezentralen Hochwasserrückhalts umfassend beurteilen zu können, wurde darauf geachtet, möglichst unterschiedliche Speicherszenarien zu berücksichtigen. So wurden jeweils sowohl HRB-Kombinationen berücksichtigt, die ein möglichst großes Einzugsgebiet abdecken als auch solche, die möglichst wenige Becken mit jeweils möglichst großem effektivem Rückhaltevolumen enthalten. Zudem wurden weitere Kombinationen ohne die Becken mit dem größten Einzugsgebiet oder dem größten effektiven Rückhaltevolumen gewählt, um zu zeigen, wie sich die Rückhaltewirkung verhält, sollten die hydrologisch wirksamsten Beckenoptionen nicht umsetzbar sein.

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die für die beiden Untersuchungsgebiete festgelegten HRB-Kombinationen mit den jeweils zugehörigen Becken und deren Volumina. Aus der Bemerkung zu den Varianten werden die zugrundeliegenden Auswahlkriterien deutlich. Die Variante 0 kennzeichnet jeweils die Vergleichsvariante, in der nur die Flutpolderpolder an der Donau berücksichtigt sind.



Tabelle 11: HRB-Kombinationen (Varianten) für die Wirkungsanalyse im Lech-Einzugsgebiet mit insgesamt abgedeckter Einzugsgebietsfläche (EZG), gerundeter Summe der Beckenvolumina (Σ V Var.), zugehörigen HRB, HRB-Typ (HS: Hauptschluss, NS: Nebenschluss) und angepasstem Volumen (V Var.) der Becken

Var.	Bemerkung Auswahl	EZG [km ²]	Σ V Var. [Mio m ³]	HRB-ID	HRB-Typ	Gewässer	V Var. [Mio m ³]
0	Flutpolder Bertoldsheim	-	18	100	NS	Donau	18
1	größtes EZG, Flutpolder 11 (Lech)	3.834	18	11	NS	Lech	18 ¹⁾
1a	wie Var. 1 mit alternativer Steuerung, exemplarisch für 1 Ereignis	3.834	18	11	NS	Lech	18 ¹⁾
2	größtes EZG (ohne Flutpolder 11)	2.886	18	346	HS	Lech	7,8 ²⁾
				29	NS	Wertach	6,4 ²⁾
				374	HS	Wertach	3,8 ²⁾
3	größtes effektives Rückhaltepotenzial (ohne Flutpolder 11)	2.031	18	346	HS	Lech	7,7
				1693	HS	Wertach	10,3 ¹⁾
4	größtes EZG (ohne Flutpolder 11 sowie HRB 346 und 374)	883	18	1606	HS	Wertach	3,6
				1043	HS	Gennach	8,1 ²⁾
				29	NS	Wertach	6,3
5	wie Var. 1, doppeltes Gesamtvolumen	3.834	36	11	NS	Lech	36
6	größtes EZG, doppeltes Gesamtvolumen	3.202	36	346	HS	Lech	7,7
				1606	HS	Wertach	3,6
				1043	HS	Gennach	8,1 ²⁾
				23	NS	Lech	6,6 ¹⁾
				29	NS	Wertach	6,3
				374	HS	Wertach	3,7
				346	HS	Lech	7,7
7	geeignete HRB ohne NS-Becken; doppeltes Gesamtvolumen	2.886	36	1693	HS	Wertach	10,3 ¹⁾
				1747	HS	Kirnach	2,6 ¹⁾
				1043	HS	Gennach	8,1 ²⁾
				1606	HS	Wertach	3,6
				374	HS	Wertach	3,7

¹⁾ Beckenvolumen im Vergleich zum effektiven Rückhaltepotenzial reduziert

²⁾ Beckenvolumen im Vergleich zum effektiven Rückhaltepotenzial erhöht



Tabelle 12: HRB-Kombinationen (Varianten) für die Wirkungsanalyse in den Einzugsgebieten von Naab (N) und Regen (R) mit insgesamt abgedeckter Einzugsgebietsfläche (EZG), gerundeter Summe der Beckenvolumina (ΣV Var.), zugehörigen HRB, HRB-Typ (HS: Hauptschluss, NS: Nebenschluss) und angepasstem Volumen (V Var.) der Becken

Var.	Bemerkung Auswahl	EZG [km ²]	ΣV Var. [Mio m ³]	HRB-ID	HRB-Typ	Gewässer	V Var. [Mio m ³]
0	Flutpolder Eltheim & Wörthhof	-	30,5	100	NS	Donau	15,1
				101	NS	Donau	15,4
1	größtes EZG	3.813	30,5	9000	NS	Waldnaab (N)	1,4
				936	HS	Haidenaab (N)	2,1
				2421	HS	Pfreimd (N)	8,8
				3154	HS	Schwarzach (N)	2,8
				3952	HS	Lauterach (N)	3,4 ²⁾
				766	HS	Regen (R)	11,9
				9000	NS	Waldnaab (N)	1,4
2	größtes EZG mit gleicher HRB-Anzahl in Naab und Regen	3.419	30,5	2421	HS	Pfreimd (N)	8,8
				3154	HS	Schwarzach (N)	2,8
				490	HS	Schw. Regen (R)	3,9 ¹⁾
				834	HS	Weißer Regen (R)	1,7
				766	HS	Regen (R)	11,9
3	größtes effektives Rückhaltepotenzial mit möglichst ausgewogener Verteilung auf Naab und Regen	1.387	30,5	283	HS	Tirschenr. Waldnaab (N)	6,8 ²⁾
				2421	HS	Pfreimd (N)	8,8
				405	HS	Schw. Regen (R)	14,8
4	größtes EZG ohne 766 (Regen) sowie 9000 (NS), 2421, 3154 (alle Naab)	1.859	30,5	283	HS	Tirschenr. Waldnaab (N)	6,1 ²⁾
				101	HS	Fichtelnaab (N)	1,9
				936	HS	Haidenaab (N)	2,1
				4430	HS	Schwarzach (N)	2,2
				2799	HS	Ascha (N)	2,3
				3952	HS	Lauterach (N)	4,2 ²⁾
				490	HS	Schw. Regen (R)	11,7
5	größtes effektives Rückhaltepotenzial ohne 490, 766 (Regen) sowie 9000 (NS), 2421, 3154 (alle Naab) mit möglichst ausgewogener Verteilung auf Naab und Regen	998	30,5	283	HS	Tirschenr. Waldnaab (N)	6,5 ²⁾
				3952	HS	Lauterach (N)	4,3 ²⁾
				275	HS	Schw. Regen (R)	4,8
				405	HS	Schw. Regen (R)	14,8



Var.	Bemerkung Auswahl	EZG [km ²]	Σ V Var. [Mio m ³]	HRB-ID	HRB-Typ	Gewässer	V Var. [Mio m ³]
6	Naab: alle HRB aus Var. 1-5, Regen: größtes EZG bei minimierter Beckenanzahl, doppeltes Gesamtvolumen	3.866	61	283	HS	Tirschenr. Waldnaab (N)	6,8 ²⁾
				101	HS	Fichtelnaab (N)	1,9
				936	HS	Haidenaab (N)	2,1
				2421	HS	Pfreimd (N)	8,8
				4430	HS	Schwarzach (N)	2,2
				2799	HS	Ascha (N)	2,3
				3952	HS	Lauterach (N)	4,3 ²⁾
				9000	NS	Waldnaab (N)	1,4
				3154	HS	Schwarzach (N)	2,8
				405	HS	Schw. Regen (R)	14,8
834	HS	Weißer Regen (R)	1,7				
766	HS	Regen (R)	11,9				

¹⁾ Beckenvolumen im Vergleich zum effektiven Rückhaltepotenzial reduziert

²⁾ Beckenvolumen im Vergleich zum effektiven Rückhaltepotenzial erhöht

8 Wirkungsanalyse großer HRB in den Einzugsgebieten von Lech sowie Naab und Regen

Die Wirkungsanalysen für die Einzugsgebiete Lech sowie Naab/Regen wurden für die ausgewählten Hochwasserereignisse (siehe Kap. 6.3) durchgeführt. Ziel dabei war es, die Auswirkungen verschiedener Rückhalteszenarien auf das Hochwassergeschehen an der Donau vergleichend zu beurteilen. Als Referenz dienen die Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand (Kap. 5). Diese wurden verglichen mit Ergebnissen für die ausgewählten HRB-Kombinationen (Kap. 7.5). Die HRB-Kombinationen umfassen jeweils die Flutpolder-Variante (Variante 0), in der nur die jeweils relevanten Flutpolder an der Donau aktiv sind, sowie weitere Varianten mit mehreren dezentral angeordneten HRB in den Einzugsgebieten.

Um die HRB-Kombinationen zu simulieren, wurden die jeweils berücksichtigten HRB in den LARSIM-Modellen implementiert und ihre Steuerung optimiert (Kap. 8.1). Die Ergebnisse wurden anschließend grafisch und tabellarisch dargestellt (Kap. 8.2) und getrennt für die beiden Untersuchungsgebiete ausgewertet und analysiert (Lech: Kap. 8.3 und Naab/Regen: Kap. 8.4).

8.1 Umsetzung der HRB-Kombinationen in den Modellen

Die Becken der berücksichtigten HRB-Kombinationen wurden in die LARSIM-Modelle implementiert. Mit Rücksicht auf ihre Wirkungsweise kamen dabei für Becken im Nebenschluss und Becken im Hauptschluss verschiedene Methoden zum Einsatz (Kap. 8.1.1 und 8.1.2). Um die bestmögliche Wirkung zu erzielen, wurde die Steuerung der Becken jeweils ereignisspezifisch optimiert (Kap. 8.1.3). Auf dieser Grundlage wurden die Simulationsläufe für die HRB-Kombinationen durchgeführt (Kap. 8.1.5).



Zusammenstellungen der implementierten HRB finden sich in Tabelle 13 für den Lech und in Tabelle 14 für Naab und Regen. Die Lage der Becken wird aus den Karten in Abbildung 4 (Lech) und Abbildung 5 (Naab/Regen) ersichtlich.

Tabelle 13: Für die Wirkungsanalyse Lech implementierte HRB mit HRB-TYP (HS: Hauptschluss, NS: Nebenschluss), Einzugsgebietsfläche (EZG), LARSIM-Zuordnung (Element und Modell) und effektivem Rückhaltevolumen (V_{netto}). Flutpolder an der Donau: ^{a)} Bertoldsheim

HRB-ID	Typ	Gewässer	EZG [km ²]	LARSIM- Element	Modell	V_{netto} [Mio.m ³]
346	HS	Lech	1859	2209	LE	7,7
23	NS	Lech	2320	2731	LE	7,9
1693	HS	Wertach	172	2971	LE	11,5
1606	HS	Wertach	300	3107	LE	3,6
1747	HS	Kirnach	59	3220	LE	6,5
29	NS	Wertach	644	3522	LE	6,3
1043	HS	Gennach	239	3852	LE	6,2
374	HS	Wertach	1027	3951	LE	3,7
11	NS	Lech	3834	146	D2	41,5
100 ^{a)}	NS	Donau	19177	240	D2	-

Tabelle 14: Für die Wirkungsanalyse Naab/Regen (N/R) implementierte HRB mit HRB-TYP (HS: Hauptschluss, NS: Nebenschluss), Einzugsgebietsfläche (EZG), LARSIM-Zuordnung (Element und Modell) und effektivem Rückhaltevolumen (V_{netto}). Flutpolder an der Donau: ^{a)} Eltheim, ^{b)} Wörthhof

HRB-ID	Typ	Gewässer	EZG [km ²]	LARSIM- Element	Modell	V_{netto} [Mio.m ³]
275	HS	Schwarzer Regen (R)	353	410	D2	4,8
405	HS	Schwarzer Regen (R)	570	660	D2	14,8
490	HS	Schwarzer Regen (R)	628	728	D2	11,7
766	HS	Regen (R)	997	1169	D2	11,9
834	HS	Weißer Regen (R)	89	1283	D2	1,7
283	HS	Tirschenreuther Waldnaab (N)	291	5506	D2	5,1
101	HS	Fichtelnaab (N)	153	5595	D2	1,9
9000	NS	Waldnaab (N)	971	5884	D2	1,1
936	HS	Haidenaab (N)	310	6064	D2	2,1
2421	HS	Pfreimd (N)	526	6848	D2	8,8
4430	HS	Schwarzach (N)	246	7075	D2	2,2
2799	HS	Ascha (N)	94	7248	D2	2,3
3154	HS	Schwarzach (N)	836	7408	D2	2,8
3952	HS	Lauterach (N)	137	8343	D2	3,7
100 ^{a)}	NS	Donau	35668	232	D3	-
101 ^{b)}	NS	Donau	35668	233	D3	-

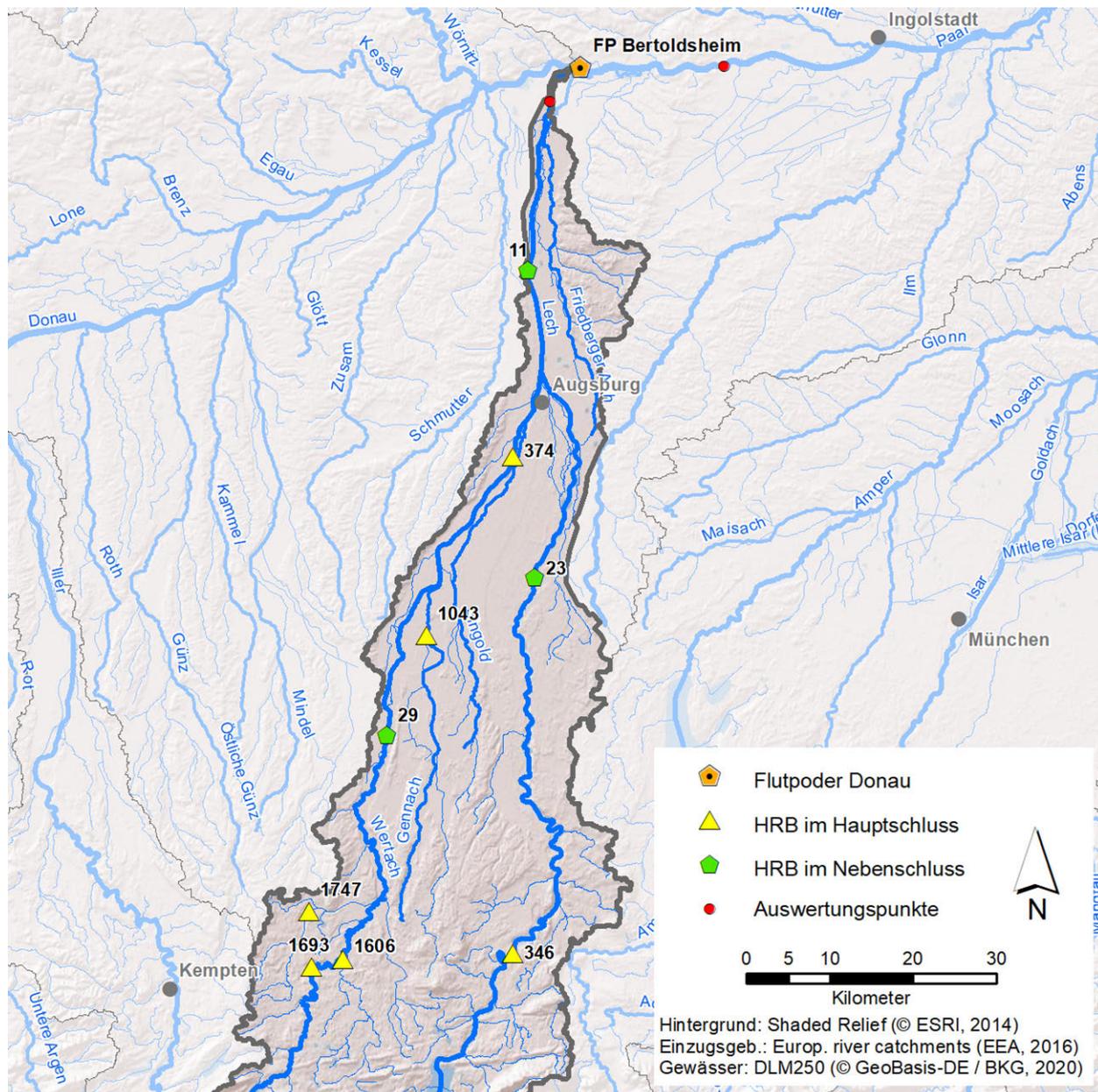


Abbildung 4: Lage und Kennnummer der für die Wirkungsanalyse ausgewählten Haupt- und Nebenschluss-HRB im Einzugsgebiet des Lech

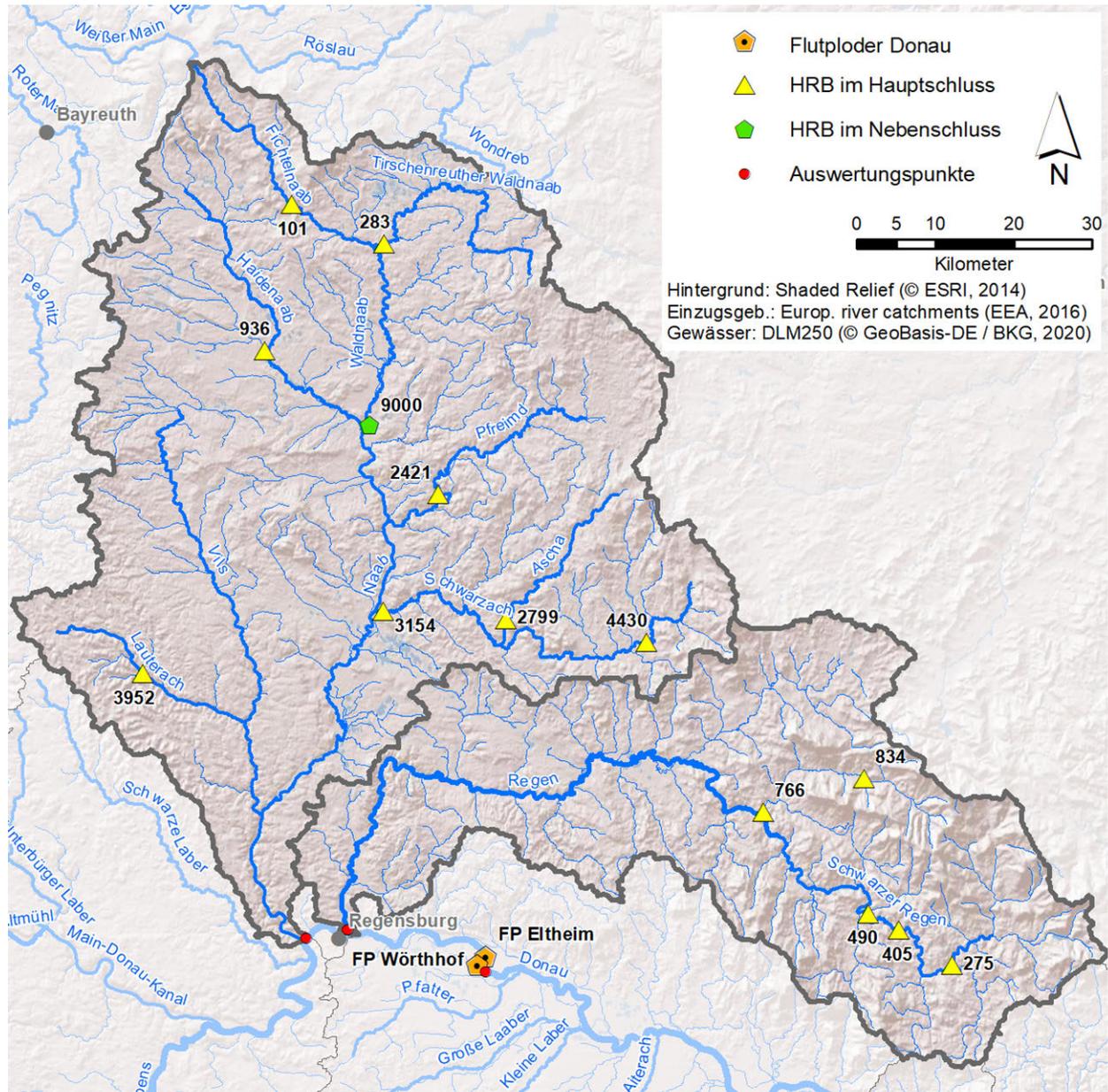


Abbildung 5: Lage und Kennnummer der für die Wirkungsanalyse ausgewählten Haupt- und Nebenschluss-HRB in den Einzugsgebieten von Naab und Regen

8.1.1 HRB im Nebenschluss

HRB im Nebenschluss können in LARSIM als gewöhnliche Rückhaltebecken implementiert werden, die über eine Verzweigung aus dem Hauptstrang angebunden werden. In der Regel erfordert dies eine vergleichsweise aufwändige Erweiterung des Modells, um ein Element abseits des regulären Gewässernetzes für das HRB zu setzen. Entsprechend der Anforderungen der Leistungsbeschreibung und nach Abstimmung mit dem AG war für die Nebenschlussbecken in dieser Untersuchung keine Entlastung vorzusehen. Aus diesem Grund wurde auf den Einbau expliziter Becken verzichtet. Stattdessen wurde jeweils lediglich eine Verzweigung in das Modell integriert, über die der Abfluss oberhalb eines definierten Schwellenwertes aus dem Hauptstrang ausgeleitet wird. Das ausgeleitete Volumen gelangt anschließend nicht wieder zurück in das Gewässernetz (keine Entlastung). Die Verzweigungen für die HRB im Nebenschluss wurden jeweils im



Bereich der vorgesehenen Einlassbauwerke vernetzt. Dieses Verfahren wurde in gleicher Weise für die drei Flutpolder an der Donau und die vier Nebenschlussbecken an den Seitengewässern (Lech, Wertach, Naab) umgesetzt. Die Zuordnung zu den LARSIM-Elementen der betroffenen Modelle wird aus Tabelle 13 und Tabelle 14 ersichtlich.

8.1.2 HRB im Hauptschluss

Die HRB im Hauptschluss wurden als Rückhaltebecken mit konstantem Regelabfluss in die Modelle implementiert. Sie wurden entsprechend ihrer Lage im Gewässernetz auf bestehenden Modellelementen vernetzt, so dass keine Anpassung der räumlichen Modellstruktur erforderlich war (zur LARSIM-Zuordnung siehe Tabelle 13 und Tabelle 14). Bei HRB mit konstantem Regelabfluss erfolgt ein Einstau sobald der Zufluss den Regelabfluss RQ überschreitet. Bei leerem Becken und einem Zufluss unter RQ entspricht die Abgabe dem Beckenzufluss, andernfalls wird die Abgabe auf RQ gedrosselt. In Abstimmung mit dem AG und im Gegensatz zu den HRB im Nebenschluss wurde für HRB im Hauptschluss eine Zwischenentlastung bei kurzzeitigem Unterschreiten des RQ innerhalb der betrachteten Ereignisse zugelassen. Mit Erreichen der maximalen Füllung wurden die Becken deaktiviert, so dass nach dem Ereignis keine Entlastung berücksichtigt wurde.

8.1.3 Optimierte Steuerung der HRB

In der Wirkungsanalyse sollte der untersuchte Rückhalt bei allen Ereignissen möglichst optimal eingesetzt werden. Mit einer Ausnahme (Lech, Variante 1a, siehe Kap. 8.1.4) wurden die HRB für die Wirkungsanalyse so gesteuert, dass am Beckenstandort eine optimale Scheitelkappung bei möglichst vollständiger Ausschöpfung des HRB-Volumens erzielt wurde. Aufgrund von Vorhersageunsicherheiten und der zum Teil langen Laufzeiten von den im Einzugsgebiet verteilten Hochwasserrückhaltebecken bis zur Donau ist es im Allgemeinen nicht realistisch, eine auf die Donau ausgerichtete Steuerung anzusetzen. Eine Ausnahme stellt Variante 1a für das Nebenschlussbecken 11 nahe der Lechmündung dar (siehe Kap. 8.1.4).

Eine Wiederentleerung der Becken nach Durchgang der Hochwasserwelle am Standort wurde nicht umgesetzt, damit dadurch keine negativen Wellenüberlagerungen entstehen, die die Hochwassersituation stromabwärts verschärfen könnten. Bei mehrgipfligen Wellen wurde bei Becken im Hauptschluss allerdings eine kurze Zwischenentlastung zwischen den Spitzen zugelassen, um alle Spitzen möglichst effektiv kappen zu können. Bei Nebenschlussbecken wurde keine solche Zwischenentlastung vorgesehen, da dort die Auslassorgane deutlich kleiner dimensioniert sind als die Einlassorgane und somit in der kurzen Zeit zwischen zwei Hochwasserspitzen des gleichen Ereignisses keine nennenswerte Entlastung zu erwarten ist.

Um die gewünschte Steuerung zu erreichen, wurden die Regelabflüsse der Hauptschlussbecken und die Ausleitungsschwellenwerte für die Nebenschlussbecken so optimiert, dass das zurückgehaltene Volumen oberhalb dieser Schwellenwerte die Becken möglichst vollständig füllt. Da in LARSIM keine Wasserspiegellagen simuliert werden, wird auch bei Nebenschlussbecken stets das gesamte implementierte Beckenvolumen ausgeschöpft und ist nicht vom auftretenden Wasserstand an der Ausleitungsstelle abhängig. Die Optimierung erfolgte separat für jedes Ereignis



und alle Becken jeder Kombination. Dies war notwendig, um den variablen HRB-Zuflüssen, in Abhängigkeit vom Ereignis und gegebenenfalls vorhandenen Oberlieger-HRB, Rechnung zu tragen. Zudem wurde das Volumen einiger HRB variantenspezifisch festgelegt (siehe Kap.7.5).

Der Beginn des Optimierungszeitraums wurde jeweils durch visuelle Analyse der Zulaufganglinie im Sinne einer Expertenschätzung festgelegt. In der Regel wurde dafür ein lokales Minimum der Ganglinie einige Stunden bis wenige Tage vor dem Abflussscheitel gewählt.

Um ein unrealistisches und unerwünschtes Verhalten der Steuerung bei vergleichsweise geringen Abflüssen am betrachteten Standort zu vermeiden, wurde zum einen ein Minimum für den Schwellenwert berücksichtigt. Dieses wurde in Abstimmung mit dem AG auf den standortspezifischen MNQ gesetzt. Zum anderen wurde der Optimierungszeitraum auf maximal zehn Tage nach dem Scheitel begrenzt. Wenn zu diesem Zeitpunkt selbst bei minimalem Schwellenwert keine Vollausslastung des betrachteten Beckens erreicht wurde, wurde das Becken als nicht ausgelastet betrachtet. In Einzelfällen, bei denen innerhalb des 10-Tage-Zeitraums ein weiteres, separates Hochwasserereignis mit potenziellem Einfluss auf den Speicher zu beobachten war, wurde der Optimierungszeitraum entsprechend verkürzt.

Im Zuge der Optimierung wurde der Regelabfluss bzw. der Verzeigungsschwellenwert so angepasst, dass eine vollständige Füllung (> 99,9 %) des vorgegebenen Speichervolumens erreicht wurde, ohne dass es dabei zu einer Überlastung des Speichers kam. Die resultierenden Schwellenwerte wurden im Weiteren für die Simulation der Speichervarianten festgesetzt. Im Einzugsgebiet des Lech ergab sich so eine vollständige Auslastung der Speicher aller Varianten bei allen Ereignissen. Im Bereich Naab/Regen wurde für das Ereignis 136 bei drei Becken mindestens einmal der minimale RQ erreicht. Bei den Varianten 3 bis 6 konnten jeweils ein oder zwei dieser Becken nicht komplett ausgelastet werden. Die prozentuale Auslastung dieser Becken sowie der Gesamtauslastung der betroffenen Varianten ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Prozentuale Auslastung der nicht vollständig ausgelasteten HRB (ausschließlich) im Bereich Naab/Regen für das Ereignis 136 für die betroffenen Varianten 3 bis 6 sowie Gesamtauslastung der HRB der Varianten inklusive der nicht aufgeführten ausgelasteten HRB

HRB (Einzugsgebiet)	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6
HRB 101 (Naab)	nicht in Var.	49 %	nicht in Var.	49 %
HRB 283 (Naab)	85 %	95 %	89 %	85 %
HBR 405 (Regen)	ausgelastet	nicht in Var.	90 %	ausgelastet
Gesamtauslastung E136 für alle HRB d. Var. (inklusive nicht aufgeführter HRB)	97 %	96 %	92 %	97 %

Um eine Vorfüllung der HRB durch – dem untersuchten Ereignis vorausgehende – Hochwasserwellen auszuschließen, wurden die Becken in LARSIM erst kurz vor dem Ereignis aktiviert. Der Aktivierungszeitpunkt wurde entsprechend dem Beginn des Optimierungszeitraums gesetzt. Mit Erreichen der maximalen Beckenfüllung innerhalb des Optimierungszeitraums, in der Regel also mit der vollständigen Auslastung, wurden die HRB wieder deaktiviert, so dass das eingestaute Volumen innerhalb des Simulationszeitraumes nicht wieder in das Gewässer abgegeben wurde.



Hinweis: LARSIM deaktiviert, sofern die Option RHB MIT FLOOD-ROUTING nicht gesetzt ist, das Flood-Routing für die Gewässerstrecke von Teilgebieten, auf denen ein HRB vernetzt ist. Im Rahmen der Untersuchung stellte sich heraus, dass dies auch dann gilt, wenn die HRB deaktiviert sind. Aus diesem Grund zeigten sich in den betroffenen Modellen (Lech, Regen) geringfügige Abweichungen der simulierten Ganglinien im Vergleich zum Ist-Zustand, auch im Zeitraum vor Aktivierung der HRB. Nach Prüfung der Ergebnisse und in Abstimmung mit dem AG wurde der resultierende Fehler als vernachlässigbar eingestuft.

8.1.4 Alternative Steuerungsvariante V1a für ein Nebenschluss-HRB am Lech

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Steuerungskonzept wurde für einen vergleichsweise donanahen Nebenschlussstandort am Lech, nördlich von Augsburg (HRB 11) exemplarisch für das Ereignis 250 ein alternativer Steuerungsansatz umgesetzt (siehe Tabelle 11, Variante 1a). Dieser beruht auf einer hypothetischen Beobachtung des Hochwassergeschehens am Standort (Lech) und am Pegel Donauwörth (Donau) oberhalb der Lech-Mündung. Er zielt nicht auf eine optimale Scheitelkappung am Standort ab, sondern darauf, die Abflussspitze in der Donau möglichst effektiv zu dämpfen.

In Abstimmung mit dem AG wurde die Steuerung nach dem im Folgenden aufgeführten Reglement vorgenommen. Dabei wurde eine Verzögerung der Steuerung von drei Stunden angenommen, entsprechend der ungefähren Laufzeit der Welle an der Donau vom Pegel Donauwörth bis zur Lechmündung. Als Kriterium für die stufenweise Anpassung wurde die Abflusssumme beider Pegel berücksichtigt.

- drei Stunden nach Überschreiten einer Abflusssumme von 2100 m³/s: Drosselung des Lech-Abflusses auf 600 m³/s
- drei Stunden nach Überschreiten einer Abflusssumme von 2300 m³/s: Drosselung des Lech-Abflusses auf 500 m³/s
- drei Stunden nach Überschreiten einer Abflusssumme von 2400 m³/s: optimierte Drosselung des Lech-Abflusses mit dem Ziel das HRB-Volumen auszulasten

Im dritten Schritt wurde ein optimierter Schwellenwert angesetzt, der im realen Einsatzfall nur auf Grundlage von Vorhersagen zu ermitteln wäre. Dieser Ansatz wurde für die vorliegende Untersuchung dennoch gewählt, um die Vergleichbarkeit mit den übrigen Varianten (mit optimierter Steuerung) zu gewährleisten. Die Optimierung ergab im vorliegenden Fall eine Drosselung auf 388 m³/s. Die Umsetzung in LARSIM erfolgte als Verzweigung (siehe Kap. 8.1.1) mit zeitlich differenzierter Ausleitungsregel.

8.1.5 Simulationsläufe

Für die Wirkungsanalyse wurde pro HRB-Kombination (Variante) und berücksichtigtem Ereignis je ein Simulationslauf für das Gesamtmodell vorgenommen. Dazu kam, wie für die Läufe des Ist-



Zustands, die unter Kap. 4 beschriebene Modellumgebung zum Einsatz. Bei jeweils zehn Ereignissen ergaben sich so für die Wirkungsanalyse Lech 71 Läufe (Varianten 1 bis 7 + Variante 1a für ein Ereignis) für Naab/Regen 60 Läufe (Varianten 1 bis 6).

Für die Simulationsläufe wurde jeweils eine ereignis- und variantenspezifische LARSIM-Steuerdatei (tape10) bereitgestellt, die die jeweils berücksichtigten HRB mit optimierter Steuerung beinhaltet.

Umfang und Formate der Ergebnisdateien entsprechen im Wesentlichen den Ausgaben der Simulationsläufe für den Ist-Zustand. Sie umfassen zusätzlich Ausgaben der simulierten Ganglinien an den HRB-Standorten. Als Kennung in den Ergebnisdateinamen der Szenarien wurden folgende Kürzel verwendet: skle[Nr.] für die Wirkungsanalyse Lech und sknr[Nr.] für Naab/Regen (siehe Tabelle 2). Die angegebene Nummer (Nr.) weicht beim Lech aufgrund einer nachträglichen Umnummerierung von der Variantenummer ab: skle02 entspricht Variante 1a, skle03 Variante 2, usw.

8.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsläufe wurden für abgestimmte Ausgabepunkte im Gewässernetz ausgewertet. Im Untersuchungsgebiet Lech waren dies zwei Punkte, für Naab und Regen wurden drei Punkte berücksichtigt. Details zur Lage finden sich in den folgenden Abschnitten 8.3 und 8.4.

Die simulierten Abflusszeitreihen wurden in Form von **Gangliniendiagrammen** für den jeweils relevanten Ereigniszeitraum dargestellt. Pro Ausgabepunkt und Ereignis wurden jeweils zwei Grafiken erstellt. Die erste beinhaltet die Ergebnisse für den Ist-Zustand und die Varianten mit einfachem HRB-Volumen, die zweite den Ist-Zustand und die Varianten mit doppeltem HRB-Volumen. Für die Ausgabepunkte an der Donau ist zusätzlich die Flutpoldervariante dargestellt. Die Gangliniendiagramme für alle Szenarien sind nach Ereignissen sortiert in Anlage B.2 (Lech) und Anlage B.3 (Naab/Regen) zusammengestellt.

Daneben wurden die Ergebnisse in Form von **Tabellen mit Hochwasserscheitelwerten** für die simulierten Szenarien aufbereitet. Diese wurden für jeden Ausgabepunkt erzeugt und beinhalten die Werte für alle Varianten und Ereignisse inklusive der Abweichungen zum Ist-Zustand. Die Tabellen finden sich in Anlage A.2 (Lech) und Anlage A.3 (Naab/Regen).

Schließlich wurden **Tabellen mit dem Volumen über HQ₁₀₀** für die simulierten Szenarien erzeugt. Diese liegen nur für die Ausgabepunkte an der Donau vor und beinhalten die Ergebnisse für alle Varianten und Ereignisse inklusive der Abweichungen zum Ist-Zustand und sind ebenfalls in Anlage A.2 (Lech) und Anlage A.3 (Naab/Regen) zusammengestellt.

8.3 Wirkungsanalyse für das Einzugsgebiet des Lech

Für die Wirkungsanalyse im Lech-Einzugsgebiet wurden die Berechnungsergebnisse an zwei Ausgabepunkten ausgewertet. Zum einen wurde ein Ausgabepunkt am Unterlauf des Lech, unterhalb aller berücksichtigten HRB, gewählt. Dieser liegt rund 6 Kilometer oberhalb der Mündung des Lech in die Donau (Modell D2, LARSIM-Element 223). Ein zweiter Ausgabepunkt wurde an



der Donau am Pegel Neuburg, rund 19 Kilometer unterhalb der Lech-Mündung verortet (D2, Element 736), um die Auswirkungen der HRB-Szenarien auf den Donauabfluss zu bewerten. Der Auswertepunkt wurde soweit stromabwärts gewählt, da erst nach der Steppberger Enge der gesamte Donauabfluss im Hochwasserfall wieder in einem Gerinne vereinigt ist und eine einheitliche Auswertung erlaubt. Die Lage der Auswertungspunkte wird auch aus Abbildung 4 ersichtlich. Für alle simulierten Szenarien finden sich Gangliniendarstellungen in Anlage B.2, Tabellen mit Scheitelabflüssen und Scheitelreduktion sowie Volumen über HQ_{100} und Volumenreduktion in Anlage A.2.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich in LARSIM unterhalb des Ausgabepunktes am Lech eine Ausleitung in ein fiktives Rückhaltebecken (Nebenschluss) befindet. Dieses soll im Hochwasserfall den Grundwasserrückhalt im Lechvorland abbilden. Nach Auskunft des AG ist dieser natürliche Prozess messtechnisch nachgewiesen. Die Steuerung der Ausleitung und des fiktiven LARSIM-Beckens wurde anhand historischer Ereignisse (1999, 2005) abgeleitet. Die Ausleitung beginnt ab einem Lechabfluss von $800 \text{ m}^3/\text{s}$ und steigt linear von 0 auf $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (bei $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ im Lech), so dass der Lechabfluss auf $800 \text{ m}^3/\text{s}$ gekappt wird. Das gekoppelte Becken ist mit einem Volumen von 38 Mio. m^3 implementiert. Bis zu einer Füllung von 20 Mio. m^3 werden maximal $5 \text{ m}^3/\text{s}$ abgegeben, so dass bei Ereignissen mit Abflüssen deutlich über $800 \text{ m}^3/\text{s}$ von einer erheblichen Retention auszugehen ist.

8.3.1 Variante V0 (Flutpolder Bertoldsheim)

Die Scheitelkappung am Flutpolder Bertoldsheim zeigt sich am Pegel Neuburg, Donau (Ausgabepunkt) durch eine deutliche Abflachung der Ganglinie im Scheitelbereich (siehe z. B. Abbildung 8). Das direkt unterhalb des Flutpolders noch ausgeprägte Abflussplateau wird durch Retentionseffekte entlang der dazwischenliegenden Donaueinzugsstrecke (19 km) und durch Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet leicht verformt. Im Vergleich zum Ist-Zustand ergibt sich für Variante V0 in Neuburg eine Scheitelreduktion von 8,4 % oder $199 \text{ m}^3/\text{s}$ im Mittel aller zehn Ereignisse. Die größte Reduktion zeigt sich mit 10,6 % ($249 \text{ m}^3/\text{s}$) für das relativ große Sommerereignis E245, das einen vergleichsweise steilen Scheitelbereich aufweist. Die geringste Absenkung des Scheitels wird beim niedrigeren Winterereignis E031 mit 5,3 % ($122 \text{ m}^3/\text{s}$) erzielt. Das Winterereignis zeichnet sich durch eine langgezogene zweigipflige Welle aus. Alle übrigen Ereignisse weisen mit 7,8 % bis 9,0 % eine Scheitelreduktion vergleichbarer Größenordnung auf.

Das Hochwasservolumen über HQ_{100} wird im Mittel um 76,9 % reduziert, wobei durch den Flutpoldereinsatz bei den drei kleinsten Ereignissen (E036, E136, E276) das HQ_{100} nicht mehr überschritten wird (Reduktion 100 %). Die höchsten absoluten Werte der Reduktion mit 16,4 bis 17,9 Mio. m^3 finden sich erwartungsgemäß bei den Ereignissen mit den höchsten Scheiteln (E303, E042, E168) und bei den Ereignissen mit vergleichsweise langgestreckten, voluminösen Scheiteln (E031, E138). Die Verminderung des Volumens entspricht hier annähernd dem Flutpolder-volumen von 18 Mio. m^3 .

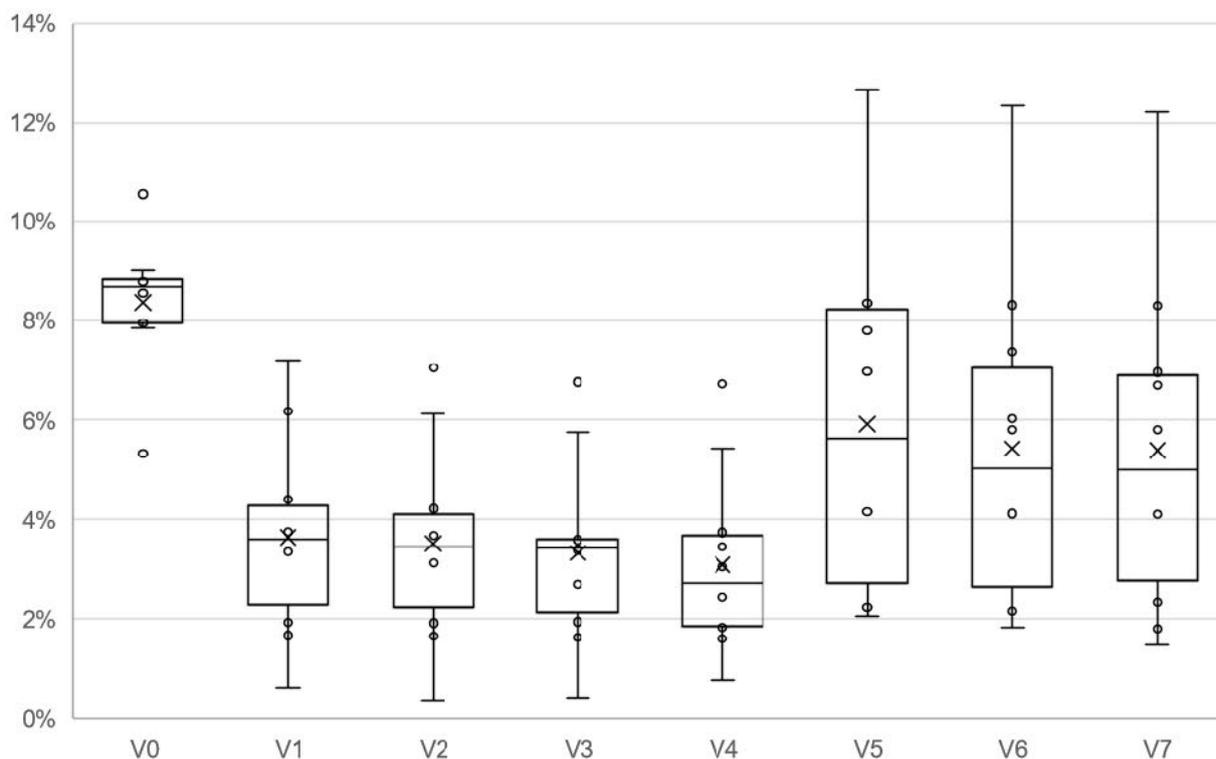


Abbildung 6: Prozentuale Scheitelreduktion bei der Wirkungsanalyse Lech am Pegel Neuburg, Donau für die zehn untersuchten Ereignisse nach HRB-Variante (Erläuterung: die Box umschließt die mittleren 50% der Werte, das Kreuz markiert das arithmetische Mittel, der Querstrich den Median der Werte. Die Whisker zeigen die Wertespanne ohne Ausreißer. Als Ausreißer werden Werte betrachtet, die um mehr als das anderthalbfache des Interquartilsabstands (Länge der Box) von der Box entfernt liegen)

8.3.2 Varianten V1 bis V4 (einfaches HRB-Gesamtvolumen)

Das aufsummierte HRB-Volumen der Varianten V1 bis V4 entspricht mit 18 Mio. m³ jeweils dem Volumen des Flutpolders Bertoldsheim. Abbildung 7 gibt eine Übersicht über die Lage der in den Varianten berücksichtigten HRB. Der Einsatz dieser HRB-Kombinationen resultiert am Pegel Neuburg im Mittel über alle Varianten und Ereignisse in einer Scheitelreduzierung um 3,4 % (82 m³/s). Im Durchschnitt ist die Wirkung auf den Hochwasserabfluss damit rund 59 % geringer als bei der Flutpoldervariante (8,4 % bzw. 199 m³/s). Bei keinem der betrachteten Szenarien wird die Wirkung des Flutpolders erreicht. Die maximale Reduktion mit 7,2 % tritt bei Ereignis E245 und Variante V1 auf, die mit 0,4 % geringste Reduktion bei Ereignis E031, Varianten V2 und V3 (Abbildung 8, Abbildung 9). Damit zeigen sich die Extremwerte bei denselben Ereignissen wie bei der Flutpoldervariante.

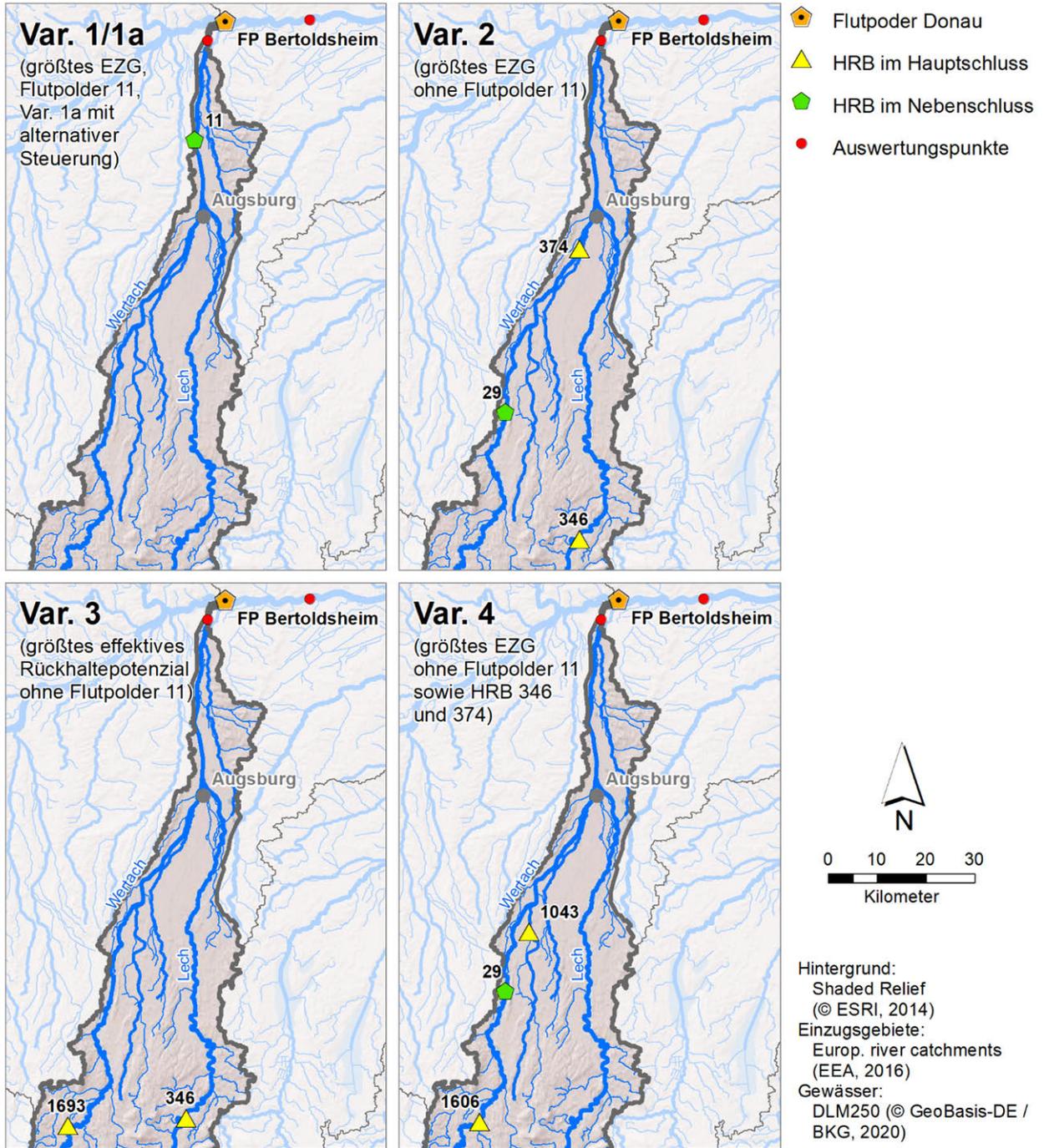


Abbildung 7: Lage und Kennnummern der Haupt- und Nebenschluss-HRB der Varianten V1 bis V4 (einfaches HRB-Gesamtvolumen) im Einzugsgebiet des Lech

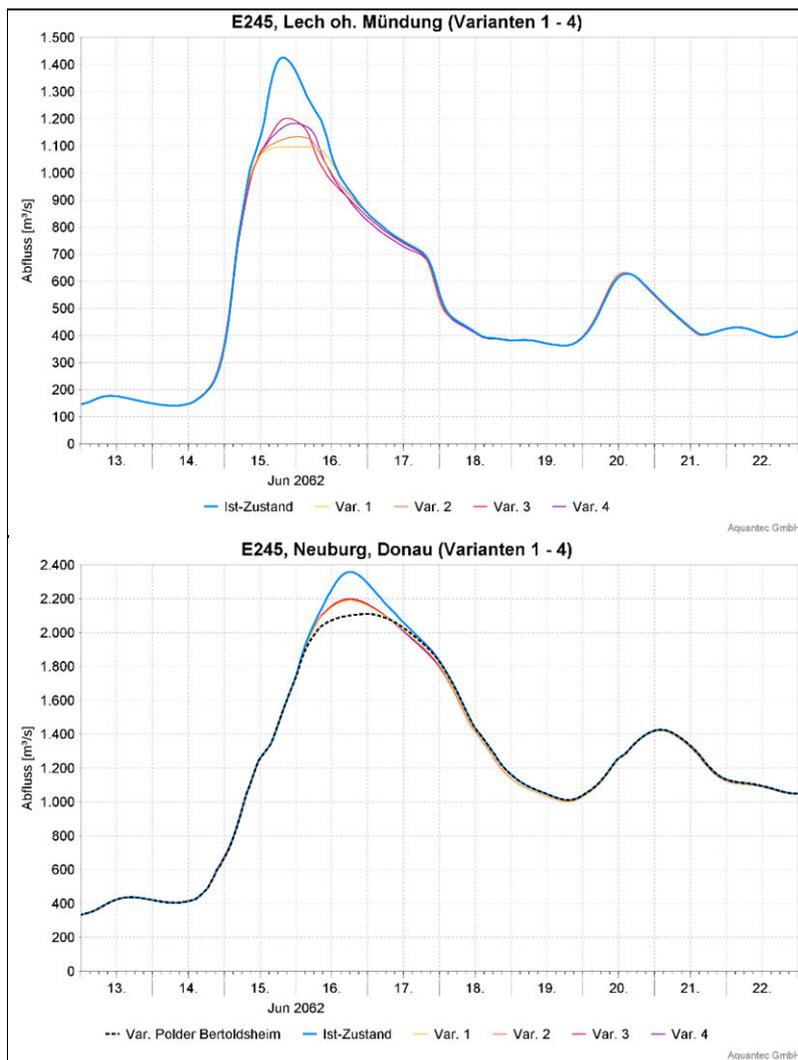


Abbildung 8: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E245: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Varianten V1 bis V4 am Unterlauf des Lech (oben) und am Pegel Neuburg, Donau (unten)

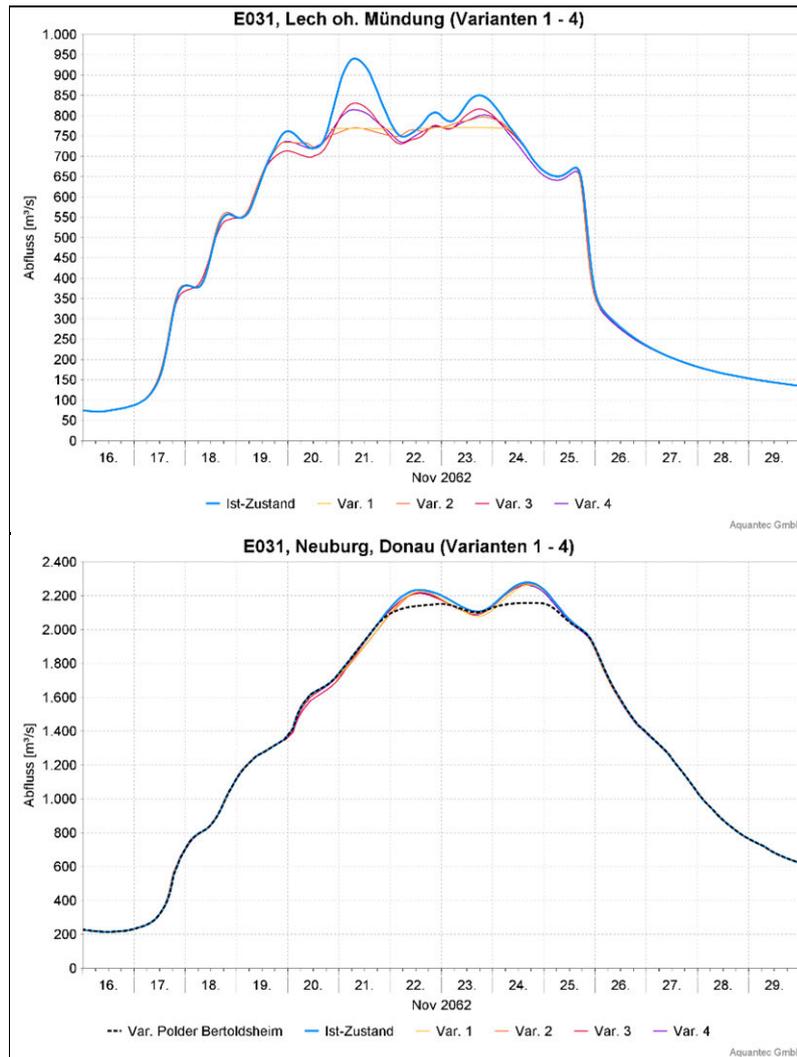


Abbildung 9: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E031: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Varianten V1 bis V4 am Unterlauf des Lech (oben) und am Pegel Neuburg, Donau (unten)

Es fällt auf, dass alle Varianten beim gleichen Ereignis durchgängig vergleichbare Ergebnisse zeigen (siehe Abbildung 10). Die Spannweite der Scheitel schwankt zwischen $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (E136) und maximal $38 \text{ m}^3/\text{s}$ (E042), im Mittel liegt sie bei $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Vergleich der Varianten (Abbildung 6 und Anlage A.2.2) ergibt sich die größte Scheitelreduktion für Variante V1 sowohl im Mittel über die Ereignisse ($3,6 \%$ bzw. $88 \text{ m}^3/\text{s}$) als auch bei allen einzelnen Ereignissen mit Ausnahme von E031. V1 umfasst mit dem Nebenschlussbecken 11 am Unterlauf des Lech nur ein großes HRB, deckt aber einen Großteil des Lech-Einzugsgebiets ab. Mit $3,5 \%$ bzw. $85 \text{ m}^3/\text{s}$ ist die durchschnittliche Reduktion bei Variante V2 nur etwas geringer. Sie beinhaltet die HRB mit dem größten Einzugsgebiet mit Ausnahme des Nebenschlussbeckens 11. Für Variante V3, die die beiden HRB mit dem größten Rückhaltepotenzial umfasst, ist die mittlere Scheitelreduktion bei $3,3 \%$ bzw. $80 \text{ m}^3/\text{s}$ noch geringer. Die geringste Auswirkung auf den Scheitel in Neuburg lässt sich bei Variante V4 beobachten (Reduktion $3,1 \%$ bzw. $75 \text{ m}^3/\text{s}$), bei der die HRB 11, 346 und 374 nicht berücksichtigt sind und die nur knapp ein Viertel der Einzugsgebietsfläche von V1 abdeckt. Diese Wirksamkeitsrangfolge findet sich mit nur wenigen Abweichungen bei allen Ereignissen wieder.



Für die Reduzierung des Hochwasservolumens über HQ_{100} ergibt sich ein vergleichbares Bild. Sie beträgt im Mittel knapp 39 % oder 7,6 Mio. m^3 . Damit ist die Wirkung etwa halb so groß wie bei Einsatz des Flutpolders an der Donau. Nur beim größten Ereignis E303 erreicht die Reduktion am Pegel Neuburg annähernd die in den dezentralen Speichern zurückgehaltenen 18 Mio. m^3 . Bei allen anderen Varianten liegt sie deutlich geringer. Die Wirksamkeitsrangfolge der Varianten für die Volumenreduktion entspricht der der Scheitelreduktion mit der durchschnittlich größten Wirksamkeit für V1.

Die Ergebnisse legen nahe, dass sich mit mündungsnahen HRB, die ein größeres Einzugsgebiet abdecken, eine größere Wirkung erzielen lässt, als beispielweise mit den Becken, die nach ihrem effektiven Rückhaltevolumen ausgewählt wurden.

Bei den Ergebnissen für den Ausgabepunkt am Unterlauf des Lech mit einer mittleren Scheitelreduktion von 18 % oder 198 m^3/s sind die Unterschiede zwischen den Varianten deutlich ausgeprägter als an der Donau, wobei die Rangfolge vergleichbar ist. Variante V1 zeigt hier bei allen betrachteten Ereignissen die größte Wirkung (im Mittel 22,9 % oder 252 m^3/s). Das wenig oberhalb des Ausgabepunktes liegende Becken resultiert in einer Kappung der Ganglinie mit einem ausgeprägten Plateau im Scheitelbereich. Die Scheitelreduktion für V2 ist im Mittel rund 13 % geringer (19,8 % bzw. 219 m^3/s). Der Unterschied zwischen V1 und V2 zeigt sich markant bei allen Ereignissen mit Ausnahme des Sommerereignisses E138 mit einem Abflussschwerpunkt im oberen Lech-Einzugsgebiet. Die Varianten V3 und V4 weisen durchgängig eine signifikant geringere Scheitelsenkung auf. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den Pegel Neuburg ist die mittlere Wirkung von V4 (15,2 %) am Unterlauf des Lech geringfügig höher als die von V3 (14,1 %), wobei diese Rangfolge offensichtlich stark vom Ereignis abhängig ist.

Ereignisabhängigkeit

Während der Einsatz des Flutpolders an der Donau (V0) bei allen Ereignissen eine signifikante Wirkung am Pegel Neuburg zeigt, ist die Scheitelreduktion bei den Varianten V1 bis V4 deutlich stärker vom jeweiligen Ereignis abhängig. Die vergleichsweise größte Wirkung zeigt sich bei den Ereignissen E303 und E245. Hier fällt die Scheitelreduktion im Mittel um nur 26 % bzw. 34 % geringer aus als bei V0. Bei den Ereignissen E031 und E036 dagegen liegt die Wirkung von V1 bis V4 90 % bzw. 82 % unter der des Flutpolders.

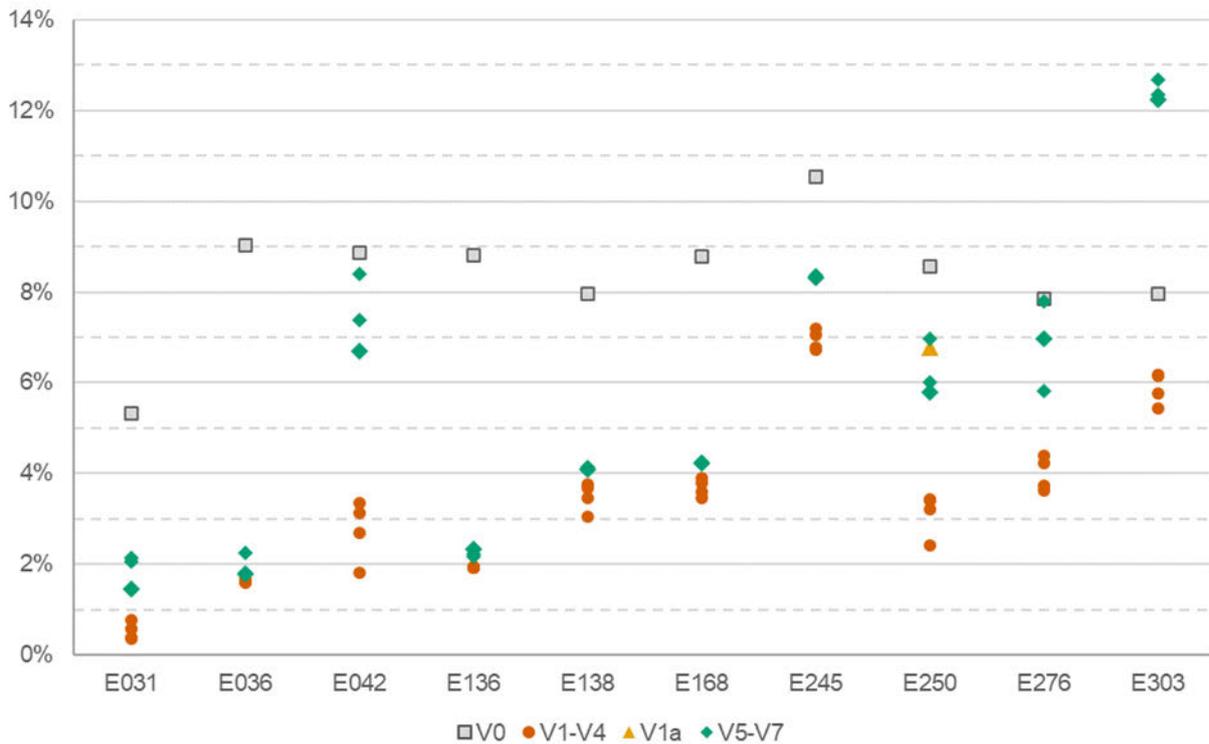


Abbildung 10: Prozentuale Scheitelreduktion bei der Wirkungsanalyse Lech am Pegel Neuburg, Donau, nach Ereignis für die Varianten V0 (Flutpoldervariante), V1-V4 (einfaches Rückhaltevolumen), V5-V7 (doppeltes Rückhaltevolumen) und V1a (alternative Steuerung, Ereignis 250)

Die Ereignisabhängigkeit hat verschiedene Ursachen. So ist z. B. der Anteil des Abflussvolumens aus dem Lech am Gesamtabfluss an der Donau von Bedeutung. Bei Ereignissen mit vergleichsweise niedrigen Lechabflüssen, wie E250 oder E276, ist das Potenzial für eine signifikante Scheitelreduktion an der Donau naturgemäß geringer als bei den Lech-lastigeren Ereignissen E245 oder E303. Die Form der Hochwasserwelle spielt ebenfalls eine Rolle. Bei langgestreckten, flachen Wellen oder Wellen mit mehreren Scheiteln verteilt sich das zurückgehaltene Volumen auf einen längeren Zeitraum als bei kurzen, steilen Wellen, so dass die Scheitelsenkung geringer ausfällt. Dies zeigt sich z. B. bei Ereignis E031, das bereits am Unterlauf des Lechs im Mittel die geringste Scheitelreduktion aller Ereignisse aufweist. Bezüglich der Abfolge der Wellen ist die größte Wirksamkeit zu erwarten, wenn die Scheitel aus Lech und Donau zeitlich in etwa zusammentreffen, so dass die Reduktion am Lech zielgenau auf den Donauscheitel wirkt. Dies ist beispielweise beim Ereignis E303 zu beobachten. Dagegen trifft beim Ereignis E250 der Lechscheitel deutlich früher, beim Ereignis E138 deutlich später ein als der Donauscheitel. Dadurch verschiebt sich die Volumenreduktion an der Donau eher in den anlaufenden bzw. ablaufenden Ast der Welle und wirkt sich weniger stark auf den Scheitel aus.

Grundwasserrückhalt im unteren Lechvorland

Bei einigen Ereignissen ist die Scheitelreduktion am Pegel Neuburg auffällig gering, selbst bei steilen Wellen mit geringem Zeitversatz. Dies gilt z. B. für das Ereignis E042, das am Lech-Unterlauf hinsichtlich der Scheitelreduktion durchgängig zu den zwei besten Ereignissen zählt, an der Donau jedoch eine unterdurchschnittliche Wirkung zeigt (im Mittel der Varianten 2,8 %). Die



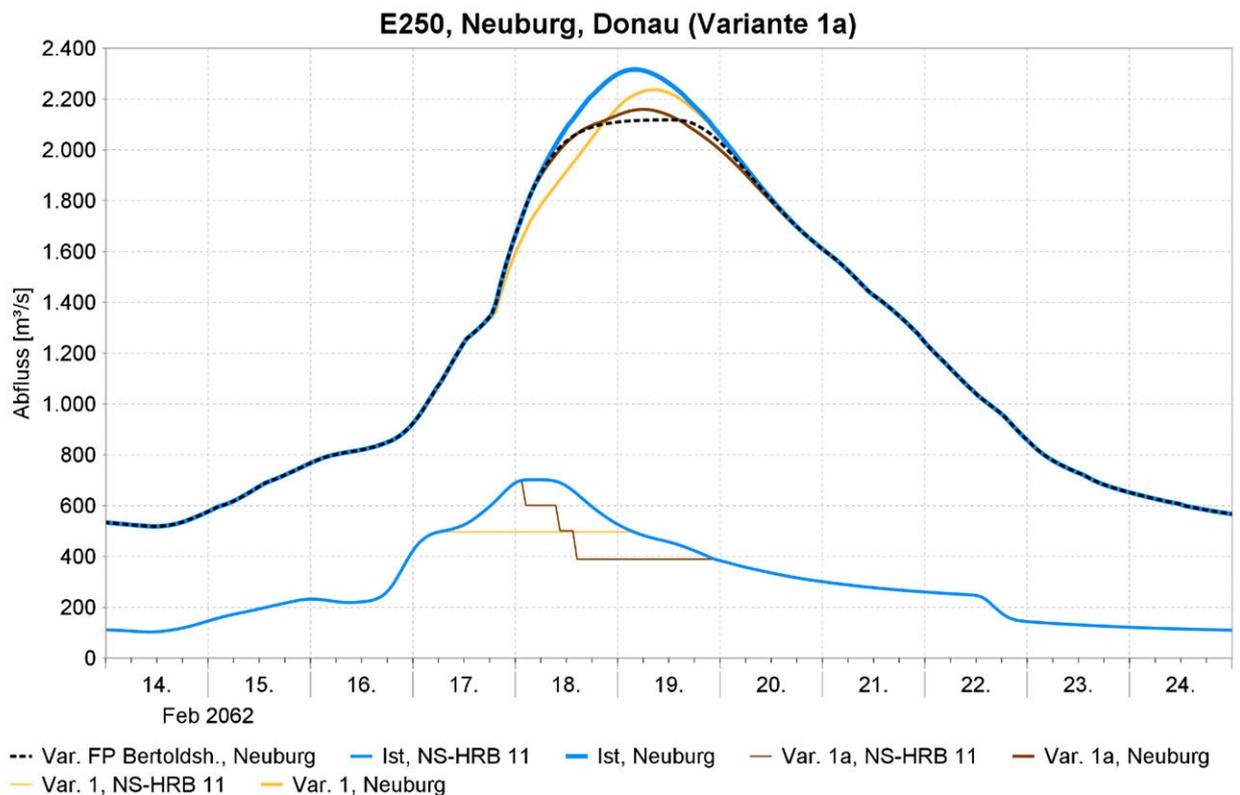
Ursache dafür liegt im Grundwasserrückhalt des Lech-Vorlandes, der im Modell über ein fiktives Nebenschlussbecken abgebildet wird, das unterhalb des Ausgabepunktes vernetzt ist (siehe oben., Kap. 8.3). Die Retention wirkt sich bei der Simulation des Ist-Zustandes (und damit auch bei der Flutpoldervariante V0) stark dämpfend auf den Hochwasserabfluss im Lech aus, da letzterer im Scheitelbereich deutlich höher liegt als der Schwellenwert von 800 m³/s. Im Gegensatz dazu wird der Schwellenwert bei den Varianten V1 bis V4 nicht oder nur minimal überschritten, so dass die dämpfende Wirkung hier kaum zum Tragen kommt. Damit verringert sich unterhalb der Ausleitung der Unterschied zum Istzustand. Gewissermaßen wird durch die dezentralen HRB im Lecheinzugsgebiet der natürliche Rückhalt größtenteils deaktiviert. Das fiktive Becken stellt ein relevantes Volumen für die Retention bereit und gibt das gespeicherte Wasser vergleichsweise langsam ab. Ein erheblicher Teil des zurückgehaltenen Volumens fehlt somit beim ereignisbezogenen Volumenvergleich am Pegel Neuburg, was dazu führt, dass die Differenzen deutlich geringer ausfallen als das in den HRB genutzte Volumen von 18 Mio. m³. Beim Ereignis E042 beispielsweise beträgt die Volumenreduktion über das gesamte Ereignis im Mittel nur rund 10 Mio. m³. Der beschriebene Mechanismus wirkt sich grundsätzlich bei allen Ereignissen aus, die im Ist-Zustand den genannten Schwellenwert überschreiten. In Fällen, bei denen auch die Speichervarianten Abflüsse deutlich oberhalb von 800 m³/s aufweisen, sind die Auswirkungen allerdings weniger prägnant (z. B. E245). Die natürliche Dämpfung der Lechwellen bewirkt zudem eine Vereinheitlichung, so dass die Wirksamkeitsunterschiede zwischen den Varianten an der Donau wesentlich weniger zu Tage treten, als an dem Auswertepunkt am Lech. Ausnahmen hiervon bilden beispielsweise die Ereignisse E042, E250 und E276, bei denen schon mit den Varianten V1 bis V4 keine Ausuferung am Lech mehr auftritt und so die Wirksamkeiten der Varianten auch an der Donau stärker differenziert sind.

8.3.3 Variante V1a

Wie oben beschrieben hängt die Wirksamkeit der Varianten unter anderem maßgeblich vom zeitlichen Versatz der Scheitel an Lech und Donau ab. Um zu prüfen, inwieweit sich die Wirkung durch Berücksichtigung des Donauabflusses bei der HRB-Steuerung verbessern lässt, wurde die Variante V1a eingeführt, die wie V1 nur das Nebenschlussbecken 11 am Unterlauf des Lech umfasst. Die Details zur Steuerung sind in Kap. 8.1.4 beschrieben. Die Simulation wurde exemplarisch für das Ereignis E250 durchgeführt, bei dem die Lech-Welle zeitlich vorläuft und sich dadurch im Vergleich zu den meisten anderen Ereignissen bei lokal optimierter Steuerung schon signifikante Wirkung im ansteigenden Ast zeigt. In Abbildung 11 sind die resultierenden Ganglinien am Beckenstandort und in Neuburg im Vergleich zum Ist-Zustand, zur Flutpoldervariante und zu V1 dargestellt. Bei der optimierten Variante V1a beginnt die Absenkung am Lech erst mit Erreichen des Scheitels, fast einen Tag später als bei V1, so dass das Lechhochwasser vorwiegend im auslaufenden Bereich reduziert wird. Durch die zeitliche Abstimmung auf den Donauscheitel ergibt sich aber eine deutlich bessere Scheitelreduktion an der Donau in Neuburg (6,8 % statt 3,4 % bei V1), so dass der Scheitel von V1a nur noch geringfügig höher ist, als bei der Flutpoldervariante (Reduktion 8,6 %). Es ist davon auszugehen, dass eine in dieser Form angepasste HRB-Steuerung bei allen Ereignissen mit vor- oder nachlaufender Lechwelle zu besseren Ergebnissen führen würde. Allerdings dürfte dies nur für mündungsnaher HRB umsetzbar sein,



da nur in diesem Fall vorab eine realistische Abschätzung des zeitlichen Verlaufs der Wellen möglich ist. Zudem muss beachtet werden, dass in dieser Untersuchung angenommen wurde, dass das Volumen im Nebenschlussbecken 11 stets vollständig genutzt werden kann. Wird im ansteigenden oder absteigenden Ast der Lechwelle jedoch auf einen niedrigen Abfluss gedrosselt, müsste in Realität gegebenenfalls durch längere Zuleitungskanäle von einem höheren Wasserstand oberstrom gewährleistet werden, dass ein Nebenschlussbecken noch ganz gefüllt werden kann.



Aquantec GmbH

Abbildung 11: Simulierte Ganglinien der Variante 1a (braun) am Standort des Nebenschlussbeckens 11 (dünne Linien) und am Pegel Neuburg, Donau (dicke Linien) im Vergleich zu Ist-Zustand (blau), Variante 1 (gelb) und Variante 0 (Flutpolder Bertoldsheim, schwarz).

8.3.4 Varianten V5 bis V7 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen)

Abbildung 12 gibt eine Übersicht über die Lage der in den Varianten V5 bis V7 berücksichtigten HRB. Bei diesen Varianten wurde das Gesamtvolumen im Vergleich zum Flutpoldervolumen Bertoldsheim und zu den Volumina der Varianten V1 bis V4 auf 36 Mio. m³ verdoppelt. Im Mittel über alle Szenarien ergibt sich damit am Pegel Neuburg eine Scheitelreduktion von 5,6 % (zum Vergleich V0: 8,4 %, V1 bis V4: 3,4 %). Das Maximum liegt bei 12,7 % (V5, E303), das Minimum bei 1,5 % (V7, E031). Die durchschnittliche Reduktion liegt damit etwa um zwei Drittel höher als bei den Varianten V1 bis V4. Dennoch wird die Reduktion der Flutpoldervariante (V0 mit 18 Mio. m³) nur bei Ereignis E303 übertroffen (Abbildung 13). Im Mittel ist die Scheitelreduktion um rund ein Drittel geringer als bei V0.

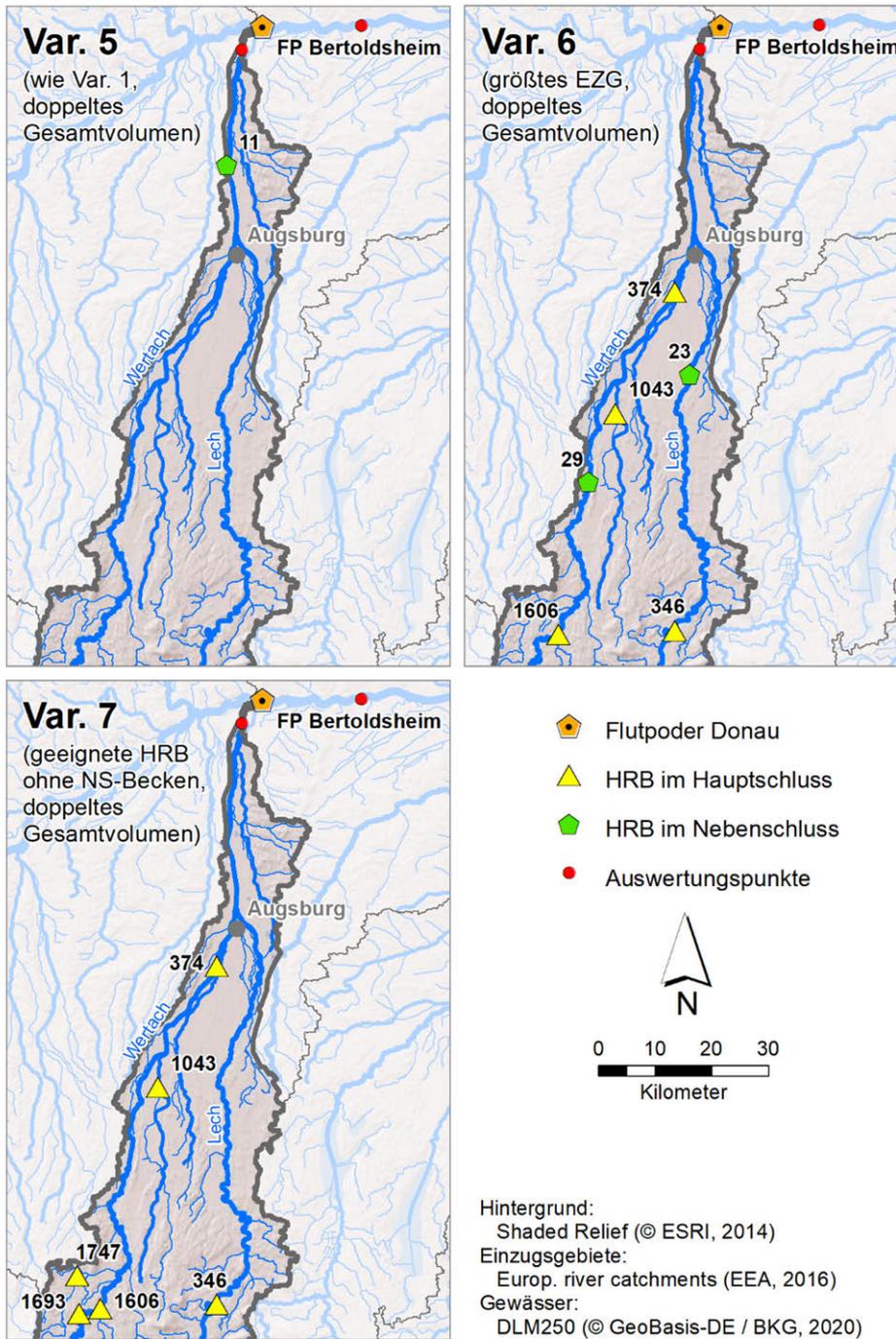


Abbildung 12: Lage und Kennnummern der Haupt- und Nebenschluss-HRB der Varianten V5 bis V7 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen) im Einzugsgebiet des Lech

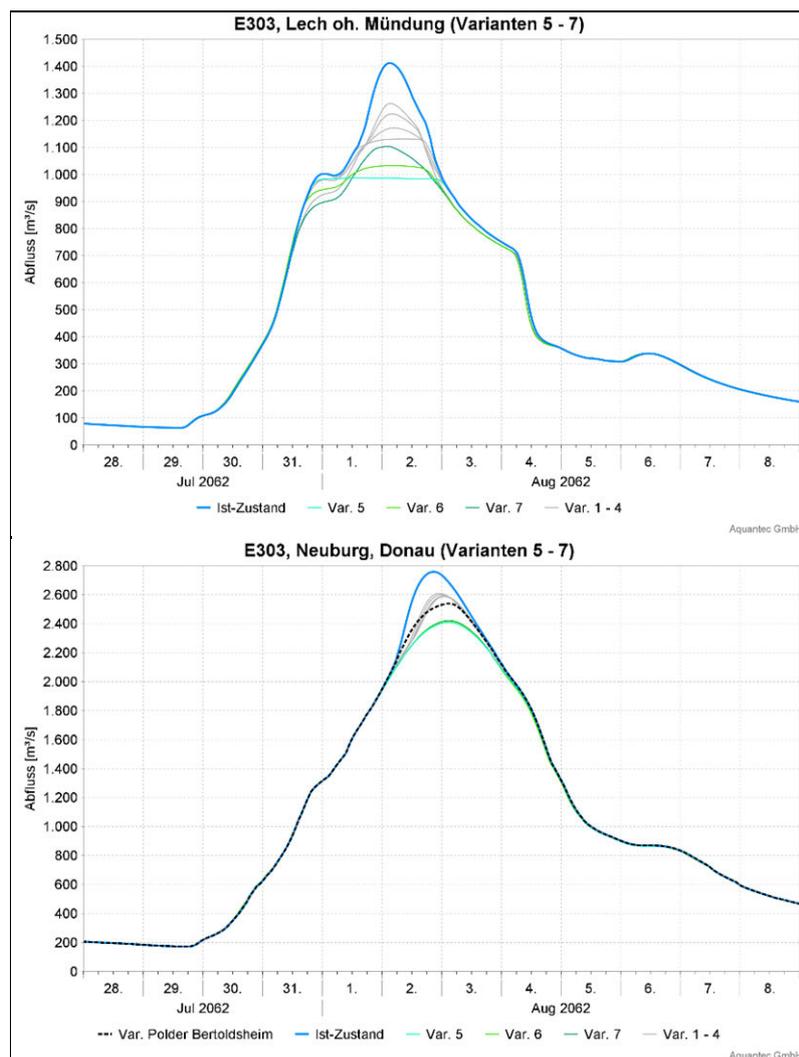


Abbildung 13: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E303: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Varianten V5 bis V7 am Unterlauf des Lech (oben) und am Pegel Neuburg, Donau (unten)

Auch bei den Varianten V5 bis V7 ist die Schwankungsbreite der Variantenwirksamkeit beim gleichen Ereignis vergleichsweise gering. Die größte Scheitelreduktion in Relation zum Istzustand ergibt sich am Pegel Neuburg durchgängig für Variante V5 (durchschnittlich 5,9 % bzw. 144 m³/s). Diese Variante entspricht V1 mit nur einem Nebenschlussbecken (HRB 11) im Unterlauf, bei doppeltem Volumen. Etwas geringere Auswirkungen zeigen die Varianten V6 (größtes Einzugsgebiet ohne HRB 11) und V7 (alle geeigneten HRB ohne Nebenschlussbecken) mit einer mittleren Reduktion von jeweils 5,4 % (133 m³/s bzw. 132 m³/s).

Die Volumenreduktion über HQ₁₀₀ zeigt vergleichbare Ergebnisse. Im Mittel liegt sie bei 12,7 Mio. m³ (59 %) und entspricht damit rund 88 % der Flutpolderwirkung. Mit 61,5 % schneidet auch bei der Volumenbetrachtung die Variante V5 im Mittel über die Ereignisse am besten ab, die Werte für V6 und V7 sind etwas niedriger bei 58,3 % bzw. 58,0 %.

Am Ausgabepunkt am Unterlauf des Lech ist die mittlere Scheitelreduktion der Varianten V5 bis V7 mit 336 m³/s (30,5 %) um rund 70 % höher als die der Varianten V1 bis V4 (198 m³/s bzw. 18 %). Die Unterschiede in der Wirkung der Varianten zeigen sich naturgemäß ausgeprägter als



an der Donau. Die Scheitelreduktion ist auch hier für Variante V5 durchgängig am höchsten (im Mittel über die Ereignisse 33,8 %). Die Ganglinien für V5 zeigen eine markante Kappung der Scheitel durch das wenig oberhalb des Ausgabepunktes liegende Becken. Am Lech zeigt sich im Gegensatz zur Donau daneben eine erkennbare Differenzierung der Varianten V6 (mittlere Reduktion 30,4 %) und V7 (27,2 %), wobei V7 mit Ausnahme des Ereignisses E276 (geringer Lechabfluss) die schlechteren Ergebnisse aufweist. Auch hier dürfte, wie oben beschrieben, die geringere abgedeckte Einzugsgebietsfläche der Variante ursächlich sein.

Auch die Wirkung der Varianten mit doppeltem Rückhaltevolumen ist maßgeblich ereignisabhängig. Wie bei den Varianten V1 bis V4 zeigen sich an der Donau die höchsten Werte der Scheitelreduktion im Mittel über die Varianten für die Ereignisse E303 (9,0 %) und E245 (7,6 %), während die Auswirkungen bei den Ereignissen E031 (1,2 %) und E036 (1,7 %) nur gering sind. Bei Ereignis E303 wird die Wirkung des Flutpolders an der Donau bei allen drei Varianten um mehr als 50 % übertroffen, während bei E036 durchgängig nur gut 20 % der Flutpolderwirkung erreicht werden. Ursachen für die Ereignisabhängigkeit liegen, wie oben für die Varianten V1 bis V4 beschrieben, unter anderem im Abflussanteil des Lech bezogen auf den Gesamtabfluss, in der Form der Hochwasserwellen sowie im Zeitversatz der Scheitel in Lech und Donau.

Der Einfluss des Grundwasserrückhalts im Lechvorland (siehe oben) wird bei den Varianten V5 bis V7 ebenfalls evident. Bei Ereignis E036 beispielsweise zeigen sich in der Wirkung am Pegel Neuburg nur sehr geringe Unterschiede zu den Varianten mit einfachem Volumen. Grund dafür ist die deutliche Reduktion des Scheitels am Lech, der die Abflüsse V5 bis V7 in den Bereich oder unter den Schwellenwert von 800 m³/s senkt. Damit ist die Grundwasserretention hier nahezu inaktiv, während sie im Istzustand und bei allen anderen Varianten erhebliche Wirkung entfaltet. Dagegen wird beim Ereignis E042 der Schwellenwert schon bei den Varianten V1 bis V4 meist unterschritten, so dass die Grundwasserretention hier keinen dämpfenden Einfluss mehr hat. Dadurch zeigt sich an der Donau die Wirkung des erhöhten Speichervolumens (V5 bis V7) deutlich. Letzteres gilt beispielsweise auch für das Ereignis E303, bei dem die Scheitel aller Varianten deutlich über 800 m³/s liegen und die Grundwasserretention damit alle Varianten beeinflusst.

8.3.5 Zusammenfassung

Die untersuchten dezentralen Rückhaltevarianten erweisen sich im Vergleich zu der Flutpoldervariante als deutlich weniger wirksam. Im Mittel ist die Wirkung um rund 60 % geringer. Auch bei einer Verdoppelung des Speichervolumens wird die Flutpolderwirkung in den meisten Fällen nicht erreicht. Die günstigste Variante der dezentralen Rückhaltevarianten ist in fast allen Szenarien V1, die nur ein großes HRB im Unterlauf des Lech umfasst und das größte Einzugsgebiet abdeckt. Bei Variante V3 mit dem größten effektiven Rückhaltepotenzial, aber kleinerem abgedeckten Einzugsgebiet ist die Wirkung an der Donau im Mittel rund 9 % geringer. Die Scheitelreduktion der dezentralen Rückhaltevarianten ist in deutlich höherem Maße ereignisabhängig als die der Flutpoldervariante. Die besten Ergebnisse werden für Lech-betonte Ereignisse mit kurzen steilen Hochwasserwellen und geringem Zeitversatz zum Donauscheitel erreicht. Ein Sonderfall am Lech ist der Grundwasserrückhalt im Vorland des Unterlaufs, dessen Retentionswirkung erst ab einer



bestimmten Abflussmenge einsetzt und mit steigendem Abfluss zunimmt. Stromaufwärts gelegene dezentrale Rückhaltemaßnahmen vermindern den Abfluss im Unterlauf und können so dafür sorgen, dass die Retentionswirkung des natürlichen Grundwasserrückhalts geringer wird oder überhaupt nicht zum Tragen kommt. Dieser Zusammenhang spielt bei den meisten betrachteten Ereignissen eine Rolle und bewirkt, dass in diesen Fällen das theoretische Gesamtrückhaltepotential der Rückhaltemaßnahmen abnimmt.

8.4 Wirkungsanalyse für die Einzugsgebiete Naab und Regen

Für die Wirkungsanalyse im Bereich Naab/Regen wurden die Berechnungsergebnisse an drei Ausgabepunkten ausgewertet. Je ein Auswertungspunkt wurde an Naab und Regen jeweils wenige hundert Meter oberhalb ihrer Mündung in die Donau gesetzt (Modell D2, LARSIM-Elemente 8717 und 8993). Um den Einfluss der Szenarien auf den Donauabfluss zu bewerten, wurde ein weiterer Ausgabepunkt an der Donau direkt unterhalb des geplanten Flutpolders Wörthhof verortet (D3, Element 233). Die Lage der Auswertungspunkte wird auch aus Abbildung 5 ersichtlich. Für alle simulierten Szenarien finden sich Gangliniendarstellungen in Anlage B.2, Tabellen mit Scheitelabflüssen und Scheitelreduktion sowie Volumen über HQ_{100} und Volumenreduktion in Anlage A.3.

8.4.1 Variante V0 (Flutpolder Eltheim und Wörthhof)

Die Flutpoldervariante führt am Ausgabepunkt direkt unterhalb der Flutpolder zu einer ausgeprägten Kappung der Hochwasserwellen mit einem ausgeprägten Abflussplateau im Scheitelbereich. Im Mittel über alle Ereignisse wird der Scheitel um 10,4 % oder 372 m^3/s reduziert. Die größte Wirkung mit 13,8 % bzw. 496 m^3/s lässt sich für das Spätsommerereignis E258 beobachten, dass durch eine steile Welle mit vergleichsweise geringem Volumen gekennzeichnet ist. Die geringste Scheitelreduktion ergibt sich für das Winterereignis E031 (4,9 %) mit einer langgezogenen mehrgipfligen Welle und dem größten Volumen aller betrachteten Ereignisse. Bei den übrigen Ereignissen liegt die Wirkung mit 8,1 % (E081) bis 12,5 % (E144) im mittleren Bereich.

Bei sieben der zehn Ereignisse bewirkt der Flutpoldereinsatz eine Verminderung des Scheitelabflusses unter HQ_{100} (3.400 m^3/s), so dass das Volumen über HQ_{100} jeweils um 100 % reduziert wird. Die Scheitel zweier weiterer Ereignisse (E057, E081) liegen bereits im Ist-Zustand etwas unter dem HQ_{100} . Beim größten Ereignis E309 wird das Volumen über HQ_{100} um genau das Volumen der beiden Flutpolder (30,5 Mio. m^3 bzw. 90,5 %) reduziert.

8.4.2 Varianten V1 bis V5 (einfaches HRB-Gesamtvolumen)

Abbildung 14 gibt eine Übersicht über die Lage der in den Varianten V1 bis V5 berücksichtigten HRB. Das Gesamtvolumen der Becken in den Varianten entspricht mit 30,5 Mio. m^3 jeweils dem summierten Volumen der beiden Flutpolder Eltheim und Wörthhof. Die Wirkung dieser Varianten unterhalb der Flutpolder an der Donau ist dennoch durchgängig bei allen Ereignissen geringer als die der Variante V0 (siehe Abbildung 17 und Anlage A.3.4). Die mittlere Scheitelreduktion liegt bei 3,9 % oder 138 m^3/s (V0: 10,4 % oder 372 m^3/s). Durchschnittlich erreichen V1 bis V5 damit



nur rund 36 % der Flutpolderwirkung. Die geringste Scheitelreduktion zeigt sich wie bei V0 bei dem langanhaltenden Winterereignis E031 (V4: 0,3 % bzw. 12 m³/s), die höchste beim Septemberereignis E258 (V2: 9,6 % bzw. 343 m³/s) ebenfalls wie bei der Flutpoldervariante (Abbildung 15, Abbildung 16).

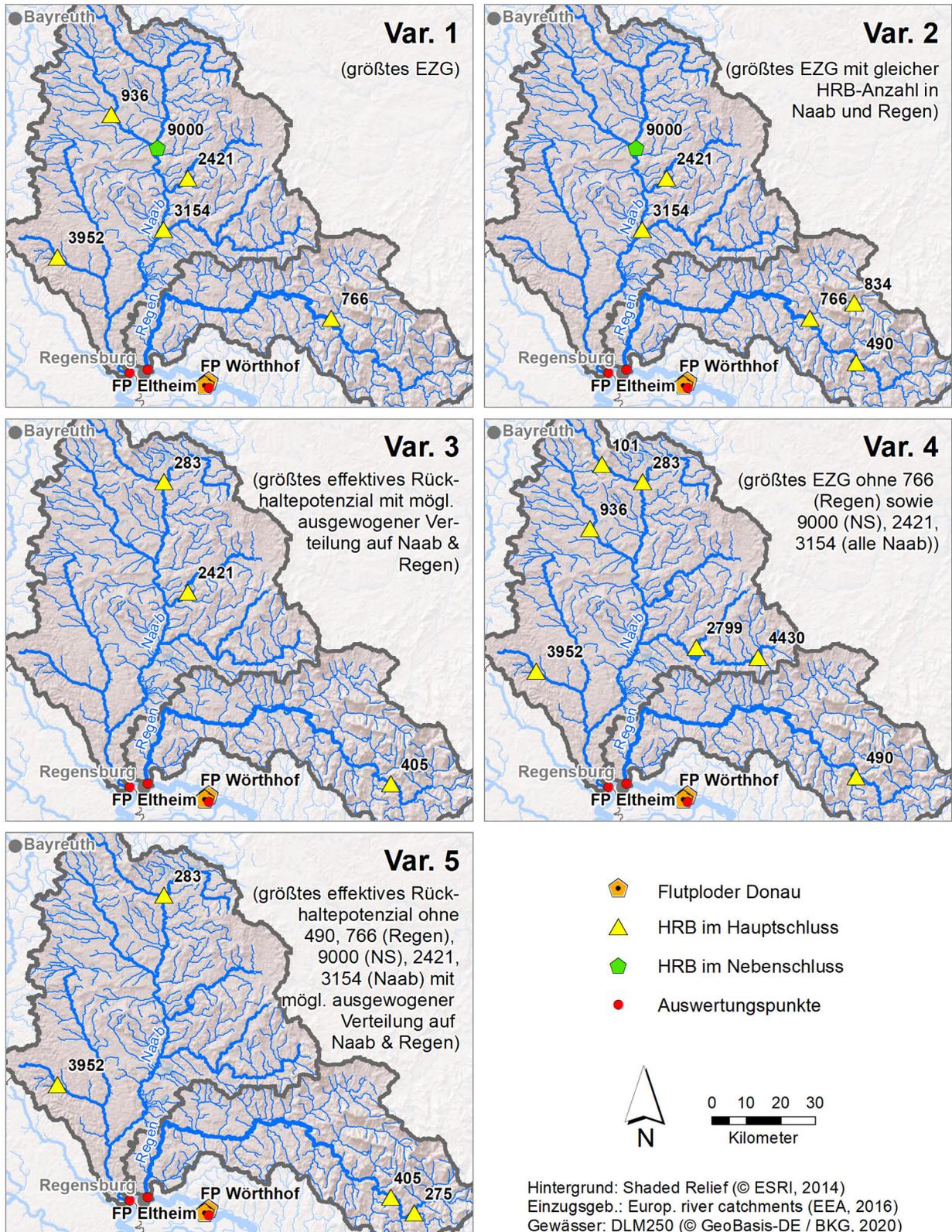


Abbildung 14: Lage und Kennnummern der Haupt- und Nebenschluss-HRB der Varianten V1 bis V5 (einfaches HRB-Gesamtvolumen) in den Einzugsgebieten von Naab und Regen

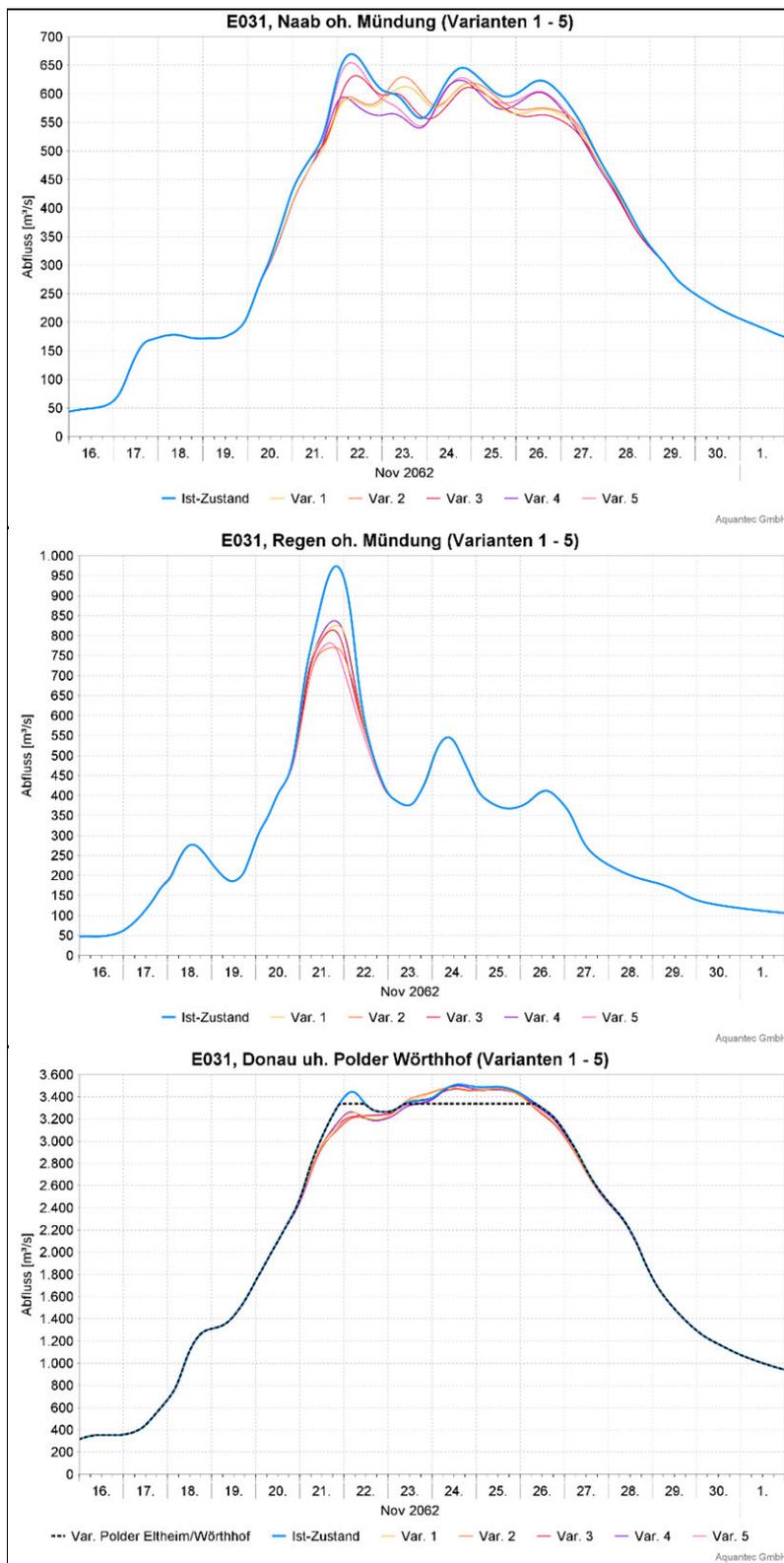


Abbildung 15: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E031: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Varianten V1 bis V5 am Unterlauf von Naab (oben), Regen (Mitte) und unterhalb der Flutpolder an der Donau (unten)

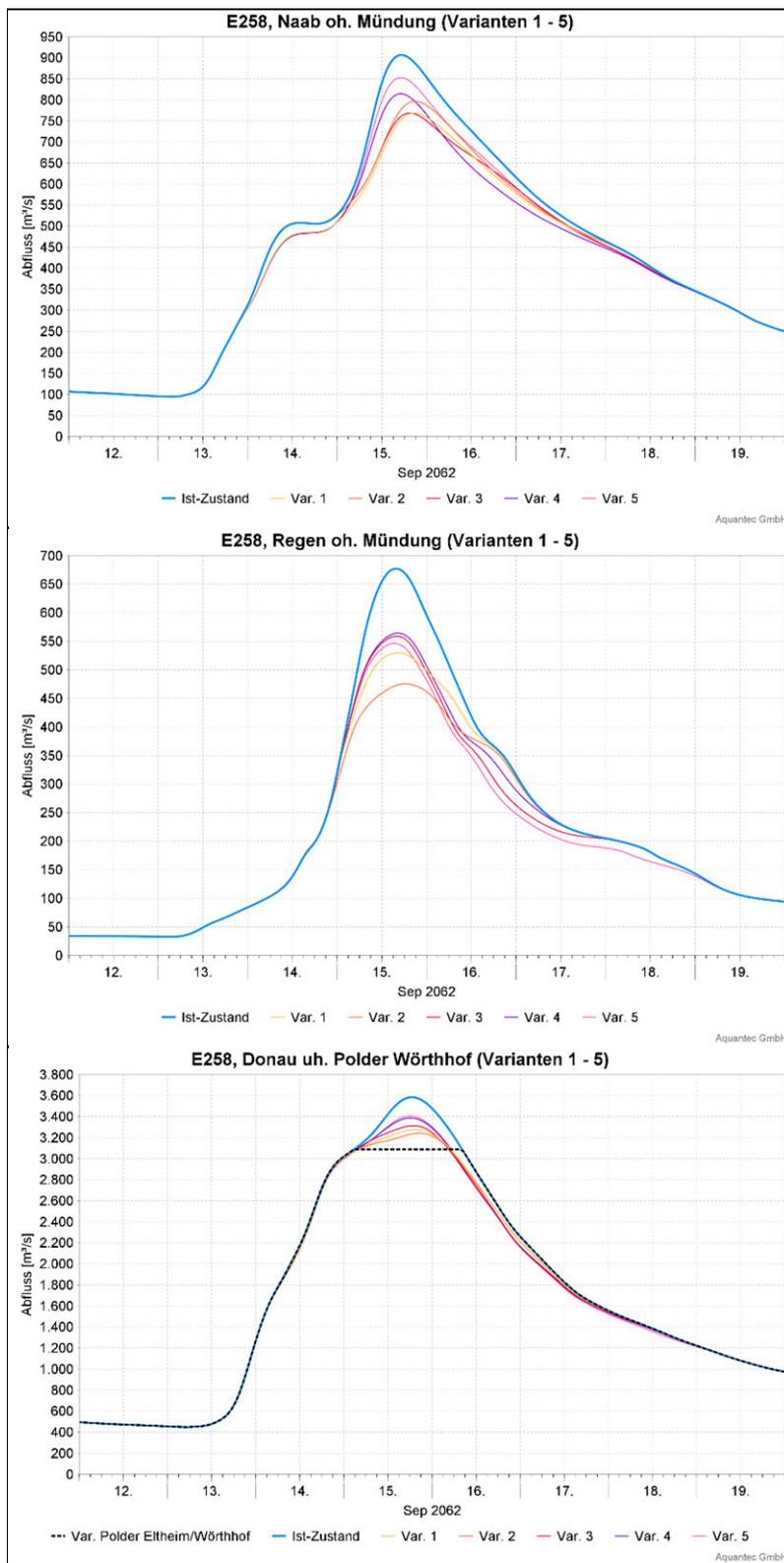


Abbildung 16: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E258: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Varianten V1 bis V5 am Unterlauf von Naab (oben), Regen (Mitte) und unterhalb der Flutpolder an der Donau (unten)



Bei einigen Ereignissen zeigt sich eine deutliche Differenzierung in der Wirkung der unterschiedlichen dezentralen Rückhaltevarianten. Dies umfasst vor allem die Ereignisse E258, E144, E158 sowie mit Abstrichen E136 und E309. Bei diesen Ereignissen ergibt sich die größte Scheitelreduktion mit durchschnittlich 7,3 % jeweils für die Variante V2 (größtes Einzugsgebiet bei gleicher Verteilung der HRB auf Naab und Regen). Etwas schlechter schneidet hier die Variante V1 (größtes Einzugsgebiet) mit einer Reduktion um 6,5 % ab. Eine eher durchschnittliche Scheitelsenkung ergibt sich für Variante V3 (größtes effektives Rückhaltepotenzial) mit 5,5 %. Die Varianten V4 (größtes Einzugsgebiet, ohne die mündungsnächsten HRB) und V5 (größtes effektives Rückhaltepotenzial, ohne die mündungsnächsten HRB) zeigen mit 4,3 % und 3,9 % bei den ausgewählten Ereignissen die geringste Wirkung. Die beschriebene Rangfolge ergibt sich auch für die mittlere Reduktion über alle Ereignisse, wie aus Abbildung 17 ersichtlich wird. Bei den weniger differenzierten Ereignissen, insbesondere E081, E031 und E057 sowie E083 und E249, zeigen sich jeweils abweichende Rangfolgen der Varianten (siehe Wertetabelle in Anlage A.3.4). Bei E083 beispielsweise wird die größte Scheitelreduktion für V3 erreicht, liegt jedoch mit 2,7 % deutlich unter dem Durchschnitt aller Szenarien. Insgesamt sind die Unterschiede bei den letztgenannten Ereignissen wenig signifikant.

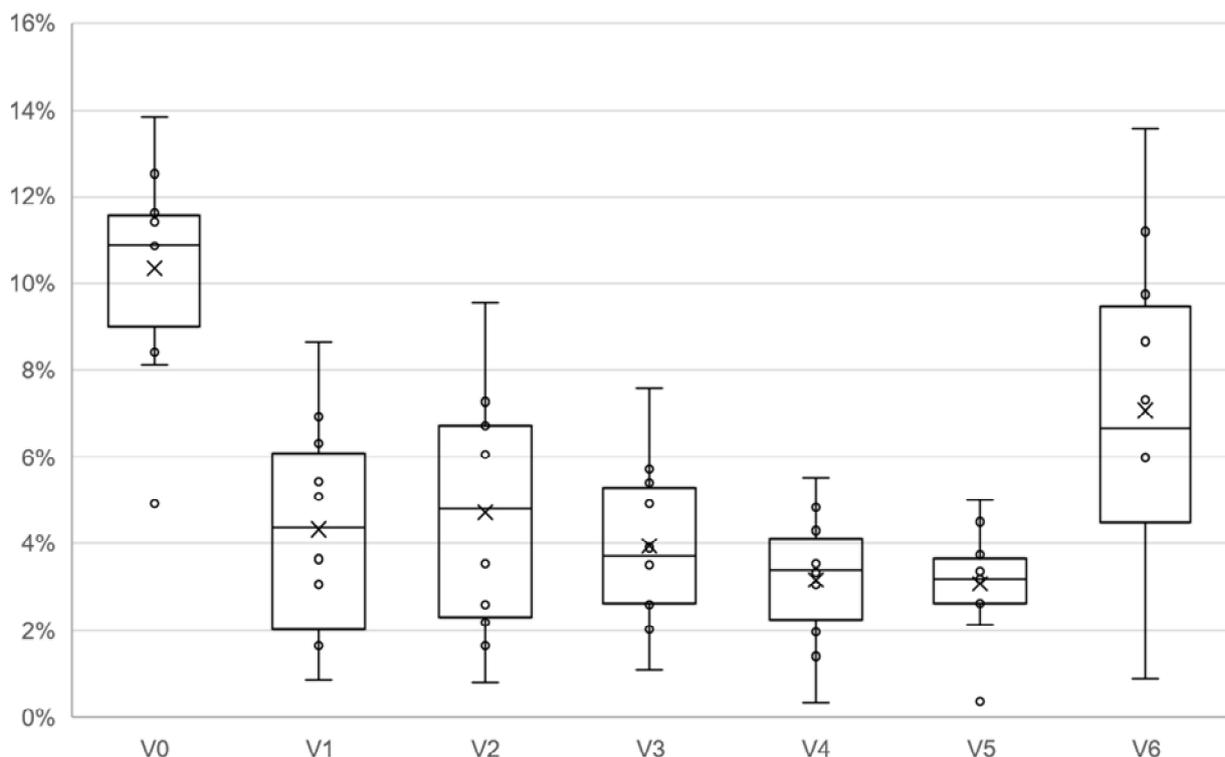


Abbildung 17: Prozentuale Scheitelreduktion bei der Wirkungsanalyse Naab/Regen unterhalb der Flutpolderstandorte an der Donau für die zehn untersuchten Ereignisse nach HRB-Variante (Erläuterung: die Box umschließt die mittleren 50% der Werte, das Kreuz markiert das arithmetische Mittel, der Querstrich den Median der Werte. Die Whisker zeigen die Wertespanne ohne Ausreißer. Als Ausreißer werden Werte betrachtet, die um mehr als das anderthalbfache des Interquartilsabstands (Länge der Box) von der Box entfernt liegen)

Während bei der Flutpoldervariante das Volumen über HQ_{100} im Mittel über die Ereignisse um 11,3 Mio. m^3 reduziert wird, ergibt sich für die Varianten V1 bis V5 ein durchschnittlicher Wert von



5,9 Mio. m³, was 52 % der Flutpolderwirkung entspricht (siehe Anlage A.3.5). Die Volumenreduktion ist im Mittel ebenfalls für Variante V2 am größten (6,5 Mio. m³), gefolgt von V1 und V3 (6,2 bzw. 6,1 Mio. m³), V5 (5,6 Mio. m³) und V4 (5,2 Mio. m³). Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Werte nur eine beschränkte Aussagekraft besitzen, da einige Ereignisse HQ₁₀₀ nicht oder nur geringfügig überschreiten und damit in den Mittelwerten unterrepräsentiert sind.

Die Analyse der Ergebnisse für die Varianten deutet dennoch insgesamt darauf hin, dass die Varianten, bei denen die HRB die größten Einzugsgebiete abdecken (V2 und V1) die beste Wirkung zeigen. Die Auswahl nach dem größten effektiven Rückhaltevolumen resultiert in nur durchschnittlichen Ergebnissen. Der Verzicht auf die mündungsnächsten HRB erweist sich in der Regel als nachteilig für die Reduktion der Hochwasserabflüsse.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für Ausgabepunkte an den Unterläufen von Naab und Regen (Anlage A.3) zeigen sich erwartungsgemäß für alle Ereignisse deutlich ausgeprägtere Unterschiede zwischen den Varianten V1 bis V5 als an dem Ausgabepunkt unterhalb der Flutpolderstandorte an der Donau. An der Naab ergibt sich die größte Scheitelreduktion mit Ausnahme von zwei Ereignissen für Variante V1 (E158: V3, E249: V4). Im Mittel über die Ereignisse werden nach V1 (11,7 %) für V3 (9,8 %) die besten Ergebnisse erzielt, gefolgt von V4 (9,3 %) und V2 (9,1 %). Die Wirkung von V5 (4,9 %) ist im Mittel auffallend geringer. Für den Regen ergibt sich im Mittel über die Ereignisse eine abweichende Reihenfolge. Die Scheitelreduktion ist durchgängig für V2 (23,4 %) am größten. Mit Abstand folgen V5 und V1 (17,6 % bzw. 17,4 %) sowie V3 und V4 (15,2 % bzw. 13,5 %) mit der geringsten Wirkung.

Bei der Analyse dieser Werte ist zu berücksichtigen, dass das Gesamtvolumen der HRB der Varianten nicht gleichmäßig auf die beiden Einzugsgebiete verteilt ist. Das Volumenverhältnis Naab zu Regen beträgt z. B. bei Variante V1 60 zu 40, bei Variante V5 dagegen 35 zu 65. Darin liegt ein wesentlicher Grund für die deutlich abweichenden Rangfolgen in den Einzugsgebieten. Damit erklären sich beispielsweise die guten Resultate für V1 und die auffällig geringe Reduktion für V5 an der Naab. Um die Wirksamkeit der dezentralen Varianten dennoch vergleichen zu können, wurden zusätzlich die Scheitelsummen beider Ausgabepunkte analysiert (Anlage A.3.3). Im Mittel über die Ereignisse ergibt sich hier, wie auch an der Donau, die größte Scheitelreduktion für Variante V2 (16,2 %). Nur bei dem stark Regen-lastigen Winterereignis E249 liefert V5 die besten Ergebnisse, was darauf zurückzuführen sein dürfte, dass die Verteilung des HRB-Volumens bei V5 ebenfalls Regen-lastig ist (rund 65 % des Gesamtvolumens). Variante V1 zeigt bei allen Ereignissen eine etwas geringere Scheitelreduktion als V2. Im Mittel liegt diese bei 14,5 %. Danach folgen V3 mit 12,6 % sowie V4 und V5 mit den geringsten Werten von jeweils 11,3 %. Somit lässt sich an den Seitengewässern dieselbe Wirksamkeitsrangfolge der Varianten beobachten, wie bei der Auswertung unterhalb der Flutpolderstandorte an der Donau.

Ereignisabhängigkeit

Wie oben beschrieben, zeigen die Varianten V1 bis V5 an der Donau unterhalb der Flutpolderstandorte bei vielen Ereignissen relativ geringe Abweichungen in ihrer Wirkung. Im Mittel über die Ereignisse liegt die Spannbreite der Scheitelreduktion bei 76 m³/s pro Ereignis. Die durchschnittliche Spanne zwischen den Ereignissen ist mit 236 m³/s mehr als dreimal so hoch. Dies zeigt,



dass die Wirkung der Varianten maßgeblich von dem jeweiligen Ereignis abhängt. Wie Abbildung 18 verdeutlicht, ergibt sich die im Variantenmittel größte Scheitelreduktion für die Ereignisse E258 (7,3 % oder 260 m³/s), E144 (5,6 %, 204 m³/s) und E309 (5,3 %, 205 m³/s). Die geringsten Werte finden sich für E083 (2,1 %, 76 m³/s), E249 (2,0 %, 77 m³/s) und schließlich E031 mit nur 0,7 % oder 24 m³/s.

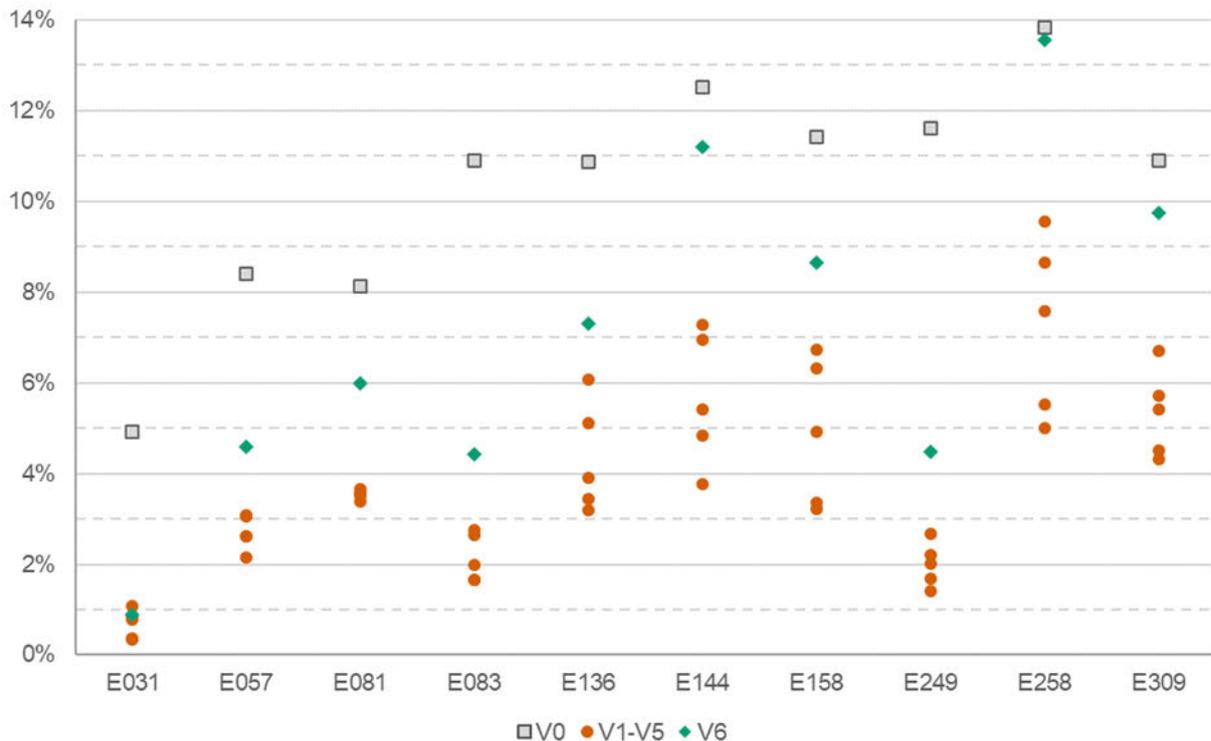


Abbildung 18: Prozentuale Scheitelreduktion bei der Wirkungsanalyse Naab/Regen unterhalb der Flutpolderstandorte an der Donau nach Ereignis für die Varianten V0 (Flutpoldervariante), V1-V5 (einfaches Rückhaltevolumen) und V6 (doppeltes Rückhaltevolumen)

Betrachtet man im Vergleich die Ergebnisse an den Unterläufen von Naab und Regen, zeigt sich, dass dort die Unterschiede in der relativen Wirkung zwischen den Ereignissen weniger prägnant sind. Dies weist darauf hin, dass die Gründe für die Ereignisabhängigkeit nicht nur in diesen Einzugsgebieten zu suchen sind, sondern auch im Zusammenwirken der Abflüsse von Naab, Regen und Donau.

So ist davon auszugehen, dass die Relation der Abflüsse aus Naab und Regen zum Gesamtabfluss der Donau eine wesentliche Rolle bei der Ereignisabhängigkeit spielt. Das Verhältnis ist bei den Ereignissen E249 und E083 mit geringer Wirksamkeit vergleichsweise niedrig, so dass der Einfluss der HRB an den Seitenzuflüssen naturgemäß beschränkt ist. Dagegen sind die beiden Gebiete insbesondere bei den Ereignissen E144 und E258 sehr stark am Donauabfluss beteiligt und die Rückhaltemaßnahmen können damit eine größere Wirkung entfalten. Daneben ist die Form und Dauer der Hochwasserwelle von Bedeutung für die Absenkung der Hochwasserwellen. Das Ereignis E031 beispielsweise zeigt die insgesamt geringste Scheitelreduktion, obwohl Naab und Regen hier einen erheblichen Anteil am Donauabfluss besitzen. Allerdings ist dies auch das



Ereignis mit dem größten Hochwasservolumen und einem langandauernden mehrgipfligen Scheitel. Letzteres trifft insbesondere auch auf das Hochwassergeschehen an der Naab zu. Aufgrund des breiten, voluminösen Scheitels erstreckt sich der Rückhalt in den Becken über einen längeren Zeitraum, so dass die Scheitelhöhe in geringerem Maße reduziert wird als bei Ereignissen mit kurzen Scheiteln und geringerem Volumen wie z. B. dem Ereignis E258.

Auch die räumliche Verteilung des Niederschlags – und damit des Abflusses – innerhalb der Einzugsgebiete hat einen Einfluss auf die Wirksamkeit des dezentral angeordneten Rückhalts. Bei vergleichsweise geringen Abflüssen an einem HRB-Standort kann es dazu kommen, dass das Becken nicht vollständig ausgelastet wird und sich damit das tatsächlich genutzte Retentionsvolumen reduziert. Dieser Fall tritt in der vorliegenden Untersuchung ausschließlich beim Ereignis E136 auf, das in beiden Einzugsgebieten insgesamt die geringsten Abflüsse aufweist. Betroffen davon sind bei den Varianten V3 bis V6 jeweils ein bis zwei HRB (siehe Tabelle 15). Lokal geringe Abflüsse können sich selbst dann auf die Wirksamkeit einer Variante auswirken, wenn die beteiligten Becken ausgelastet sind. Das Füllen der Becken benötigt in diesen Fällen vergleichsweise lange, so dass sich auch die Abflussreduktion über einen längeren Zeitraum erstreckt. Die Wirkung zum Scheitelzeitpunkt fällt damit geringer aus.

Für die Wirkung der dezentral angeordneten HRB in den Einzugsgebieten ist es des Weiteren von maßgeblicher Bedeutung, ob die Hochwasserscheitel aus Naab, Regen und Donau zeitlich zusammentreffen. Dies ist beim Ereignis E144 mit vergleichsweise hoher Reduktionswirkung am ehesten der Fall: Naab- und Donauwelle treffen annähernd zeitgleich ein, der Scheitel des Regen läuft nur um einige Stunden nach. Die Reduktion an den Seitengewässern wirkt sich so vorwiegend im Scheitelbereich der Donau aus. Beim Ereignis E057 dagegen laufen die Wellen aus Naab und Regen rund einen Tag vor. An der Donau bildet sich unterhalb der Regenmündung deshalb ein Vorscheitel aus, der sogar etwas höher ist als der ursprüngliche Donauscheitel. Die Rückhaltemaßnahmen wirken sich folglich im Wesentlichen auf den Vorscheitel aus, während der nachfolgende, ursprüngliche Donauscheitel kaum reduziert wird. Ein ganz ähnlicher Effekt zeigt sich auch bei Ereignis E083. Das Regen-lastige Ereignis E249 fällt am Regen durch eine ausgeprägte Doppelwelle auf. Die Rückhaltevarianten wirken sich hier vor allem auf die erste Welle aus, die allerdings die Donau vor deren Scheitel erreicht. Unterhalb der Flutpolderstandorte zeigt sich die Retentionswirkung daher vor allem im ansteigenden Ast der Welle, bewirkt aber keine nennenswerte Reduktion des Donauscheitels.

Natürliche Retention

Für die Wirkung der dezentral angeordneten Rückhaltevarianten spielt schließlich auch die natürliche Hochwasserretention z. B. in Vorländern, Auen und im Grundwasser eine Rolle. Im Ist-Zustand und beim Einsatz des Flutpolders wirkt sich die natürliche Retention über die gesamte Fließstrecke der Gewässer dämpfend auf den Hochwasserabfluss aus. Durch die Umsetzung von Rückhaltemaßnahmen in den Seitengewässern wird mit dem Abfluss auch die natürliche Retention flussabwärts der Becken gemindert. Dies verringert die Wirksamkeit der Maßnahmen z. B. in Relation zum Flutpolder. Je länger die Fließstrecke unterhalb der HRB ist, je mündungsferner die HRB also verortet sind, desto mehr Einfluss hat dieser Effekt.



8.4.3 Variante V6 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen)

Für Variante V6 wurde das Gesamtvolumen der HRB im Vergleich zu den übrigen Varianten auf 61 Mio. m³ verdoppelt. V6 umfasst an der Naab alle ausgewählten Becken, am Regen die drei Becken, die das größte Einzugsgebiet abdecken (siehe Abbildung 19). Im Mittel über alle Ereignisse ergibt sich damit eine Scheitelreduktion um 7,1 % (zum Vergleich V0: 10,4 %, V1 bis V5: 3,9 %) an der Donau. Im Vergleich zu den Varianten mit einfachem Volumen ist die Scheitelreduktion um 84 % höher, entspricht aber nur rund 69 % der Wirkung der Flutpoldervariante. Trotz des deutlich höheren Retentionsvolumens wird bei keinem der Ereignisse die Scheitelreduktion der Flutpoldervariante erreicht. Vergleicht man die Ergebnisse für die einzelnen Ereignisse, ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Varianten V1 bis V5. Die besten Ergebnisse werden bei den Ereignissen E258 (13,6 %, Abbildung 20), E144 (11,2 %) und E309 (9,7 %) erzielt. Die reduzierten Scheitel liegen hier jeweils nur wenig über denen der Flutpoldervariante V0. Die geringste Scheitelreduktion zeigt sich bei den Ereignissen E249 (4,5 %), E083 (4,4 %) und E031 (0,9 %). Hier liegen die Scheitel jeweils deutlich über denen der Variante V0.

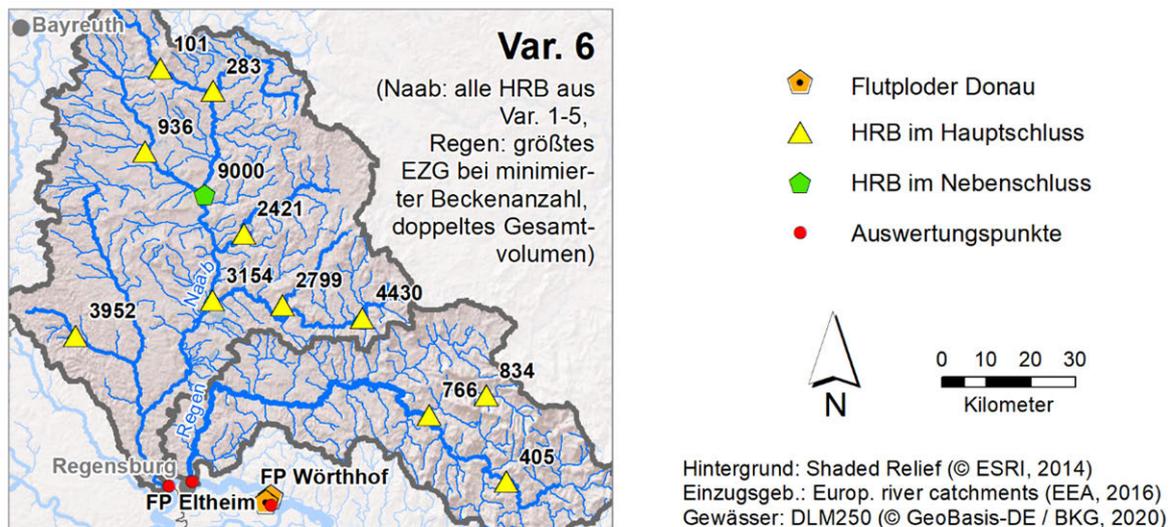


Abbildung 19: Lage und Kennnummern der Haupt- und Nebenschluss-HRB der Variante V6 (doppeltes HRB-Gesamtvolumen) in den Einzugsgebieten von Naab und Regen

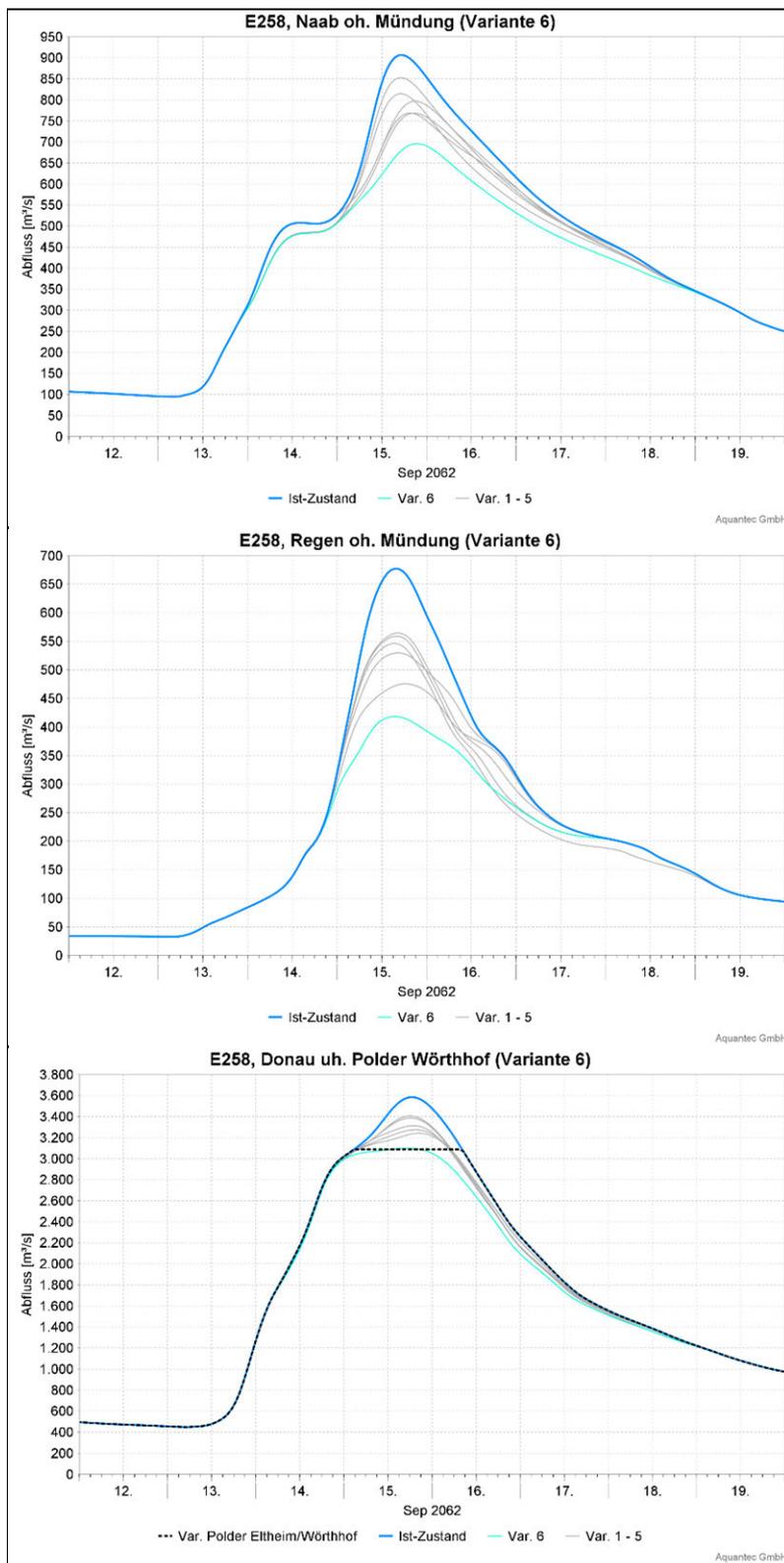


Abbildung 20: Simulierte Hochwasserganglinien für das Ereignis E258: Flutpoldervariante, Ist-Zustand und Variante V6 am Unterlauf von Naab (oben), Regen (Mitte) und unterhalb der Flutpolder an der Donau (unten)



Das Hochwasservolumen über HQ_{100} wird bei Variante V6 um durchschnittlich 9,1 Mio. m^3 pro Ereignis reduziert. Damit liegt die Reduktion 20 % unter dem Wert der Flutpoldervariante (11,3 Mio. m^3) und 53 % über dem Mittelwert für die Varianten V1 bis V5 (5,9 Mio. m^3). Wie bereits oben erwähnt, sind diese Zahlen allerdings nur bedingt aussagekräftig, da das Volumen über HQ_{100} bereits im Ist-Zustand meist deutlich unter dem veranschlagten Retentionsvolumen liegt und das HQ_{100} bei zwei Ereignissen nicht überschritten wird.

Die Wirkung von Variante V6 zeigt sich an den Ausgabepunkten an den Unterläufen von Naab und Regen noch etwas ausgeprägter als an der Donau (Abbildung 20). Bezogen auf die Scheitelsummen beider Gewässer ist die Scheitelreduktion mit durchschnittlich 369 m^3/s um 92 % höher als die der Varianten V1 bis V5 (192 m^3/s). Die größte Wirkung ist für die Ereignisse E309 (Scheitelreduktion 33,8 %) und E258 (29,7 %) zu beobachten. Neben E249 (18,0%) zeigt sich die geringste Wirkung für das Ereignis E136 (20,7%), das die geringsten Abflüsse aus Naab und Regen aufweist und bei dem, auch infolge des erhöhten Volumens, zwei Becken an der Naab nicht voll ausgelastet werden (siehe Tabelle 15).

Auch bei Variante 6 zeigt sich eine ausgeprägte Ereignisabhängigkeit der Scheitelreduktion. Die Relation der Ergebnisse zwischen den Ereignissen unterscheidet sich nicht signifikant von den entsprechenden Ergebnissen für Variante V1 bis V5, so dass davon auszugehen ist, dass auch hier dieselben Einflussfaktoren von Relevanz sind (siehe oben).

8.4.4 Zusammenfassung

Die untersuchten Rückhaltevarianten mit dezentral angeordneten HRB in den Einzugsgebieten von Naab und Regen erweisen sich im Vergleich zu der Variante mit den Flutpoldern Eltheim und Wörthhof an der Donau als deutlich weniger wirksam. Hinsichtlich der Scheitelreduktion erreichen sie durchschnittlich nur 36 % der Flutpolderwirkung. Durch eine Verdopplung des dezentralen HRB-Volumens kann dieser Wert auf 69 % gesteigert werden. Dennoch wird in keinem der Szenarien die Flutpolderwirkung erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Auswahl der HRB das abgedeckte Einzugsgebiet bedeutsamer ist als das effektive Rückhaltevolumen. Die beste Wirkung bei einfachem HRB-Volumen wird mit Variante V2 erzielt, die das größte Einzugsgebiet an Naab und Regen, bei gleicher Verteilung der HRB auf beide Einzugsgebiete, abdeckt. Bei Variante V3, in der Becken nach größtem effektiven Rückhaltepotenzial kombiniert wurden, ist die Wirkung an der Donau im Mittel um 16 % geringer. Bei allen dezentralen Varianten zeigt sich eine erhebliche Ereignisabhängigkeit. Die größte Wirkung wird bei Ereignissen erzielt, die einen hohen Abflussanteil aus Naab und Regen in Relation zum Donauabfluss aufweisen. Positiv wirken sich zudem Ereignisse mit kurzen, ausgeprägte Hochwasserscheiteln aus. Ein relevanter Zeitversatz der Scheitel von Naab, Regen und Donau reduziert dagegen die Wirksamkeit an der Donau.



Literaturverzeichnis

Ludwig, R., A. Böhnisch, M. Mittermeier, B. Poschlod (2019): Datenanalyse zur hochaufgelösten Hochwassermodellierung im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Unveröffentlichter Projektbericht, Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geographie

Tractebel Hydroprojekt GmbH (Hrsg. 2021): Bericht „Bayerisches Flutpolderprogramm; weitergehende Untersuchungen zu Flutpoldern an der Donau – Standortsuche für große Hochwasserrückhaltebecken in den Einzugsgebieten von Lech, Naab und Regen“

Technische Universität München (TUM) (2021): Bericht „Bayerisches Flutpolderprogramm; weitergehende Untersuchungen zu Flutpoldern an der Donau - Ergänzende Überprüfung der Flutpolderwirkung“



Anlagenverzeichnis

Anlage A Tabellen

Anlage A.1 Für die Simulation des Ist-Zustands ausgewählte Ereignisse

Anlage A.2 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Lech

Anlage A.2.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Lech oberhalb der Mündung

Anlage A.2.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau

Anlage A.2.3 Volumen über HQ₁₀₀ und Volumenreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau

Anlage A.3 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Naab/Regen

Anlage A.3.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten an der Naab oberhalb der Mündung

Anlage A.3.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Regen oberhalb der Mündung

Anlage A.3.3 Summierte Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten für die Ausgabepunkte an Naab und Regen

Anlage A.3.4 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau

Anlage A.3.5 Volumen über HQ₁₀₀ und Volumenreduktion der HRB-Varianten unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau

Anlage B Abbildungen

Anlage B.1 Ereignisanalyse für die Simulationsläufe des Ist-Zustands – exemplarische Darstellung der Auswertung

Anlage B.1.1 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Rang der Hochwasserscheitel nach Ereignis und Pegel (beispielhafter Ausschnitt)

Anlage B.1.2 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Überschreitung der HQ_T-Abflüsse nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Anlage B.1.3 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klassifizierte Hochwasserdauer in Stunden nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Anlage B.1.4 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klassifiziertes Hochwasservolumen in Mio. m³ nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Anlage B.1.5 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Längsschnitte der Hochwasserscheitel und -Zeitpunkte (Beispiel für ein Ereignis)

Anlage B.2 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Lech



Anlage B.2.1 Ereignis E031

Anlage B.2.2 Ereignis E036

Anlage B.2.3 Ereignis E042

Anlage B.2.4 Ereignis E136

Anlage B.2.5 Ereignis E138

Anlage B.2.6 Ereignis E168

Anlage B.2.7 Ereignis E245

Anlage B.2.8 Ereignis E250

Anlage B.2.9 Ereignis E276

Anlage B.2.10 Ereignis E303

Anlage B.3 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Naab/Regen

Anlage B.3.1 Ereignis E031

Anlage B.3.2 Ereignis E057

Anlage B.3.3 Ereignis E081

Anlage B.3.4 Ereignis E083

Anlage B.3.5 Ereignis E136

Anlage B.3.6 Ereignis E144

Anlage B.3.7 Ereignis E158

Anlage B.3.8 Ereignis E249

Anlage B.3.9 Ereignis E258

Anlage B.3.10 Ereignis E309



Anlage A Tabellen



Anlage A.1 Für die Simulation des Ist-Zustands ausgewählte Ereignisse

88 für die Simulation des Ist-Zustands ausgewählte Ereignisse nach Ereignisnummer mit Modelllauf des Klimamodells (Member), Anfangs- und Ereigniszeitpunkt der bereitgestellten Daten aus dem ClimEx-Projekt (Ori.), angepasstem (fiktivem) Anfangs- und Endzeitpunkt der LARSIM-Simulationen (Sim.), simuliertem Scheitelzeitpunkt und -abfluss in Hofkirchen/Donau sowie Auswahl für die Wirkungsanalysen Lech (LE) und Naab/Regen (NR).

Ereignis	Member	Anfang (Ori.)	Ereignis (Ori.)	Anfang (Sim.)	Ende (Sim.)	Scheitel Hofkirchen (Sim.)	Q Scheitel [m³/s]	Ausw. WA
E006	kba	01.11.2023	23.05.2025	01.11.2060	30.06.2062	26.05.2062 03:00	2921	
E008	kba	01.11.2024	06.03.2026	01.11.2060	30.04.2062	08.03.2062 10:00	4583	
E013	kbb	01.11.1999	06.10.2001	01.11.2060	30.11.2062	09.10.2062 09:00	3690	
E016	kbb	01.11.2033	12.03.2035	01.11.2060	30.04.2062	14.03.2062 13:00	3614	
E023	kbc	01.11.2025	06.06.2027	01.11.2060	31.07.2062	08.06.2062 09:00	3685	
E027	kbc	01.11.2046	19.11.2048	01.11.2060	31.12.2062	25.11.2062 18:00	3888	
E031	kbd	01.11.2046	21.11.2048	01.11.2060	31.12.2062	24.11.2062 11:00	4164	LE, NR
E033	kbe	01.11.1992	15.03.1994	01.11.2060	30.04.2062	16.03.2062 11:00	3956	
E036	kbe	01.11.2032	09.11.2034	01.11.2060	31.12.2062	12.11.2062 03:00	3185	LE
E041	kbf	01.11.1996	14.05.1998	01.11.2060	30.06.2062	15.05.2062 22:00	4341	
E042	kbf	01.11.2005	04.06.2007	01.11.2060	31.07.2062	06.06.2062 15:00	3592	LE
E044	kbf	01.11.2025	23.09.2027	01.11.2060	31.10.2062	25.09.2062 15:00	4002	
E045	kbf	01.11.2038	30.10.2040	01.11.2060	30.11.2062	01.11.2062 13:00	2866	
E048	kbg	01.11.1997	14.11.1999	01.11.2060	31.12.2062	16.11.2062 09:00	3851	
E050	kbg	01.11.2001	14.07.2003	01.11.2060	31.08.2062	16.07.2062 07:00	3454	
E053	kbg	01.11.2027	05.07.2029	01.11.2060	31.08.2062	07.07.2062 13:00	2708	
E057	kbh	01.11.2032	02.12.2033	01.11.2060	31.01.2062	02.12.2061 17:00	4107	NR
E061	kbi	01.11.2006	26.11.2008	01.11.2060	31.12.2062	29.11.2062 00:00	3534	
E063	kbi	01.11.2015	11.09.2017	01.11.2060	31.10.2062	13.09.2062 19:00	3819	
E064	kbi	01.11.2034	13.12.2035	01.11.2060	31.01.2062	15.12.2061 18:00	2902	
E067	kbj	01.11.2026	14.06.2028	01.11.2060	31.07.2062	16.06.2062 22:00	3164	
E069	kbk	01.11.2034	19.12.2035	01.11.2060	31.01.2062	21.12.2061 09:00	2643	
E071	kbl	01.11.1998	13.12.1999	01.11.2060	31.01.2062	15.12.2061 11:00	3236	
E072	kbl	01.11.2000	16.11.2002	01.11.2060	31.12.2062	18.11.2062 07:00	2418	
E081	kbn	01.11.1989	21.12.1990	01.11.2060	31.01.2062	22.12.2061 22:00	3777	NR
E083	kbn	01.11.2032	08.05.2034	01.11.2060	30.06.2062	10.05.2062 16:00	4396	NR
E084	kbn	01.11.2035	26.05.2037	01.11.2060	30.06.2062	28.05.2062 12:00	3172	
E093	kbo	01.11.2047	25.05.2049	01.11.2060	30.06.2062	27.05.2062 16:00	3505	
E097	kbp	01.11.2021	25.12.2022	01.11.2060	31.01.2062	26.12.2061 11:00	4860	
E105	kbr	01.11.2008	08.10.2010	01.11.2060	30.11.2062	08.10.2062 16:00	3653	
E107	kbr	01.11.2026	24.01.2028	01.11.2060	28.02.2062	25.01.2062 09:00	3935	
E110	kbr	01.11.2034	18.06.2036	01.11.2060	31.07.2062	21.06.2062 06:00	4112	
E112	kbs	01.11.2000	22.07.2002	01.11.2060	31.08.2062	24.07.2062 03:00	4039	
E115	kbs	01.11.2036	26.05.2038	01.11.2060	30.06.2062	28.05.2062 02:00	6257	
E116	kbs	01.11.2048	11.01.2050	01.11.2060	28.02.2062	14.01.2062 01:00	3267	



Ereignis	Member	Anfang (Ori.)	Ereignis (Ori.)	Anfang (Sim.)	Ende (Sim.)	Scheitel Hofkirchen (Sim.)	Q Scheitel [m³/s]	Ausw. WA
E121	kbu	01.11.2013	06.03.2015	01.11.2060	30.04.2062	08.03.2062 13:00	3294	
E127	kbv	01.11.2015	14.03.2017	01.11.2060	30.04.2062	18.03.2062 20:00	3906	
E130	kbw	01.11.1986	04.06.1988	01.11.2060	31.07.2062	06.06.2062 20:00	4194	
E132	kbw	01.11.2005	16.06.2007	01.11.2060	31.07.2062	18.06.2062 00:00	3611	
E134	kbw	01.11.2035	26.05.2037	01.11.2060	30.06.2062	03.06.2062 05:00	2513	
E136	kbw	01.11.2046	11.07.2048	01.11.2060	31.08.2062	13.07.2062 08:00	4645	LE, NR
E138	kbx	01.11.1980	23.07.1982	01.11.2060	31.08.2062	26.07.2062 11:00	2770	LE
E139	kbx	01.11.2032	27.05.2034	01.11.2060	30.06.2062	30.05.2062 00:00	3400	
E140	kbx	01.11.2034	11.12.2035	01.11.2060	31.01.2062	14.12.2061 10:00	3899	
E144	kby	01.11.2009	15.07.2011	01.11.2060	31.08.2062	16.07.2062 07:00	4260	NR
E147	kbz	01.11.2009	29.06.2011	01.11.2060	31.07.2062	01.07.2062 12:00	3075	
E148	kca	01.11.1986	13.06.1988	01.11.2060	31.07.2062	14.06.2062 10:00	3778	
E158	kcb	01.11.2047	25.05.2049	01.11.2060	30.06.2062	27.05.2062 05:00	4430	NR
E168	kcc	01.11.2031	19.05.2033	01.11.2060	30.06.2062	22.05.2062 07:00	3379	LE
E171	kcd	01.11.2004	19.05.2006	01.11.2060	30.06.2062	22.05.2062 00:00	2603	
E173	kcd	01.11.2020	17.10.2022	01.11.2060	30.11.2062	17.10.2062 15:00	4108	
E182	kce	01.11.2027	09.09.2029	01.11.2060	31.10.2062	10.09.2062 19:00	3371	
E183	kce	01.11.2041	01.07.2043	01.11.2060	31.08.2062	03.07.2062 06:00	3597	
E186	kcg	01.11.1986	14.07.1988	01.11.2060	31.08.2062	17.07.2062 03:00	2486	
E188	kcg	01.11.1994	04.11.1996	01.11.2060	31.12.2062	11.11.2062 23:00	3687	
E190	kcg	01.11.2028	08.03.2030	01.11.2060	30.04.2062	10.03.2062 00:00	3741	
E205	kci	01.11.2026	06.06.2028	01.11.2060	31.07.2062	08.06.2062 19:00	3540	
E207	kci	01.11.2037	13.08.2039	01.11.2060	30.09.2062	16.08.2062 01:00	2827	
E208	kci	01.11.2038	14.12.2039	01.11.2060	31.01.2062	16.12.2061 14:00	6590	
E209	kcj	01.11.1984	31.08.1986	01.11.2060	30.09.2062	02.09.2062 02:00	3256	
E211	kcj	01.11.2013	05.06.2015	01.11.2060	31.07.2062	07.06.2062 11:00	3425	
E216	kcj	01.11.2039	17.05.2041	01.11.2060	30.06.2062	19.05.2062 18:00	4468	
E226	kck	01.11.2015	05.07.2017	01.11.2060	31.08.2062	07.07.2062 12:00	3767	
E229	kck	01.11.2028	17.11.2030	01.11.2060	31.12.2062	20.11.2062 04:00	3724	
E232	kcl	01.11.2002	14.09.2004	01.11.2060	31.10.2062	15.09.2062 20:00	3374	
E235	kcl	01.11.2033	02.03.2035	01.11.2060	30.04.2062	04.03.2062 16:00	3521	
E244	kcm	01.11.2019	27.06.2021	01.11.2060	31.07.2062	28.06.2062 18:00	3643	
E245	kcm	01.11.2039	16.06.2041	01.11.2060	31.07.2062	18.06.2062 08:00	3881	LE
E248	kcn	01.11.1998	26.07.2000	01.11.2060	31.08.2062	28.07.2062 11:00	4766	
E249	kcn	01.11.2010	19.12.2011	01.11.2060	31.01.2062	21.12.2061 08:00	4346	NR
E250	kcn	01.11.2020	18.02.2022	01.11.2060	31.03.2062	20.02.2062 12:00	3401	LE
E252	kcn	01.11.2032	22.11.2034	01.11.2060	31.12.2062	24.11.2062 16:00	3860	
E253	kcn	01.11.2036	27.05.2038	01.11.2060	30.06.2062	29.05.2062 07:00	3175	
E258	kco	01.11.2011	14.09.2013	01.11.2060	31.10.2062	16.09.2062 07:00	4180	NR
E260	kcp	01.11.1985	14.11.1987	01.11.2060	31.12.2062	14.11.2062 22:00	3599	
E265	kcp	01.11.2047	07.07.2049	01.11.2060	31.08.2062	09.07.2062 09:00	5520	



Ereignis	Mem-ber	Anfang (Ori.)	Ereignis (Ori.)	Anfang (Sim.)	Ende (Sim.)	Scheitel Hofkirchen (Sim.)	Q Scheitel [m³/s]	Ausw. WA
E270	kcq	01.11.2025	06.07.2027	01.11.2060	31.08.2062	08.07.2062 22:00	4128	
E271	kcq	01.11.2025	31.07.2027	01.11.2060	31.08.2062	02.08.2062 22:00	6335	
E274	kcq	01.11.2046	24.07.2048	01.11.2060	31.08.2062	26.07.2062 14:00	4072	
E276	kcr	01.11.1995	29.06.1997	01.11.2060	31.07.2062	01.07.2062 10:00	3192	LE
E285	kcs	01.11.2029	01.06.2031	01.11.2060	31.07.2062	03.06.2062 00:00	3485	
E287	kcs	01.11.2046	19.11.2048	01.11.2060	31.12.2062	21.11.2062 17:00	3751	
E288	kct	01.11.1982	28.06.1984	01.11.2060	31.07.2062	30.06.2062 17:00	5831	
E292	kct	01.11.2033	16.06.2035	01.11.2060	31.07.2062	18.06.2062 06:00	3852	
E296	kcu	01.11.2016	04.07.2018	01.11.2060	31.08.2062	06.07.2062 18:00	3071	
E303	kcw	01.11.2005	02.08.2007	01.11.2060	30.09.2062	04.08.2062 12:00	4339	LE
E307	kcw	01.11.2028	09.12.2029	01.11.2060	31.01.2062	11.12.2061 15:00	3434	
E309	kcw	01.11.2039	01.02.2041	01.11.2060	31.03.2062	02.02.2062 23:00	4608	NR



Anlage A.2 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Lech



Anlage A.2.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Lech oberhalb der Mündung

Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für den Lech am Auswertungspunkt oberhalb der Mündung nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis		IST	V1	V2	V3	V4	V1a	V5	V6	V7
E031	Scheitel [m³/s]	941	770	797	831	815		719	735	763
	Abw. v. IST [m³/s]		-171	-144	-110	-126		-222	-206	-178
	Reduktion		18,2%	15,3%	11,7%	13,4%		23,6%	21,9%	18,9%
E036	Scheitel [m³/s]	1199	923	947	1028	1024		792	817	859
	Abw. v. IST [m³/s]		-276	-252	-171	-175		-407	-382	-340
	Reduktion		23,0%	21,0%	14,3%	14,6%		33,9%	31,9%	28,4%
E042	Scheitel [m³/s]	979	699	745	816	807		573	602	656
	Abw. v. IST [m³/s]		-280	-234	-163	-172		-406	-377	-323
	Reduktion		28,6%	23,9%	16,6%	17,6%		41,5%	38,5%	33,0%
E136	Scheitel [m³/s]	1293	967	1009	1106	1079		799	837	904
	Abw. v. IST [m³/s]		-326	-284	-187	-214		-494	-456	-389
	Reduktion		25,2%	22,0%	14,5%	16,6%		38,2%	35,3%	30,1%
E138	Scheitel [m³/s]	1157	978	991	1033	1050		874	902	925
	Abw. v. IST [m³/s]		-179	-166	-124	-107		-283	-255	-232
	Reduktion		15,5%	14,3%	10,7%	9,2%		24,5%	22,0%	20,1%
E168	Scheitel [m³/s]	1335	1024	1063	1146	1115		876	913	967
	Abw. v. IST [m³/s]		-311	-272	-189	-220		-459	-422	-368
	Reduktion		23,3%	20,4%	14,2%	16,5%		34,4%	31,6%	27,6%
E245	Scheitel [m³/s]	1426	1096	1133	1201	1183		921	971	1009
	Abw. v. IST [m³/s]		-330	-293	-225	-243		-505	-455	-417
	Reduktion		23,1%	20,5%	15,8%	17,0%		35,4%	31,9%	29,2%
E250	Scheitel [m³/s]	705	502	538	582	584	694	416	445	471
	Abw. v. IST [m³/s]		-203	-167	-123	-121	-11	-289	-260	-234
	Reduktion		28,8%	23,7%	17,4%	17,2%	1,6%	41,0%	36,9%	33,2%
E276	Scheitel [m³/s]	669	511	534	564	558		435	486	471
	Abw. v. IST [m³/s]		-158	-135	-105	-111		-234	-183	-198
	Reduktion		23,6%	20,2%	15,7%	16,6%		35,0%	27,4%	29,6%
E303	Scheitel [m³/s]	1412	1131	1172	1263	1224		987	1033	1104
	Abw. v. IST [m³/s]		-281	-240	-149	-188		-425	-379	-308
	Reduktion		19,9%	17,0%	10,6%	13,3%		30,1%	26,8%	21,8%
Minimum	Abw. v. IST [m³/s]		-158	-135	-105	-107		-222	-183	-178
	Reduktion		15,5%	14,3%	10,6%	9,2%		23,6%	21,9%	18,9%
Mittelwert	Abw. v. IST [m³/s]		-252	-219	-155	-168		-372	-338	-299
	Reduktion		22,9%	19,8%	14,1%	15,2%		33,8%	30,4%	27,2%
Maximum	Abw. v. IST [m³/s]		-330	-293	-225	-243		-505	-456	-417
	Reduktion		28,8%	23,9%	17,4%	17,6%		41,5%	38,5%	33,2%



Anlage A.2.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau

Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für den Lech am Pegel Neuburg, Donau nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis	Wert	IST	V0	V1	V2	V3	V4	V1a	V5	V6	V7
E031	Scheitel [m³/s]	2279	2157	2265	2271	2270	2261		2232	2230	2245
	Abw. v. IST [m³/s]		-122	-14	-8	-9	-18		-47	-49	-34
	Reduktion		5,3%	0,6%	0,3%	0,4%	0,8%		2,0%	2,1%	1,5%
E036	Scheitel [m³/s]	2193	1995	2156	2156	2157	2157		2143	2153	2153
	Abw. v. IST [m³/s]		-198	-37	-37	-36	-36		-50	-40	-40
	Reduktion		9,0%	1,7%	1,7%	1,6%	1,6%		2,3%	1,8%	1,8%
E042	Scheitel [m³/s]	2458	2240	2375	2381	2392	2413		2252	2276	2293
	Abw. v. IST [m³/s]		-218	-83	-77	-66	-45		-206	-182	-165
	Reduktion		8,9%	3,4%	3,1%	2,7%	1,8%		8,4%	7,4%	6,7%
E136	Scheitel [m³/s]	2292	2090	2247	2248	2247	2247		2240	2242	2238
	Abw. v. IST [m³/s]		-202	-45	-44	-45	-45		-52	-50	-54
	Reduktion		8,8%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%		2,2%	2,2%	2,3%
E138	Scheitel [m³/s]	2366	2177	2277	2279	2284	2294		2267	2268	2269
	Abw. v. IST [m³/s]		-189	-89	-87	-82	-72		-99	-98	-97
	Reduktion		8,0%	3,7%	3,7%	3,4%	3,0%		4,2%	4,1%	4,1%
E168	Scheitel [m³/s]	2456	2240	2360	2363	2368	2371		2352	2352	2352
	Abw. v. IST [m³/s]		-216	-96	-93	-88	-85		-104	-104	-104
	Reduktion		8,8%	3,9%	3,8%	3,6%	3,5%		4,2%	4,2%	4,2%
E245	Scheitel [m³/s]	2358	2109	2188	2192	2198	2199		2161	2162	2162
	Abw. v. IST [m³/s]		-249	-170	-166	-160	-159		-197	-196	-196
	Reduktion		10,6%	7,2%	7,0%	6,8%	6,7%		8,4%	8,3%	8,3%
E250	Scheitel [m³/s]	2315	2117	2236	2241	2237	2259	2158	2154	2176	2181
	Abw. v. IST [m³/s]		-198	-79	-74	-78	-56	-157	-161	-139	-134
	Reduktion		8,6%	3,4%	3,2%	3,4%	2,4%	6,8%	7,0%	6,0%	5,8%
E276	Scheitel [m³/s]	2267	2089	2167	2171	2185	2182		2090	2135	2109
	Abw. v. IST [m³/s]		-178	-100	-96	-82	-85		-177	-132	-158
	Reduktion		7,8%	4,4%	4,2%	3,6%	3,7%		7,8%	5,8%	7,0%
E303	Scheitel [m³/s]	2759	2539	2588	2589	2600	2609		2409	2418	2422
	Abw. v. IST [m³/s]		-220	-171	-170	-159	-150		-350	-341	-337
	Reduktion		8,0%	6,2%	6,2%	5,8%	5,4%		12,7%	12,4%	12,2%
Minimum	Abw. v. IST [m³/s]		-122	-14	-8	-9	-18		-47	-40	-34
	Reduktion		5,3%	0,6%	0,3%	0,4%	0,8%		2,0%	1,8%	1,5%
Mittelwert	Abw. v. IST [m³/s]		-199	-88	-85	-80	-75		-144	-133	-132
	Reduktion		8,4%	3,6%	3,5%	3,3%	3,1%		5,9%	5,4%	5,4%
Maximum	Abw. v. IST [m³/s]		-249	-171	-170	-160	-159		-350	-341	-337
	Reduktion		10,6%	7,2%	7,0%	6,8%	6,7%		12,7%	12,4%	12,2%



Anlage A.2.3 Volumen über HQ₁₀₀ und Volumenreduktion der HRB-Varianten am Pegel Neuburg, Donau

Volumen über HQ₁₀₀ der Rückhalteszenarien für den Lech am Pegel Neuburg, Donau nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis	IST	V0	V1	V2	V3	V4	V1a	V5	V6	V7	
E031	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	27,1	10,1	22,0	22,9	22,8	22,3		13,3	14,1	15,9
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-17,0	-5,1	-4,2	-4,3	-4,8		-13,8	-13,0	-11,2
	Reduktion [%]		62,7%	18,8%	15,5%	15,9%	17,7%		50,9%	48,0%	41,3%
E036	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	4,5	0,0	2,3	2,3	2,3	2,3		1,6	1,9	1,9
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-4,5	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2		-2,9	-2,6	-2,6
	Reduktion [%]		100,0%	48,9%	48,9%	48,9%	48,9%		64,4%	57,8%	57,8%
E042	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	28,9	12,0	21,1	21,7	22,8	24,4		9,6	11,5	12,9
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-16,9	-7,8	-7,2	-6,1	-4,5		-19,3	-17,4	-16,0
	Reduktion [%]		58,5%	27,0%	24,9%	21,1%	15,6%		66,8%	60,2%	55,4%
E136	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	11,7	0,0	8,2	8,2	7,9	7,8		7,7	7,3	6,9
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-11,7	-3,5	-3,5	-3,8	-3,9		-4,0	-4,4	-4,8
	Reduktion [%]		100,0%	29,9%	29,9%	32,5%	33,3%		34,2%	37,6%	41,0%
E138	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	23,9	7,5	15,9	16,0	16,5	17,4		14,1	14,2	14,3
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-16,4	-8,0	-7,9	-7,4	-6,5		-9,8	-9,7	-9,6
	Reduktion [%]		68,6%	33,5%	33,1%	31,0%	27,2%		41,0%	40,6%	40,2%
E168	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	29,4	12,3	21,3	21,4	21,8	22,2		19,2	19,2	19,2
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-17,1	-8,1	-8,0	-7,6	-7,2		-10,2	-10,2	-10,2
	Reduktion [%]		58,2%	27,6%	27,2%	25,9%	24,5%		34,7%	34,7%	34,7%
E245	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	14,5	0,2	4,2	4,4	4,9	4,9		2,3	2,4	2,4
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-14,3	-10,3	-10,1	-9,6	-9,6		-12,2	-12,1	-12,1
	Reduktion [%]		98,6%	71,0%	69,7%	66,2%	66,2%		84,1%	83,4%	83,4%
E250	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	16,4	1,0	7,9	8,2	8,2	9,9	2,8	2,1	3,2	3,6
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-15,4	-8,5	-8,2	-8,2	-6,5	-13,6	-14,3	-13,2	-12,8
	Reduktion [%]		93,9%	51,8%	50,0%	50,0%	39,6%	82,9%	87,2%	80,5%	78,0%
E276	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	13,1	0,0	3,5	4,0	5,0	5,0		0,0	1,3	0,2
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-13,1	-9,6	-9,1	-8,1	-8,1		-13,1	-11,8	-12,9
	Reduktion [%]		100,0%	73,3%	69,5%	61,8%	61,8%		100,0%	90,1%	98,5%
E303	V ü. HQ100 [Mio. m ³]	62,4	44,5	44,3	44,6	45,4	46,0		30,3	31,0	31,3
	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-17,9	-18,1	-17,8	-17,0	-16,4		-32,1	-31,4	-31,1
	Reduktion [%]		28,7%	29,0%	28,5%	27,2%	26,3%		51,4%	50,3%	49,8%
Minimum	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-4,5	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2		-2,9	-2,6	-2,6
	Reduktion		28,7%	18,8%	15,5%	15,9%	15,6%		34,2%	34,7%	34,7%
Mittelwert	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-14,4	-8,1	-7,8	-7,4	-7,0		-13,2	-12,6	-12,3
	Reduktion		76,9%	41,1%	39,7%	38,0%	36,1%		61,5%	58,3%	58,0%
Maximum	Abw. v. IST [Mio. m ³]		-17,9	-18,1	-17,8	-17,0	-16,4		-32,1	-31,4	-31,1
	Reduktion		100,0%	73,3%	69,7%	66,2%	66,2%		100,0%	90,1%	98,5%



Anlage A.3 Ergebnisse der Wirkungsanalyse Naab/Regen



Anlage A.3.1 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten an der Naab oberhalb der Mündung

Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für Naab/Regen am Auswertungspunkt Naab oberhalb der Mündung nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis		IST	V1	V2	V3	V4	V5	V6
E031	Scheitel [m³/s]	670	617	629	632	624	655	580
	Abw. v. IST [m³/s]		-53	-41	-38	-46	-15	-90
	Reduktion		7,9%	6,1%	5,7%	6,9%	2,2%	13,4%
E057	Scheitel [m³/s]	759	648	665	667	666	716	566
	Abw. v. IST [m³/s]		-111	-94	-92	-93	-43	-193
	Reduktion		14,6%	12,4%	12,1%	12,3%	5,7%	25,4%
E081	Scheitel [m³/s]	733	655	674	660	665	696	603
	Abw. v. IST [m³/s]		-78	-59	-73	-68	-37	-130
	Reduktion		10,6%	8,0%	10,0%	9,3%	5,0%	17,7%
E083	Scheitel [m³/s]	497	446	459	452	459	473	415
	Abw. v. IST [m³/s]		-51	-38	-45	-38	-24	-82
	Reduktion		10,3%	7,6%	9,1%	7,6%	4,8%	16,5%
E136	Scheitel [m³/s]	508	470	481	479	490	496	466
	Abw. v. IST [m³/s]		-38	-27	-29	-18	-12	-42
	Reduktion		7,5%	5,3%	5,7%	3,5%	2,4%	8,3%
E144	Scheitel [m³/s]	1122	972	996	997	1018	1068	886
	Abw. v. IST [m³/s]		-150	-126	-125	-104	-54	-236
	Reduktion		13,4%	11,2%	11,1%	9,3%	4,8%	21,0%
E158	Scheitel [m³/s]	680	592	606	589	617	642	532
	Abw. v. IST [m³/s]		-88	-74	-91	-63	-38	-148
	Reduktion		12,9%	10,9%	13,4%	9,3%	5,6%	21,8%
E249	Scheitel [m³/s]	525	484	518	501	462	481	453
	Abw. v. IST [m³/s]		-41	-7	-24	-63	-44	-72
	Reduktion		7,8%	1,3%	4,6%	12,0%	8,4%	13,7%
E258	Scheitel [m³/s]	907	769	797	769	814	853	696
	Abw. v. IST [m³/s]		-138	-110	-138	-93	-54	-211
	Reduktion		15,2%	12,1%	15,2%	10,3%	6,0%	23,3%
E309	Scheitel [m³/s]	753	624	636	669	657	725	551
	Abw. v. IST [m³/s]		-129	-117	-84	-96	-28	-202
	Reduktion		17,1%	15,5%	11,2%	12,7%	3,7%	26,8%
Minimum	Abw. v. IST [m³/s]		-38	-7	-24	-18	-12	-42
	Reduktion		7,5%	1,3%	4,6%	3,5%	2,2%	8,3%
Mittelwert	Abw. v. IST [m³/s]		-88	-69	-74	-68	-35	-141
	Reduktion		11,7%	9,1%	9,8%	9,3%	4,9%	18,8%
Maximum	Abw. v. IST [m³/s]		-150	-126	-138	-104	-54	-236
	Reduktion		17,1%	15,5%	15,2%	12,7%	8,4%	26,8%



Anlage A.3.2 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten am Regen oberhalb der Mündung

Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für Naab/Regen am Auswertungspunkt Regen oberhalb der Mündung nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis		IST	V1	V2	V3	V4	V5	V6
E031	Scheitel [m³/s]	974	825	771	814	837	782	669
	Abw. v. IST [m³/s]		-149	-203	-160	-137	-192	-305
	Reduktion		15,3%	20,8%	16,4%	14,1%	19,7%	31,3%
E057	Scheitel [m³/s]	940	798	745	802	817	772	656
	Abw. v. IST [m³/s]		-142	-195	-138	-123	-168	-284
	Reduktion		15,1%	20,7%	14,7%	13,1%	17,9%	30,2%
E081	Scheitel [m³/s]	798	708	669	693	714	665	595
	Abw. v. IST [m³/s]		-90	-129	-105	-84	-133	-203
	Reduktion		11,3%	16,2%	13,2%	10,5%	16,7%	25,4%
E083	Scheitel [m³/s]	764	630	588	650	660	629	525
	Abw. v. IST [m³/s]		-134	-176	-114	-104	-135	-239
	Reduktion		17,5%	23,0%	14,9%	13,6%	17,7%	31,3%
E136	Scheitel [m³/s]	528	409	374	439	438	436	355
	Abw. v. IST [m³/s]		-119	-154	-89	-90	-92	-173
	Reduktion		22,5%	29,2%	16,9%	17,0%	17,4%	32,8%
E144	Scheitel [m³/s]	532	414	378	448	449	438	345
	Abw. v. IST [m³/s]		-118	-154	-84	-83	-94	-187
	Reduktion		22,2%	28,9%	15,8%	15,6%	17,7%	35,2%
E158	Scheitel [m³/s]	571	457	435	503	507	494	404
	Abw. v. IST [m³/s]		-114	-136	-68	-64	-77	-167
	Reduktion		20,0%	23,8%	11,9%	11,2%	13,5%	29,2%
E249	Scheitel [m³/s]	780	739	690	705	739	689	617
	Abw. v. IST [m³/s]		-41	-90	-75	-41	-91	-163
	Reduktion		5,3%	11,5%	9,6%	5,3%	11,7%	20,9%
E258	Scheitel [m³/s]	677	530	476	559	565	546	418
	Abw. v. IST [m³/s]		-147	-201	-118	-112	-131	-259
	Reduktion		21,7%	29,7%	17,4%	16,5%	19,4%	38,3%
E309	Scheitel [m³/s]	751	579	527	594	613	566	445
	Abw. v. IST [m³/s]		-172	-224	-157	-138	-185	-306
	Reduktion		22,9%	29,8%	20,9%	18,4%	24,6%	40,7%
Minimum	Abw. v. IST [m³/s]		-41	-90	-68	-41	-77	-163
	Reduktion		5,3%	11,5%	9,6%	5,3%	11,7%	20,9%
Mittelwert	Abw. v. IST [m³/s]		-123	-166	-111	-98	-130	-229
	Reduktion		17,4%	23,4%	15,2%	13,5%	17,6%	31,5%
Maximum	Abw. v. IST [m³/s]		-172	-224	-160	-138	-192	-306
	Reduktion		22,9%	29,8%	20,9%	18,4%	24,6%	40,7%



Anlage A.3.3 Summierte Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten für die Ausgabepunkte an Naab und Regen

Summierte Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für Naab/Regen: Summe der Scheitel an den Auswertungspunkten Naab oberhalb der Mündung und Regen oberhalb der Mündung nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis		IST	V1	V2	V3	V4	V5	V6
E031	Scheitel [m ³ /s]	1643	1443	1400	1446	1461	1436	1249
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-200	-243	-197	-182	-207	-394
	Reduktion		12,2%	14,8%	12,0%	11,1%	12,6%	24,0%
E057	Scheitel [m ³ /s]	1699	1446	1409	1469	1483	1488	1222
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-253	-290	-230	-216	-211	-477
	Reduktion		14,9%	17,1%	13,5%	12,7%	12,4%	28,1%
E081	Scheitel [m ³ /s]	1531	1363	1343	1352	1378	1361	1198
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-168	-188	-179	-153	-170	-333
	Reduktion		11,0%	12,3%	11,7%	10,0%	11,1%	21,8%
E083	Scheitel [m ³ /s]	1261	1076	1047	1102	1119	1102	940
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-185	-214	-159	-142	-159	-321
	Reduktion		14,7%	17,0%	12,6%	11,3%	12,6%	25,5%
E136	Scheitel [m ³ /s]	1036	879	854	919	928	932	822
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-157	-182	-117	-108	-104	-214
	Reduktion		15,2%	17,6%	11,3%	10,4%	10,0%	20,7%
E144	Scheitel [m ³ /s]	1654	1386	1374	1445	1467	1506	1231
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-268	-280	-209	-187	-148	-423
	Reduktion		16,2%	16,9%	12,6%	11,3%	8,9%	25,6%
E158	Scheitel [m ³ /s]	1251	1049	1041	1092	1123	1136	936
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-202	-210	-159	-128	-115	-315
	Reduktion		16,1%	16,8%	12,7%	10,2%	9,2%	25,2%
E249	Scheitel [m ³ /s]	1305	1223	1208	1206	1201	1171	1070
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-82	-97	-99	-104	-134	-235
	Reduktion		6,3%	7,4%	7,6%	8,0%	10,3%	18,0%
E258	Scheitel [m ³ /s]	1584	1298	1272	1328	1379	1399	1114
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-286	-312	-256	-205	-185	-470
	Reduktion		18,1%	19,7%	16,2%	12,9%	11,7%	29,7%
E309	Scheitel [m ³ /s]	1504	1203	1164	1263	1270	1291	996
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-301	-340	-241	-234	-213	-508
	Reduktion		20,0%	22,6%	16,0%	15,6%	14,2%	33,8%
Minimum	Abw. v. IST [m ³ /s]		-82	-97	-99	-104	-104	-214
	Reduktion		6,3%	7,4%	7,6%	8,0%	8,9%	18,0%
Mittelwert	Abw. v. IST [m ³ /s]		-210	-236	-185	-166	-165	-369
	Reduktion		14,5%	16,2%	12,6%	11,3%	11,3%	25,2%
Maximum	Abw. v. IST [m ³ /s]		-301	-340	-256	-234	-213	-508
	Reduktion		20,0%	22,6%	16,2%	15,6%	14,2%	33,8%



Anlage A.3.4 Scheitelabflüsse und Scheitelreduktion der HRB-Varianten unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau

Scheitelabflüsse der Rückhalteszenarien für Naab/Regen unterhalb des Flutpolderstandorts Wörthhof, Donau nach HRB-Variante und Ereignis mit absoluter und relativer Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand

Ereignis		IST	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
E031	Scheitel [m ³ /s]	3510	3337	3479	3482	3472	3498	3497	3478
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-173	-31	-28	-38	-12	-13	-32
	Reduktion		4,9%	0,9%	0,8%	1,1%	0,3%	0,4%	0,9%
E057	Scheitel [m ³ /s]	3365	3082	3261	3277	3277	3262	3293	3210
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-283	-104	-88	-88	-103	-72	-155
	Reduktion		8,4%	3,1%	2,6%	2,6%	3,1%	2,1%	4,6%
E081	Scheitel [m ³ /s]	3324	3054	3202	3206	3207	3206	3211	3124
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-270	-122	-118	-117	-118	-113	-200
	Reduktion		8,1%	3,7%	3,5%	3,5%	3,5%	3,4%	6,0%
E083	Scheitel [m ³ /s]	3545	3159	3486	3486	3448	3475	3452	3388
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-386	-59	-59	-97	-70	-93	-157
	Reduktion		10,9%	1,7%	1,7%	2,7%	2,0%	2,6%	4,4%
E136	Scheitel [m ³ /s]	3685	3284	3497	3461	3541	3558	3567	3415
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-401	-188	-224	-144	-127	-118	-270
	Reduktion		10,9%	5,1%	6,1%	3,9%	3,4%	3,2%	7,3%
E144	Scheitel [m ³ /s]	3620	3167	3369	3357	3424	3446	3484	3215
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-453	-251	-263	-196	-174	-136	-405
	Reduktion		12,5%	6,9%	7,3%	5,4%	4,8%	3,8%	11,2%
E158	Scheitel [m ³ /s]	3430	3038	3213	3199	3261	3315	3320	3133
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-392	-217	-231	-169	-115	-110	-297
	Reduktion		11,4%	6,3%	6,7%	4,9%	3,4%	3,2%	8,7%
E249	Scheitel [m ³ /s]	3813	3370	3748	3729	3735	3759	3711	3642
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-443	-65	-84	-78	-54	-102	-171
	Reduktion		11,6%	1,7%	2,2%	2,0%	1,4%	2,7%	4,5%
E258	Scheitel [m ³ /s]	3585	3089	3275	3242	3313	3387	3405	3098
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-496	-310	-343	-272	-198	-180	-487
	Reduktion		13,8%	8,6%	9,6%	7,6%	5,5%	5,0%	13,6%
E309	Scheitel [m ³ /s]	3849	3429	3640	3591	3629	3683	3676	3474
	Abw. v. IST [m ³ /s]		-420	-209	-258	-220	-166	-173	-375
	Reduktion		10,9%	5,4%	6,7%	5,7%	4,3%	4,5%	9,7%
Minimum	Abw. v. IST [m ³ /s]		-173	-31	-28	-38	-12	-13	-32
	Reduktion		4,9%	0,9%	0,8%	1,1%	0,3%	0,4%	0,9%
Mittelwert	Abw. v. IST [m ³ /s]		-372	-156	-170	-142	-114	-111	-255
	Reduktion		10,4%	4,3%	4,7%	4,0%	3,2%	3,1%	7,1%
Maximum	Abw. v. IST [m ³ /s]		-496	-310	-343	-272	-198	-180	-487
	Reduktion		13,8%	8,6%	9,6%	7,6%	5,5%	5,0%	13,6%



Anlage B Abbildungen



Anlage B.1 Ereignisanalyse für die Simulationsläufe des Ist-Zustands – exemplarische Darstellung der Auswertung

Anlage B.1.1 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Rang der Hochwasserscheitel nach Ereignis und Pegel (beispielhafter Ausschnitt)

Szenario	Scheitel Hofkirchen	Neu-Ulm	Günzburg	Dillingen	Donauwörth	Neuburg	Ingolstadt	Kelheim	Kelheimwinzer	Schwabelweis	Straubing	Pfelling	Deggendorf	Hofkirchen	mittl. Rang
E031_ist	24. November	29	39	44	46	37	37	40	36	18	18	17	18	20	30,7
E036_ist	12. November	40	47	51	66	45	44	53	64	79	78	78	79	72	61,2
E042_ist	06. Juni	44	43	41	35	25	25	24	23	62	62	64	64	53	43,5
E057_ist	02. Dezember	54	56	61	57	61	64	67	57	23	22	21	22	24	45,3
E081_ist	22. Dezember	58	64	62	45	78	77	78	68	24	24	24	24	39	51,2
E083_ist	10. Mai	87	86	82	37	57	57	52	32	17	16	16	15	13	43,6
E136_ist	13. Juli	68	66	65	64	35	34	26	20	12	10	10	10	8	32,9
E138_ist	26. Juli	10	15	24	52	31	31	38	54	83	83	83	83	82	51,5
E144_ist	16. Juli	82	84	85	85	86	86	86	83	13	13	13	12	17	57,3
E158_ist	27. Mai	79	78	79	81	79	80	70	61	21	19	18	17	12	53,4
E168_ist	22. Mai	27	17	12	33	26	26	31	41	75	75	75	74	64	44,3
E245_ist	18. Juni	33	36	37	61	32	32	34	31	28	29	29	30	33	34,2
E249_ist	21. Dezember	14	12	15	29	29	29	30	27	8	8	8	8	14	17,8
E250_ist	20. Februar	26	29	31	26	33	33	33	35	53	54	53	52	62	40,0
E258_ist	16. September	86	87	87	88	88	88	74	63	15	15	15	16	19	57,0
E276_ist	01. Juli	49	38	35	39	39	39	42	45	73	74	74	75	71	53,3
E303_ist	04. August	35	32	33	50	14	15	17	15	20	21	23	23	16	24,2
E309_ist	02. Februar	41	46	49	47	60	59	55	39	7	7	7	7	9	33,3



Anlage B.1.2 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: Überschreitung der HQ_T-Abflüsse nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Szenario												Scheitel Hofkirchen		
	Neu-Ulm	Günzburg	Dillingen	Donauwörth	Neuburg	Ingolstadt	Kelheim	Kelheimwinzer	Schwabelweis	Straubing	Pfelling		Deggendorf	Hofkirchen
E031_ist	1213	1297	1087	1529	2279	2091	2169	2431	3493	3581	3637	3664	4164	24. November
E036_ist	1096	1207	1046	1351	2193	1996	2064	2153	2363	2394	2402	2404	3185	12. November
E042_ist	1043	1238	1099	1621	2458	2256	2374	2581	2852	2870	2876	2878	3592	06. Juni
E057_ist	960,4	1076	958,7	1435	2062	1848	1931	2201	3352	3475	3523	3536	4107	02. Dezember
E081_ist	889,1	999,2	949,6	1531	1869	1693	1805	2069	3312	3427	3471	3494	3777	22. Dezember
E083_ist	485,2	672,6	814,4	1617	2091	1886	2064	2486	3527	3655	3690	3702	4396	10. Mai
E136_ist	802,2	978,5	935,3	1363	2292	2107	2340	2651	3679	3767	3777	3777	4645	13. Juli
E138_ist	1458	1566	1249	1468	2366	2163	2177	2229	2313	2315	2317	2316	2770	26. Juli
E144_ist	585,4	688,5	762	943,6	1463	1367	1556	1900	3614	3698	3723	3726	4260	16. Juli
E158_ist	634	807,2	882,8	1064	1809	1640	1918	2171	3415	3580	3634	3676	4430	27. Mai
E168_ist	1263	1562	1313	1625	2456	2246	2264	2341	2585	2610	2622	2626	3379	22. Mai
E245_ist	1157	1315	1124	1381	2358	2148	2232	2492	3245	3305	3325	3329	3881	18. Juni
E249_ist	1403	1594	1289	1742	2409	2211	2284	2528	3804	3882	3914	3918	4346	21. Dezember
E250_ist	1297	1437	1190	1783	2315	2129	2234	2431	2909	2994	3018	3030	3401	20. Februar
E258_ist	494,8	596	667,4	792,9	1317	1323	1870	2154	3581	3676	3701	3702	4180	16. September
E276_ist	993,6	1298	1159	1607	2267	2071	2142	2302	2599	2616	2623	2624	3192	01. Juli
E303_ist	1152	1360	1173	1512	2759	2550	2676	2905	3448	3503	3509	3506	4339	04. August
E309_ist	1094	1212	1048	1528	2063	1865	2035	2413	3837	3961	3996	4007	4608	02. Februar



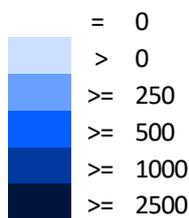
Anlage B.1.3 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klas-sifizierte Hochwasserdauer in Stunden nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Szenario	Analysepegel												Scheitel Hofkirchen	
	Neu-Ulm	Günzburg	Dillingen	Donauwörth	Neuburg	Ingolstadt	Kelheim	Kelheimwinzer	Schwabelweis	Straubing	Pfelling	Deggendorf		Hofkirchen
E031_ist	166	170	170	200	216	212	212	207	234	237	240	244	245	24. November
E036_ist	49	51	50	72	109	106	108	101	109	110	111	111	123	12. November
E042_ist	51	56	59	127	225	220	228	224	233	238	242	244	256	06. Juni
E057_ist	57	58	56	149	167	163	168	175	230	240	248	254	240	02. Dezember
E081_ist	81	89	92	127	115	113	119	128	165	173	180	184	166	22. Dezember
E083_ist	0	10	21	132	142	139	151	161	189	197	202	204	192	10. Mai
E136_ist	28	36	40	66	111	107	114	117	127	131	131	133	138	13. Juli
E138_ist	77	76	75	82	375	372	371	95	88	88	89	89	97	26. Juli
E144_ist	6	16	19	58	72	70	80	89	137	142	145	147	140	16. Juli
E158_ist	13	28	35	188	191	185	192	191	212	216	218	220	215	27. Mai
E168_ist	60	68	70	84	103	100	103	95	95	97	98	98	104	22. Mai
E245_ist	49	235	237	257	279	277	286	293	323	327	328	328	322	18. Juni
E249_ist	75	76	75	99	111	108	110	111	158	162	165	166	155	21. Dezember
E250_ist	82	86	86	118	124	122	126	130	168	176	180	184	175	20. Februar
E258_ist	0	0	0	21	42	40	53	57	96	99	101	101	92	16. September
E276_ist	75	87	90	112	125	122	128	123	132	132	133	133	127	01. Juli
E303_ist	60	63	64	87	113	111	116	114	126	129	130	130	136	04. August
E309_ist	160	163	162	181	201	196	206	212	301	305	306	308	289	02. Februar



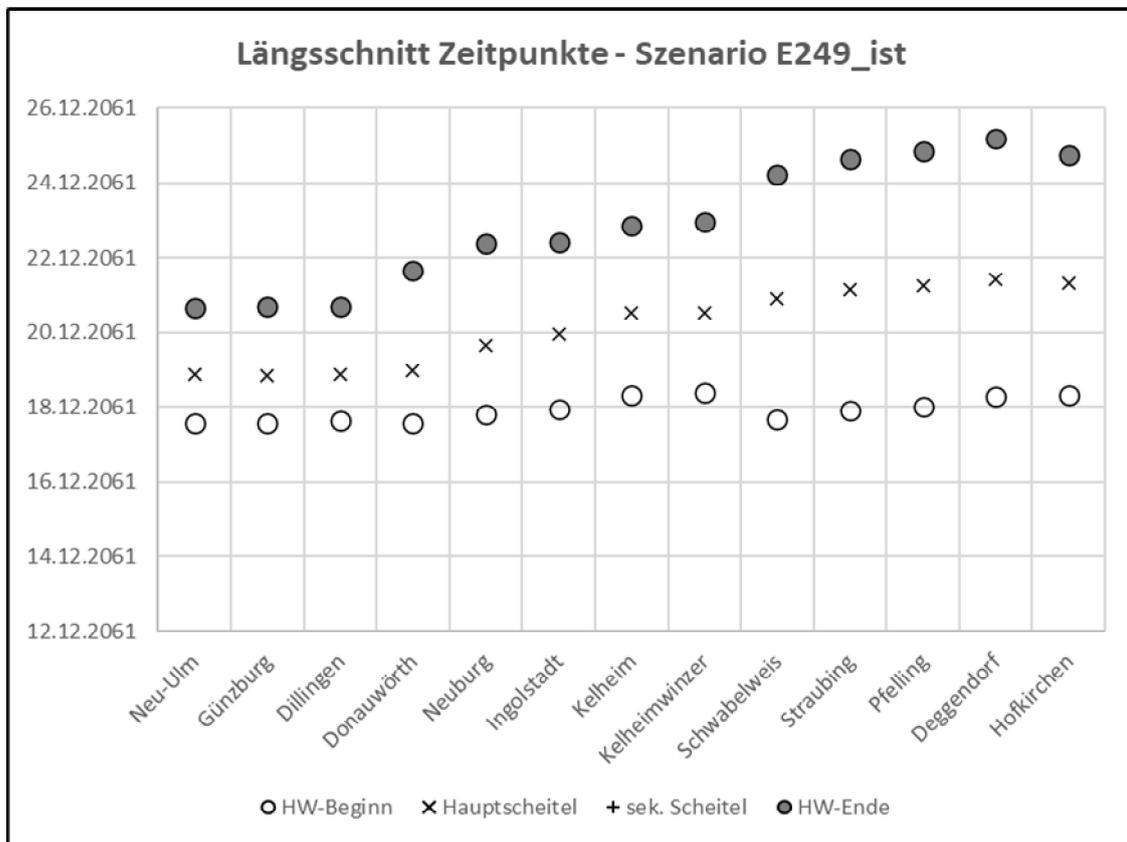
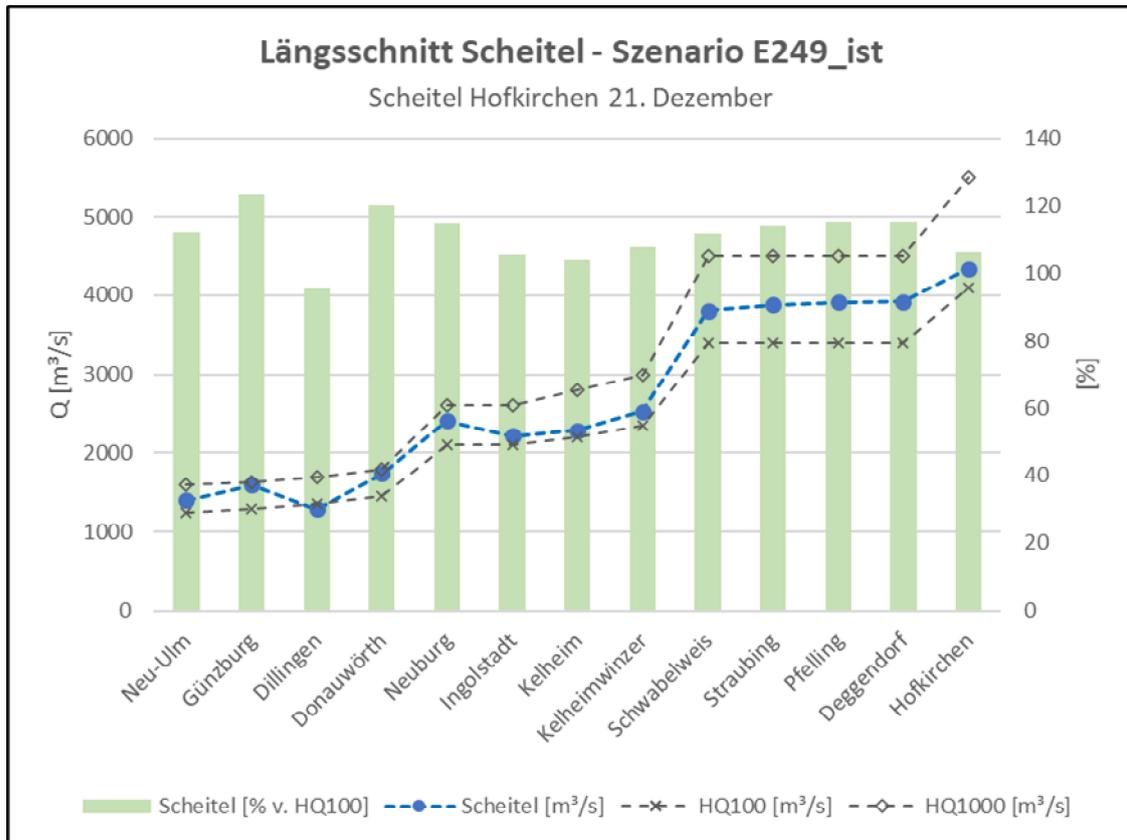
Anlage B.1.4 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel: klassifiziertes Hochwasservolumen in Mio. m³ nach Ereignis (beispielhafter Ausschnitt)

Szenario	Analysepegel												Scheitel Hofkirchen	
	Neu-Ulm	Günzburg	Dillingen	Donauwörth	Neuburg	Ingolstadt	Kelheim	Kelheimwinzer	Schwabelweis	Straubing	Pfelling	Deggendorf		Hofkirchen
E031_ist	487,8	554,5	548,9	850,1	1407	1294	1348	1470	2421	2495	2552	2597	3014	24. November
E036_ist	156,5	177,3	165,8	283,7	660,6	606,3	641,3	641,7	771,6	789,6	799,4	801,4	1150	12. November
E042_ist	150	192,1	196	504,4	127	1067	1189	1301	1597	1650	1686	1704	2183	06. Juni
E057_ist	168	189,5	178,4	506	816,9	776,1	842,3	1020	1910	2035	2120	2178	2394	02. Dezember
E081_ist	214,2	264,6	285,5	541,4	630,3	589,6	662,4	825,4	1533	1632	1700	1739	1799	22. Dezember
E083_ist	0	23,77	58,18	496,5	736,4	702,4	835,1	1090	1701	1812	1870	1898	2115	10. Mai
E136_ist	71,44	107,9	123,7	259,3	667	616,5	717,4	843,1	1192	1245	1251	1264	1604	13. Juli
E138_ist	303,9	324,1	278,5	354,7	1431	1379	1414	639,2	632,5	634,1	640,4	640,3	835,5	26. Juli
E144_ist	12,59	38,67	50,53	181,5	339,9	327,6	418,6	549,3	1231	1292	1323	1341	1516	16. Juli
E158_ist	28,66	73,93	101,2	554,1	856,7	815,7	951,9	1101	1776	1875	1919	1946	2249	27. Mai
E168_ist	195,5	262,6	251,4	348,5	678,4	618,9	652,2	641,9	718,9	739,9	750,9	753,4	1024	22. Mai
E245_ist	154,5	484,2	518,4	752,7	1435	1383	1557	1834	2635	2756	2804	2827	3365	18. Juni
E249_ist	263,8	300,5	269,5	439	709,8	652,2	691,5	780	1508	1571	1613	1630	1802	21. Dezember
E250_ist	281,8	326,8	301,3	540,8	777,7	723,5	787,9	900,4	1362	1450	1494	1529	1703	20. Februar
E258_ist	0	0	0	58,87	190	183,6	306,4	375,4	888,5	937,7	961,2	965,2	1058	16. September
E276_ist	212,2	298,7	303,8	498,4	775,7	712,5	770,2	813,5	994,3	1004	1014	1015	1183	01. Juli
E303_ist	194,4	232,9	222,7	363,3	788,8	729,4	802,6	875,5	1152	1195	1206	1208	1572	04. August
E309_ist	327,1	377,2	389,7	598	957,4	912,2	1033	1264	2443	2559	2613	2647	2926	02. Februar





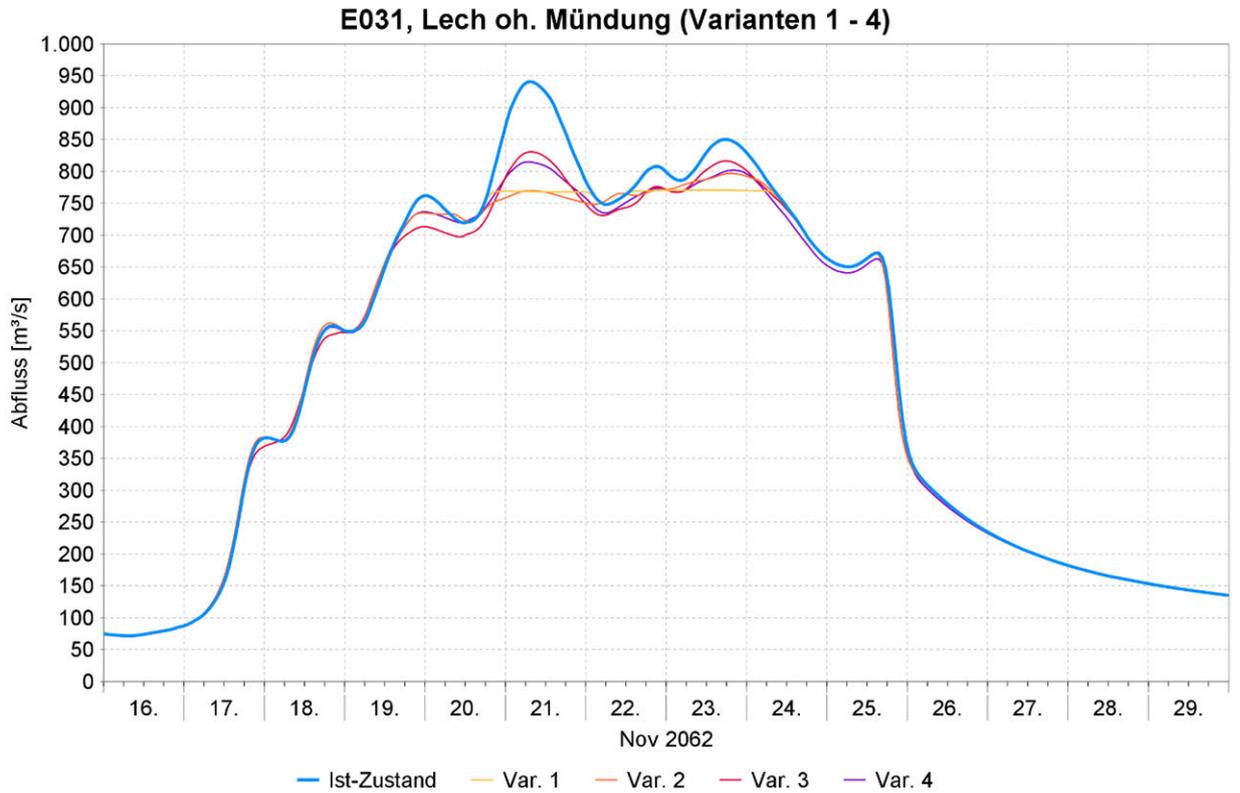
Anlage B.1.5 Auswertung der Berechnungsläufe des Ist-Zustandes für die Analysepegel:
Längsschnitte der Hochwasserscheitel und -Zeitpunkte (Beispiel für ein Ereignis)



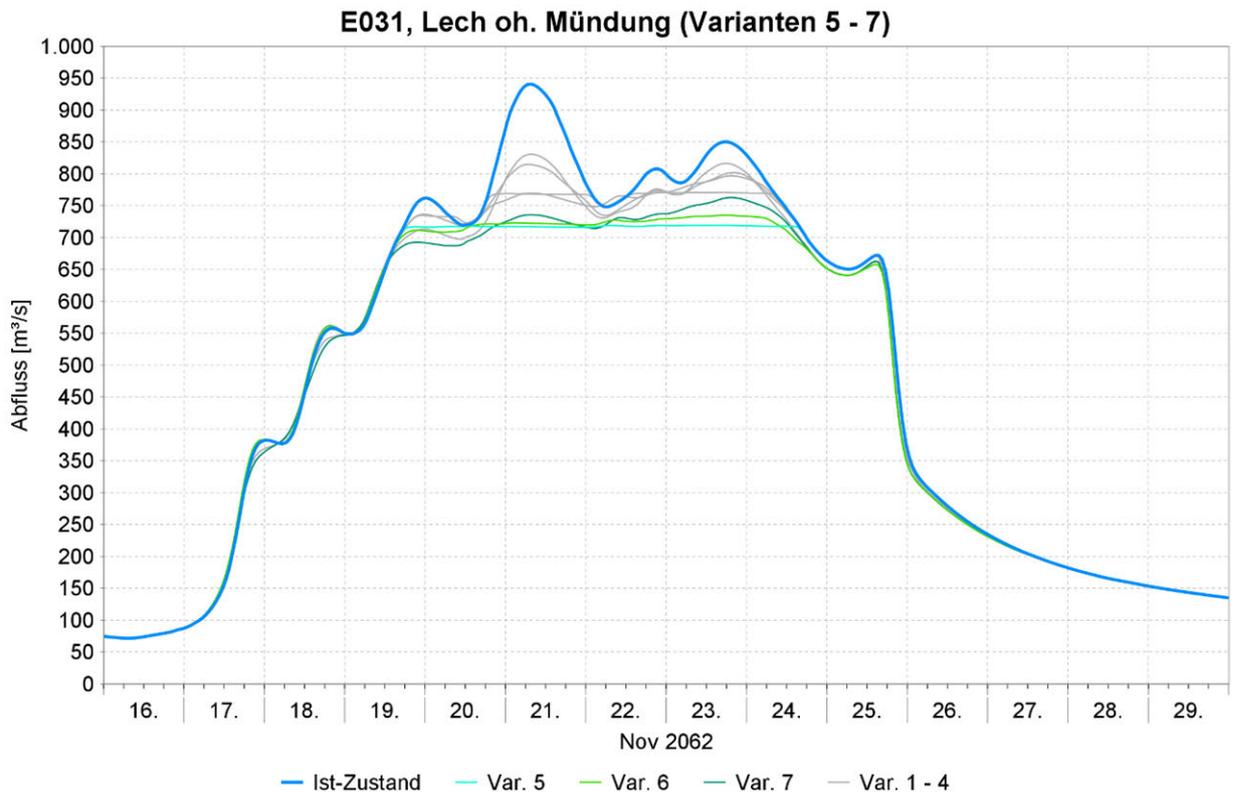


Anlage B.2 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Lech

Anlage B.2.1 Ereignis E031



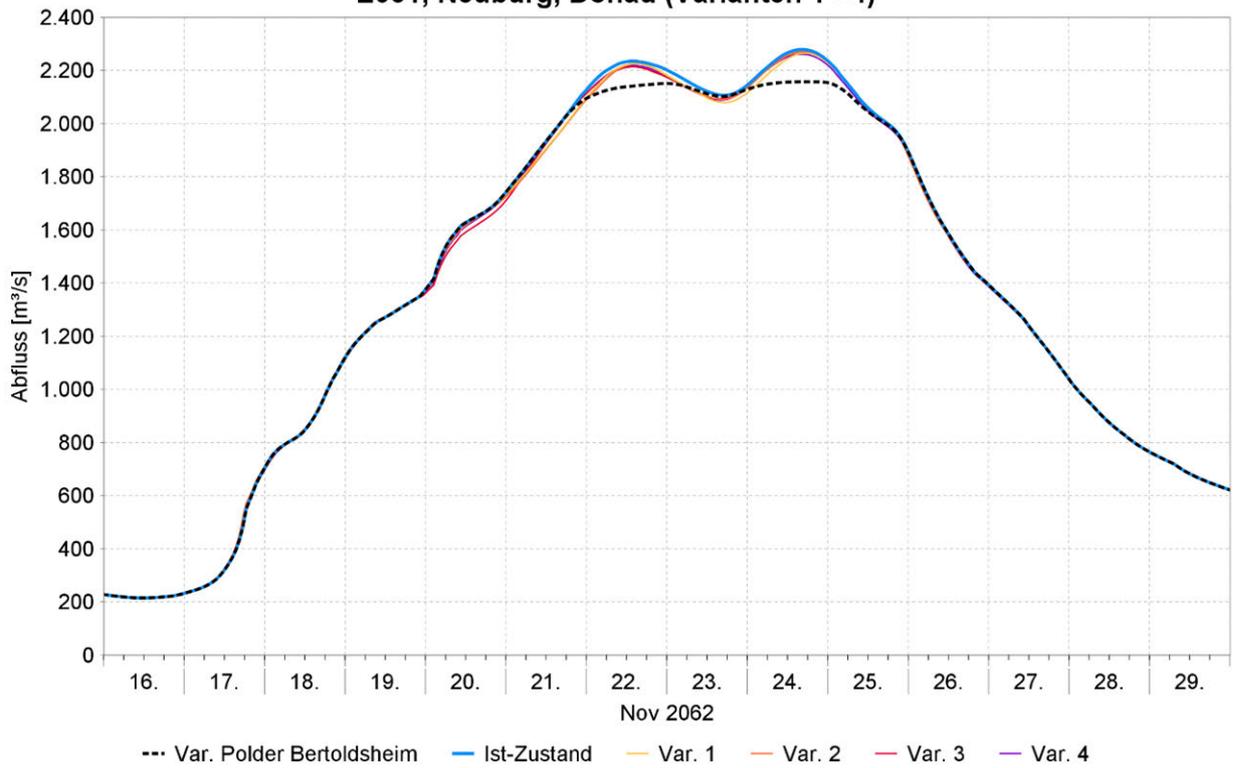
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

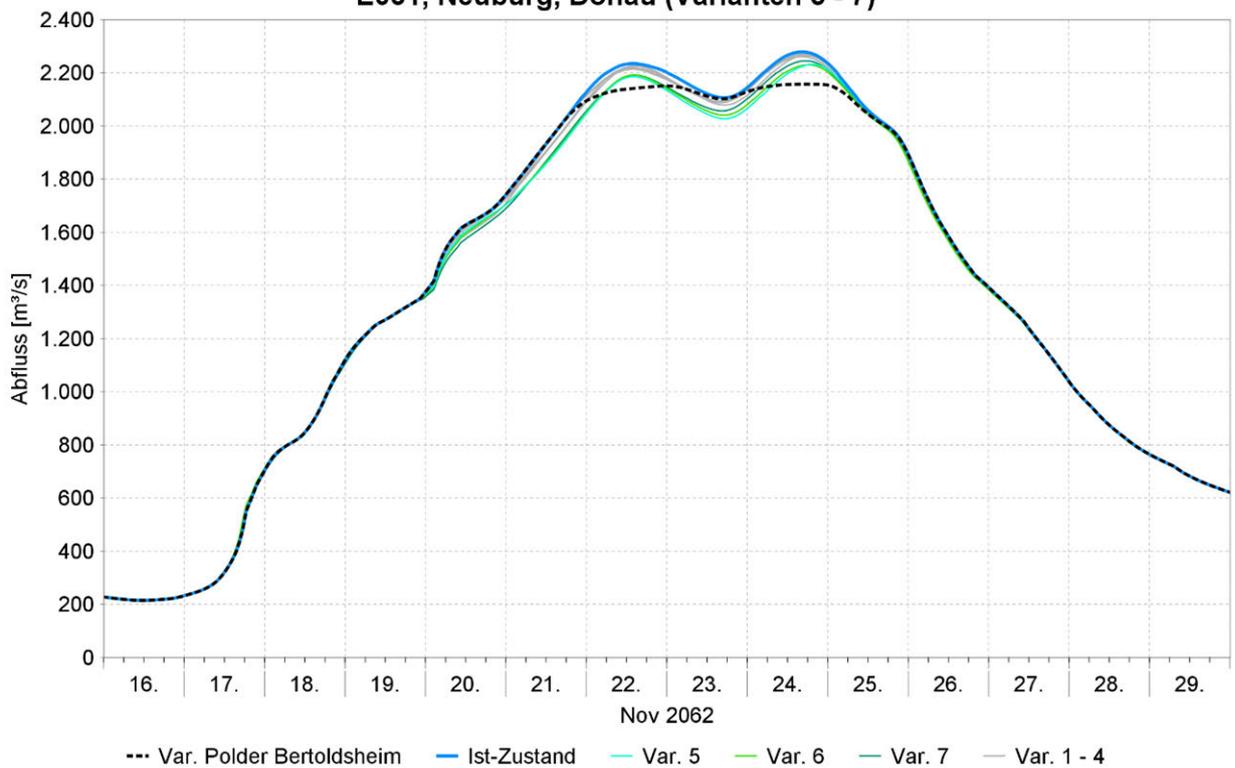


E031, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

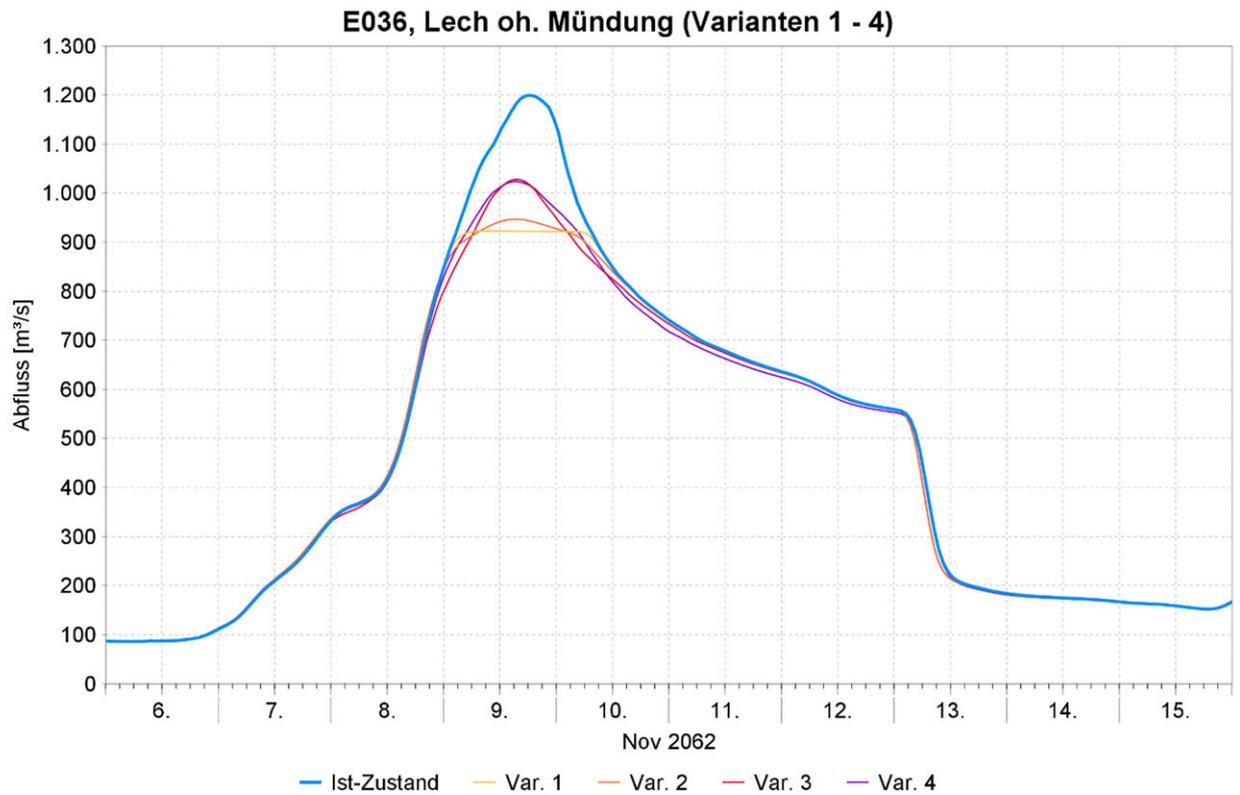
E031, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



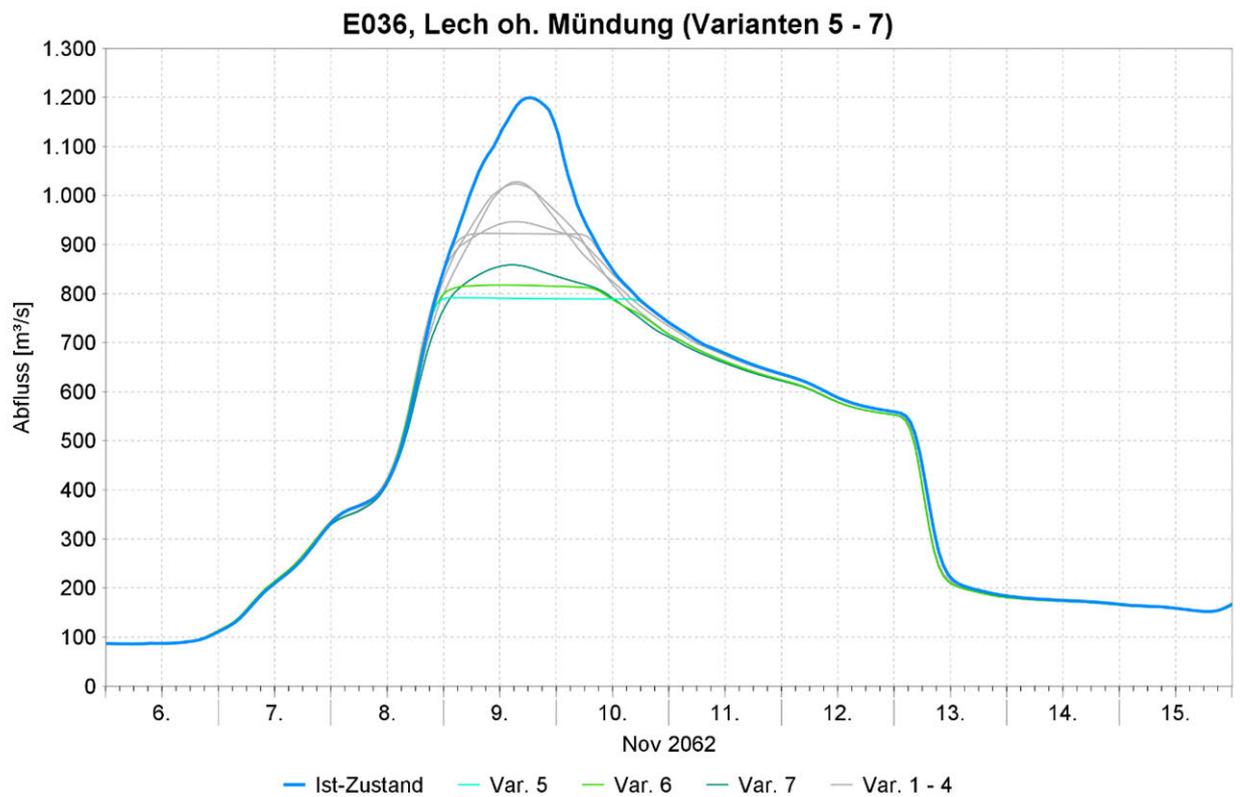
Aquantec GmbH



Anlage B.2.2 Ereignis E036



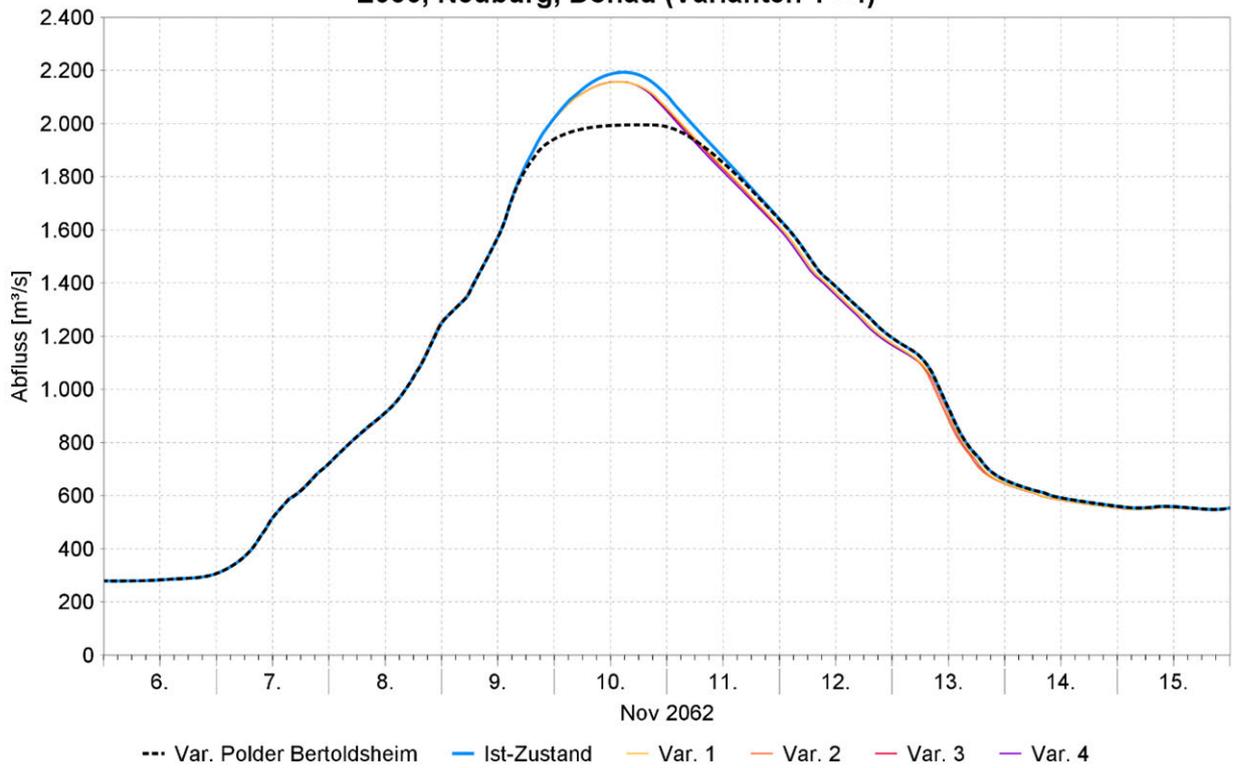
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

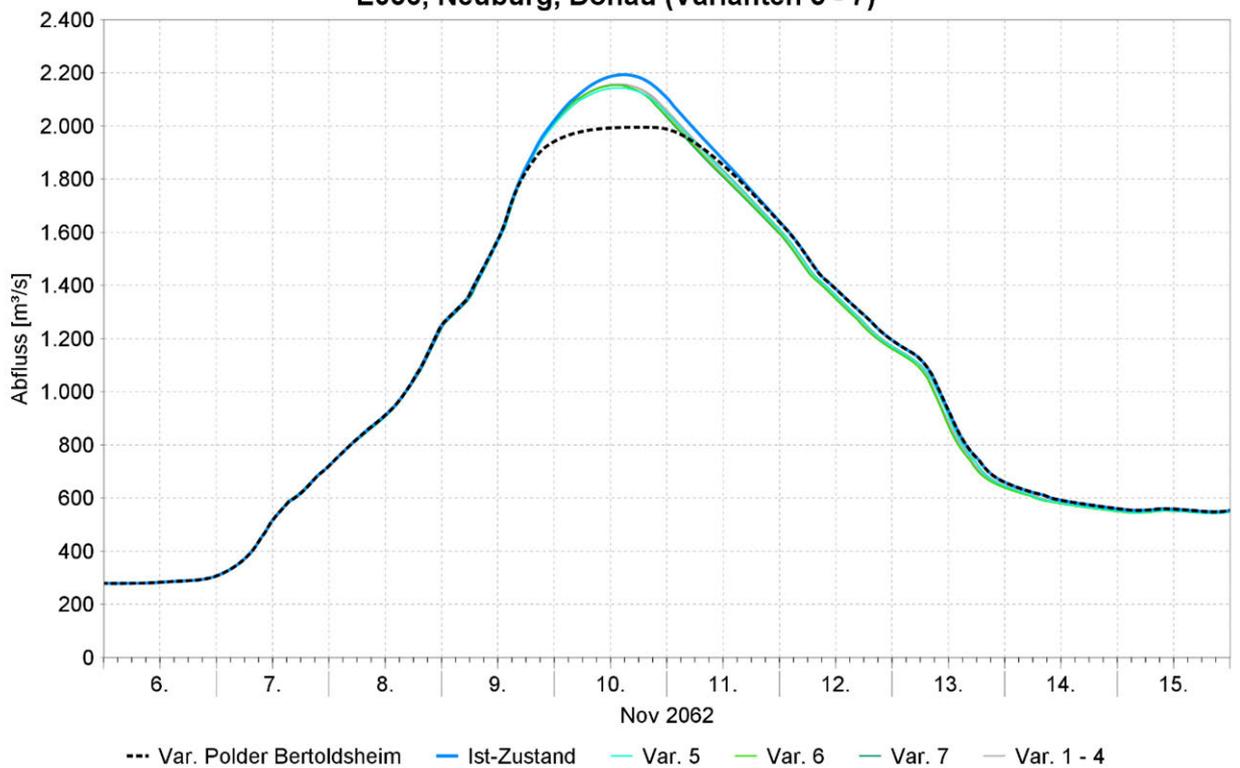


E036, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

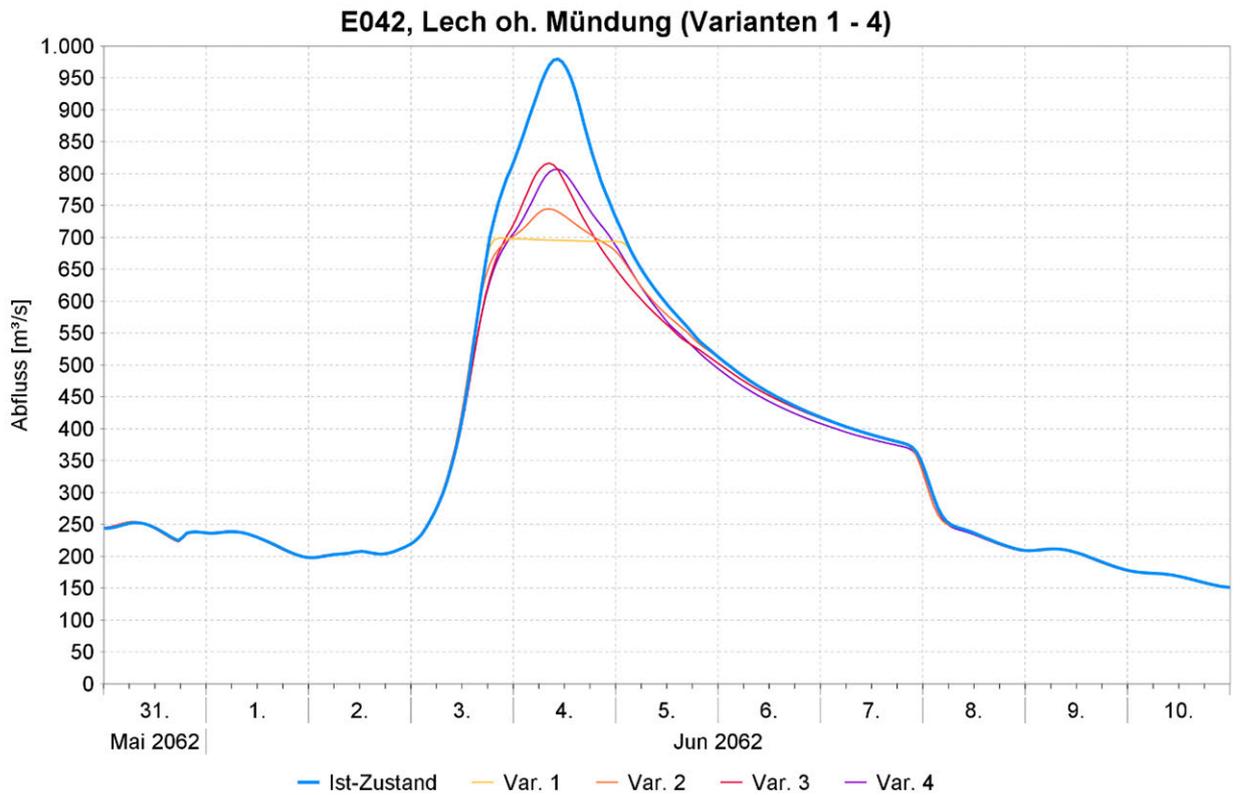
E036, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



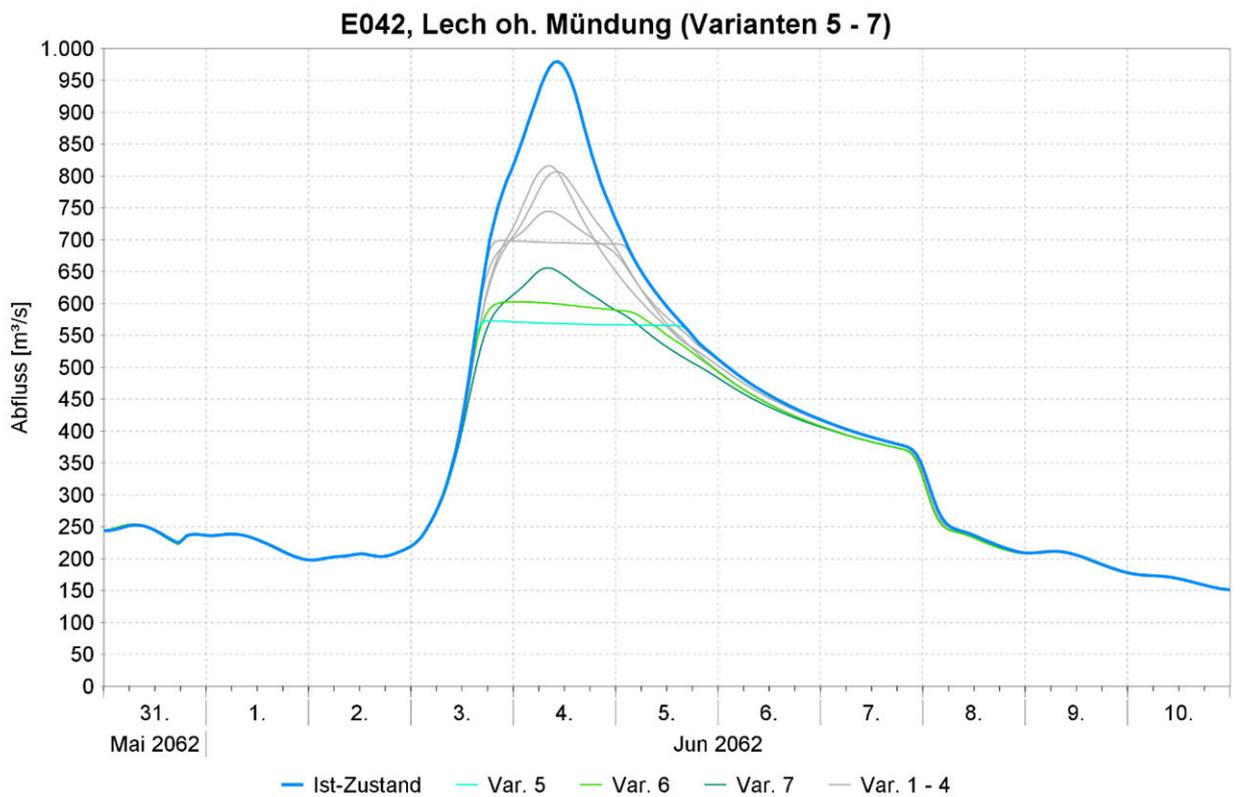
Aquantec GmbH



Anlage B.2.3 Ereignis E042



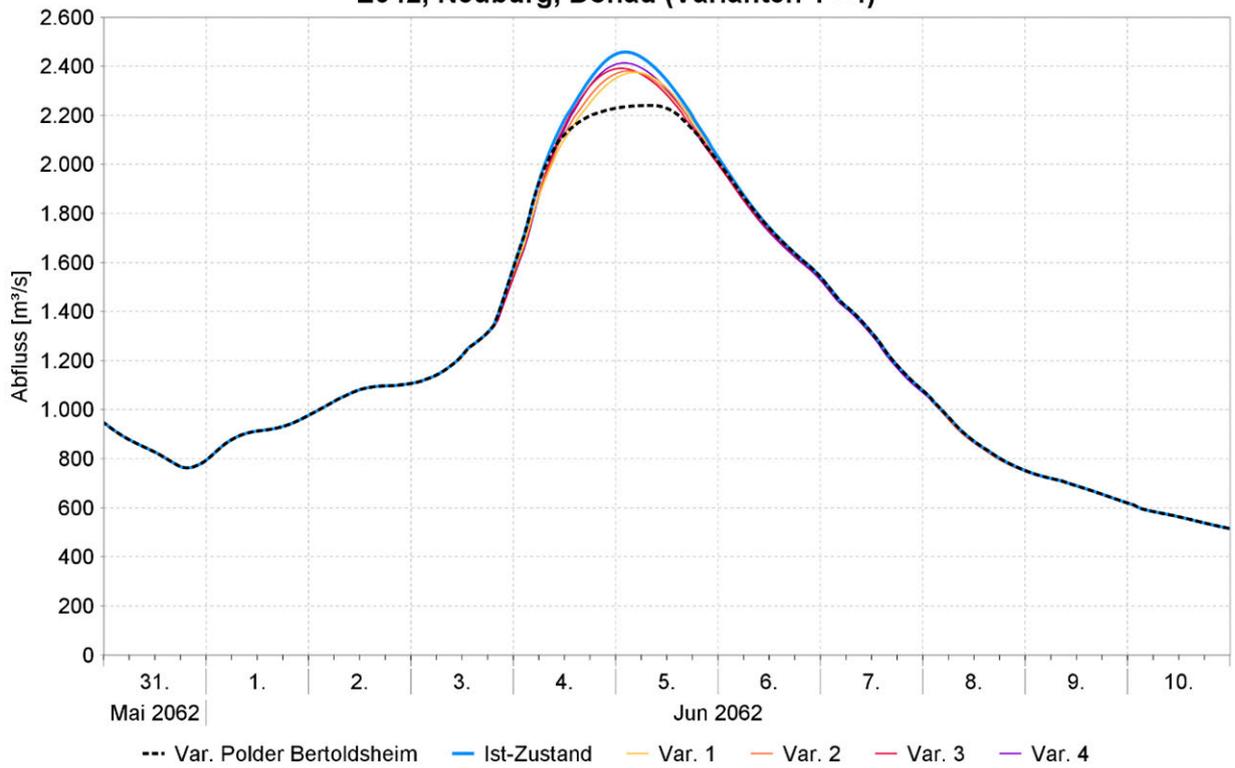
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

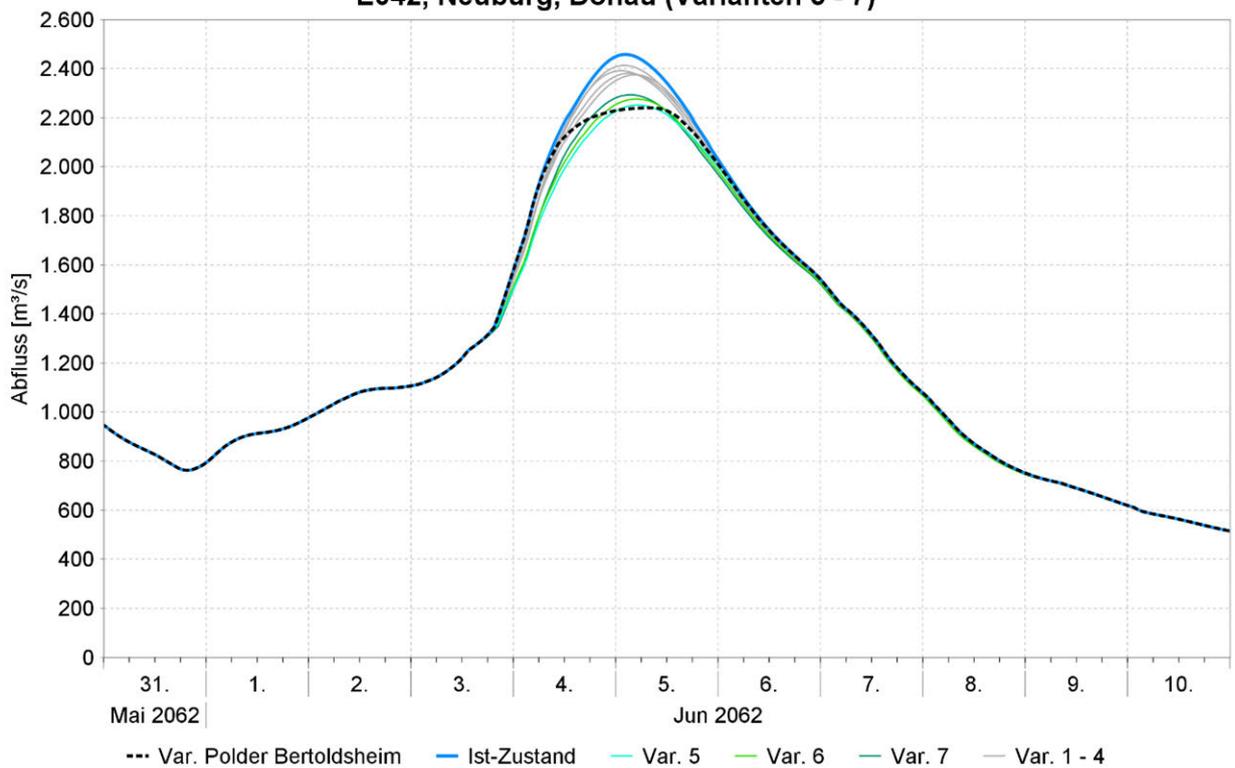


E042, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

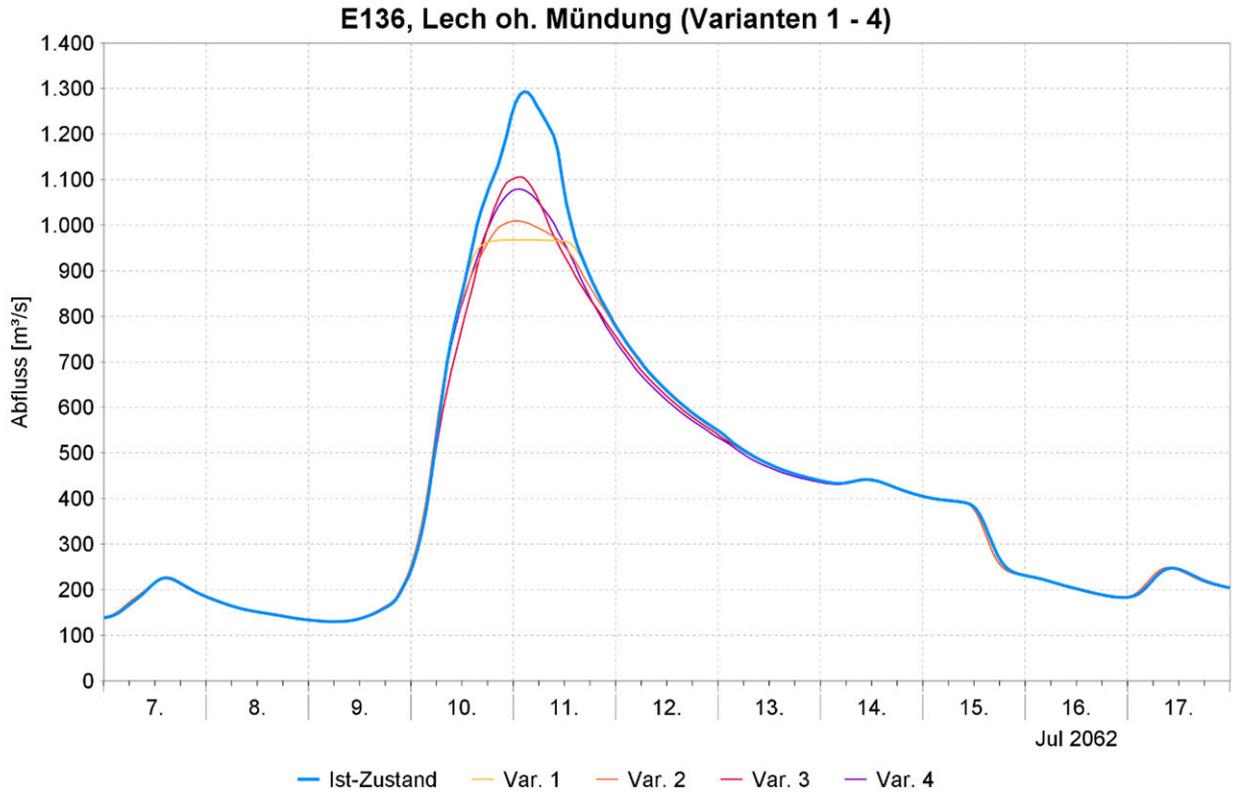
E042, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



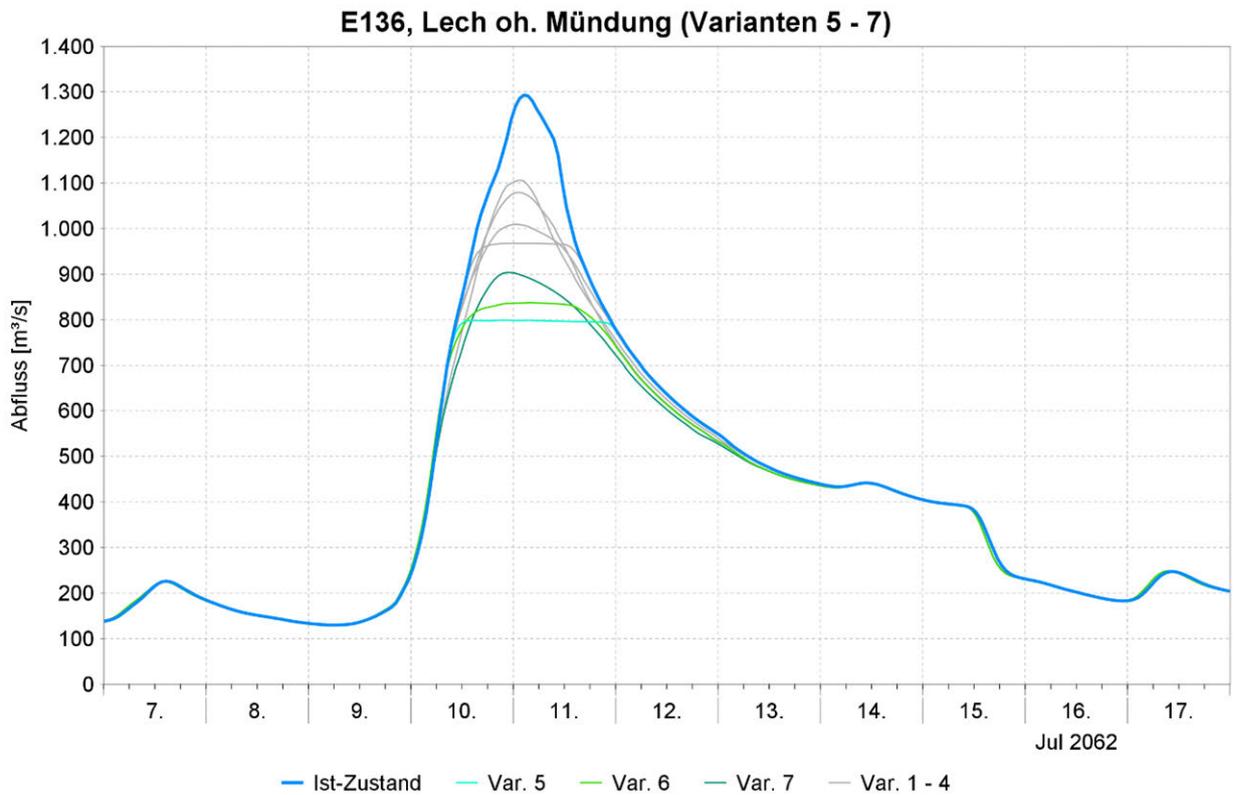
Aquantec GmbH



Anlage B.2.4 Ereignis E136



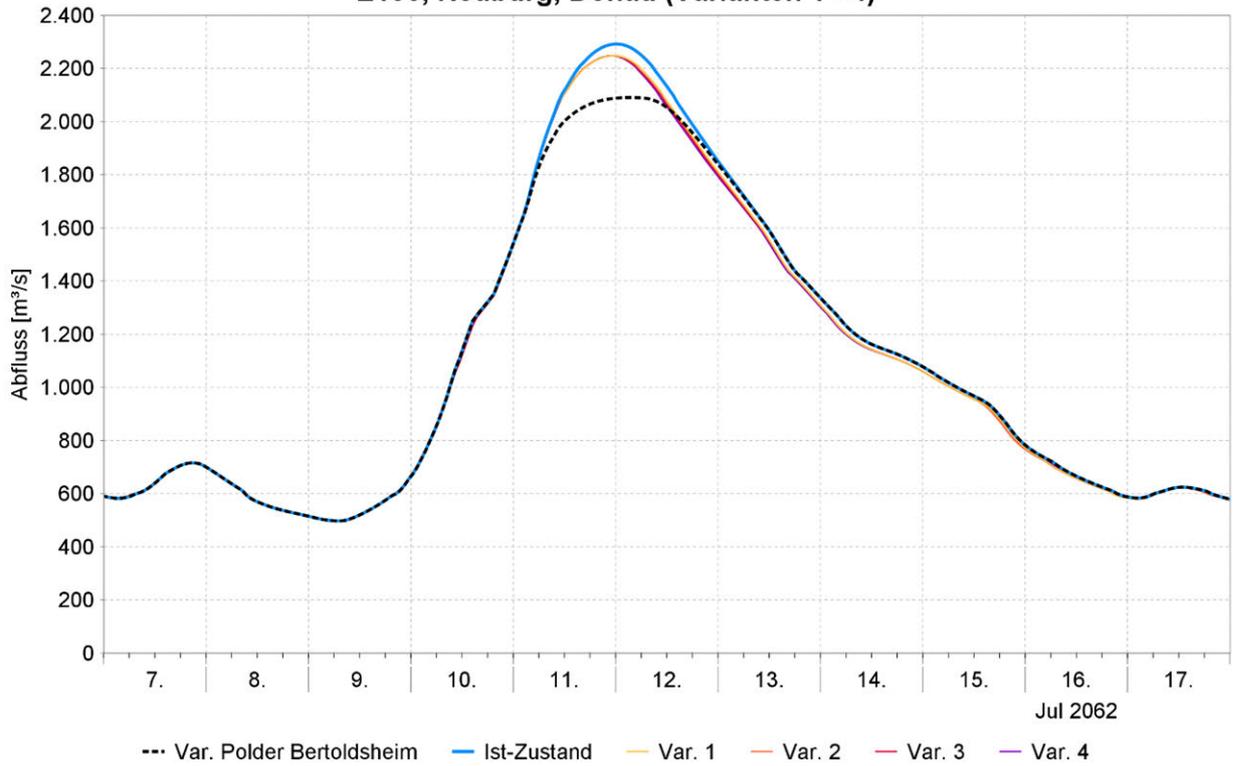
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

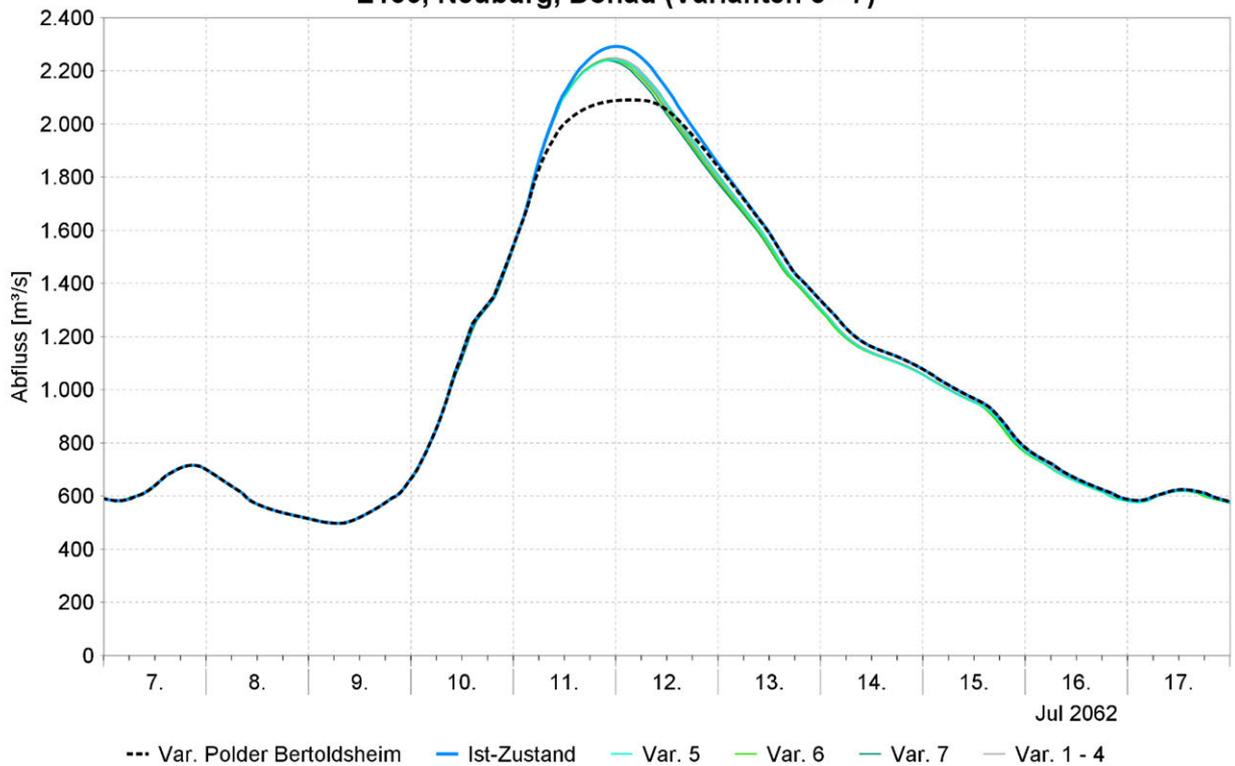


E136, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

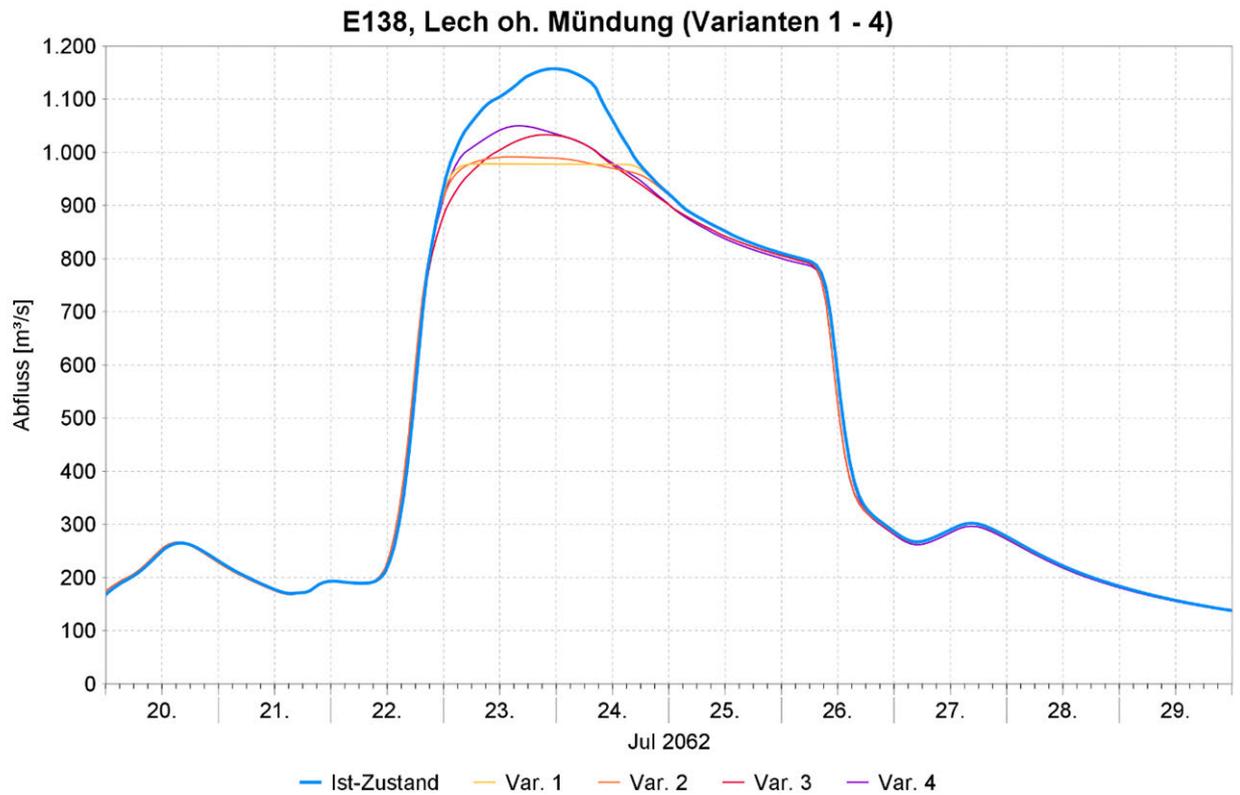
E136, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



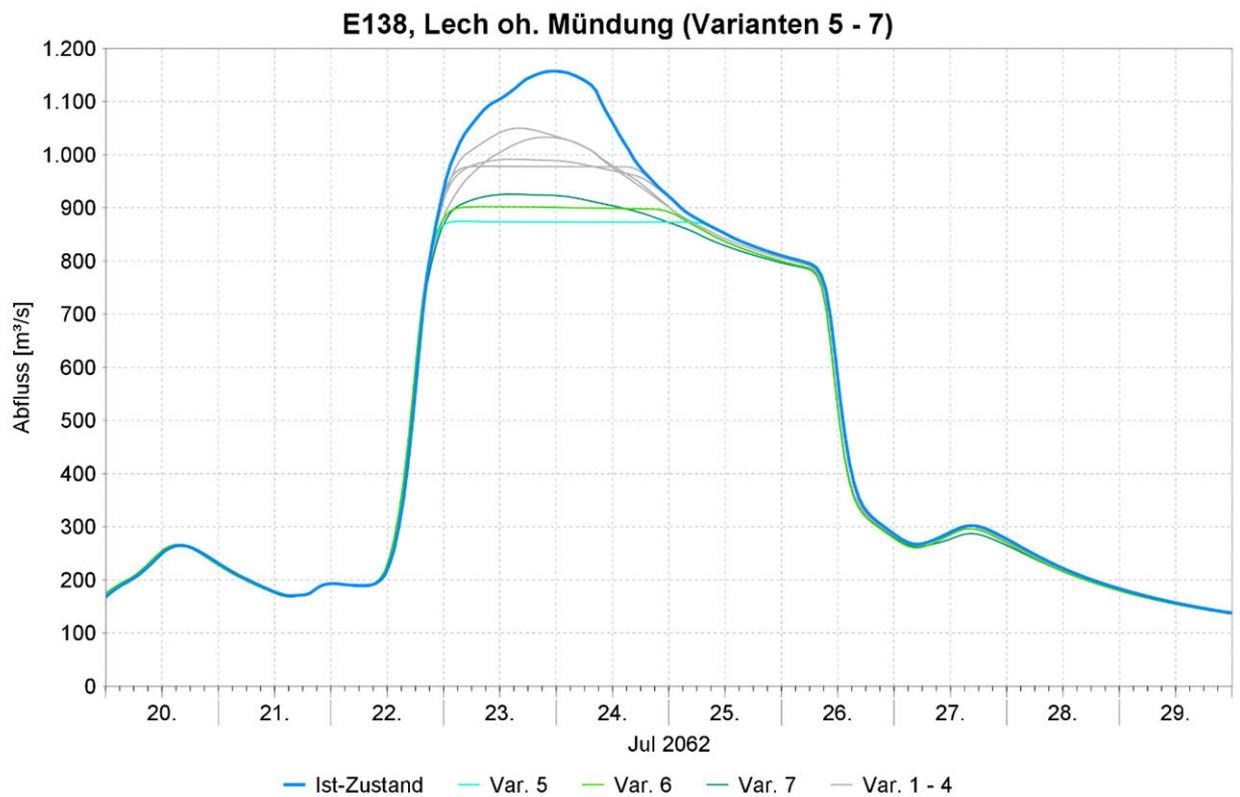
Aquantec GmbH



Anlage B.2.5 Ereignis E138



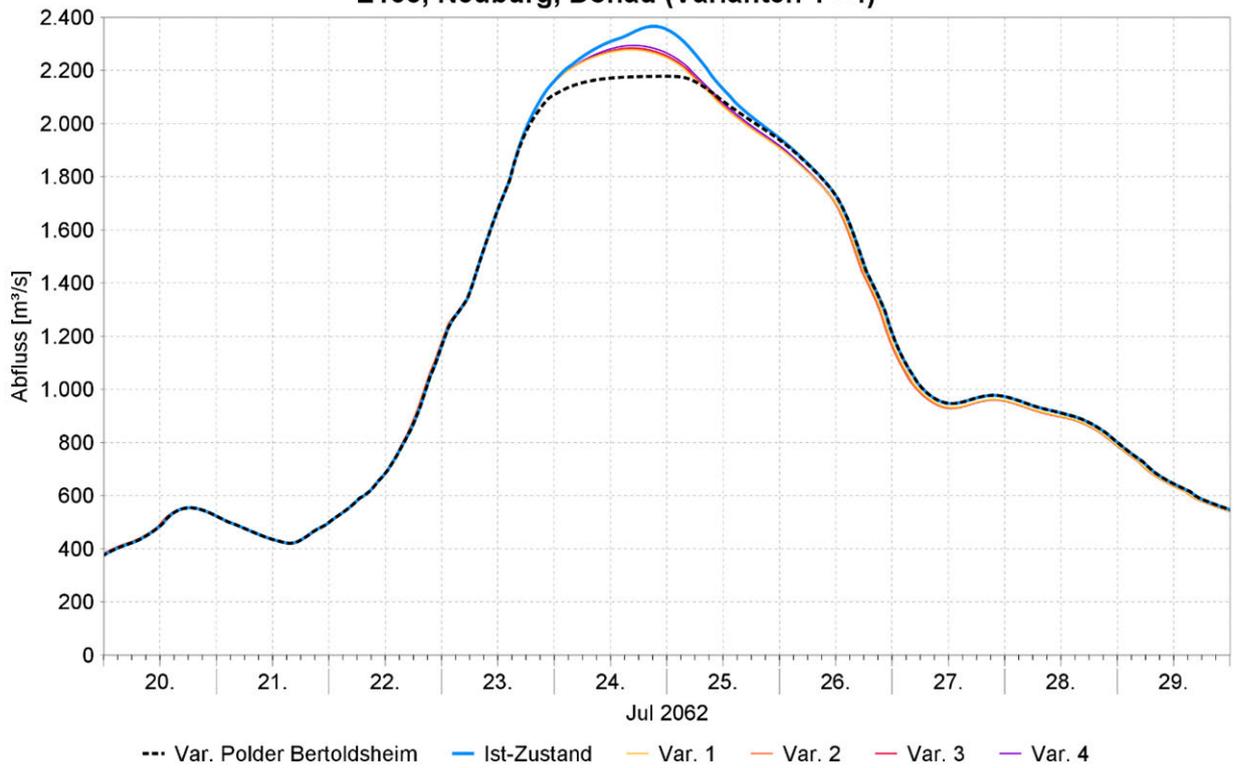
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

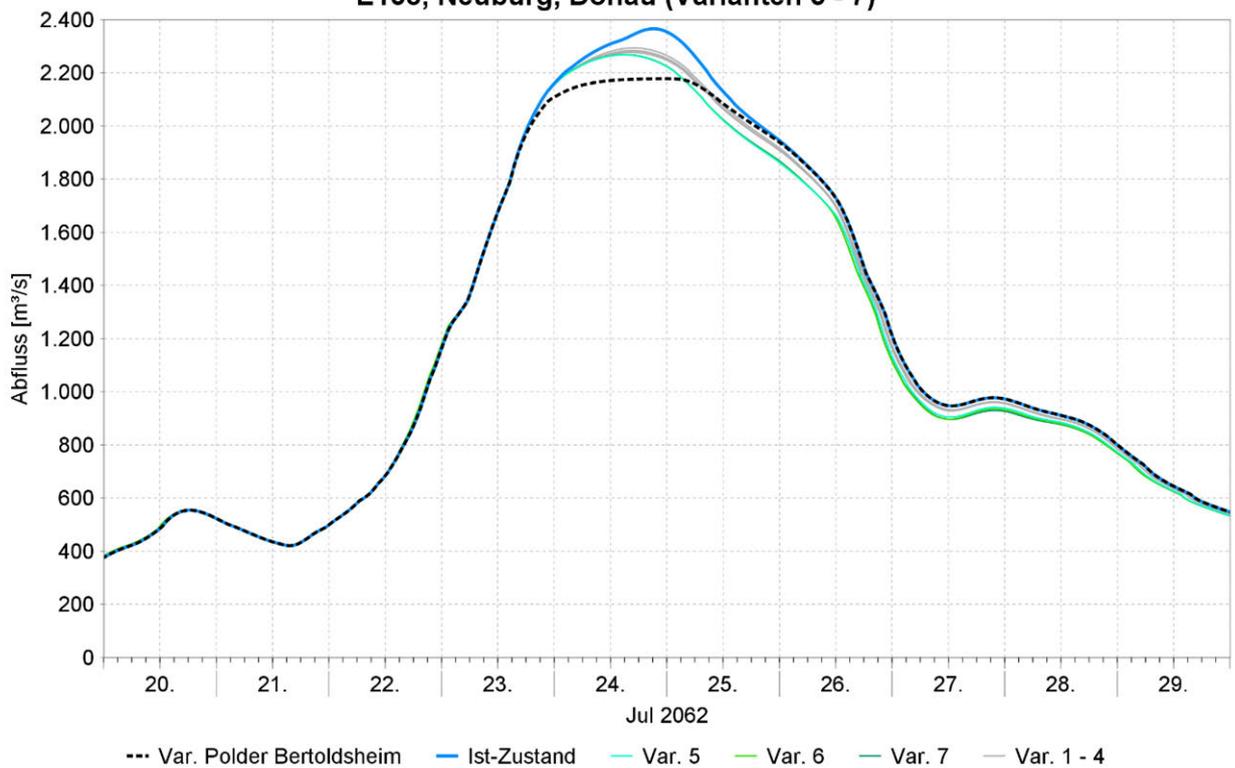


E138, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

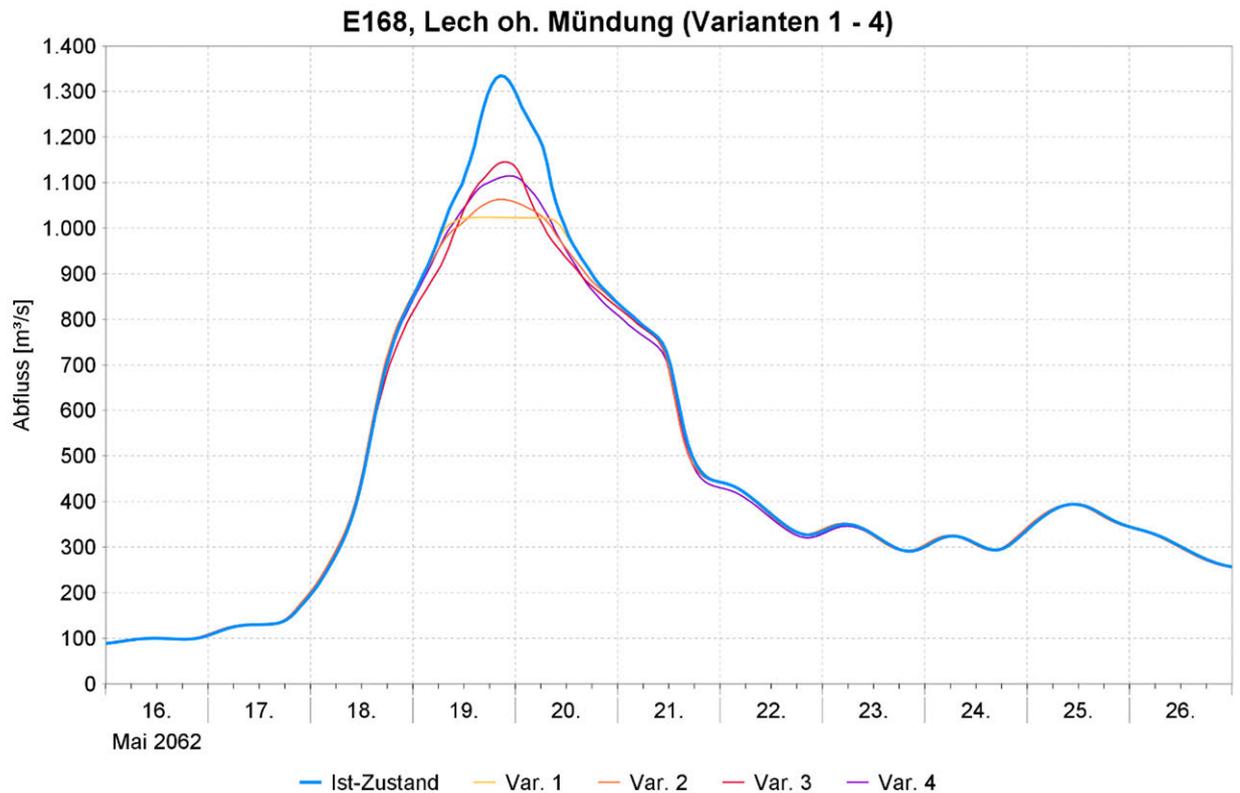
E138, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



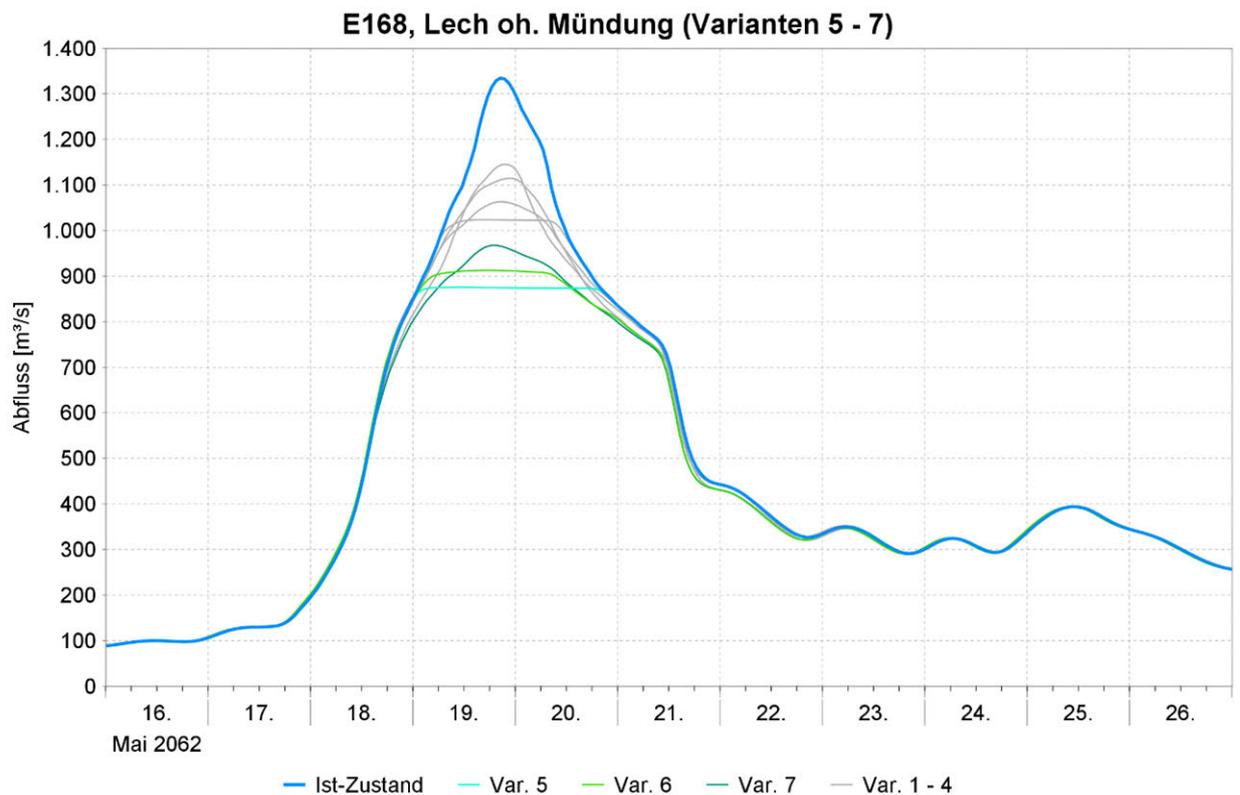
Aquantec GmbH



Anlage B.2.6 Ereignis E168



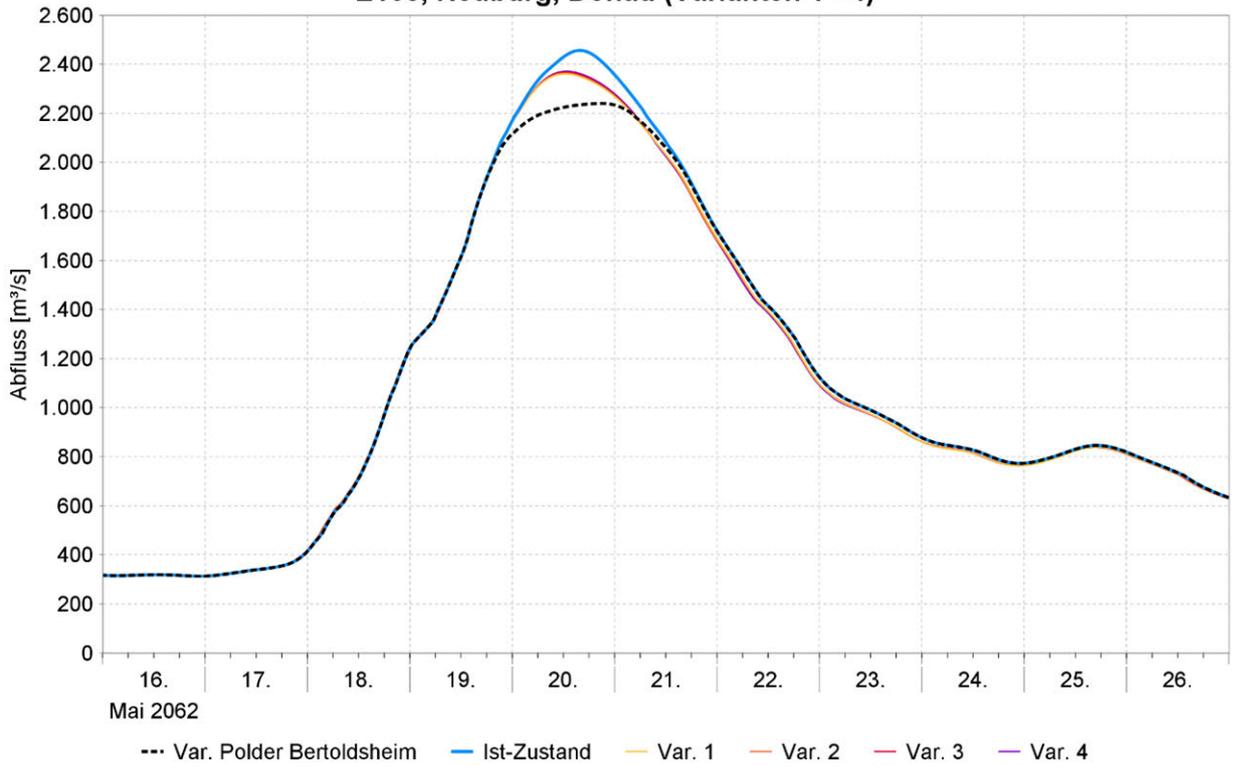
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

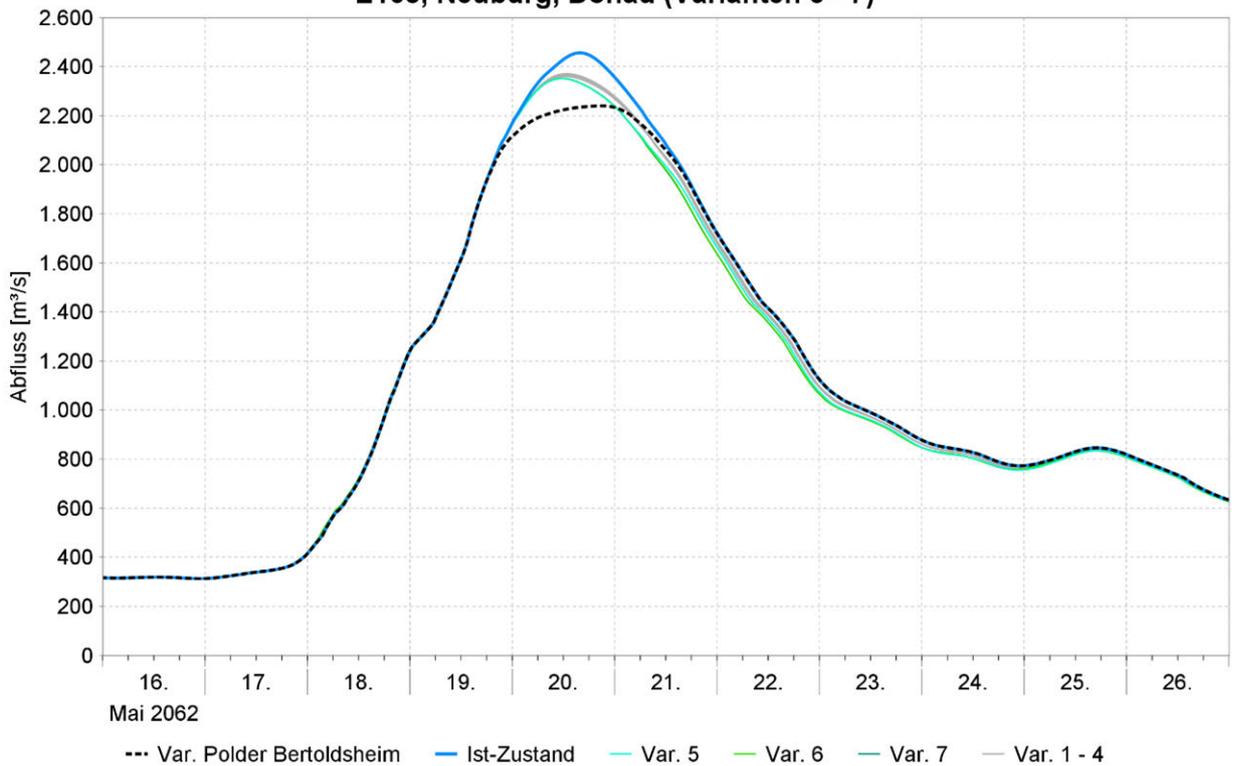


E168, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

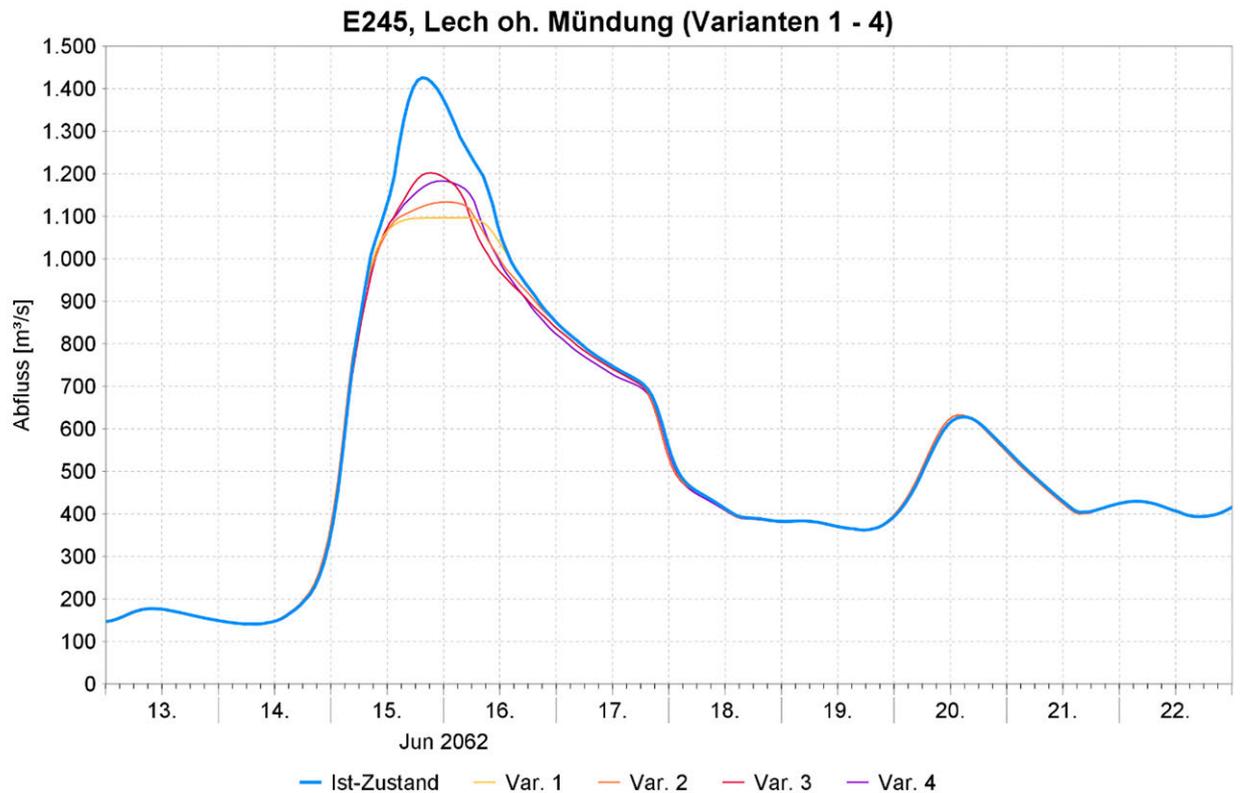
E168, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



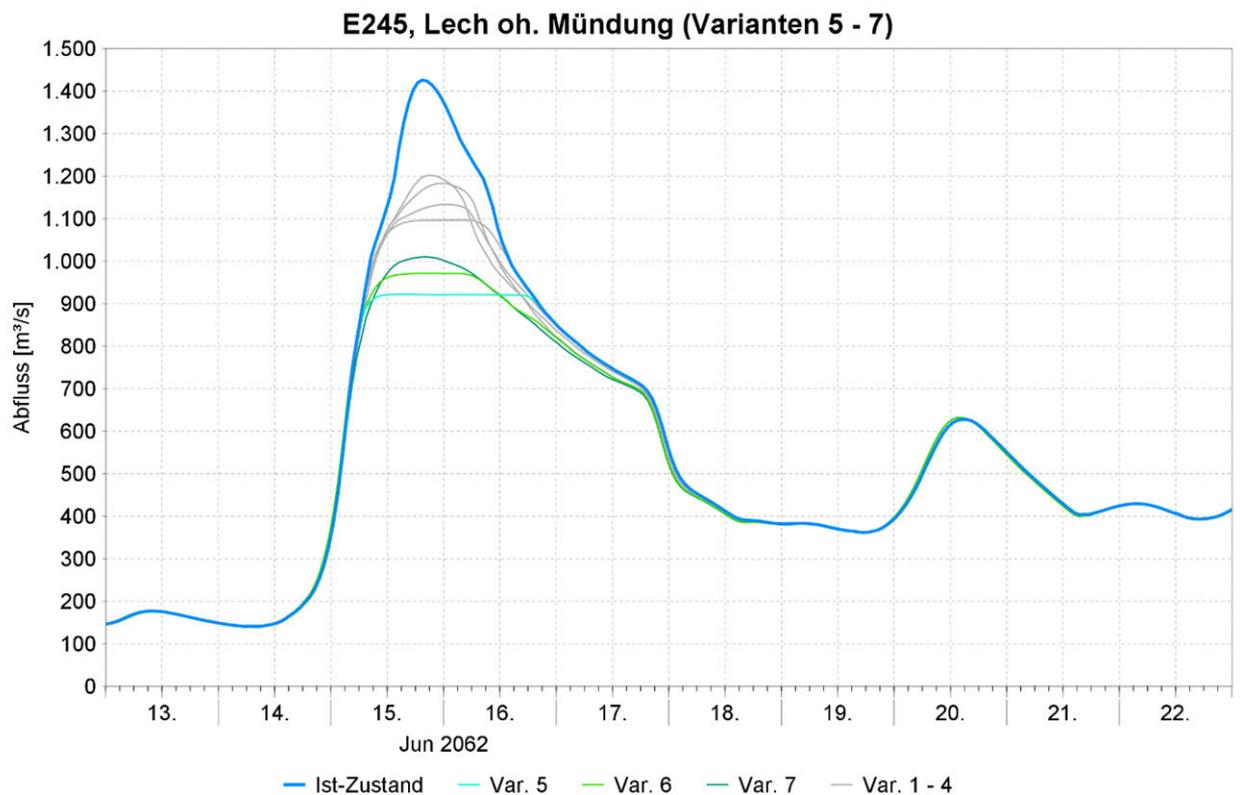
Aquantec GmbH



Anlage B.2.7 Ereignis E245



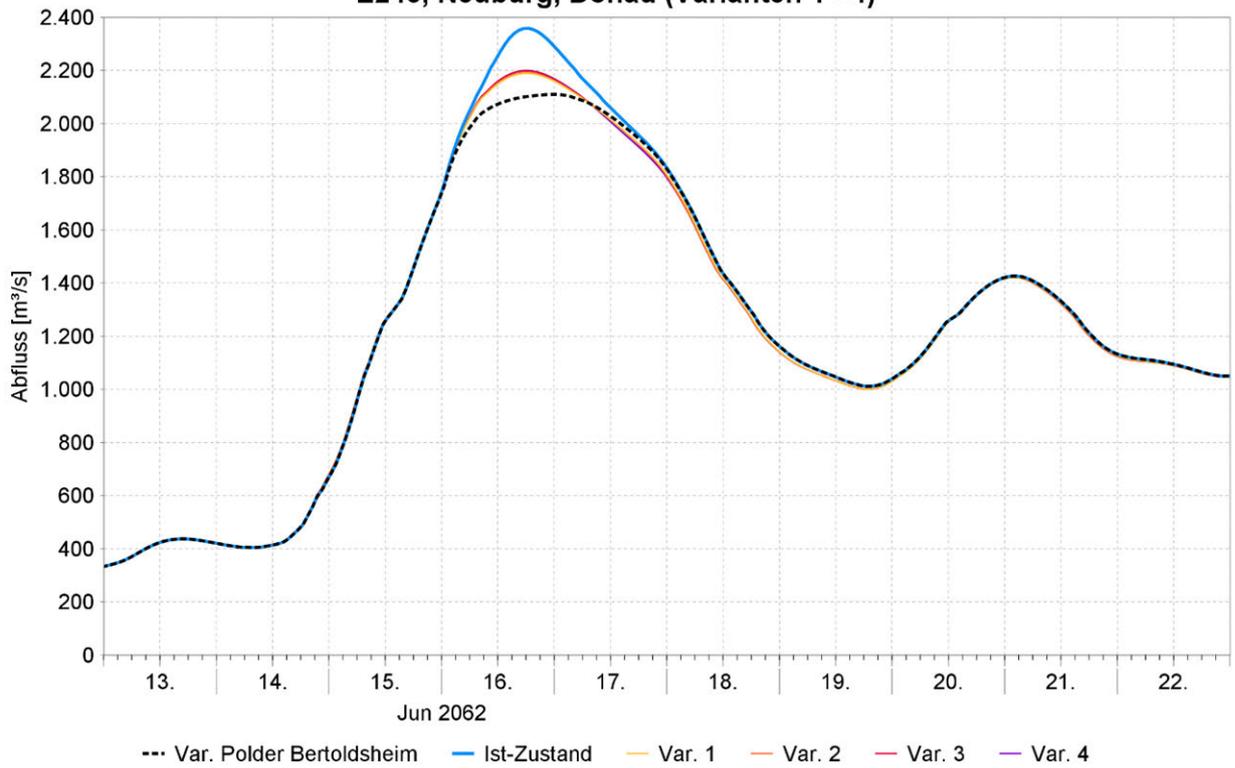
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

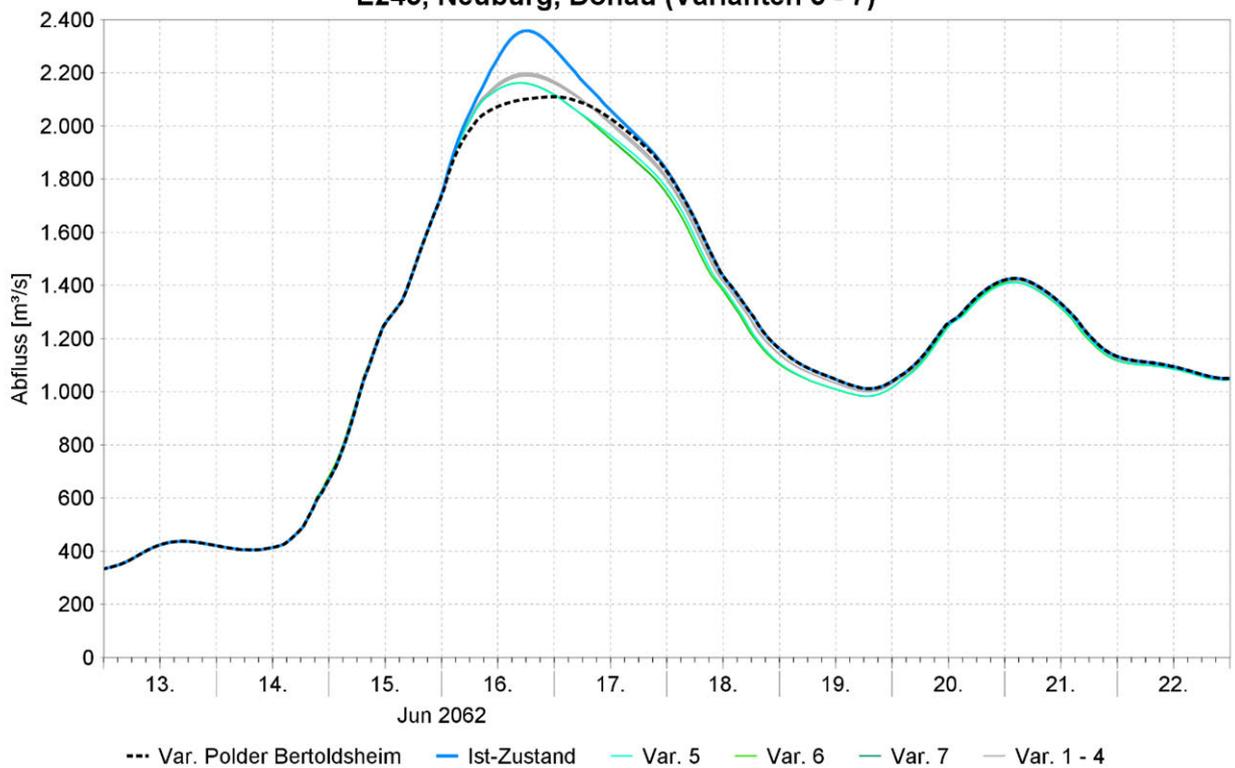


E245, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

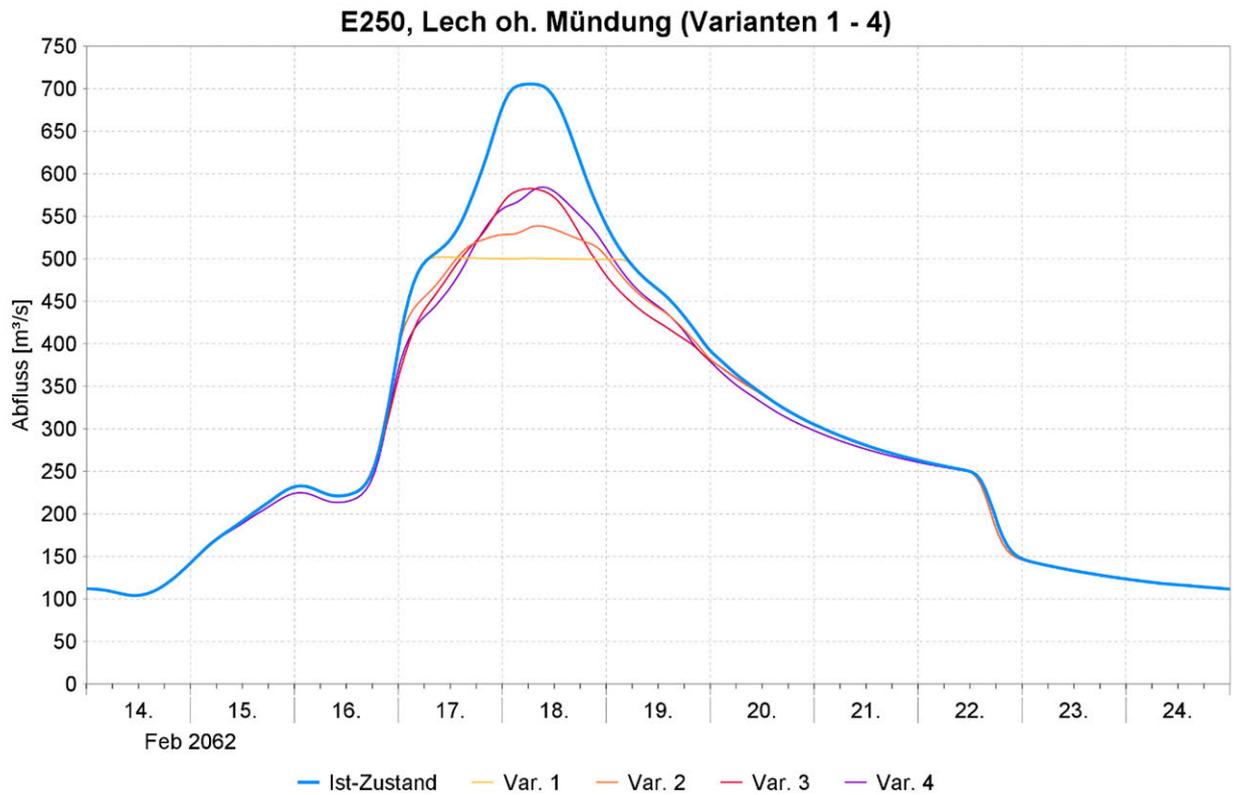
E245, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



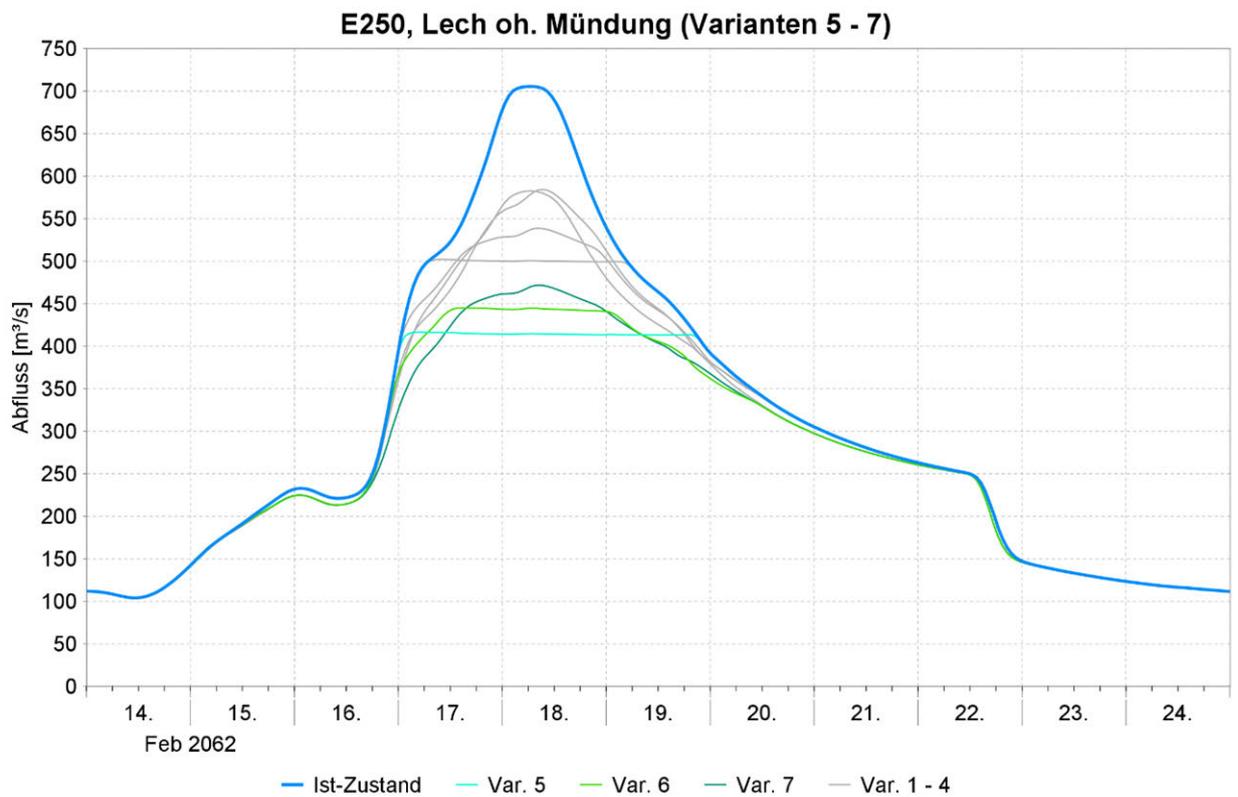
Aquantec GmbH



Anlage B.2.8 Ereignis E250



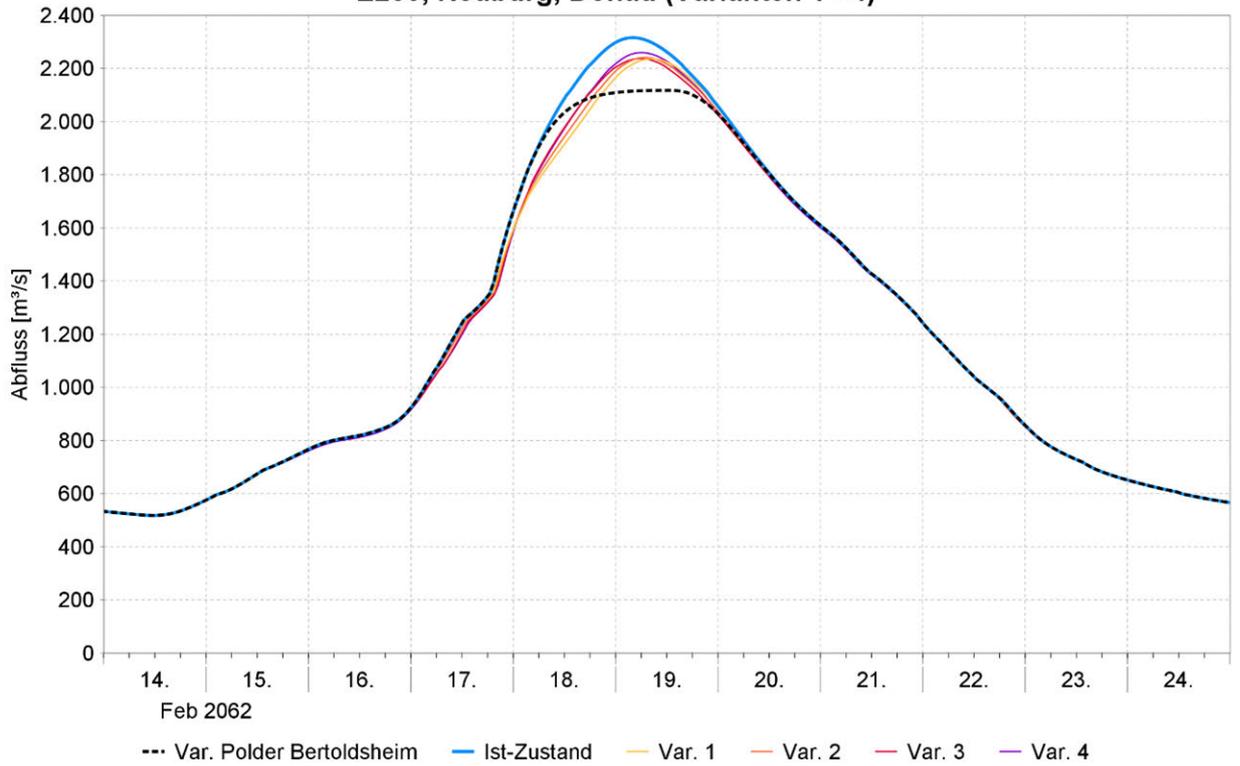
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

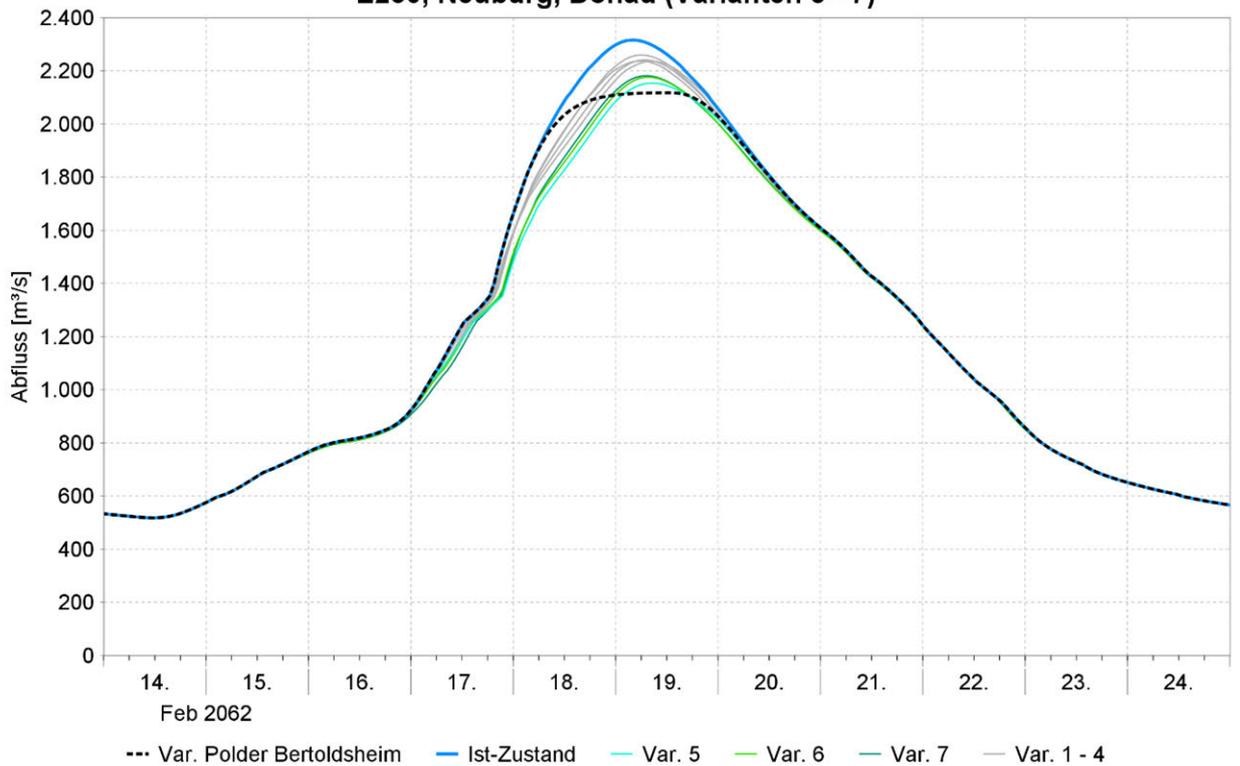


E250, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

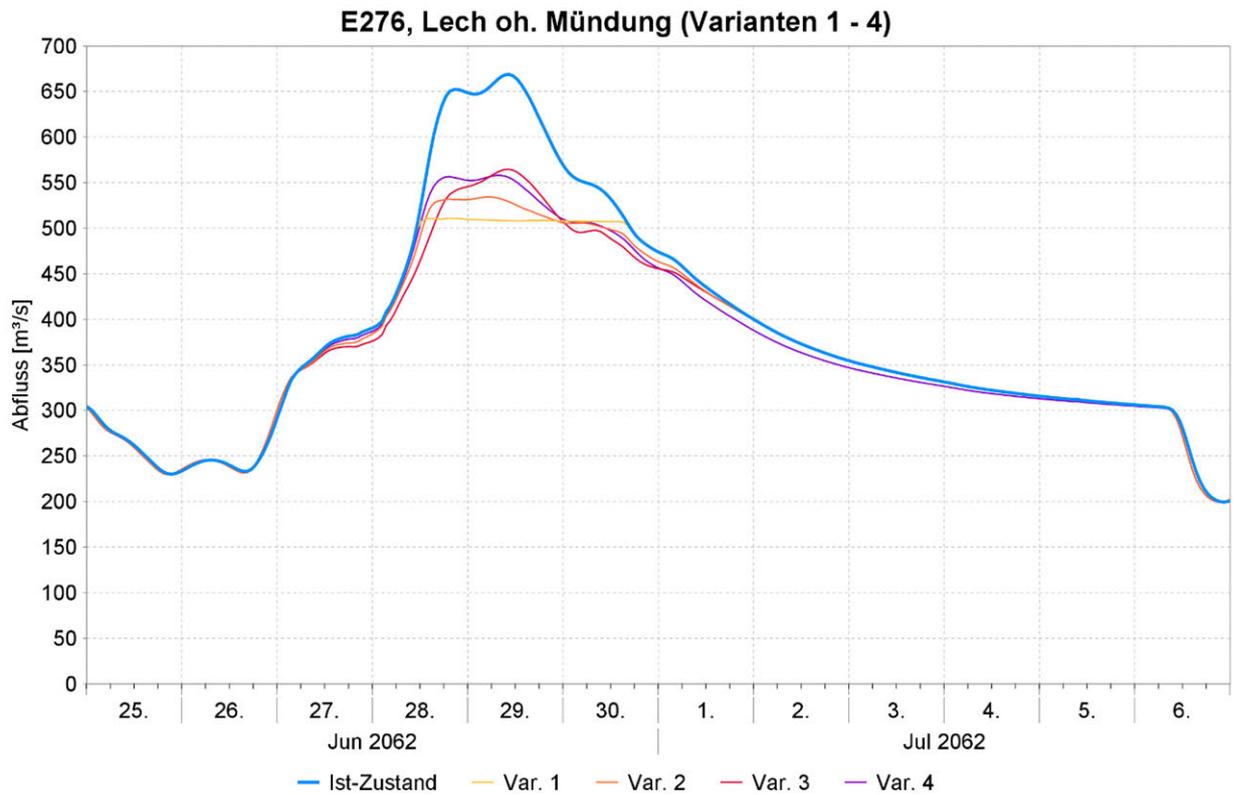
E250, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



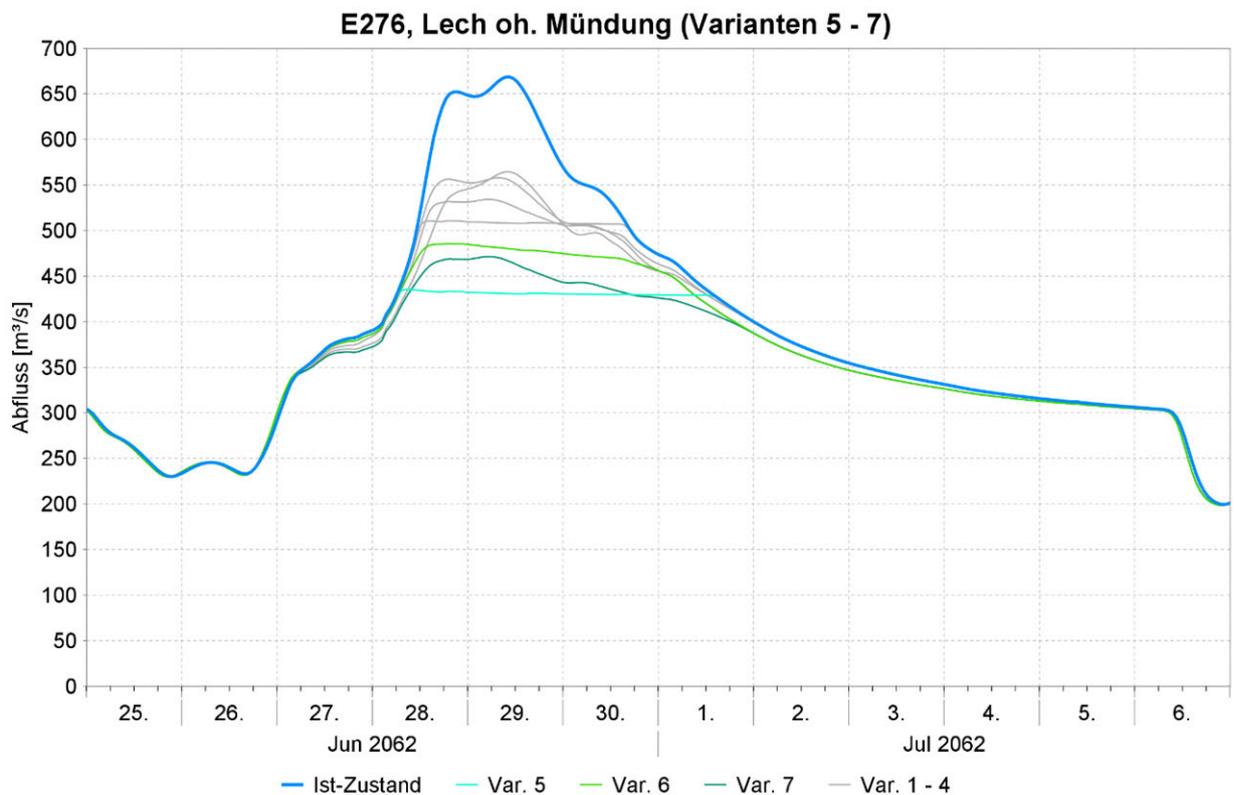
Aquantec GmbH



Anlage B.2.9 Ereignis E276



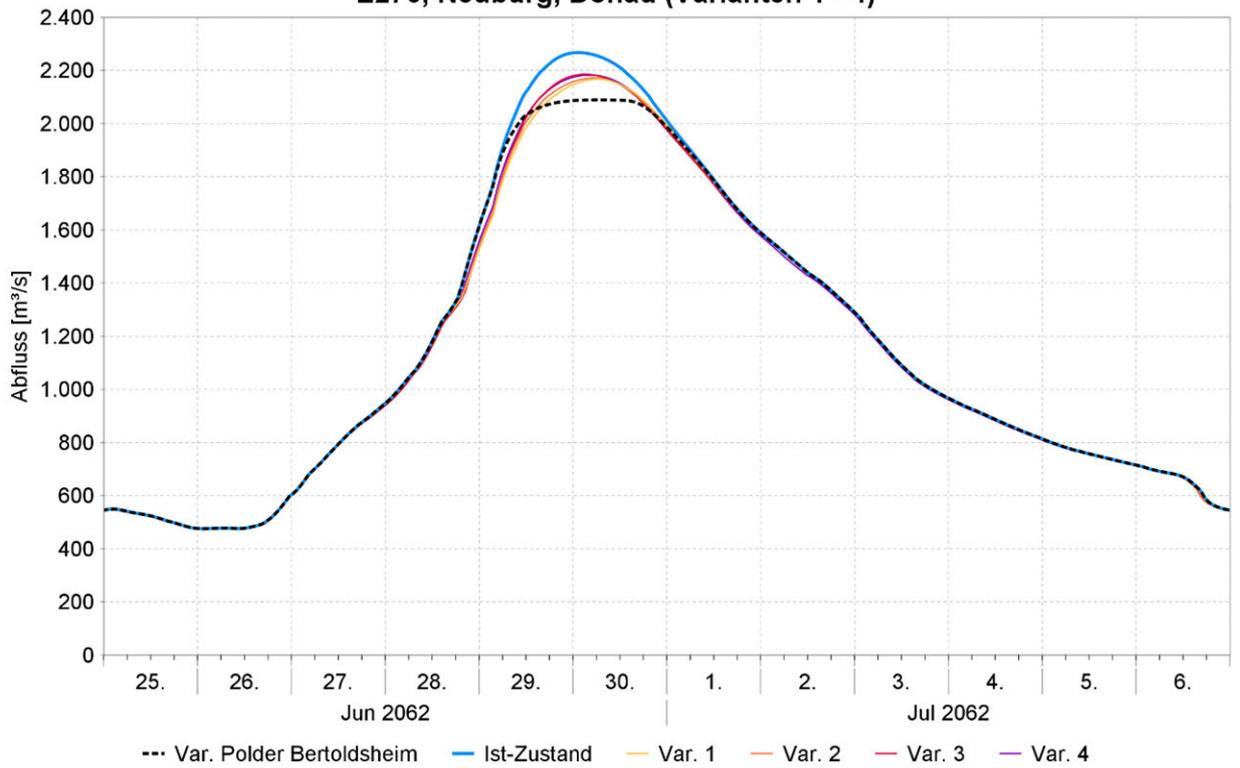
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

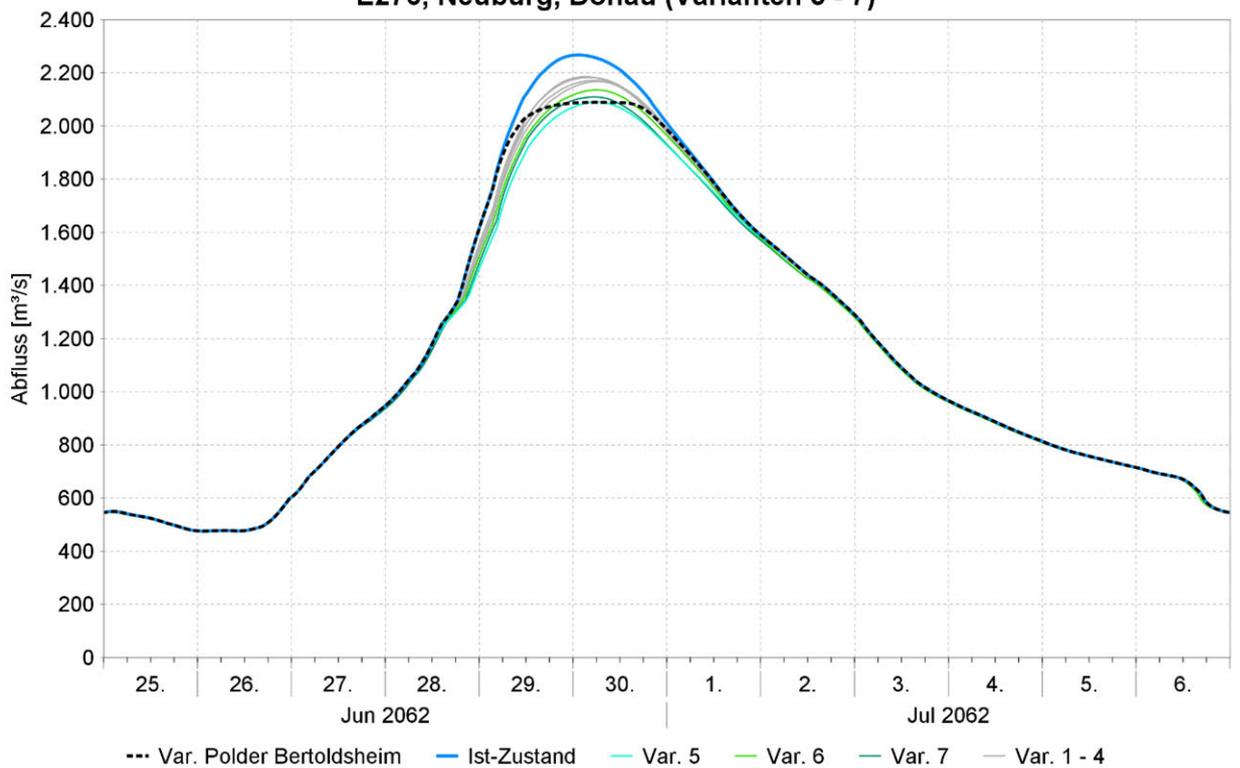


E276, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

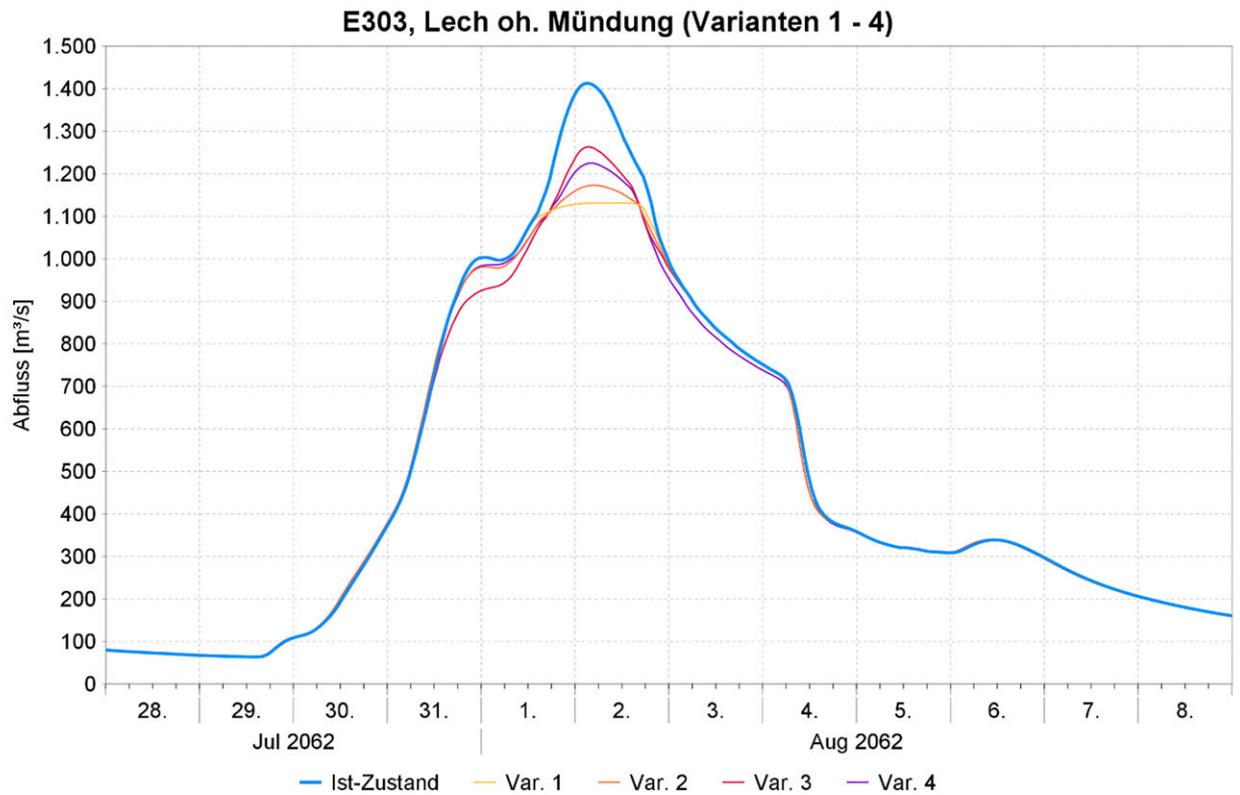
E276, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)



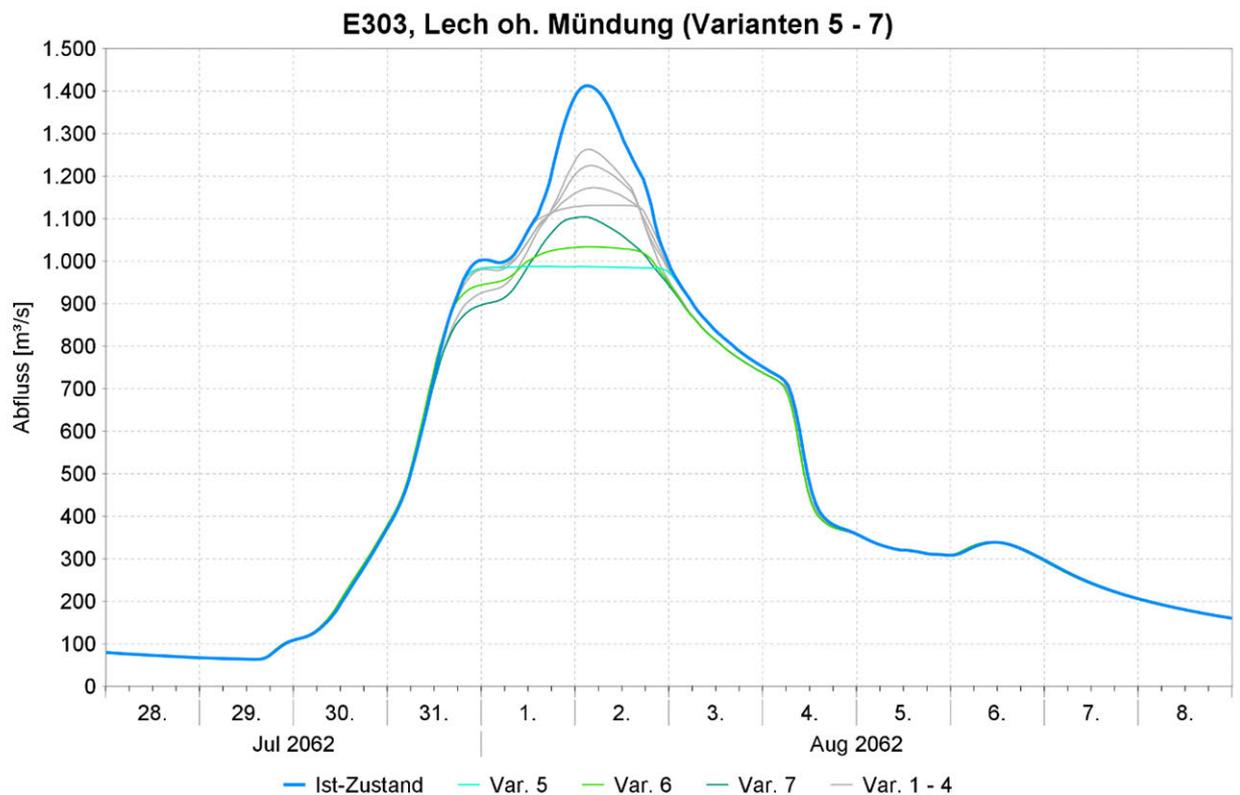
Aquantec GmbH



Anlage B.2.10 Ereignis E303



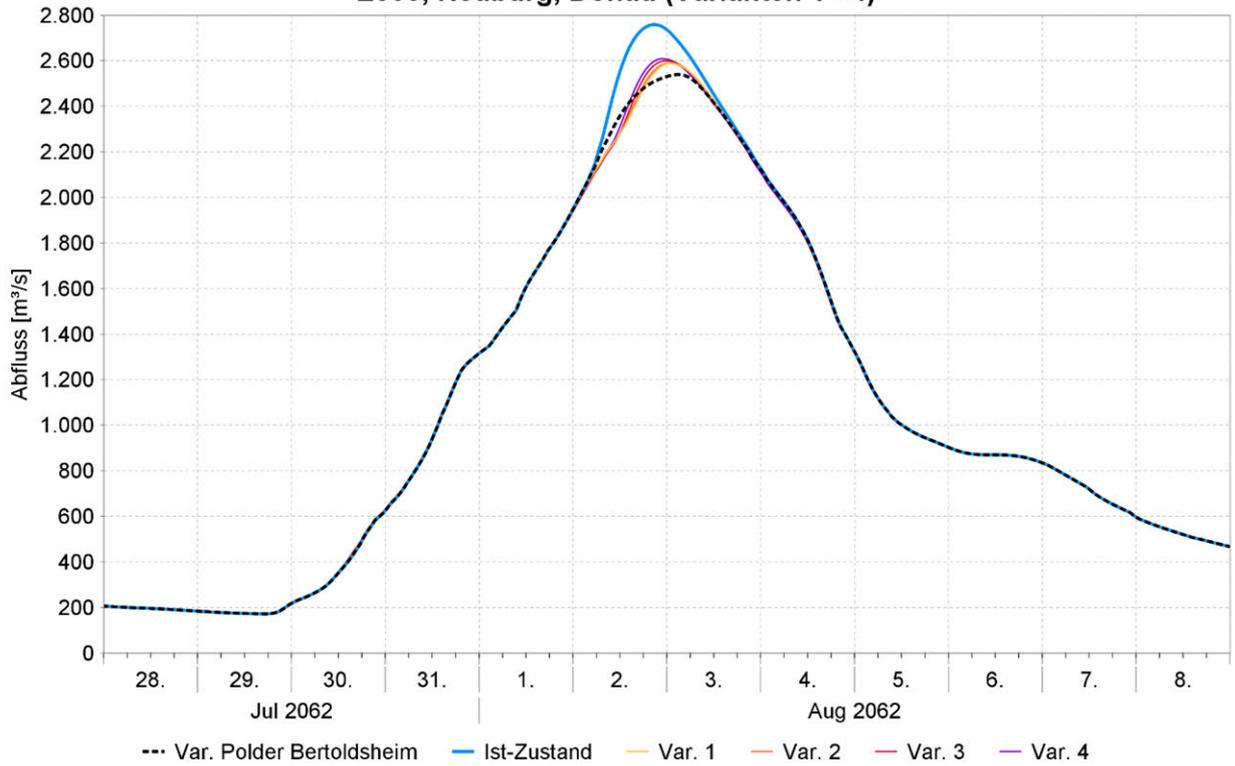
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

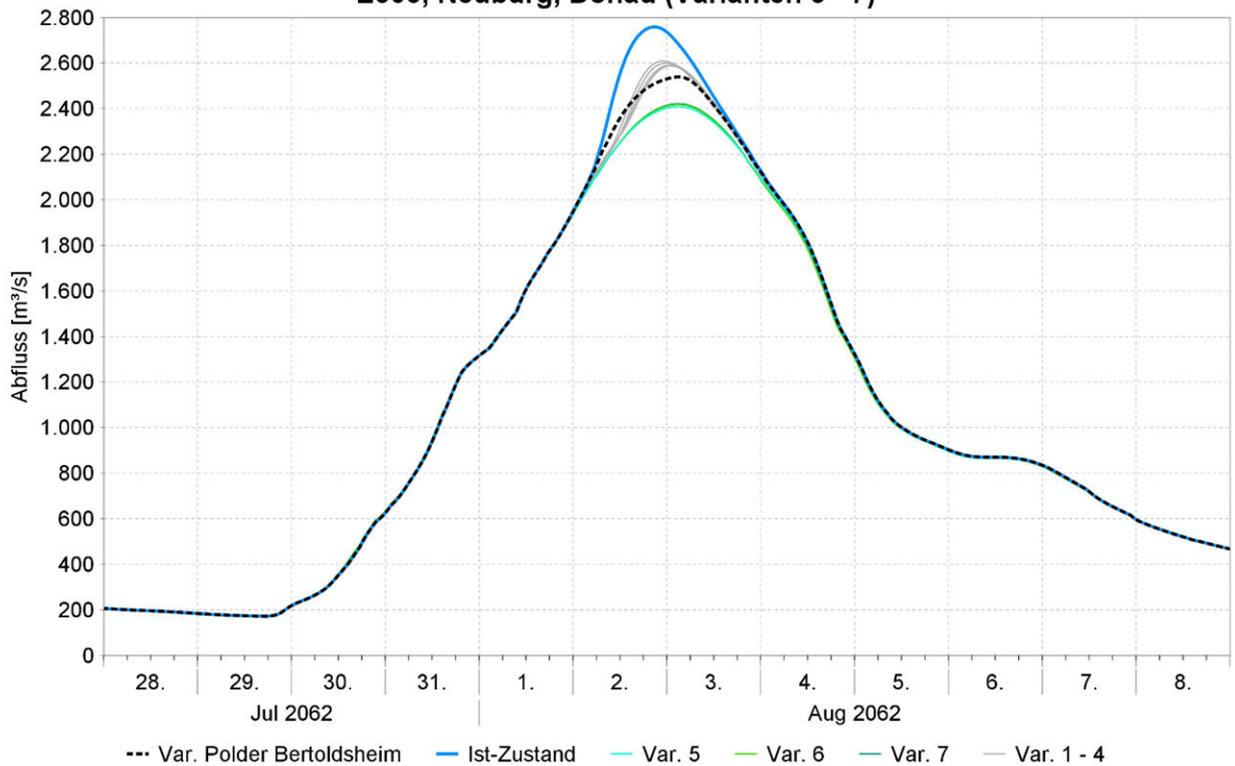


E303, Neuburg, Donau (Varianten 1 - 4)



Aquantec GmbH

E303, Neuburg, Donau (Varianten 5 - 7)

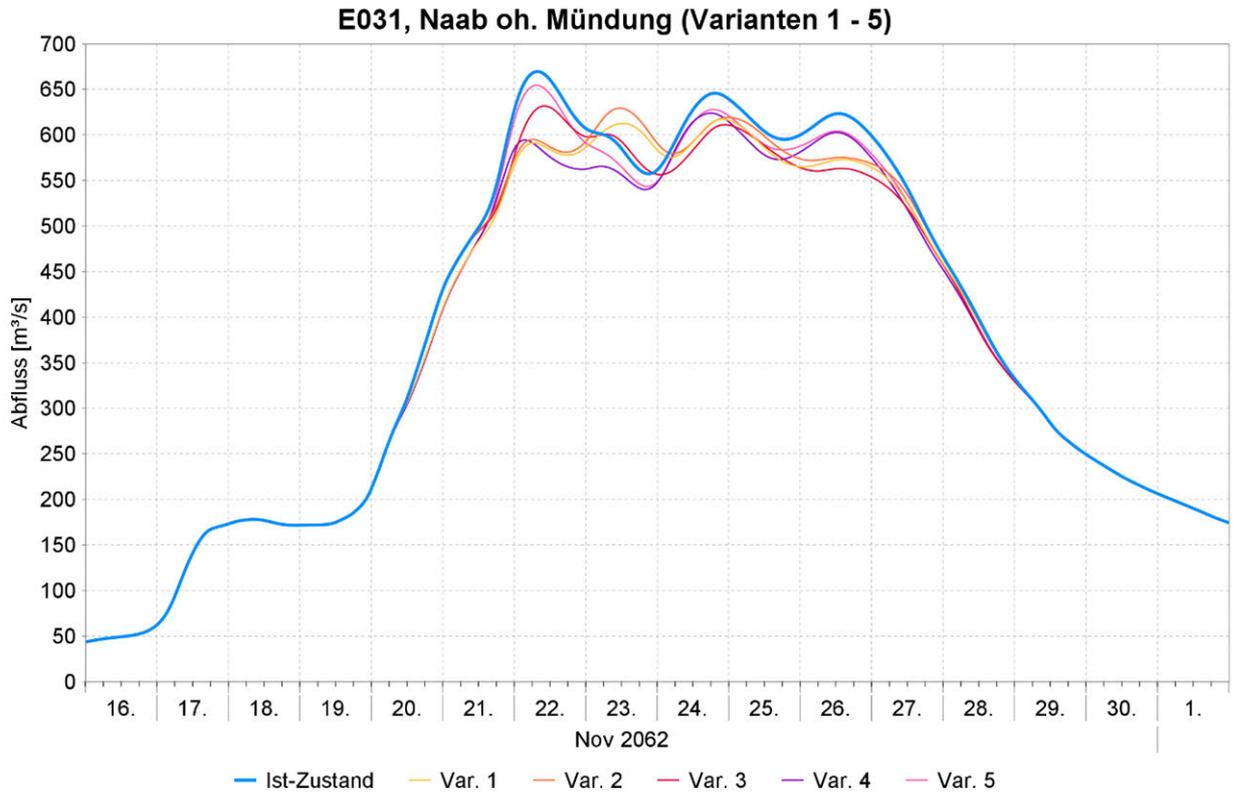


Aquantec GmbH

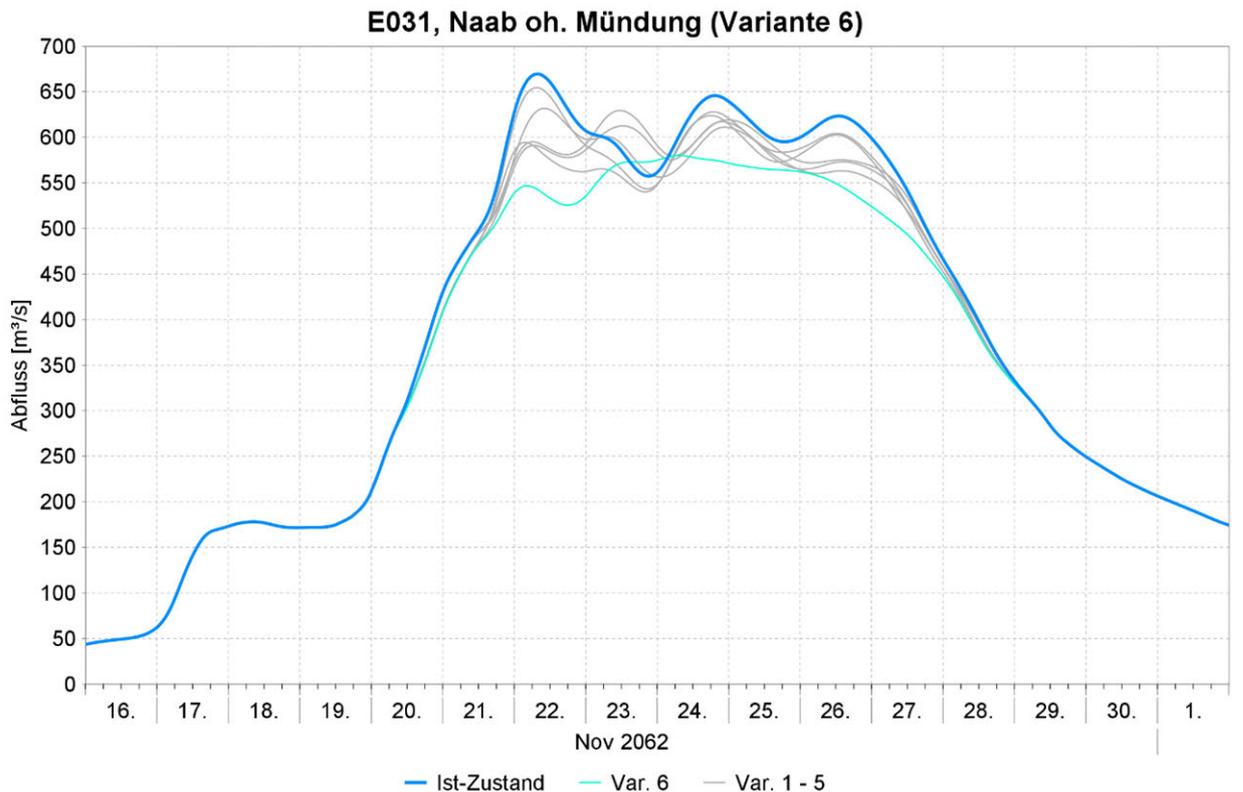


Anlage B.3 Gangliniendarstellungen HRB-Wirkungsanalyse Naab/Regen

Anlage B.3.1 Ereignis E031



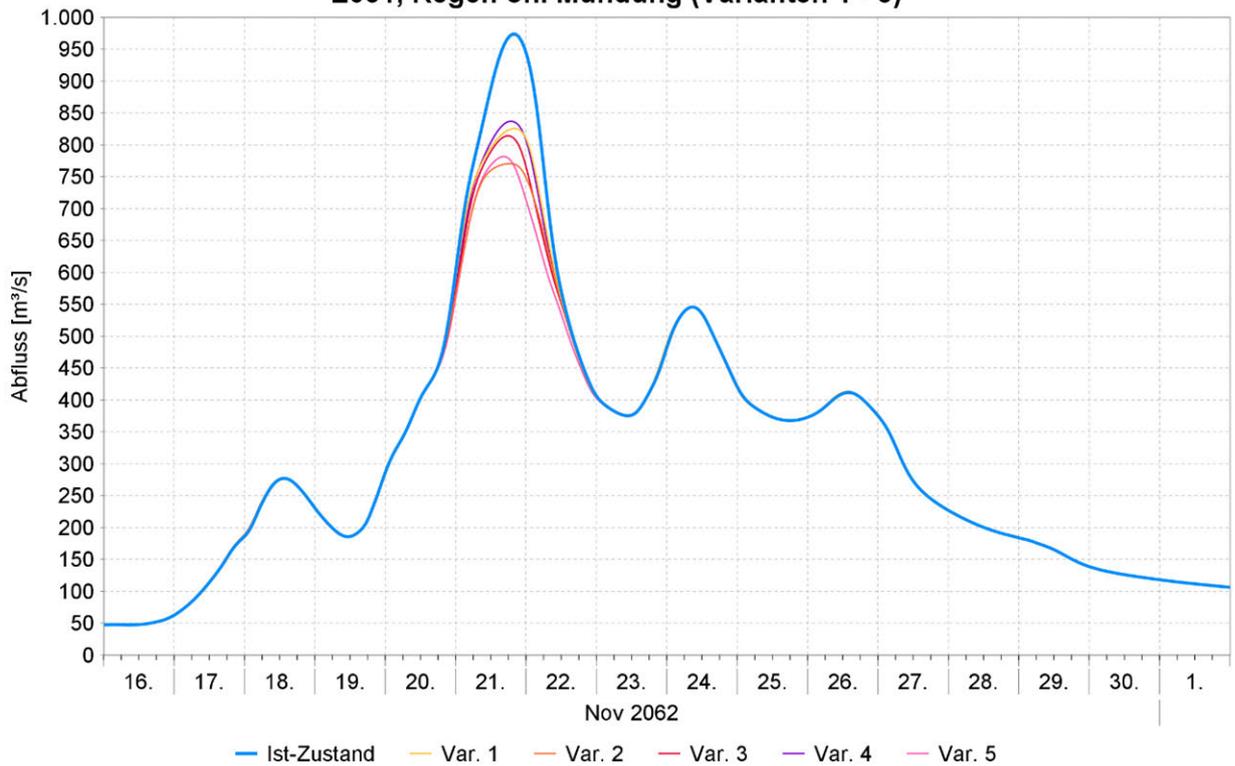
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

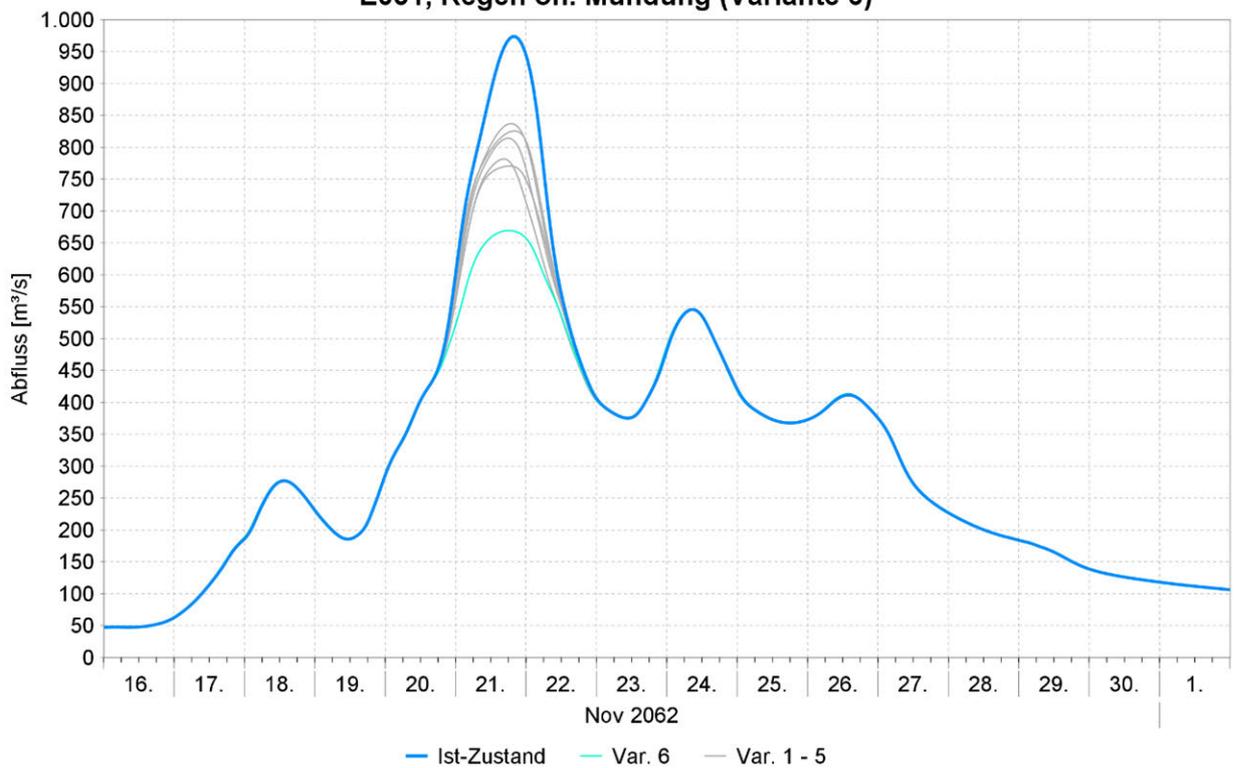


E031, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

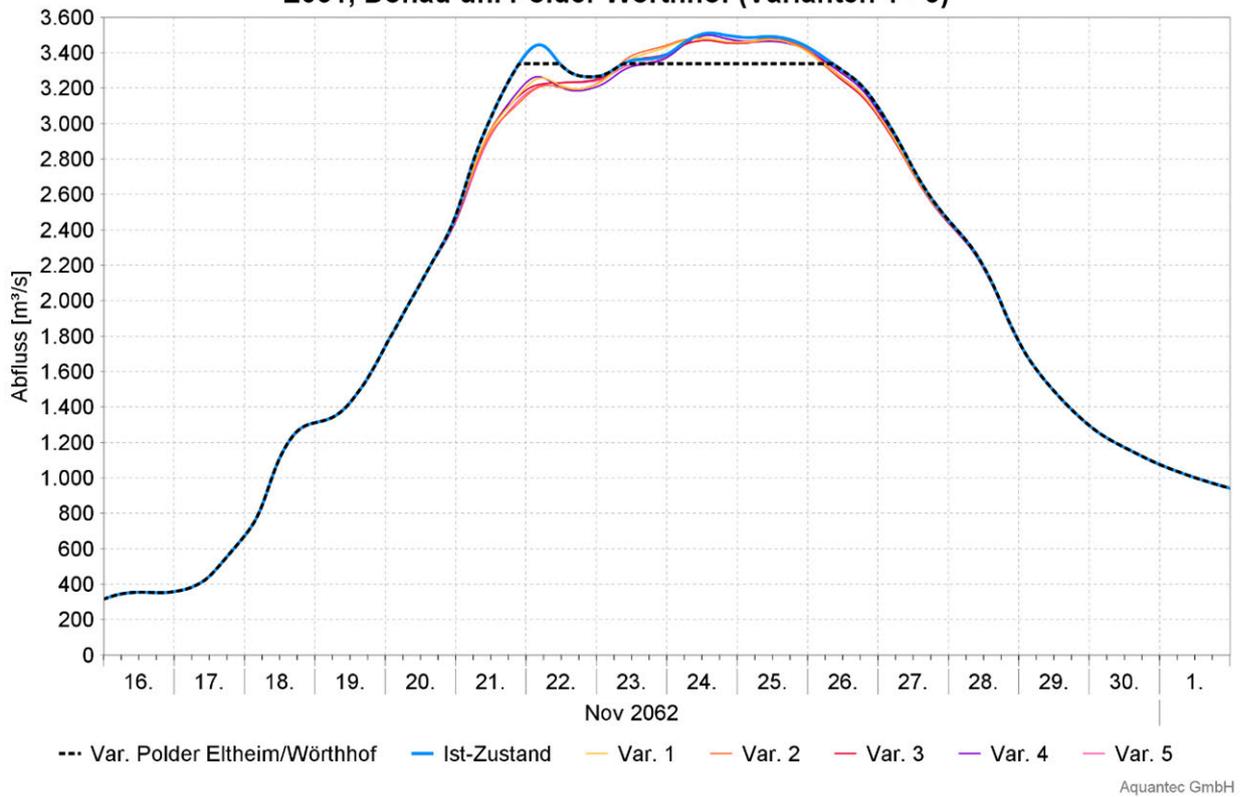
E031, Regen oh. Mündung (Variante 6)



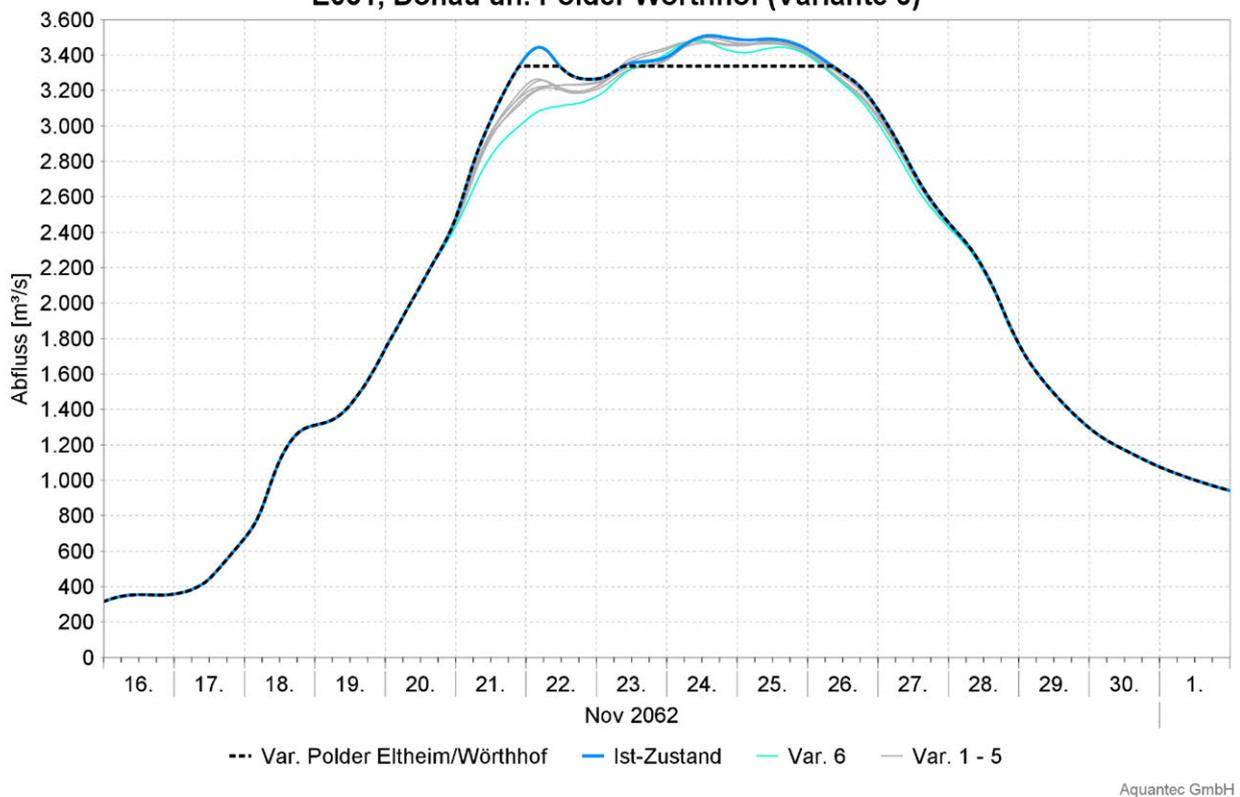
Aquantec GmbH



E031, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)



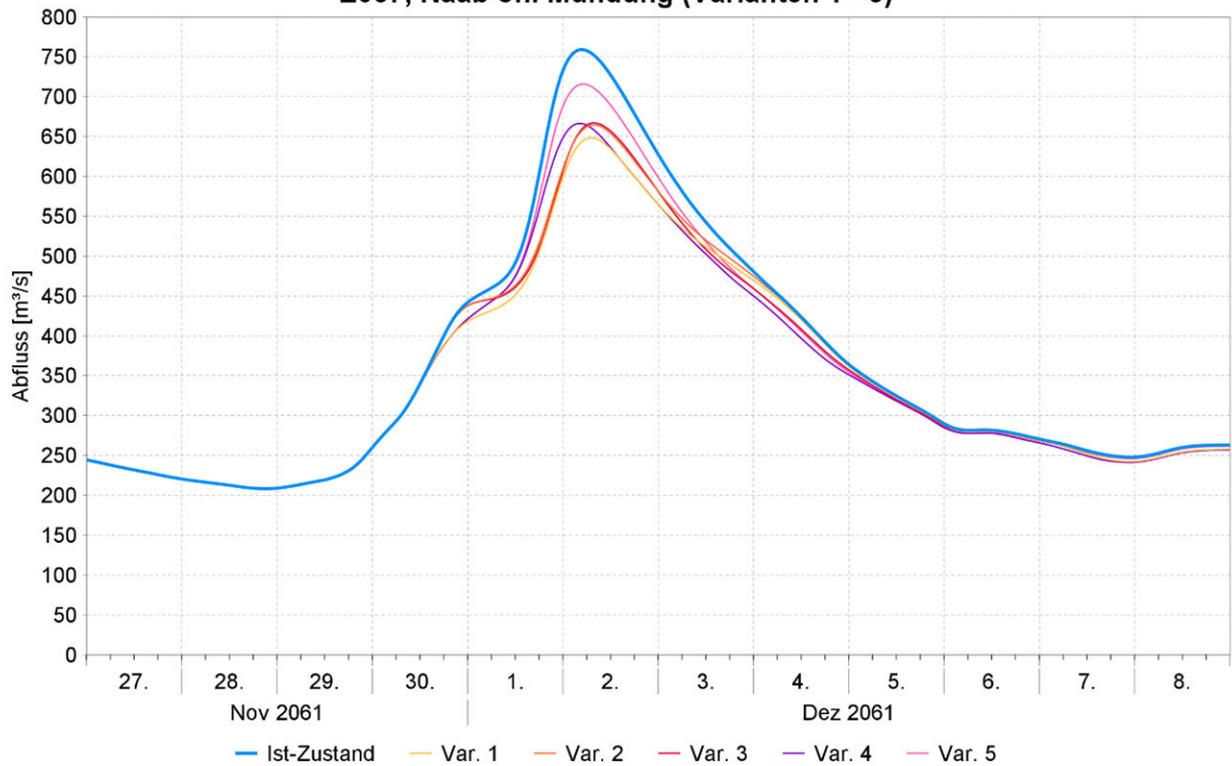
E031, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)





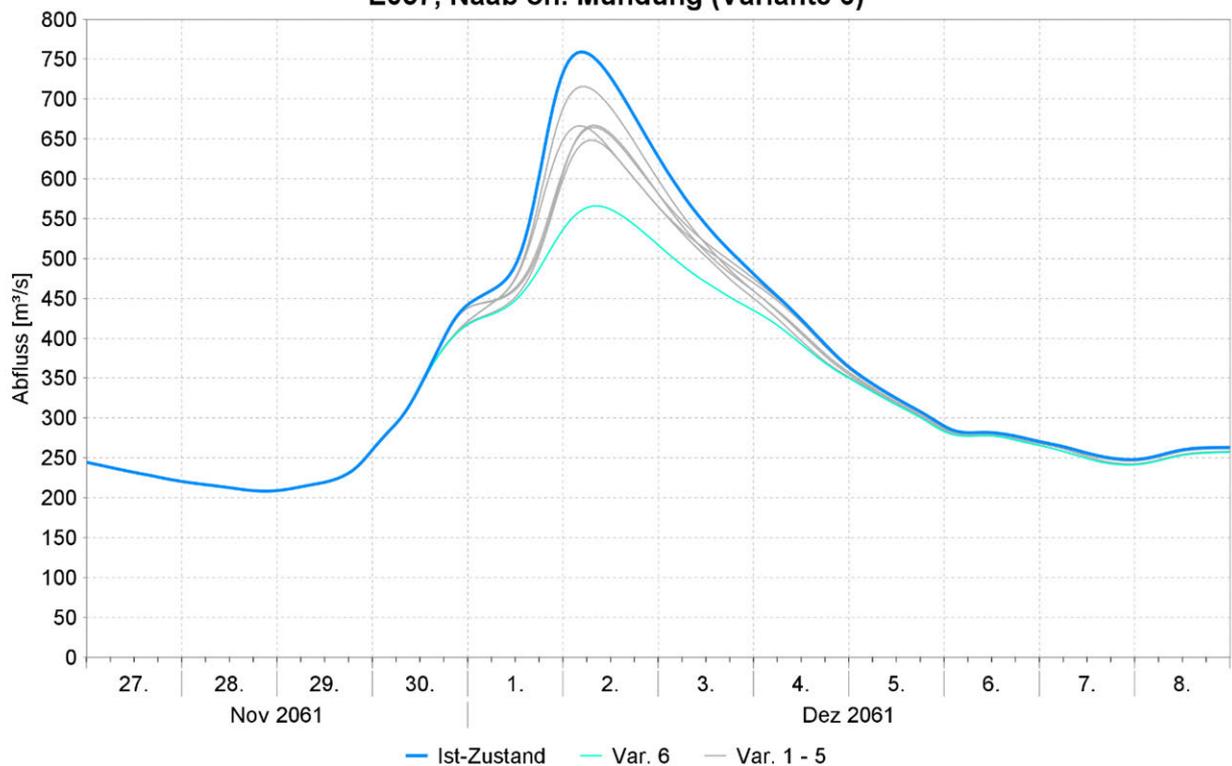
Anlage B.3.2 Ereignis E057

E057, Naab oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

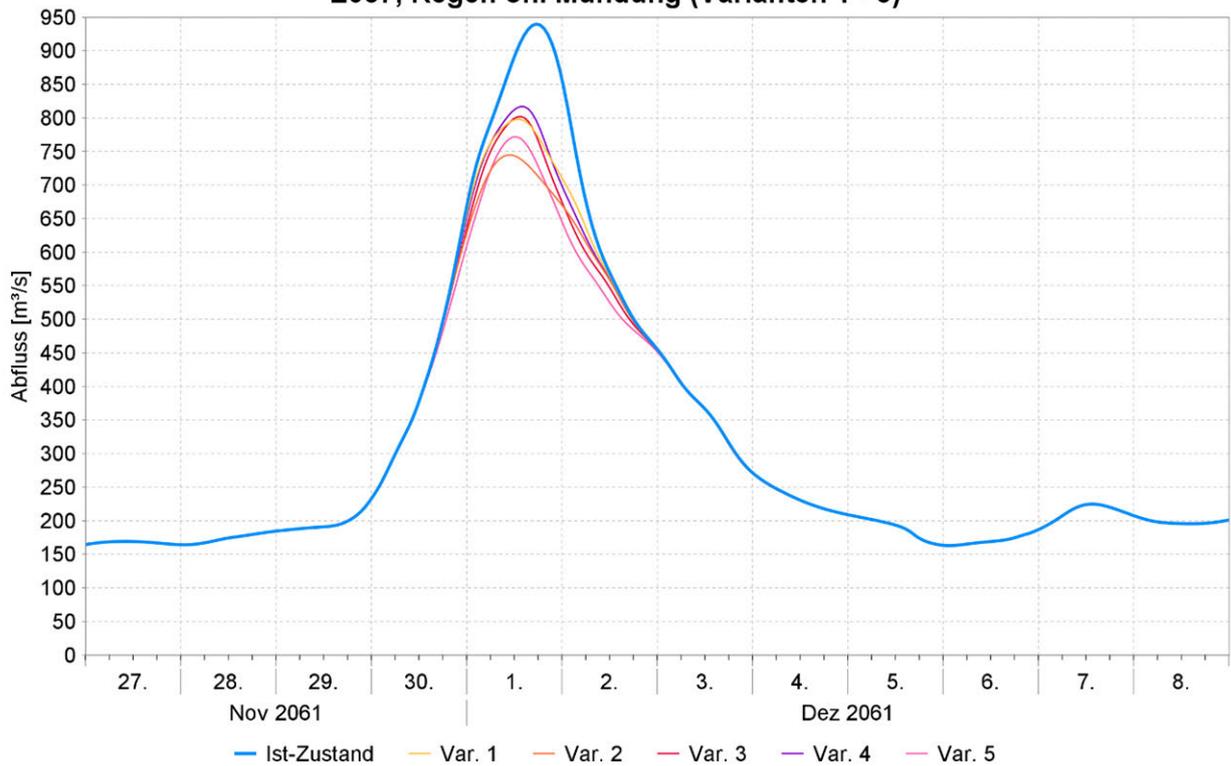
E057, Naab oh. Mündung (Variante 6)



Aquantec GmbH

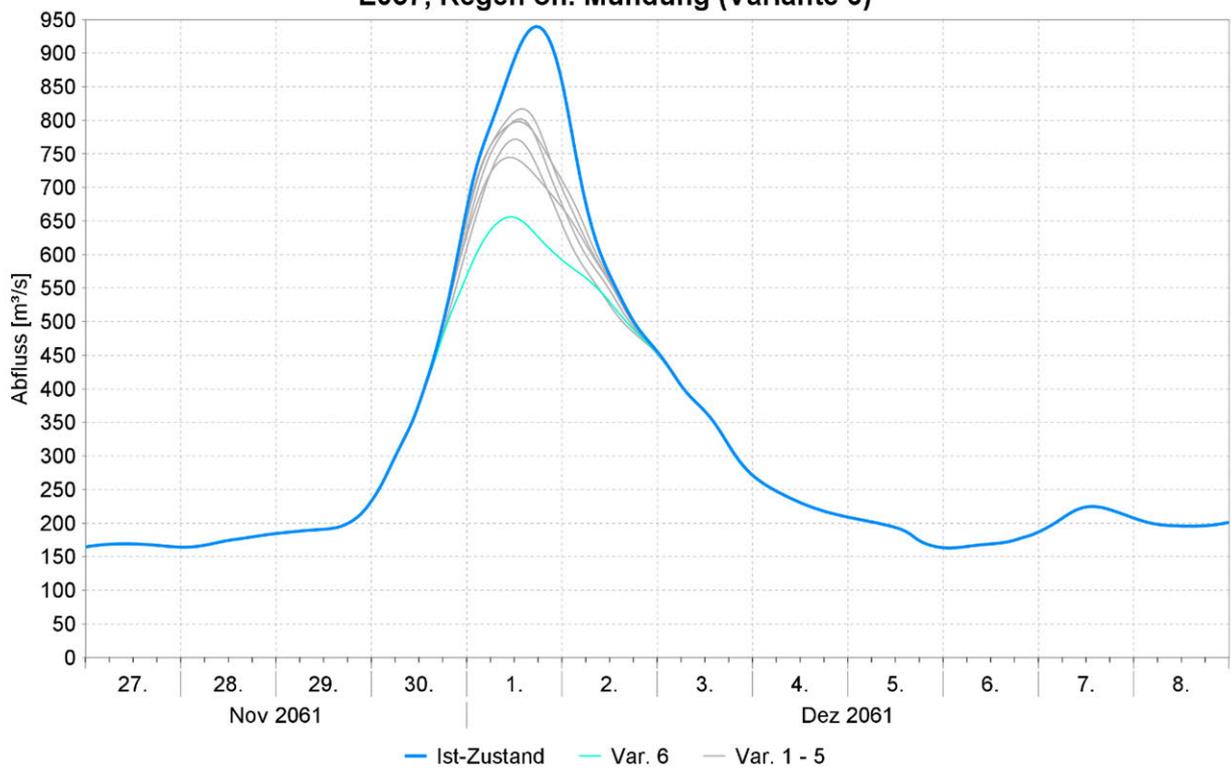


E057, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

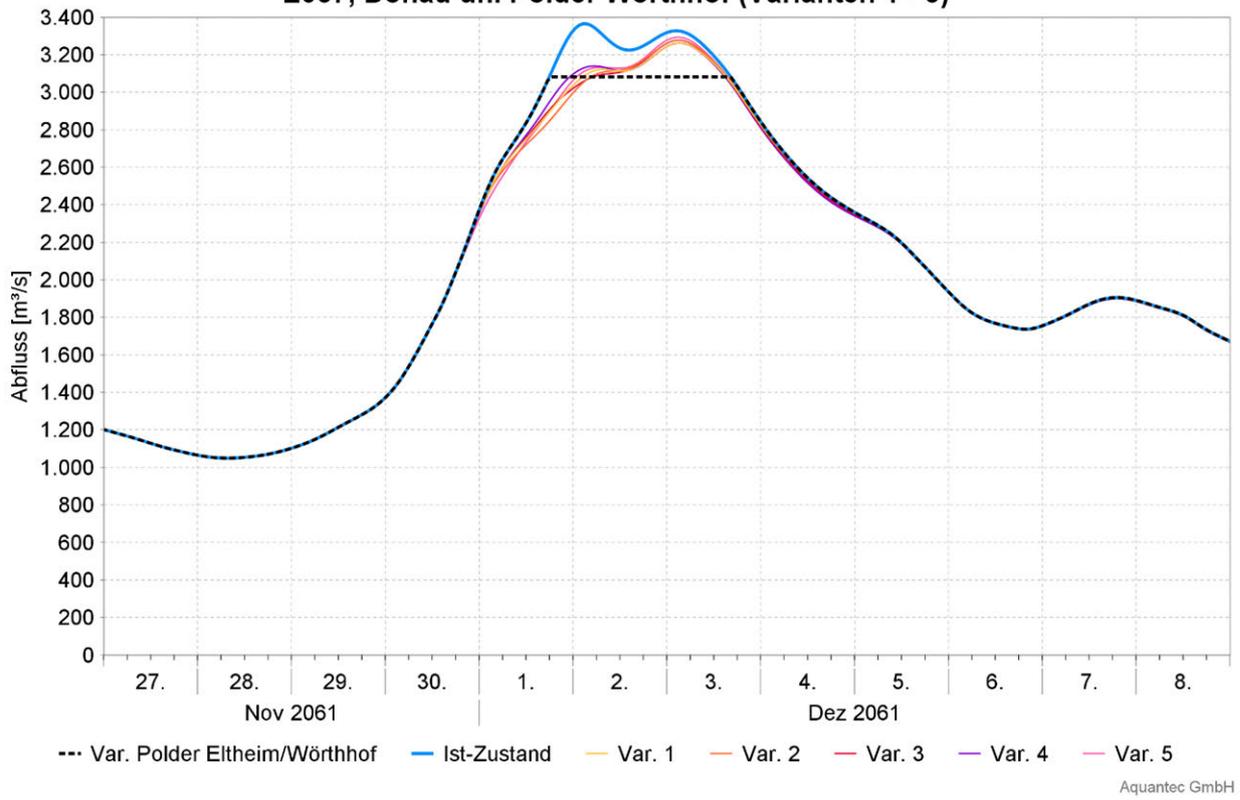
E057, Regen oh. Mündung (Variante 6)



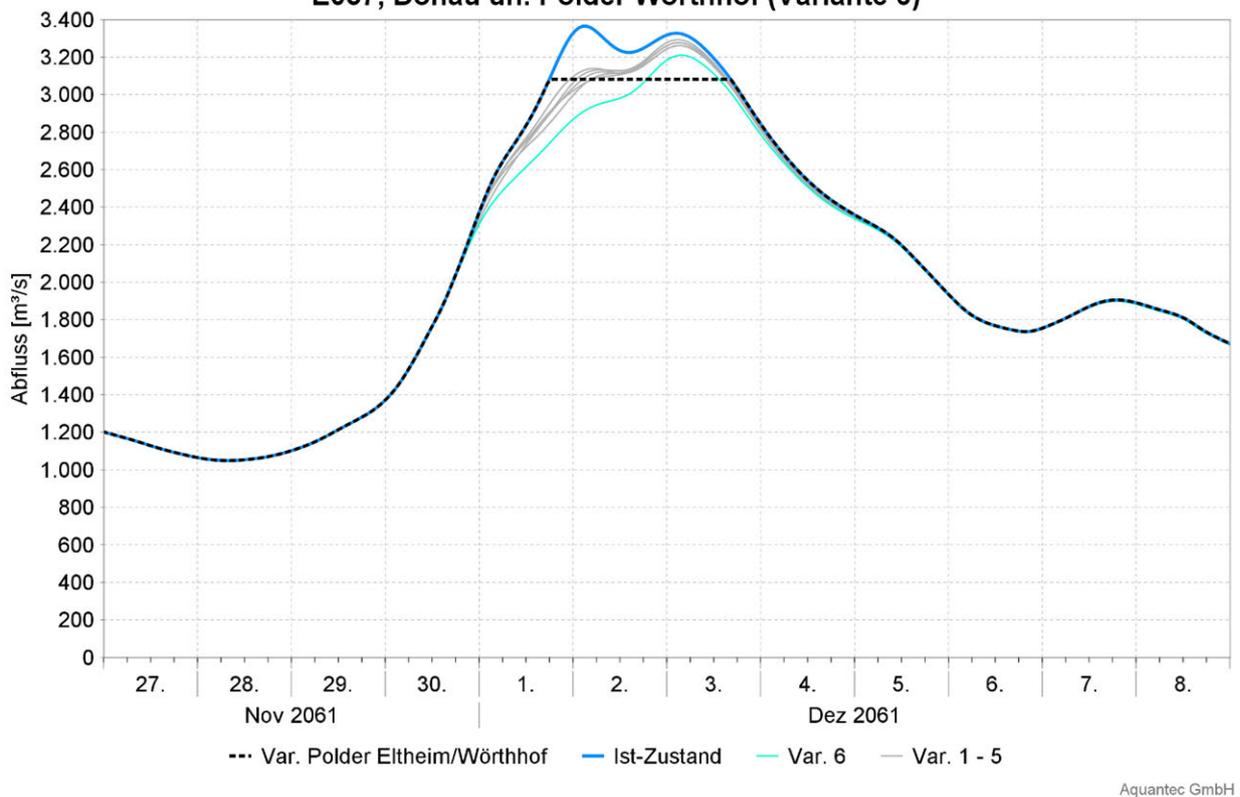
Aquantec GmbH



E057, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

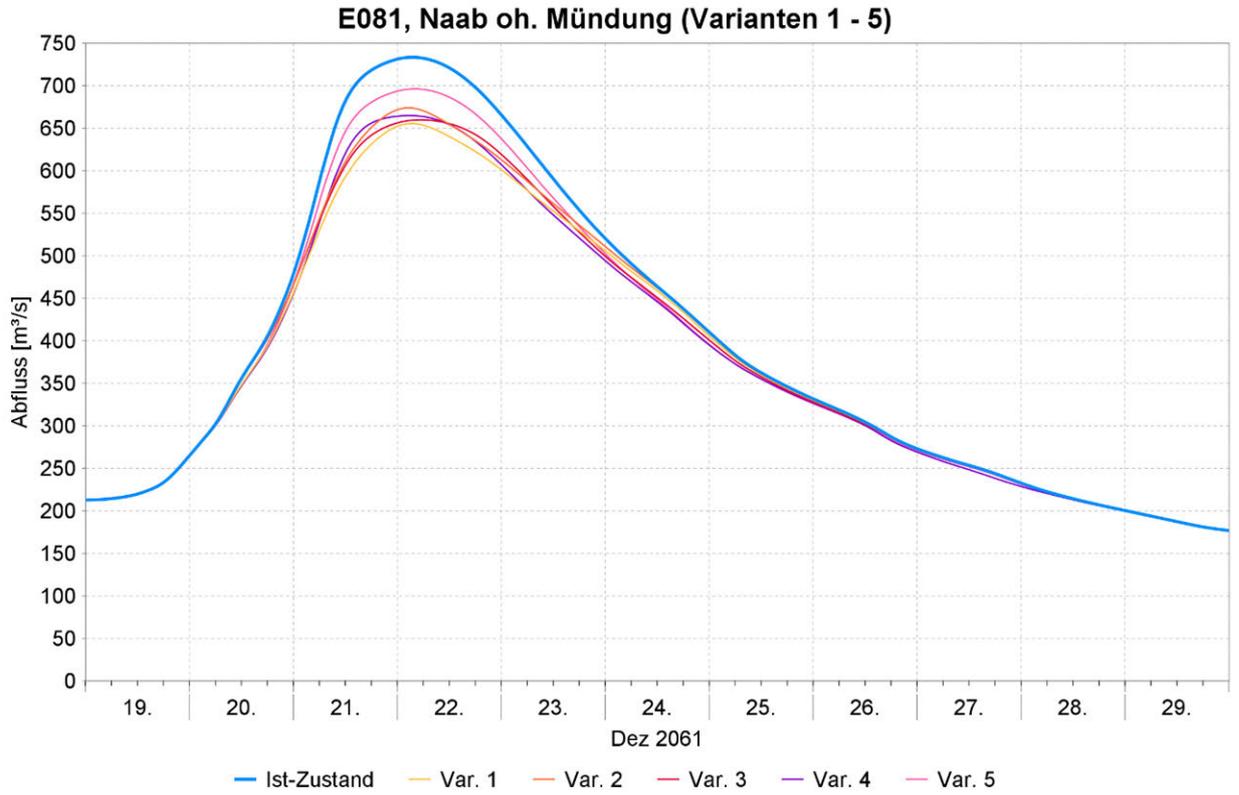


E057, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

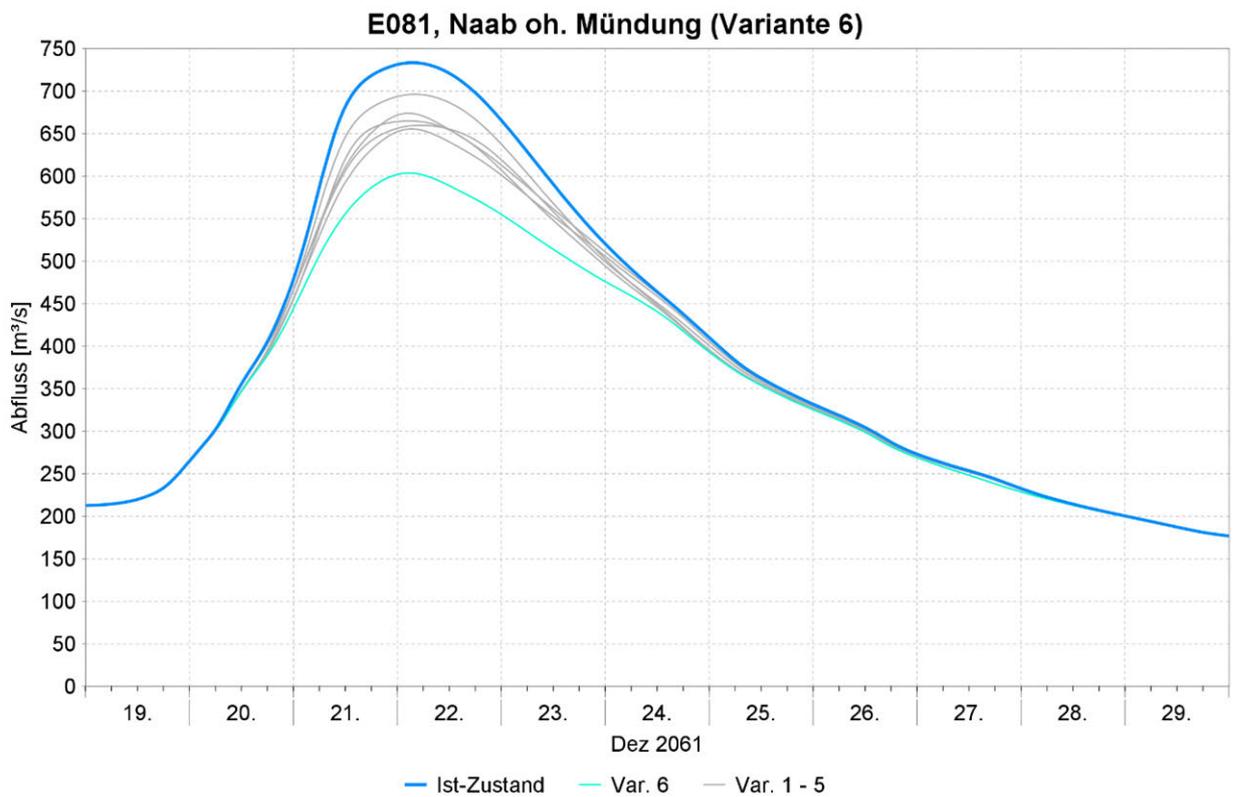




Anlage B.3.3 Ereignis E081



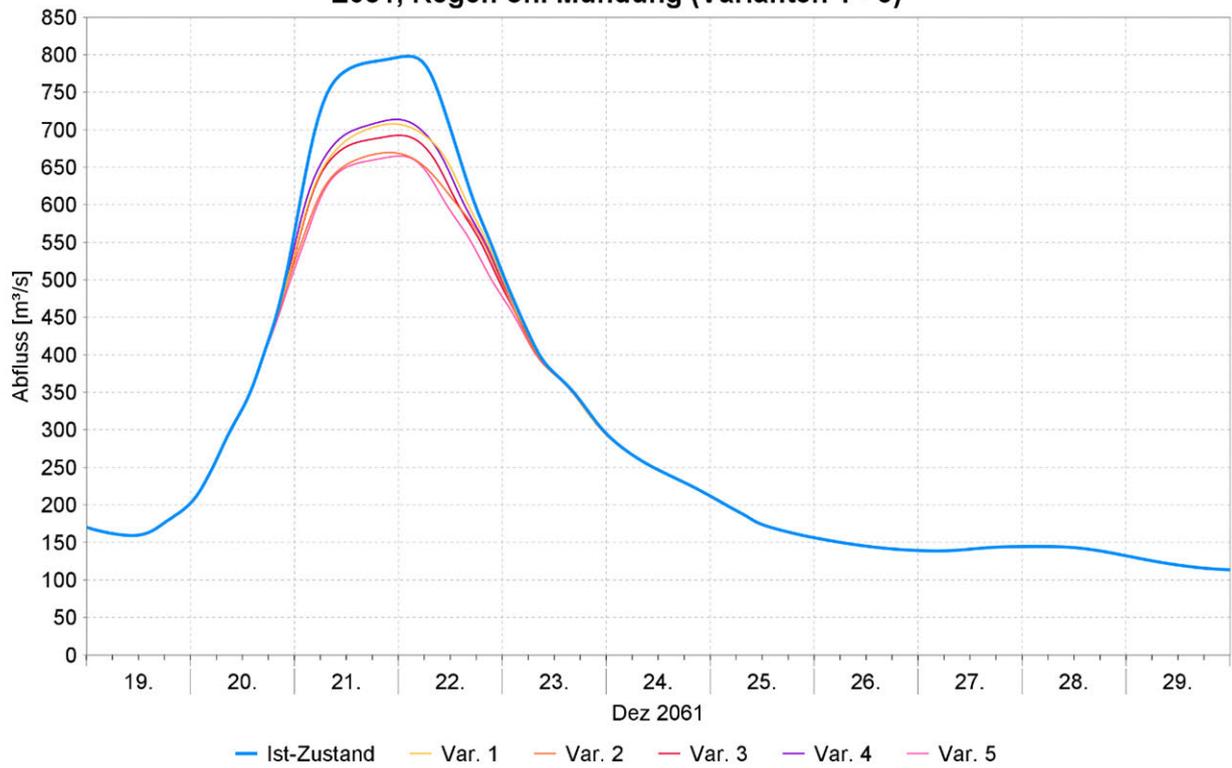
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

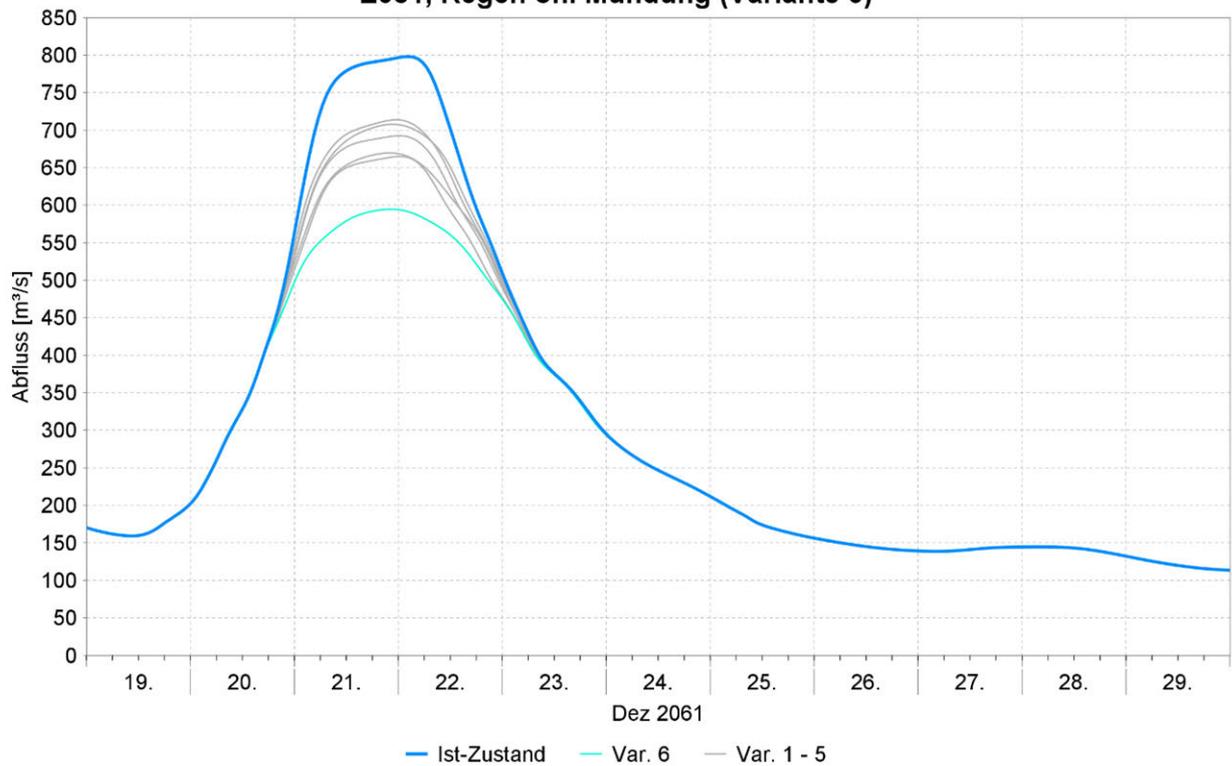


E081, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

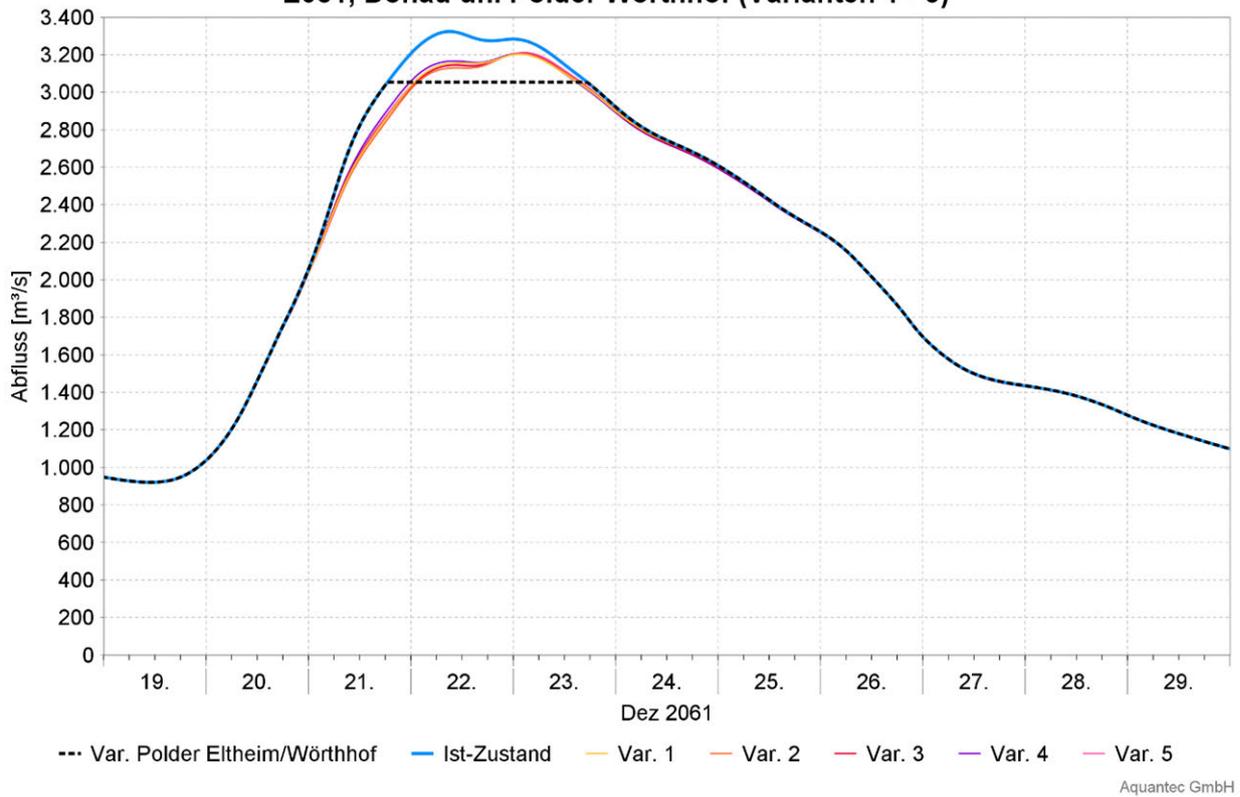
E081, Regen oh. Mündung (Variante 6)



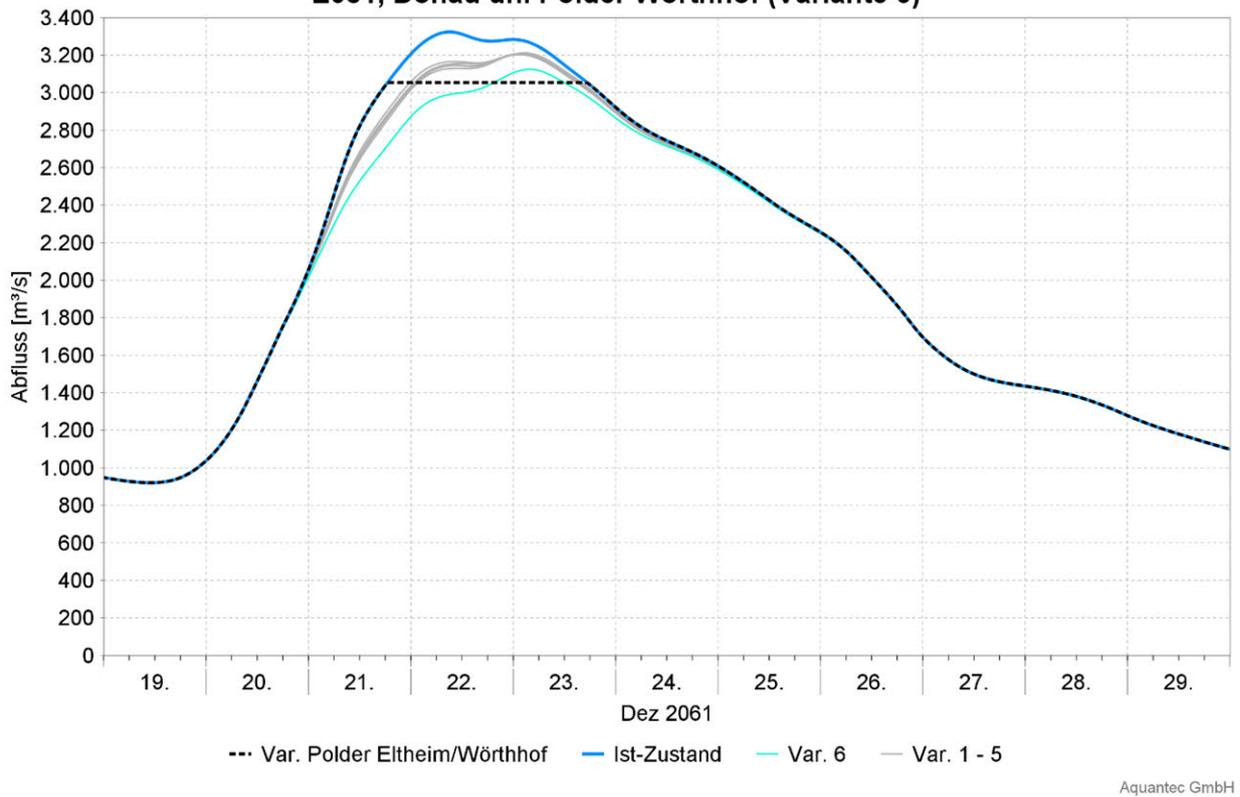
Aquantec GmbH



E081, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

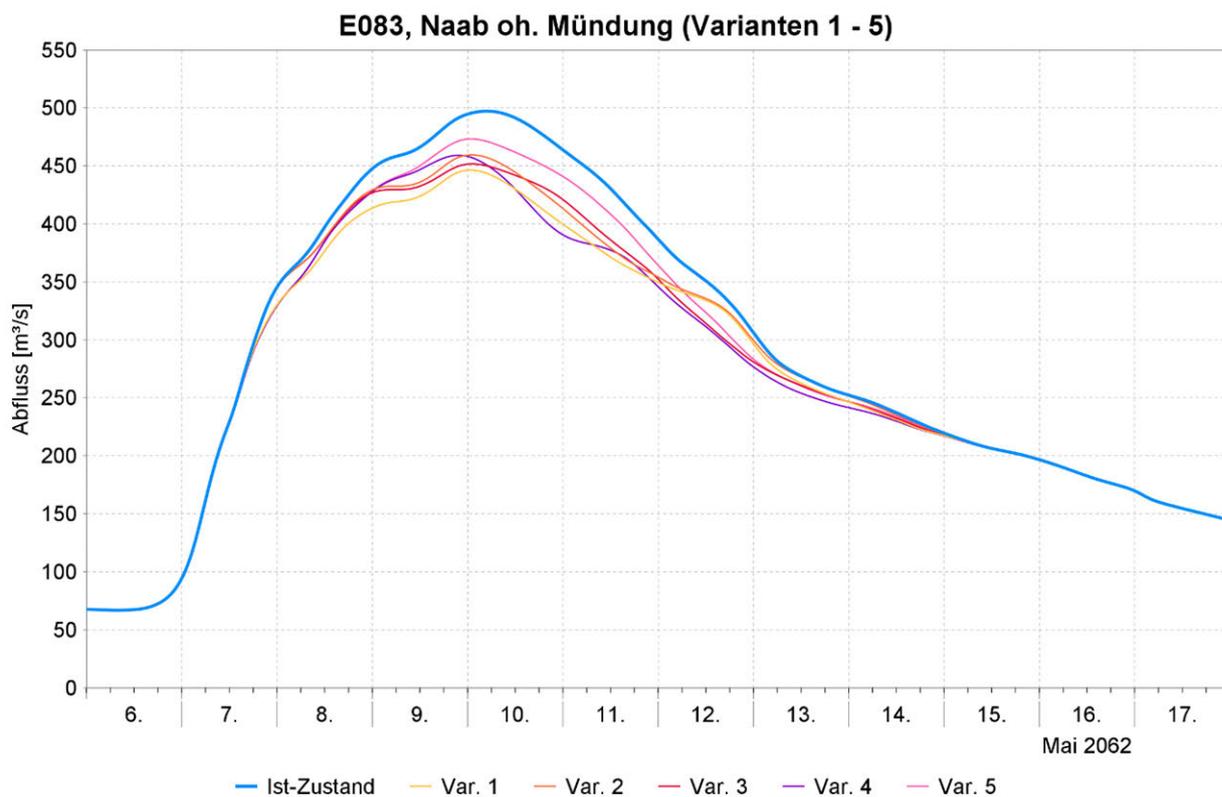


E081, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

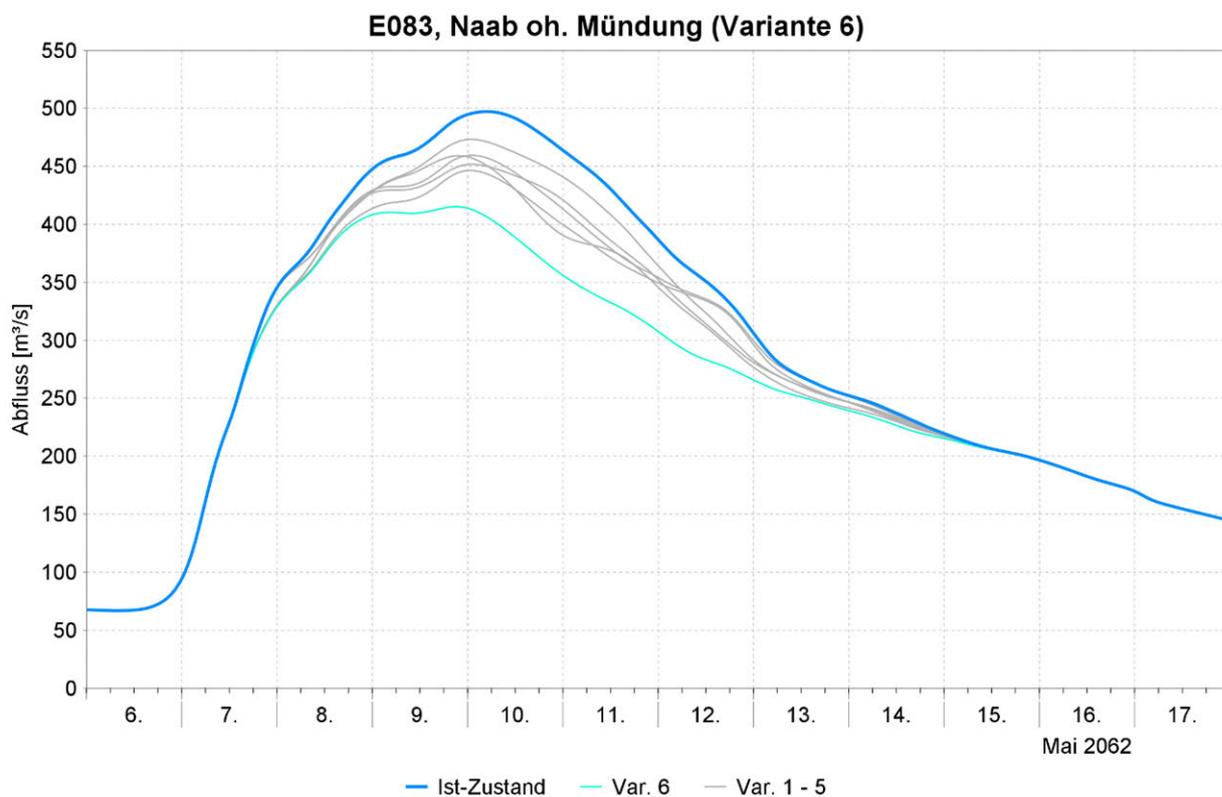




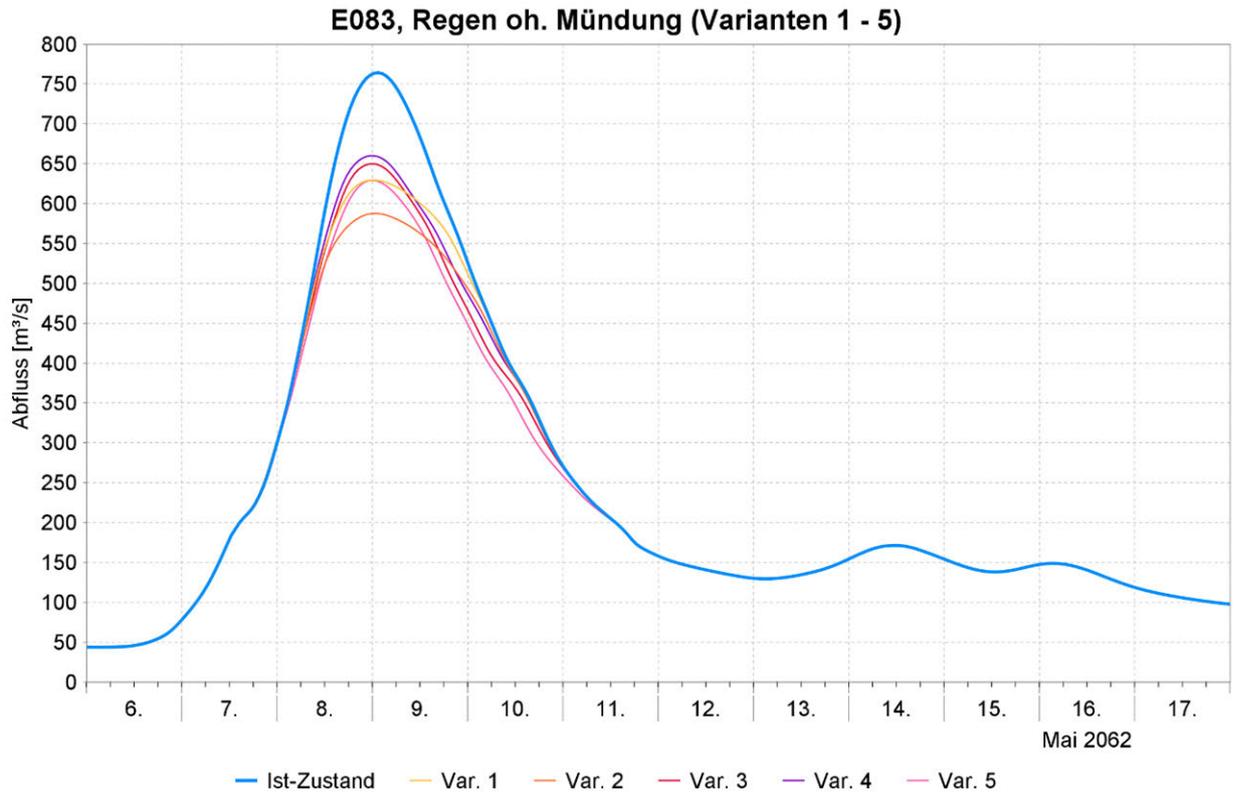
Anlage B.3.4 Ereignis E083



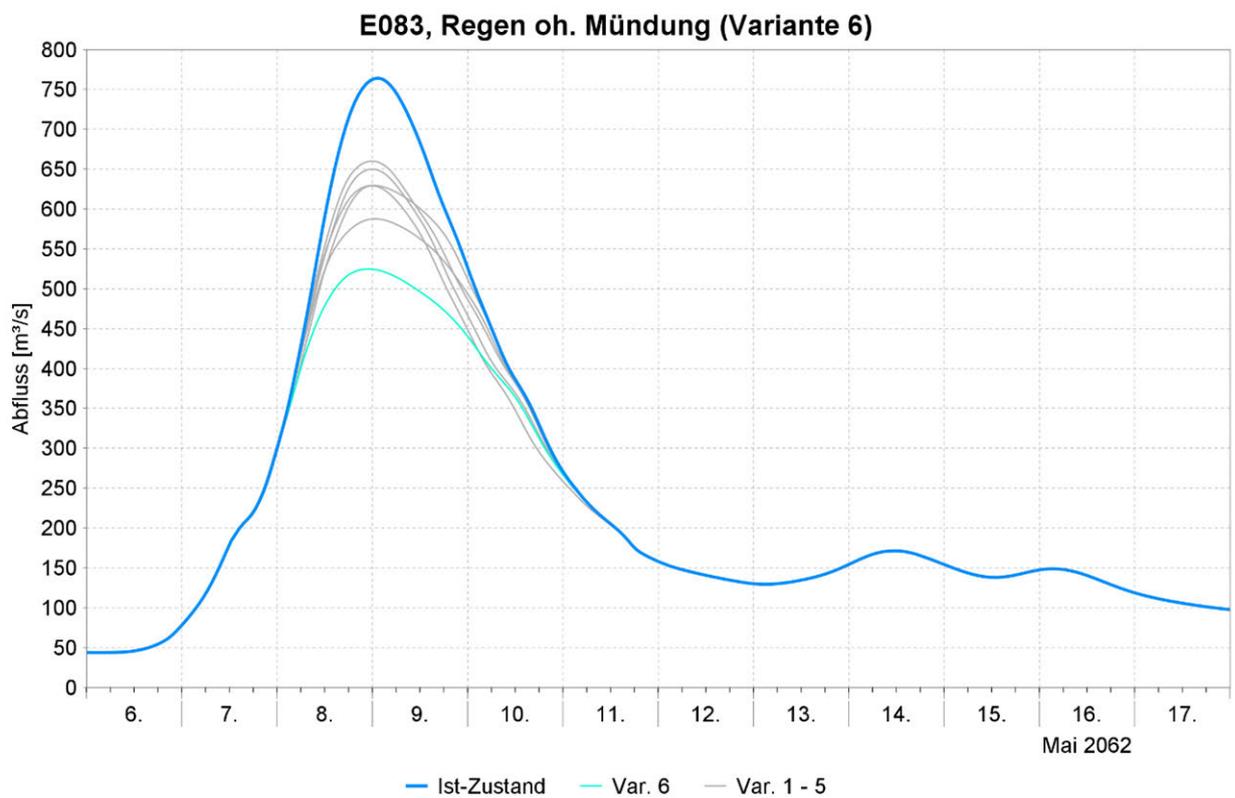
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH



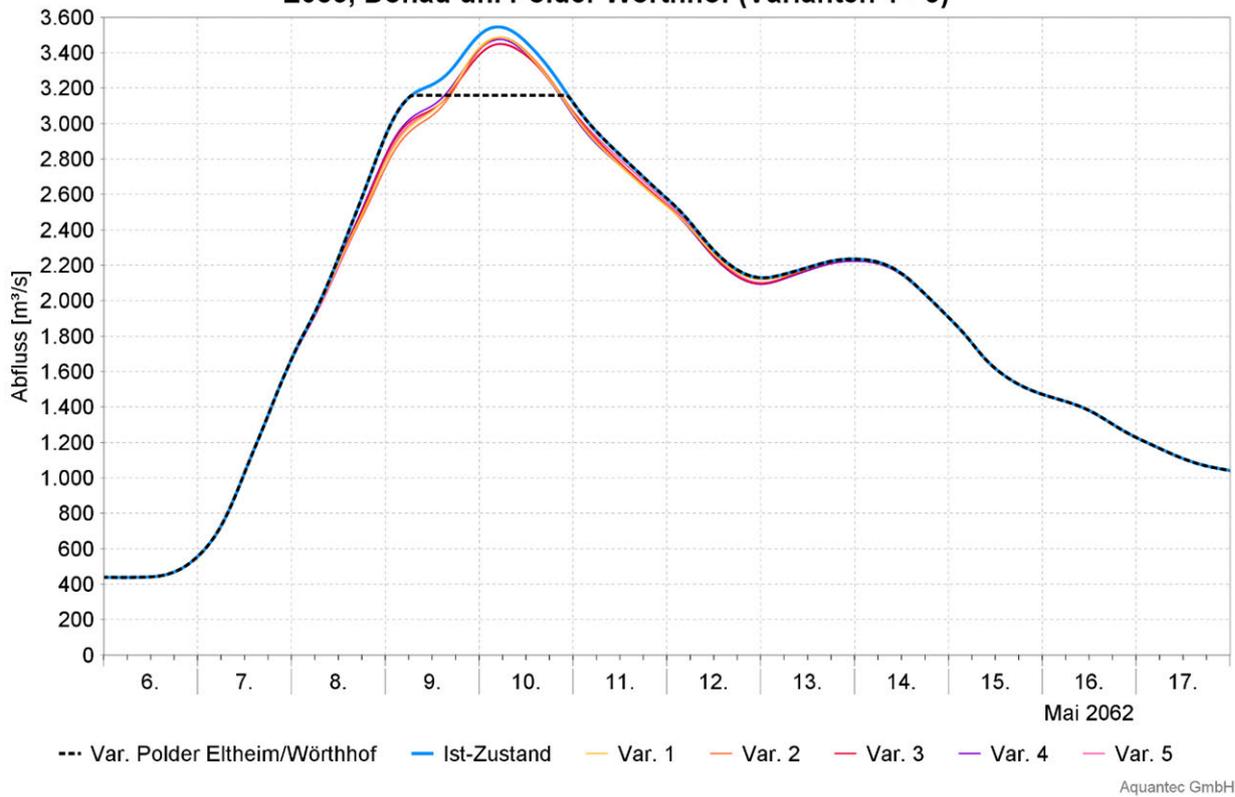
Aquantec GmbH



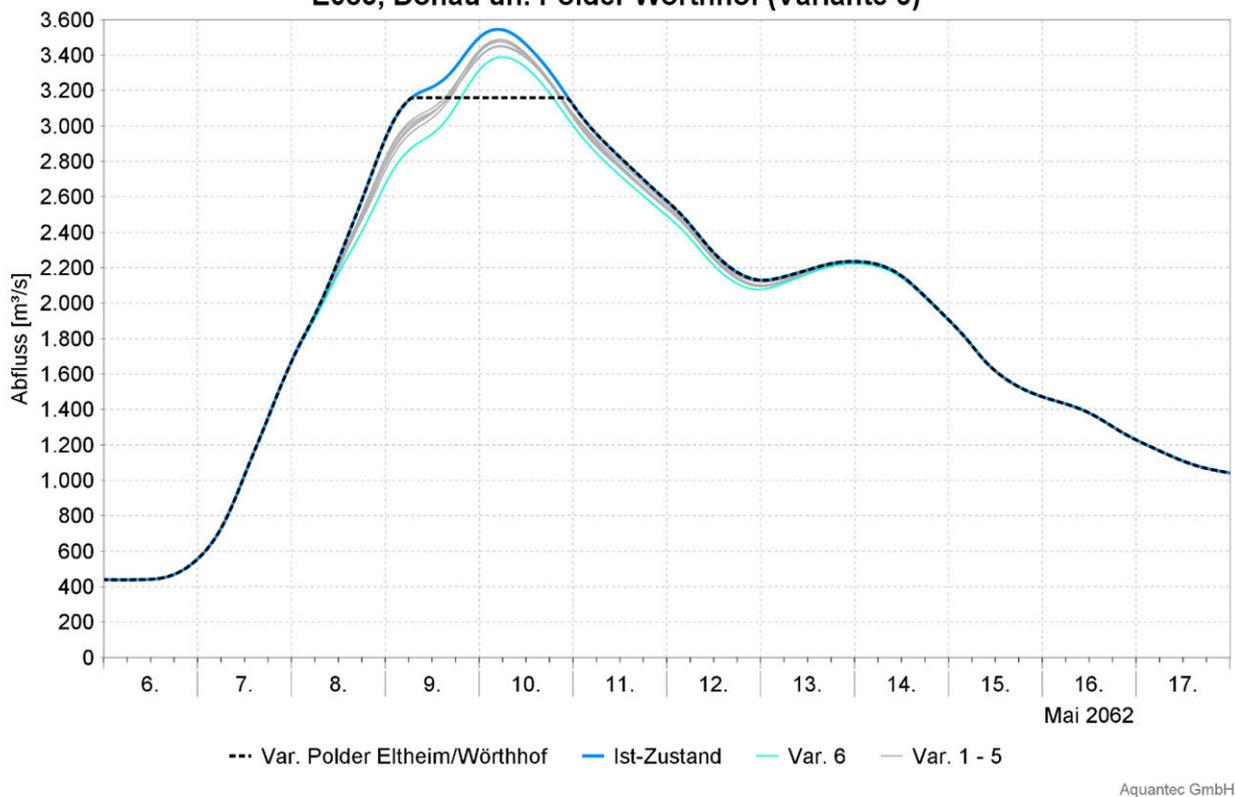
Aquantec GmbH



E083, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

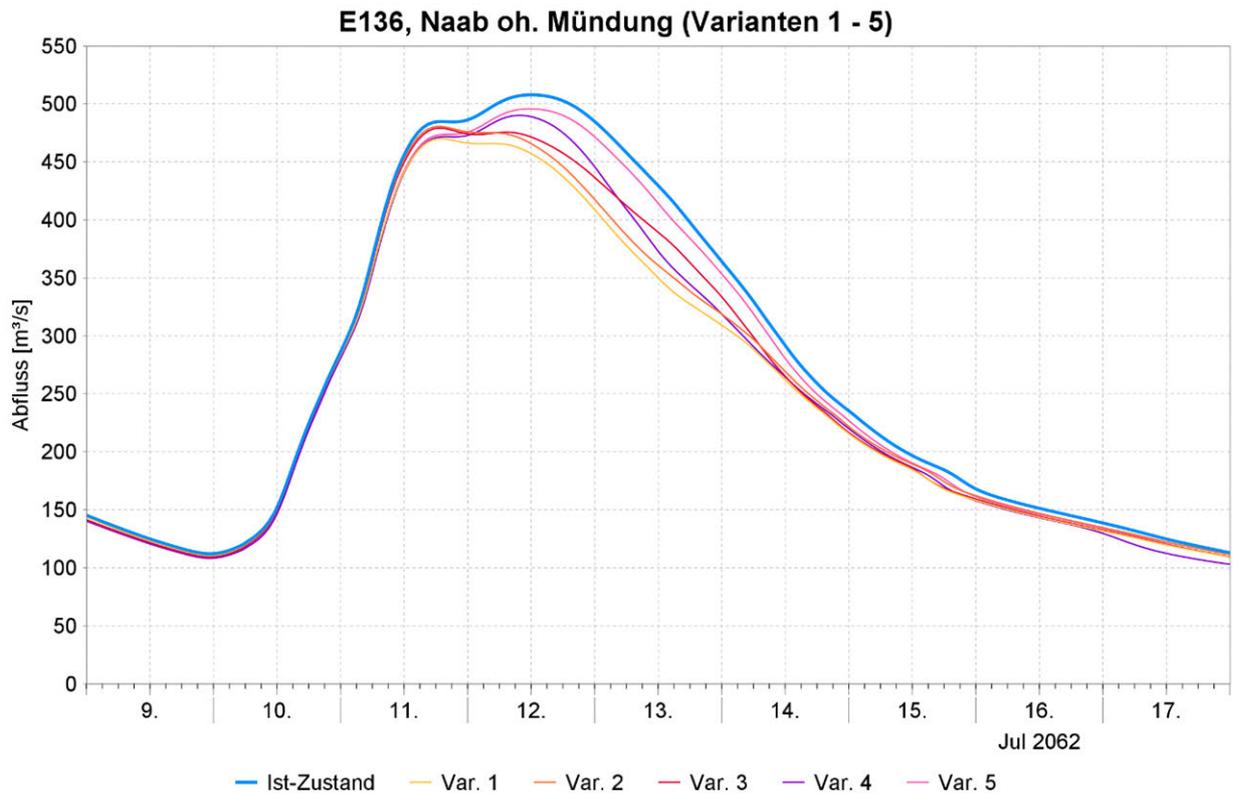


E083, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

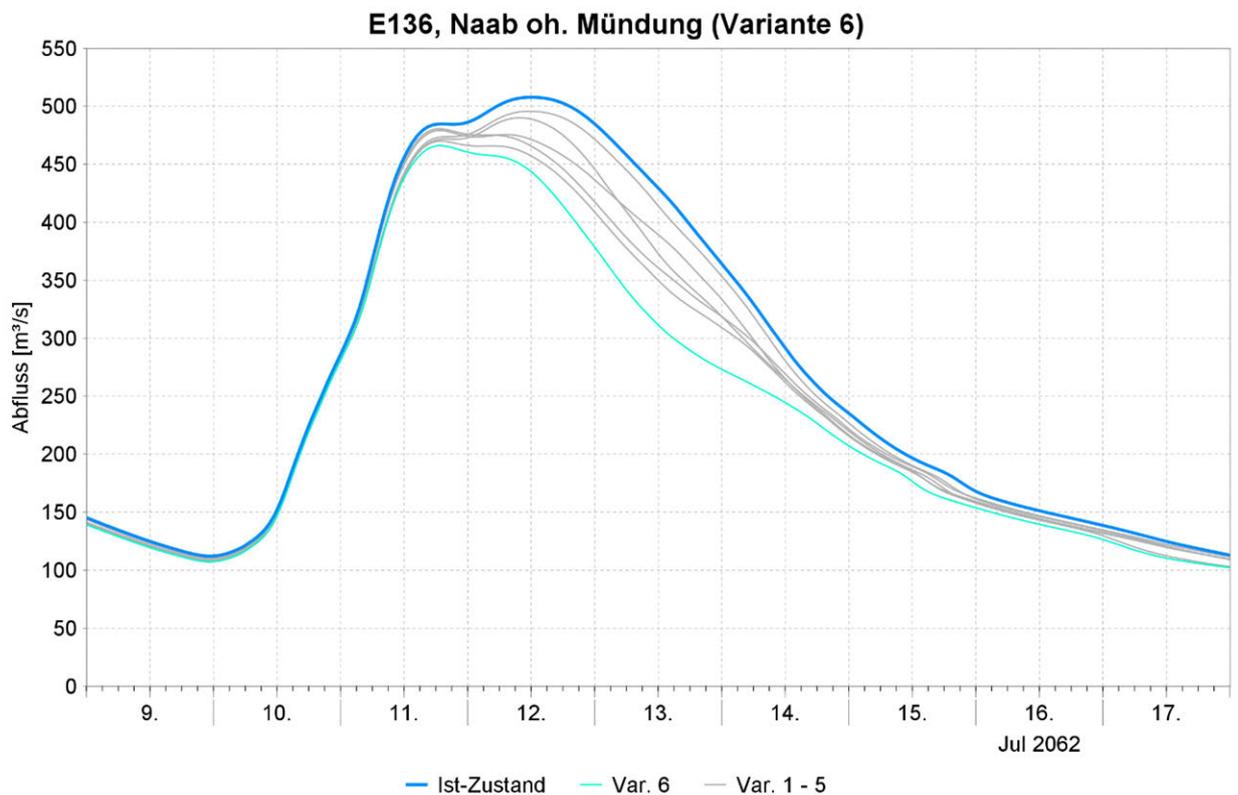




Anlage B.3.5 Ereignis E136



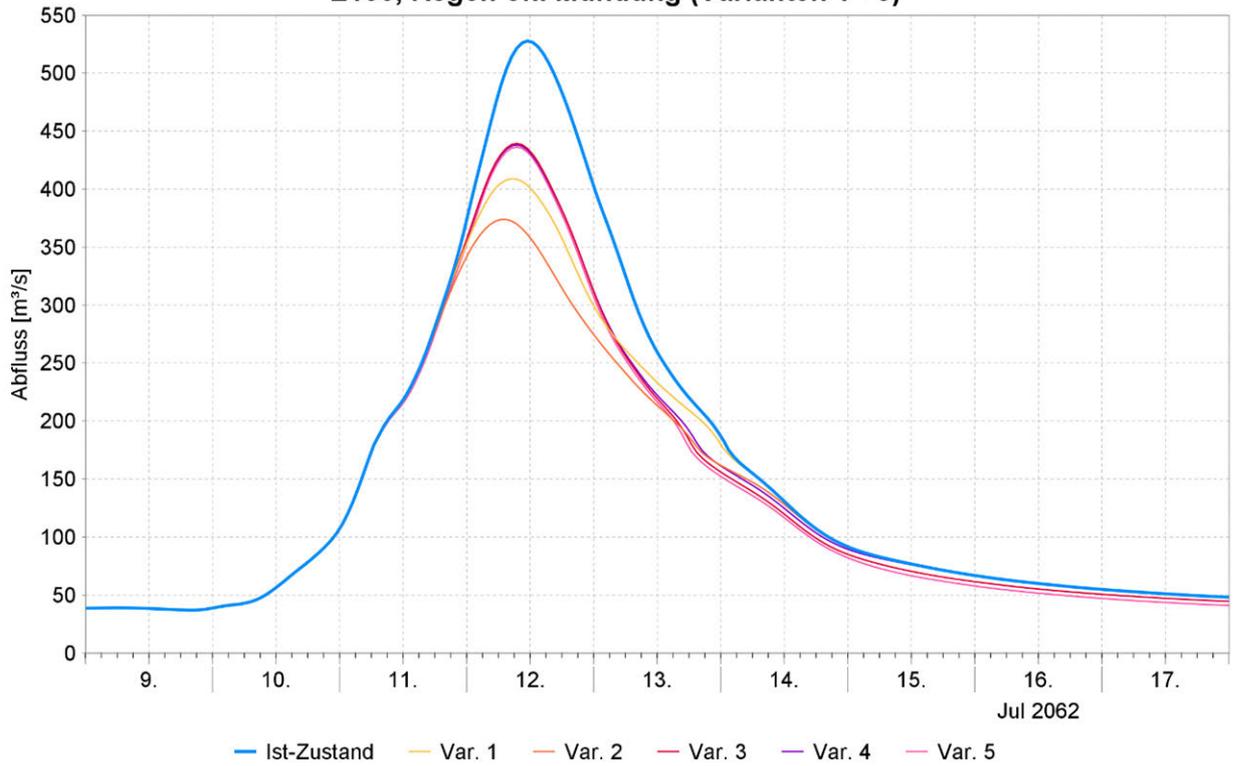
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

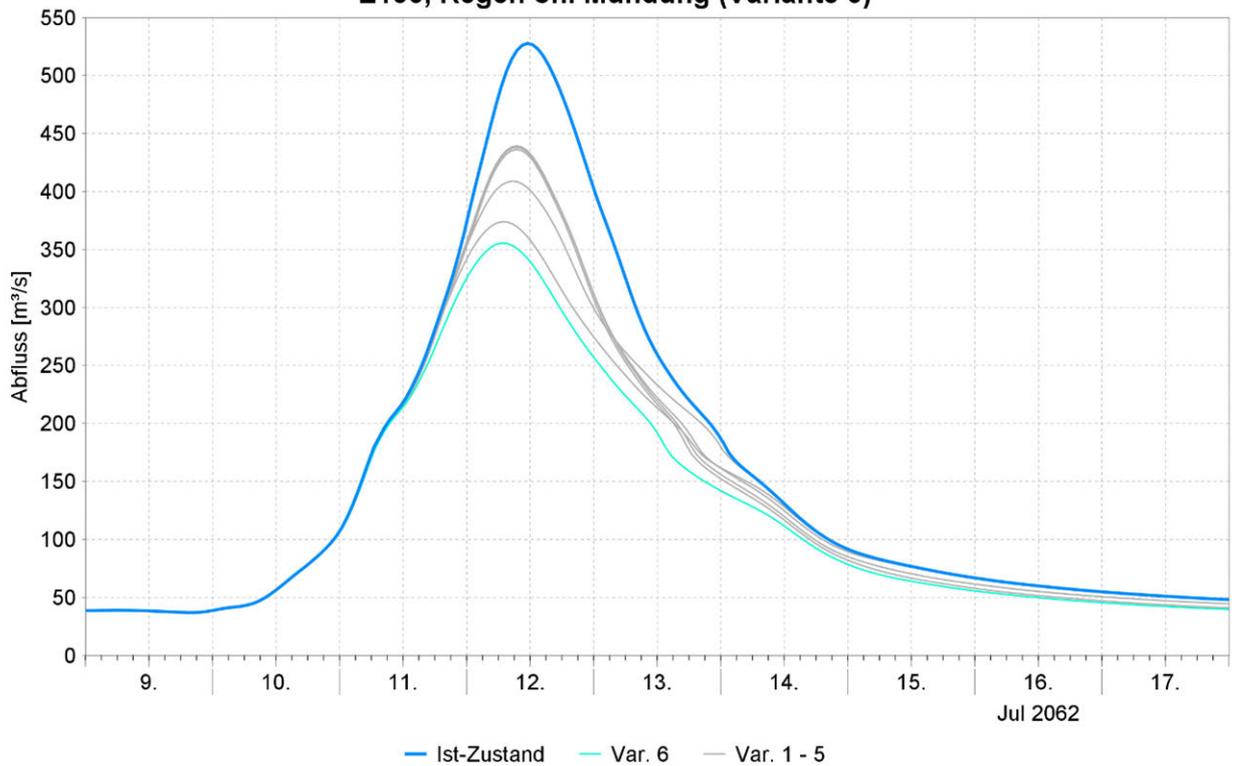


E136, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

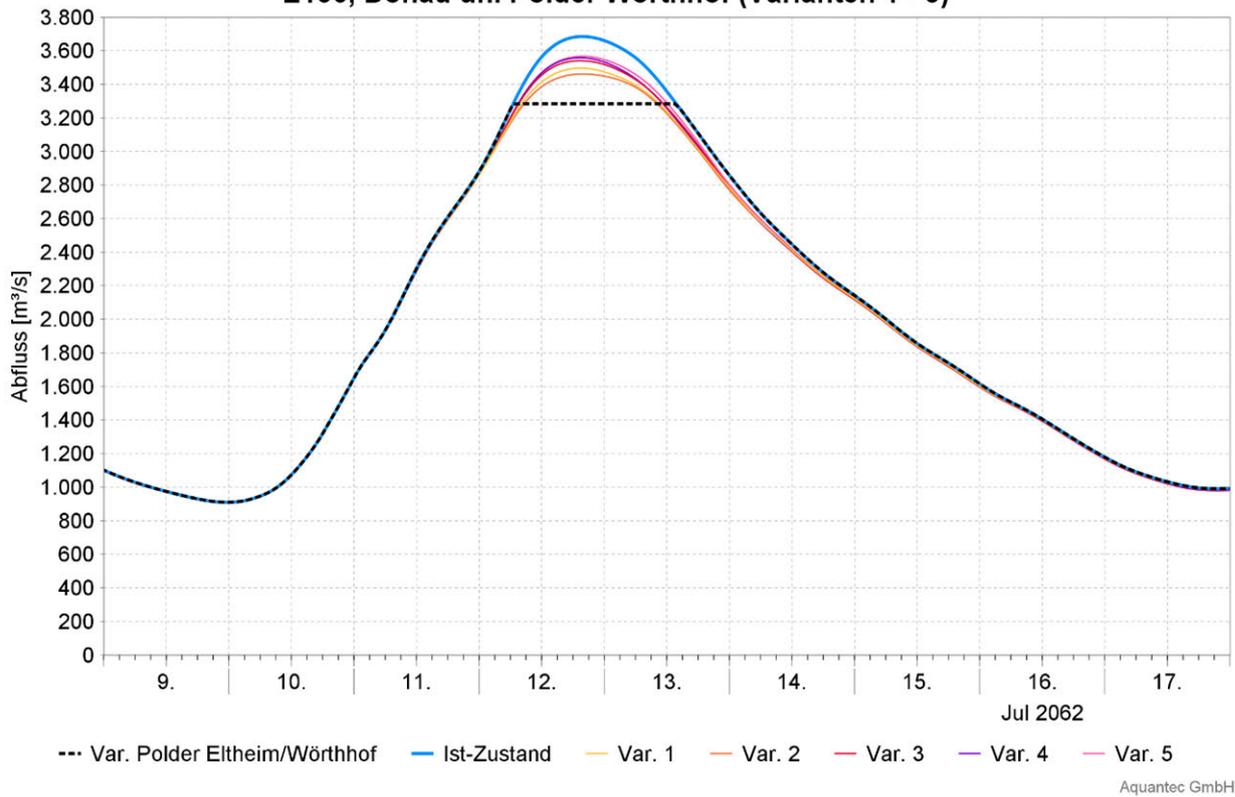
E136, Regen oh. Mündung (Variante 6)



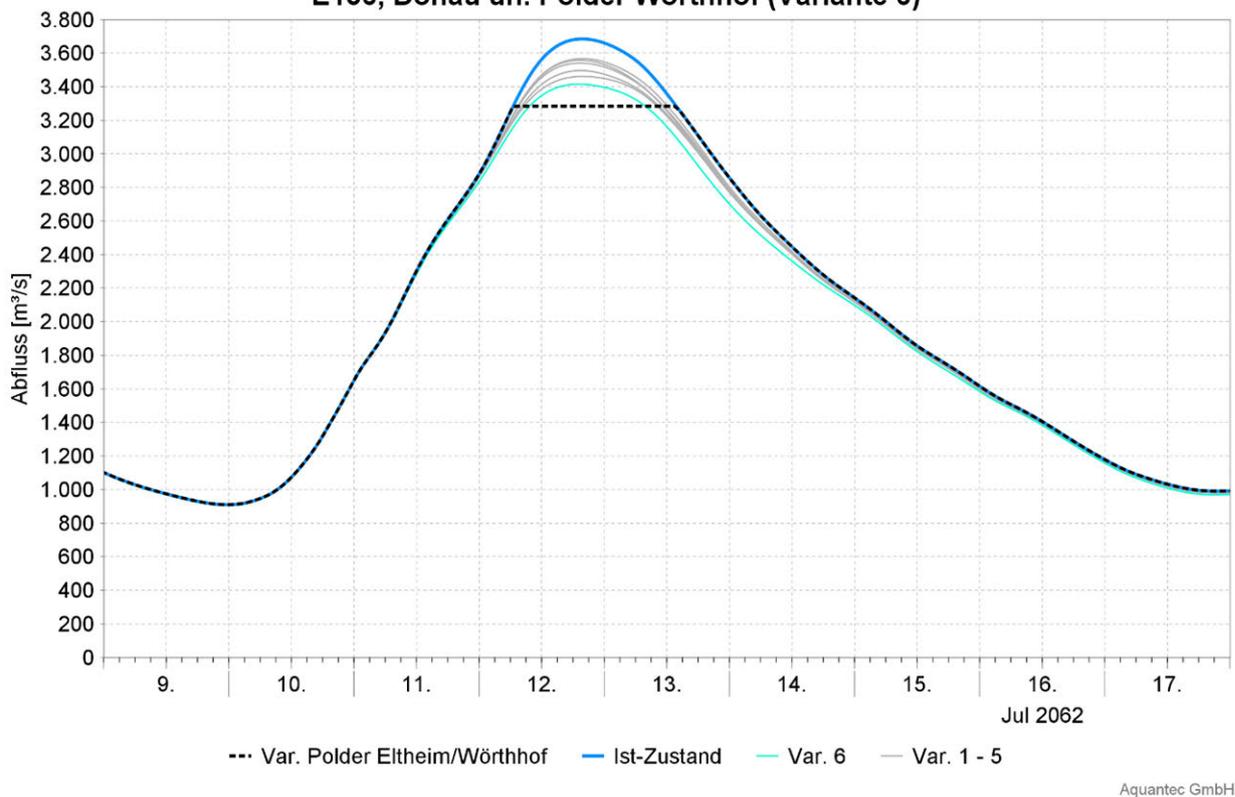
Aquantec GmbH



E136, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

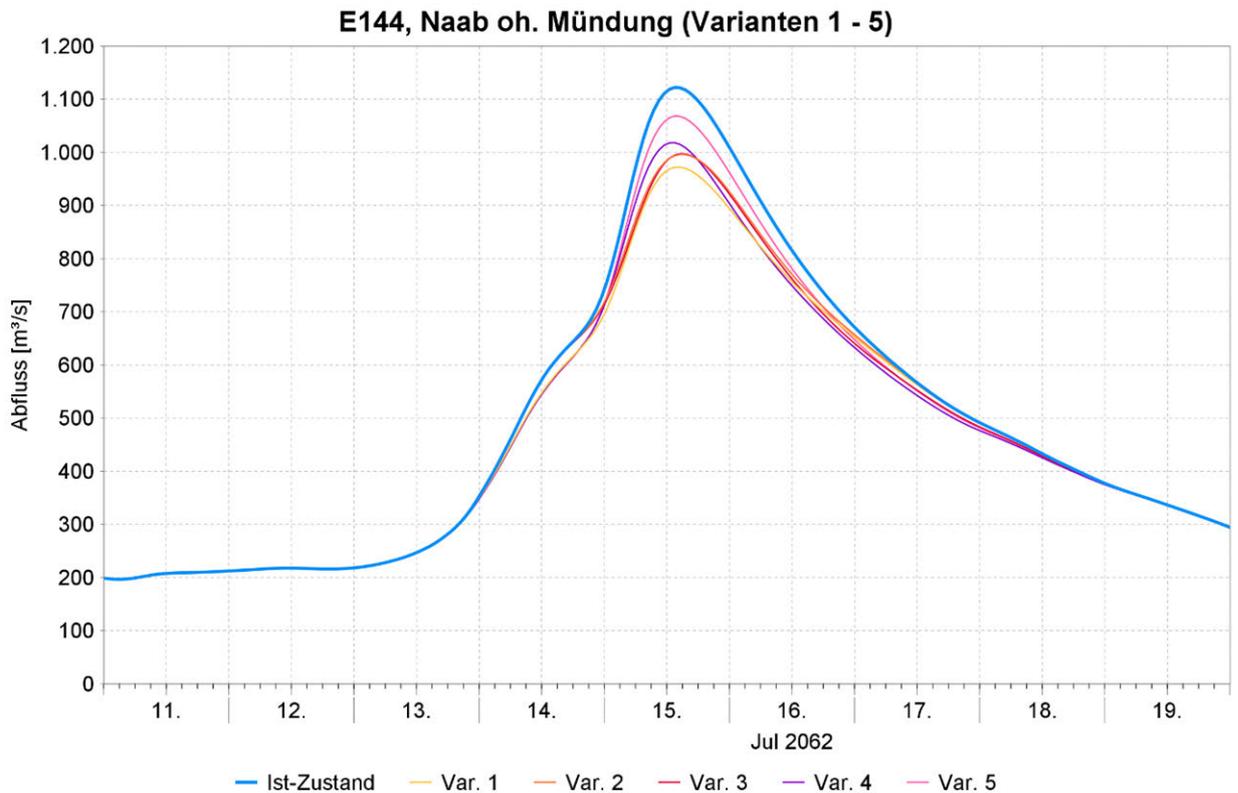


E136, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

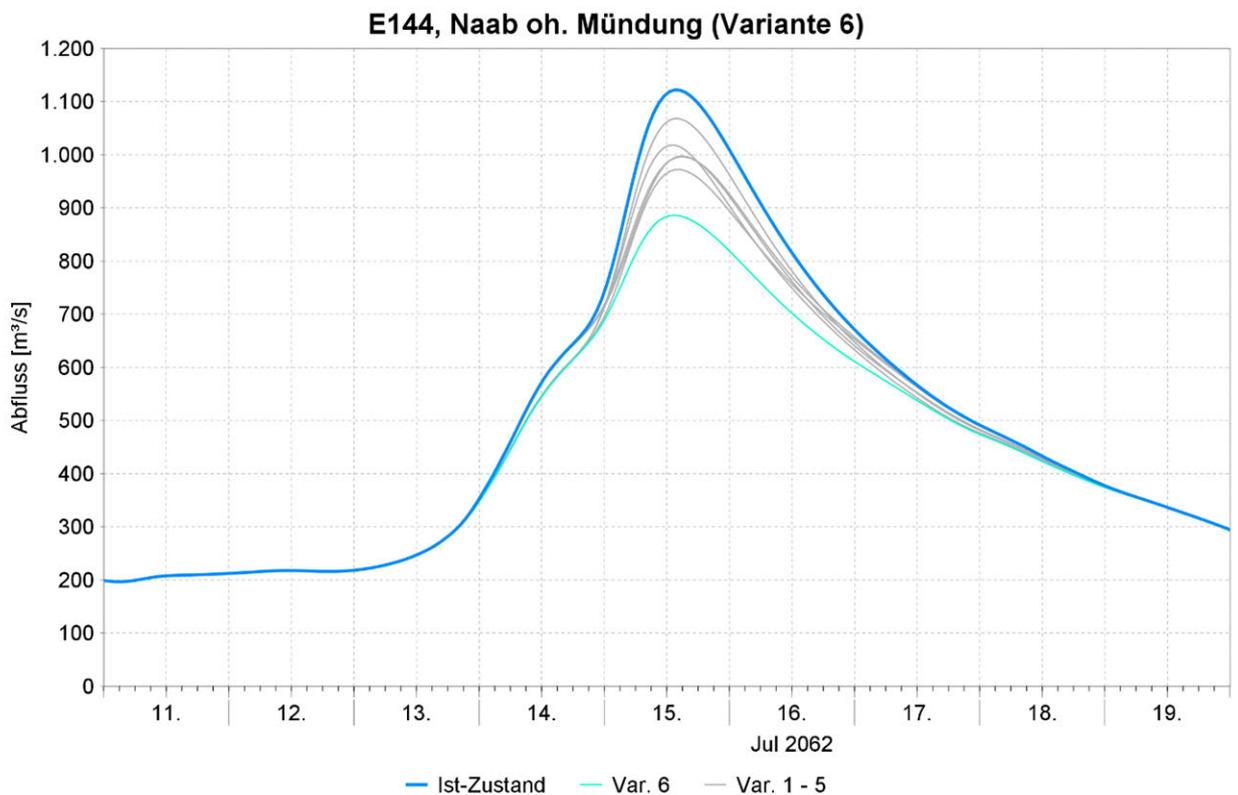




Anlage B.3.6 Ereignis E144



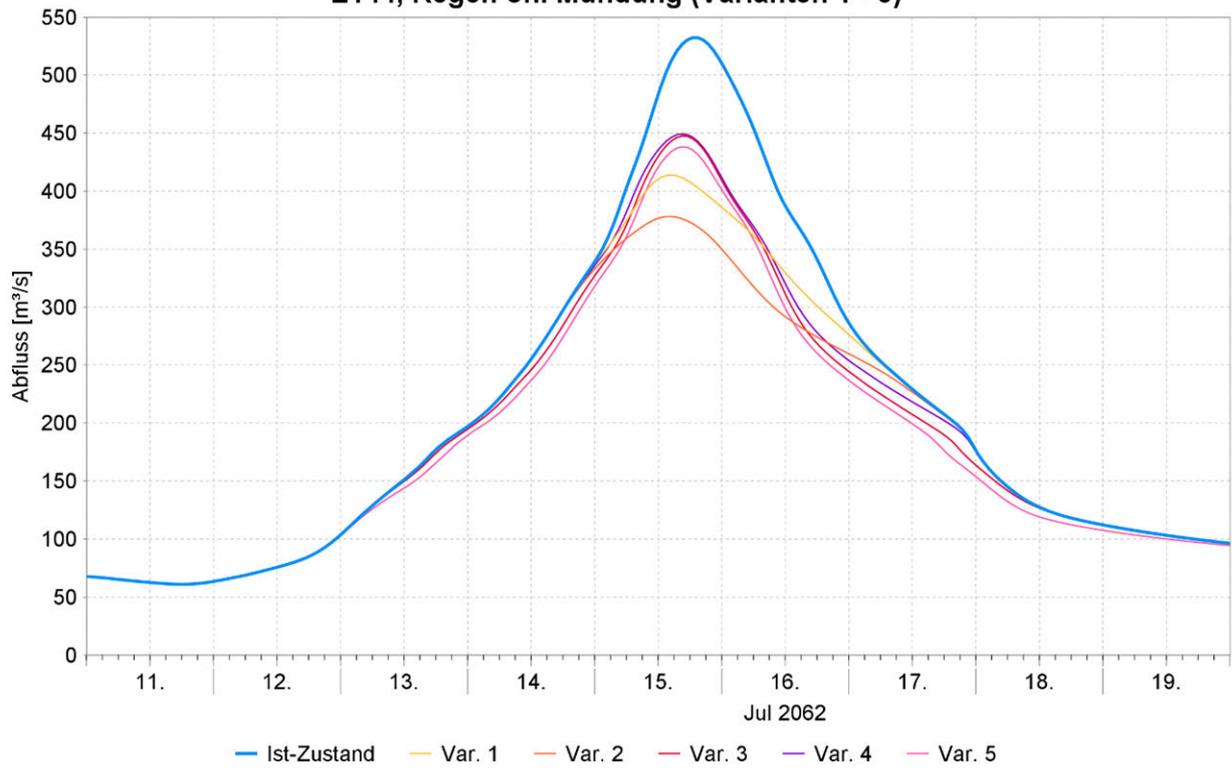
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

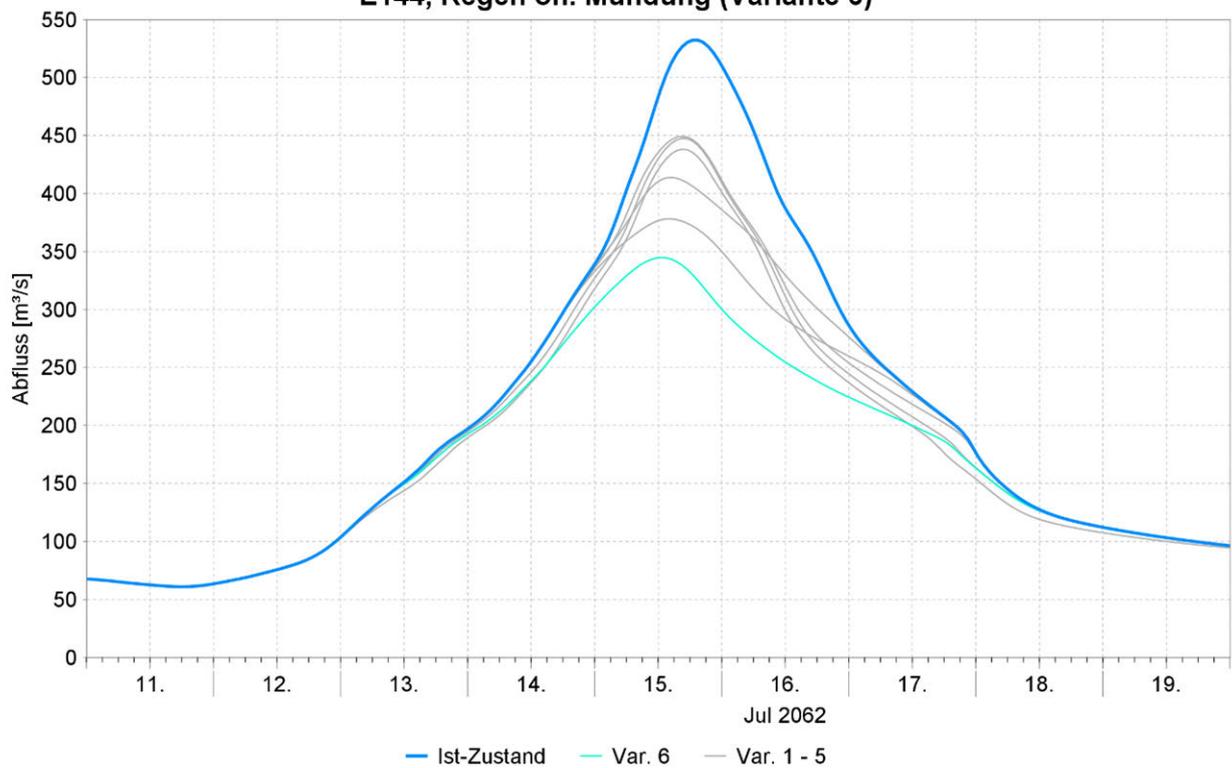


E144, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

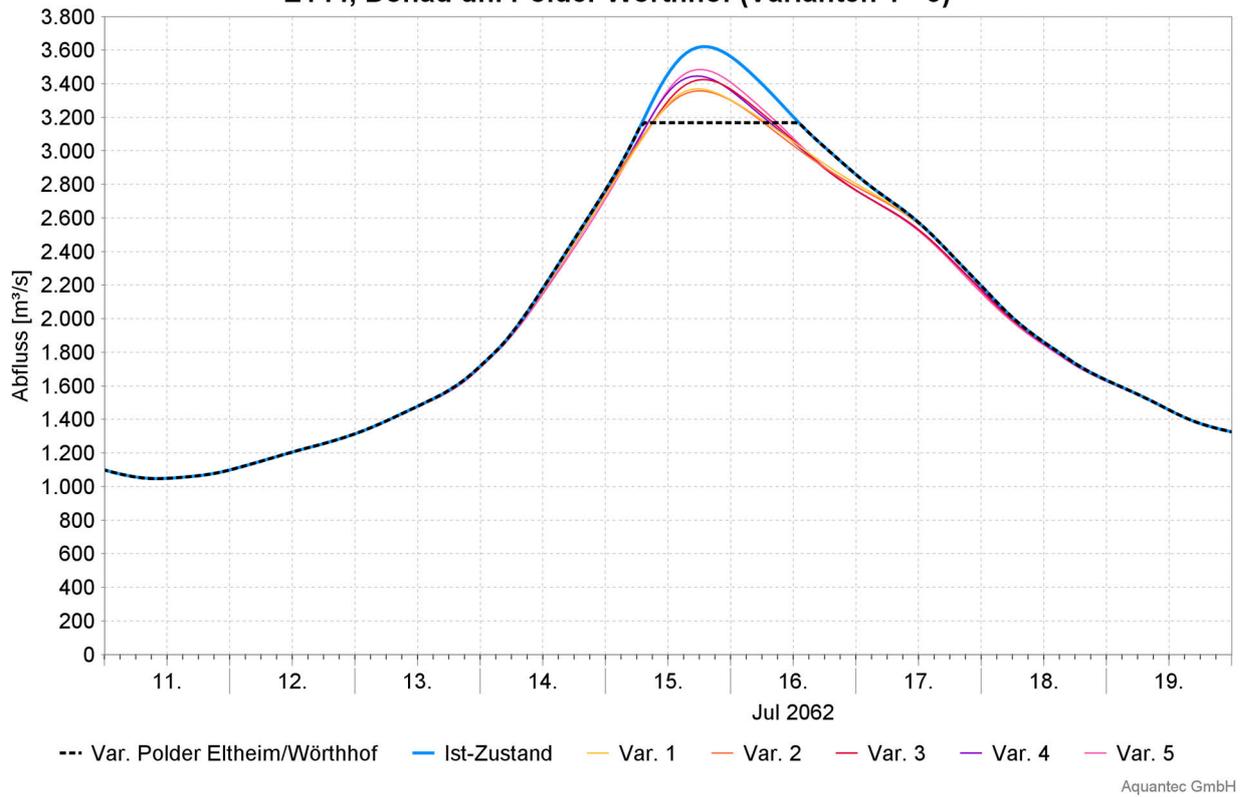
E144, Regen oh. Mündung (Variante 6)



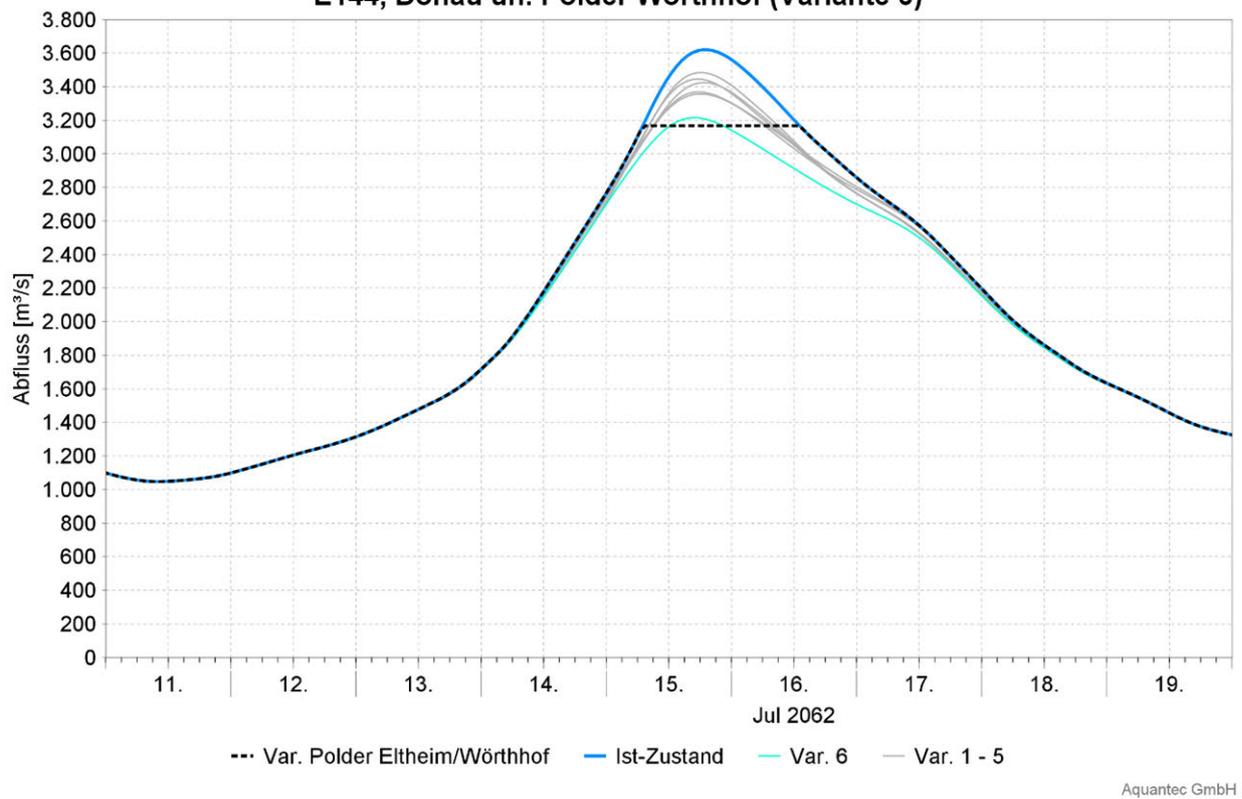
Aquantec GmbH



E144, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

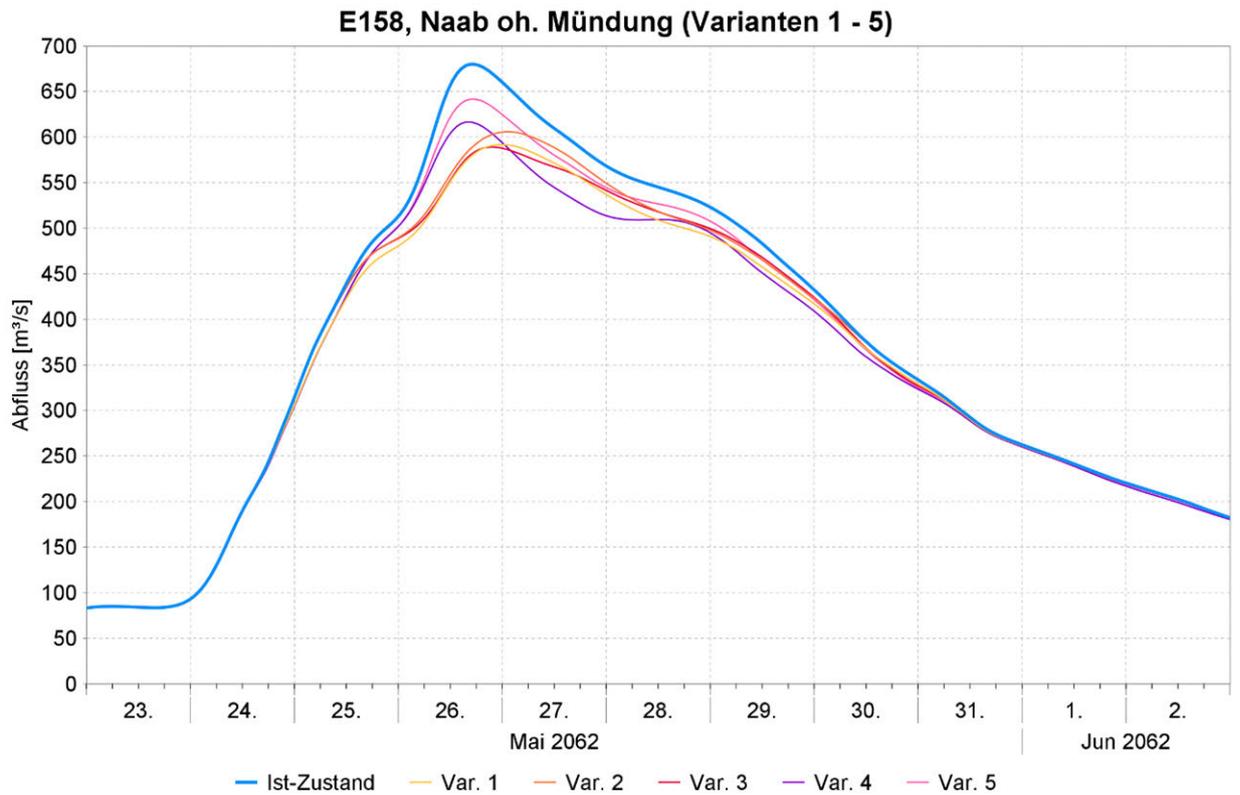


E144, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

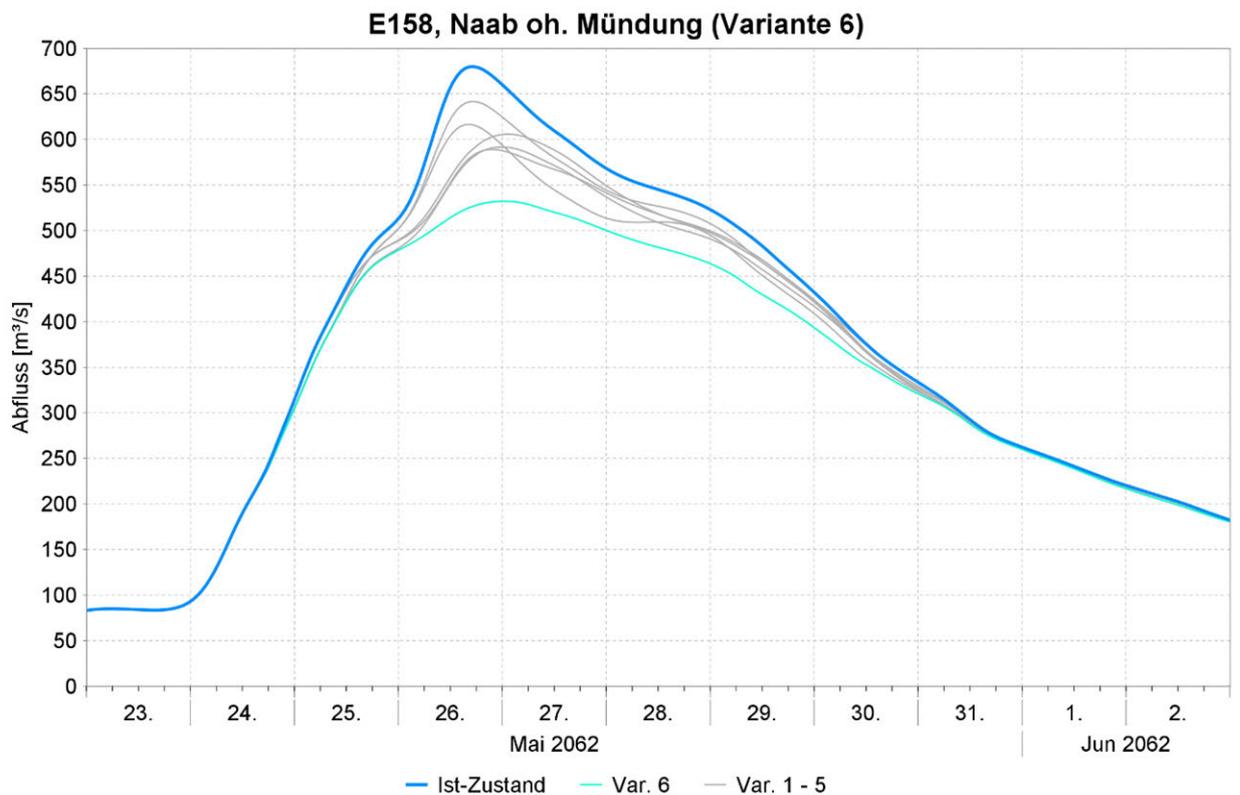




Anlage B.3.7 Ereignis E158



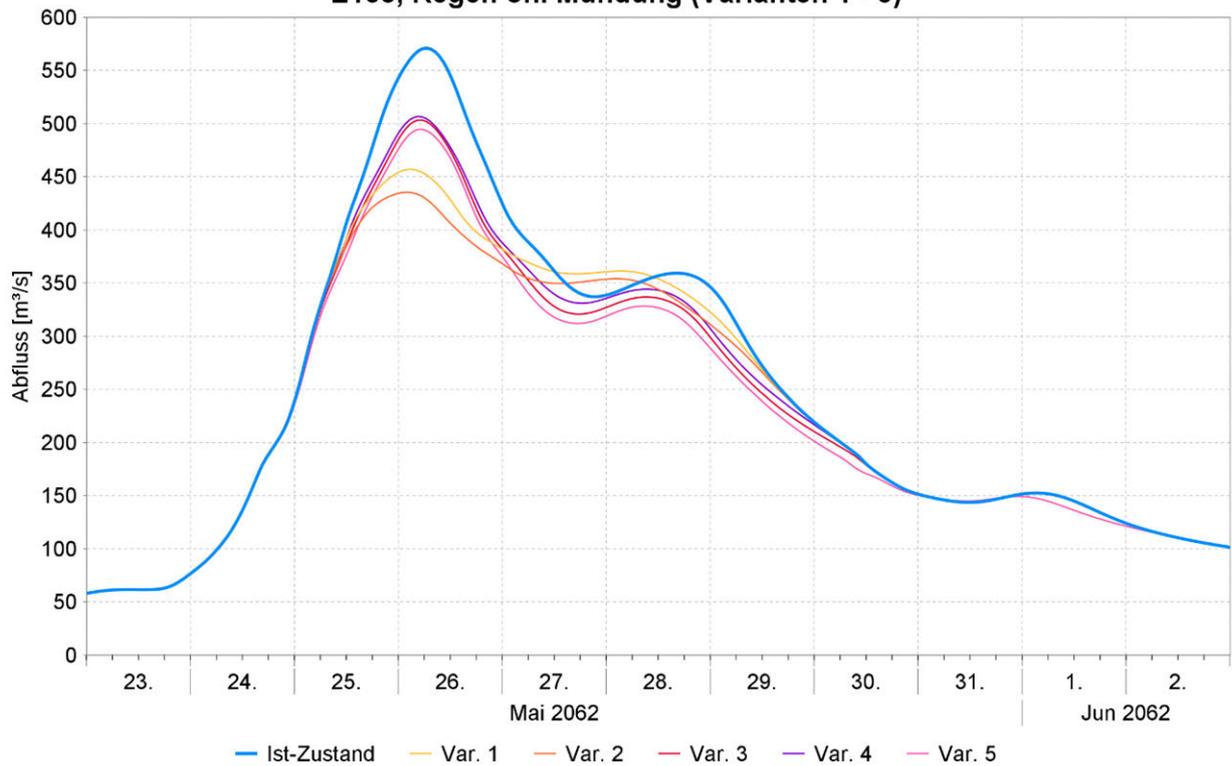
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

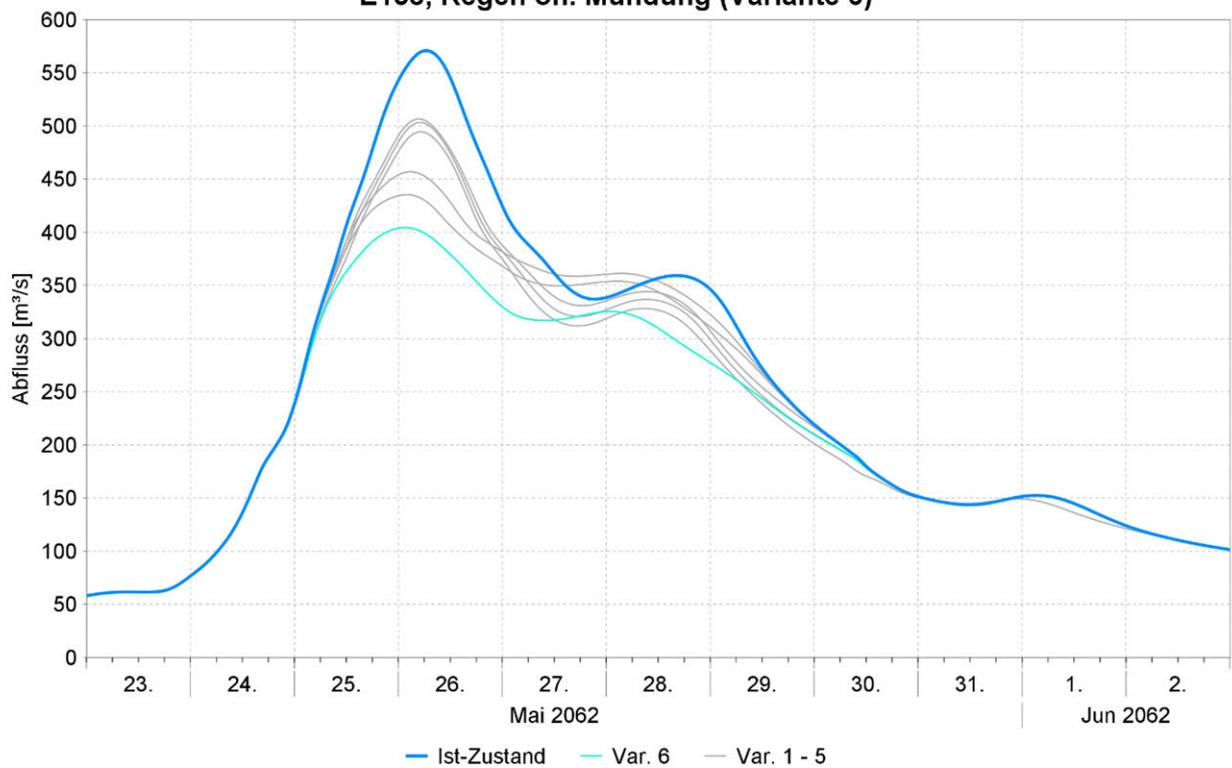


E158, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

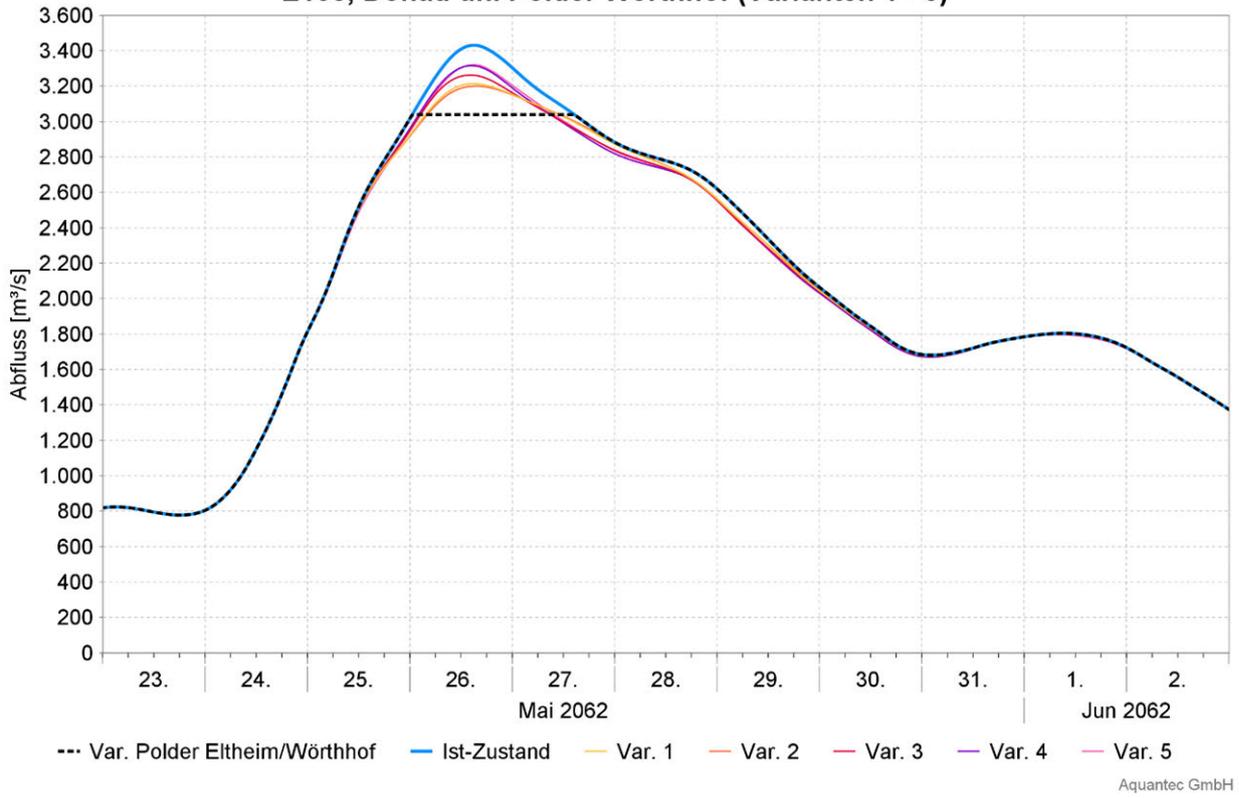
E158, Regen oh. Mündung (Variante 6)



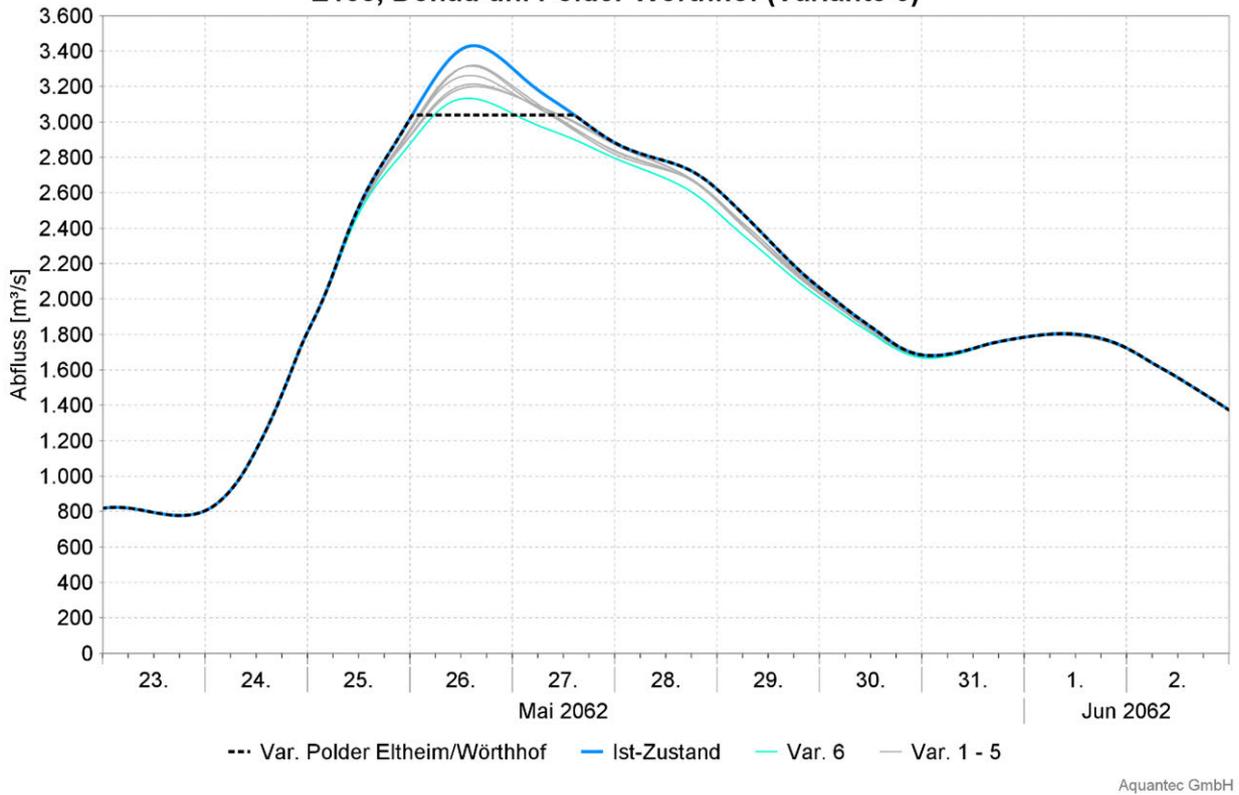
Aquantec GmbH



E158, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

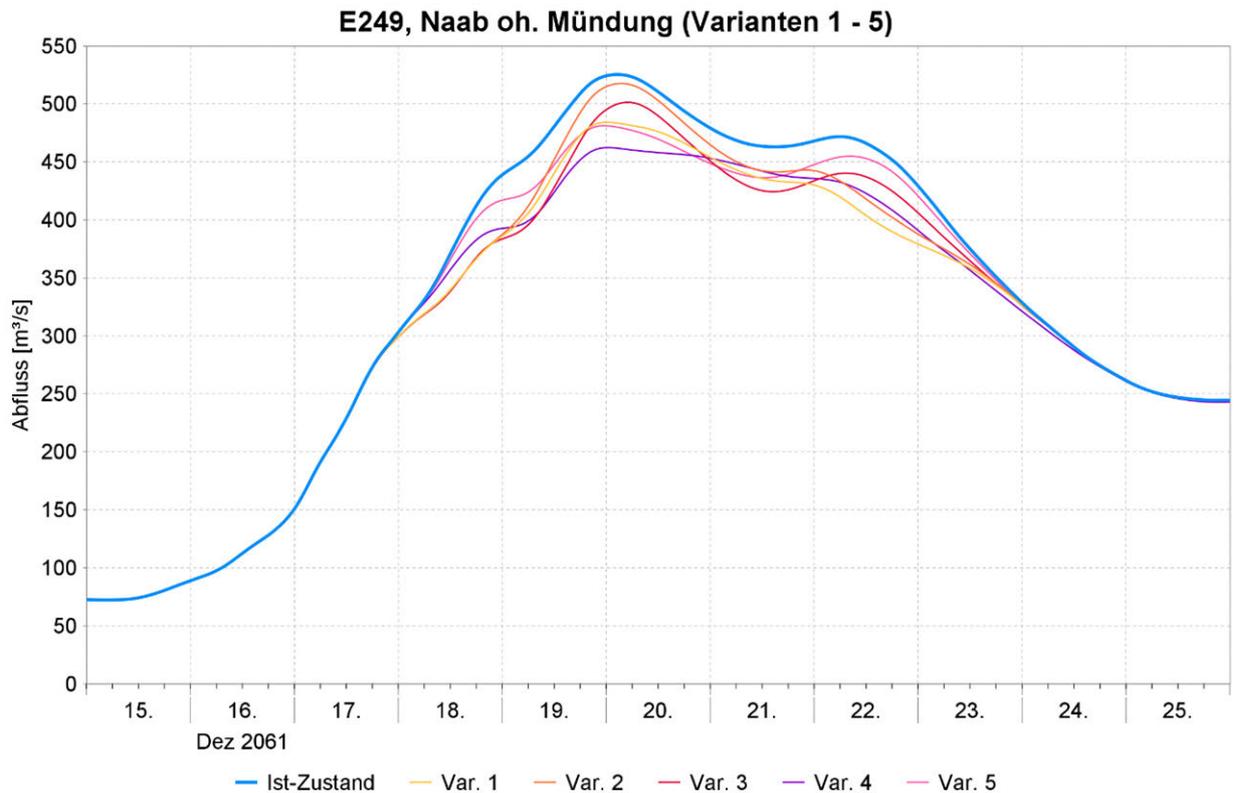


E158, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

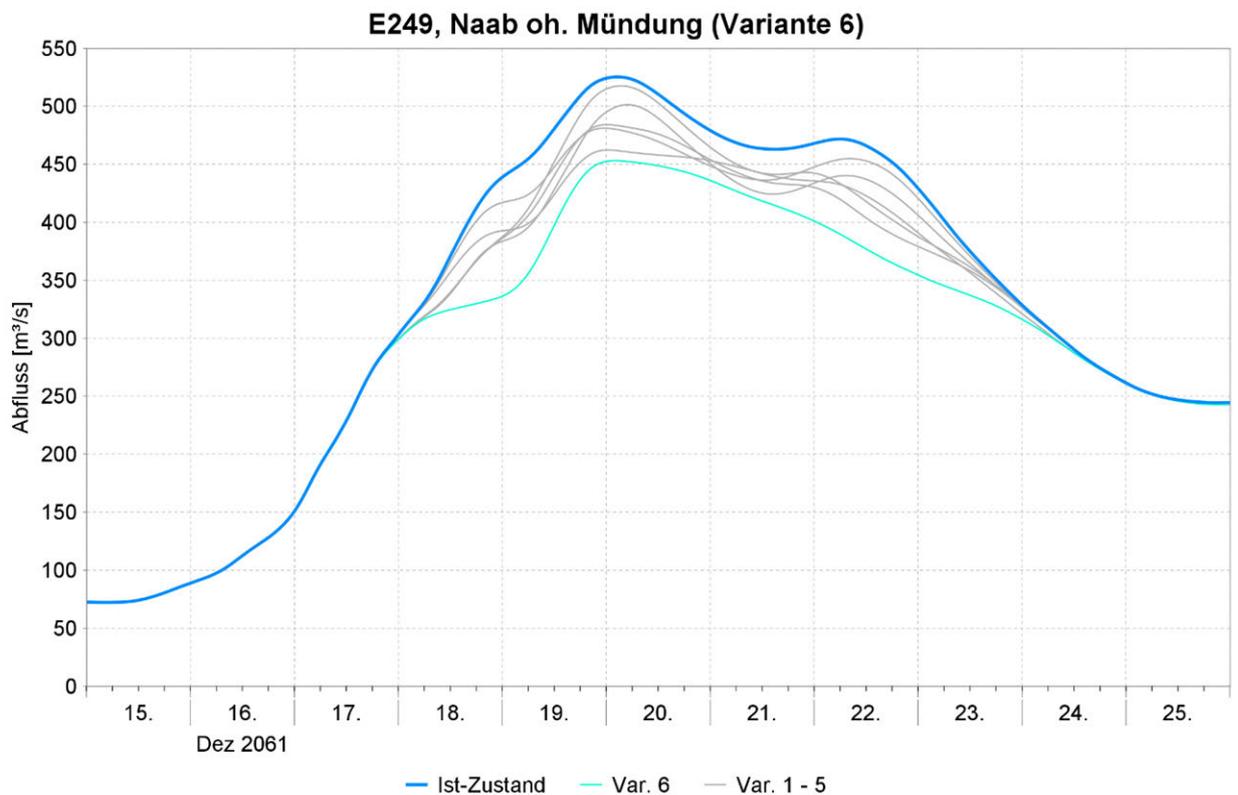




Anlage B.3.8 Ereignis E249



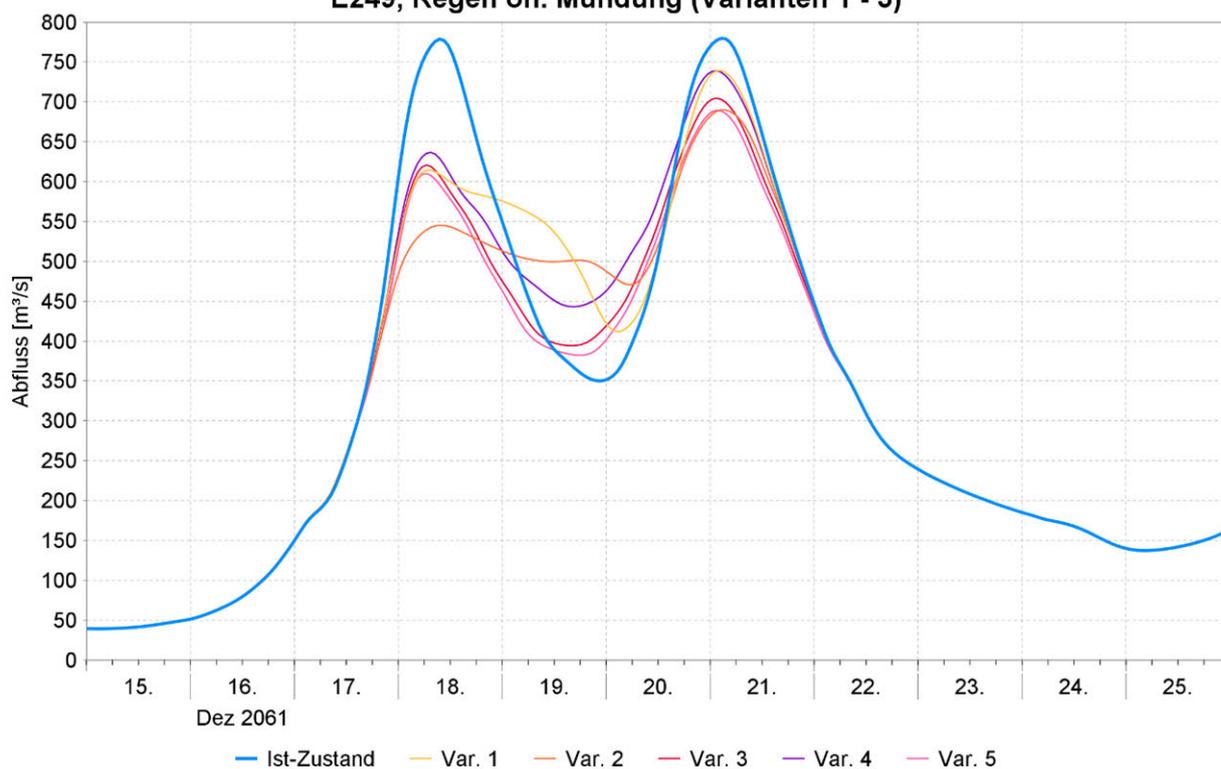
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

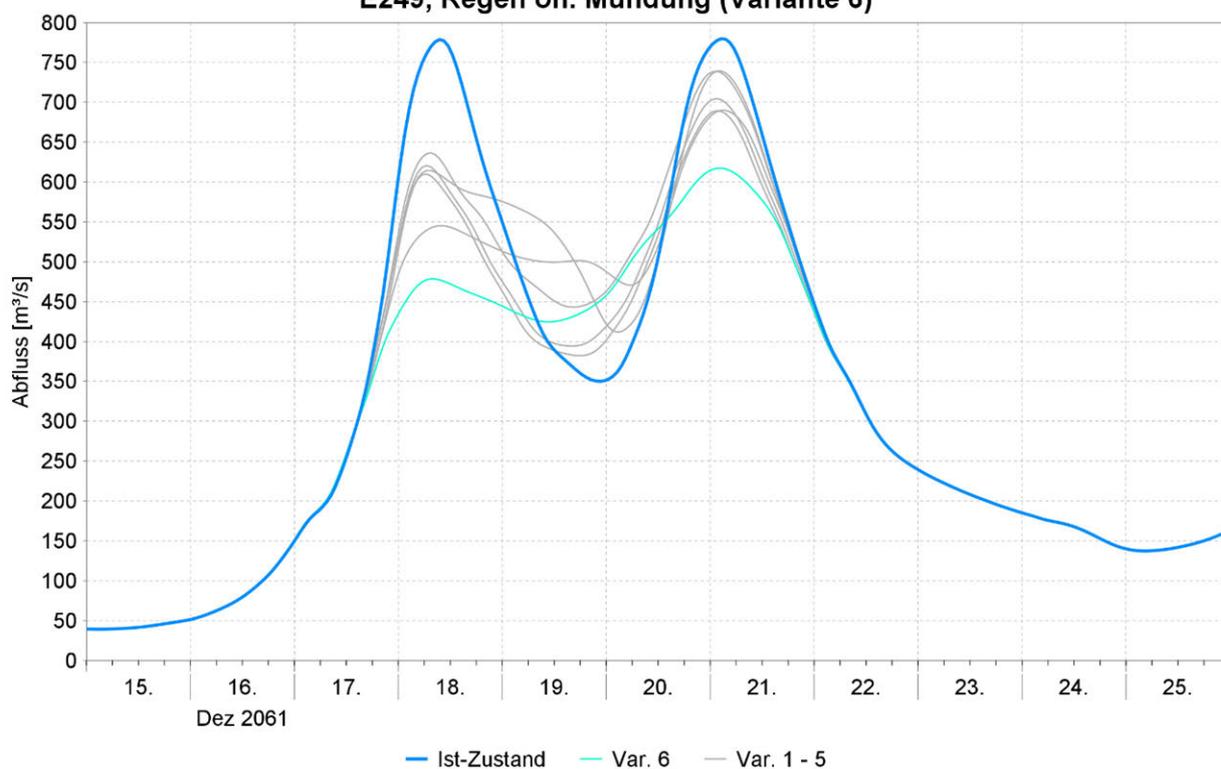


E249, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

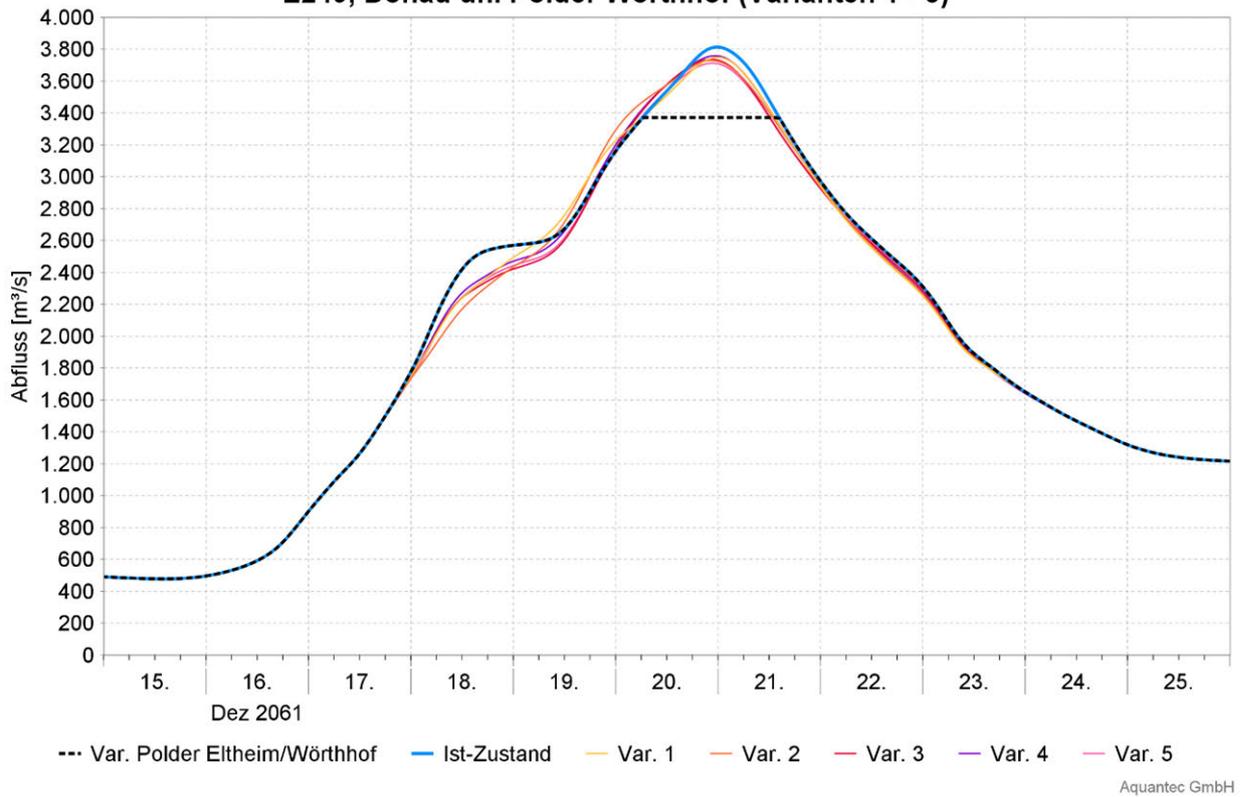
E249, Regen oh. Mündung (Variante 6)



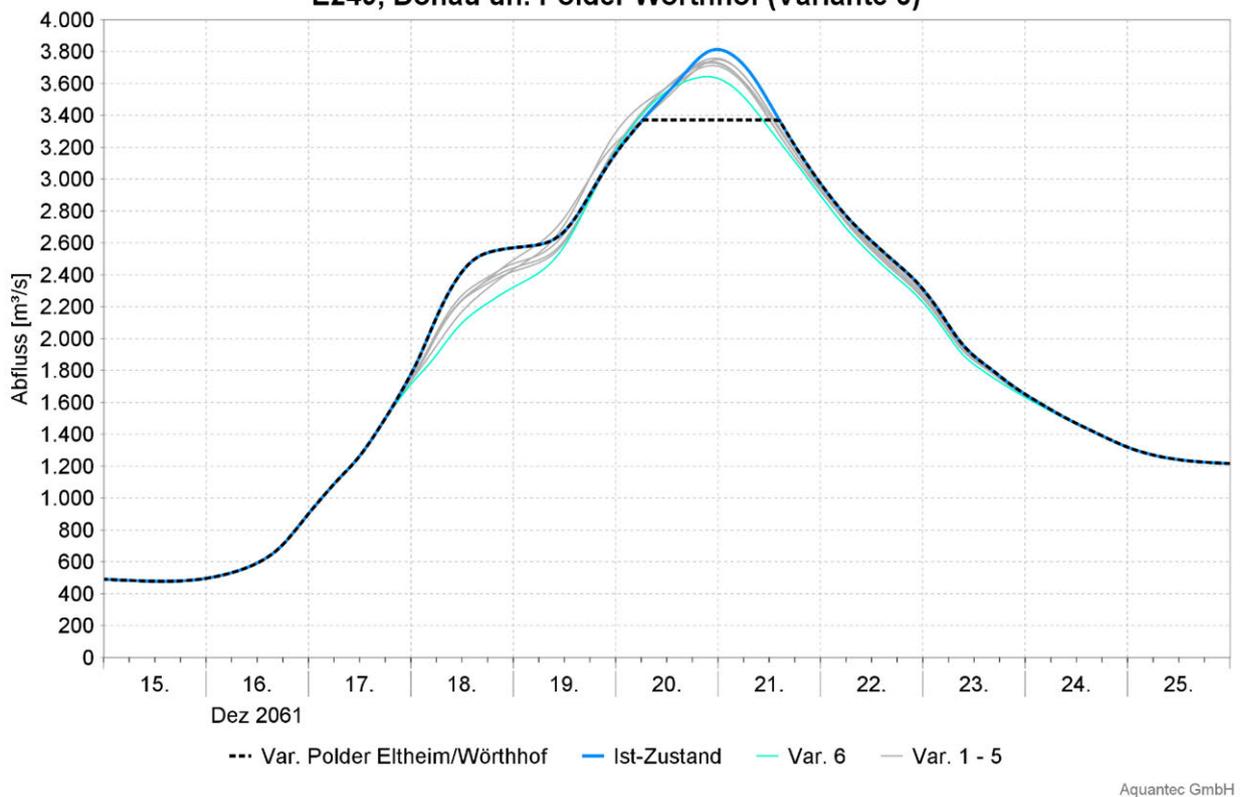
Aquantec GmbH



E249, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

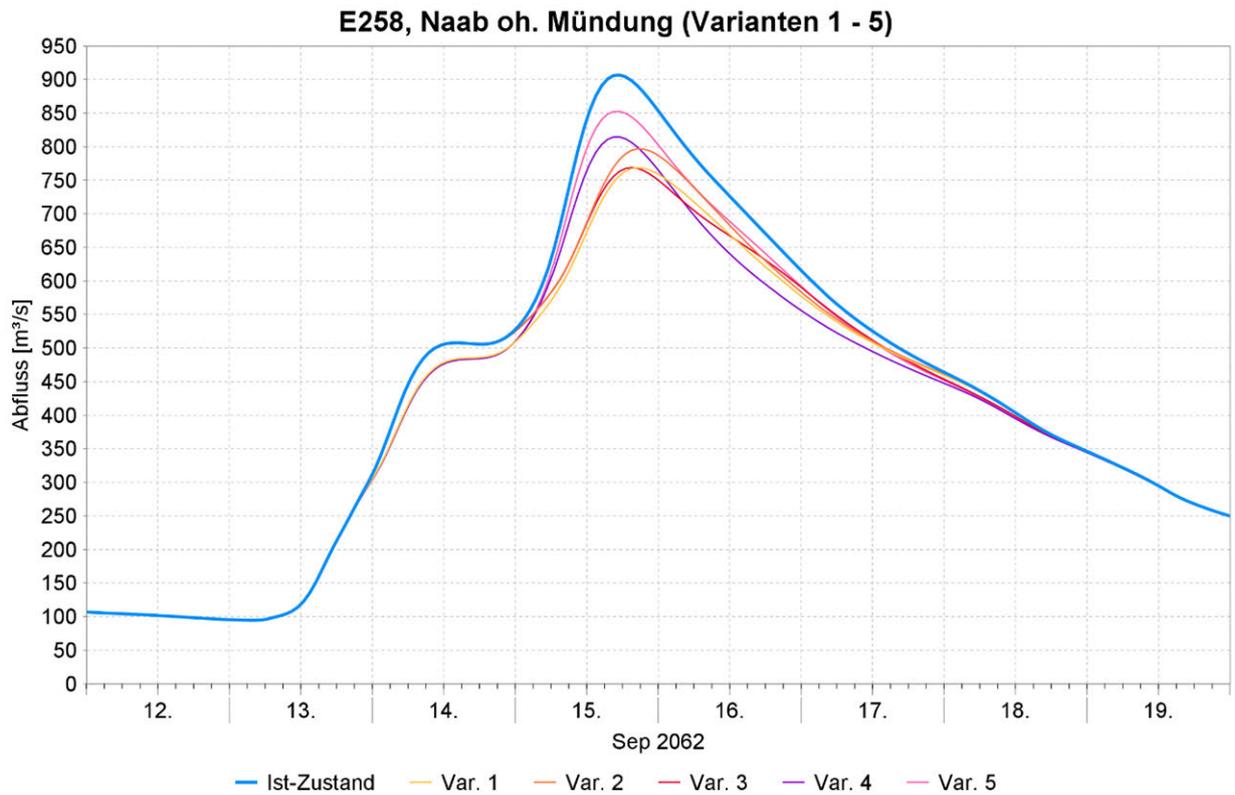


E249, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

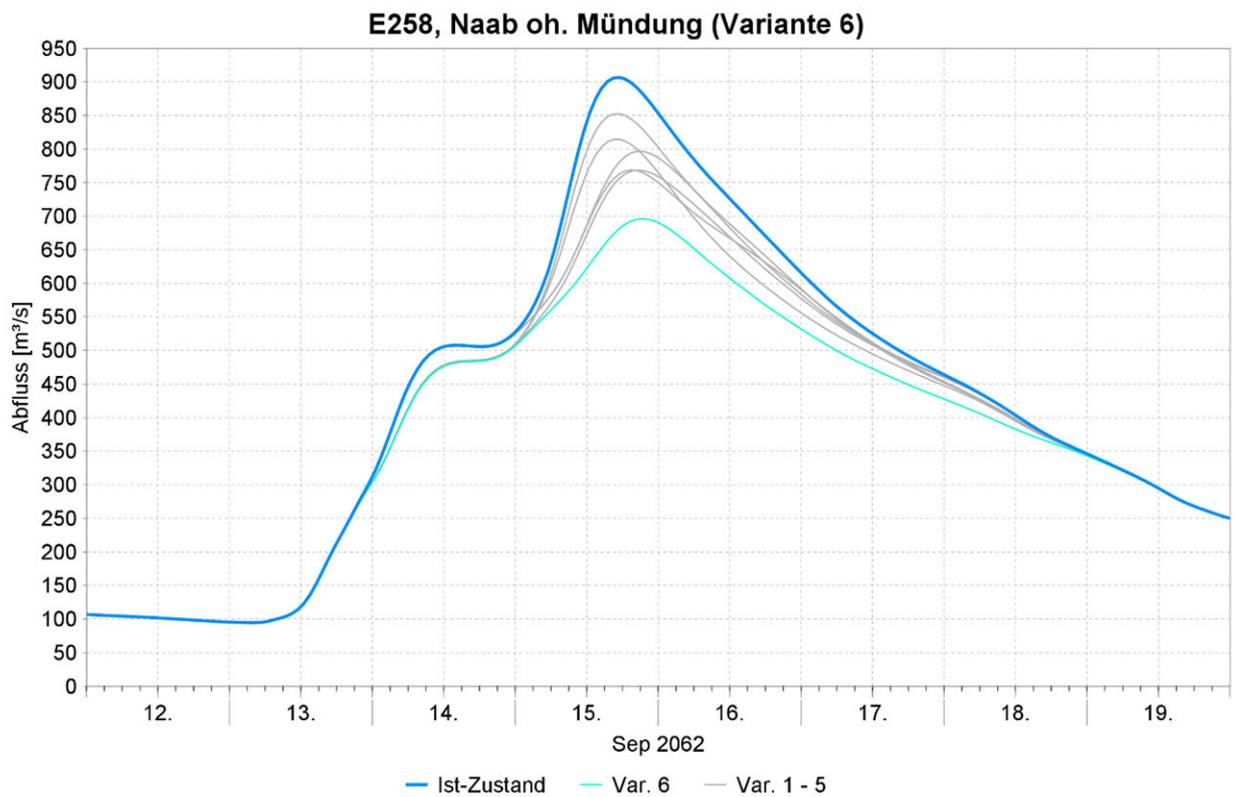




Anlage B.3.9 Ereignis E258



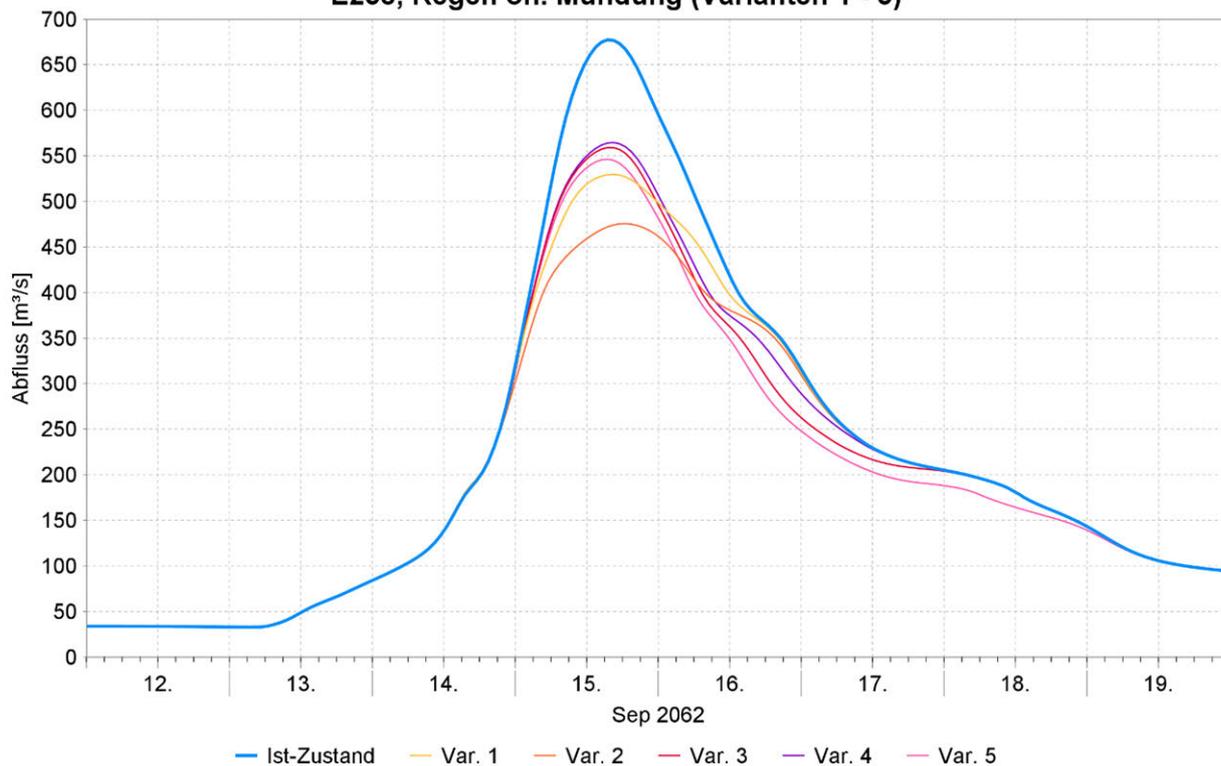
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

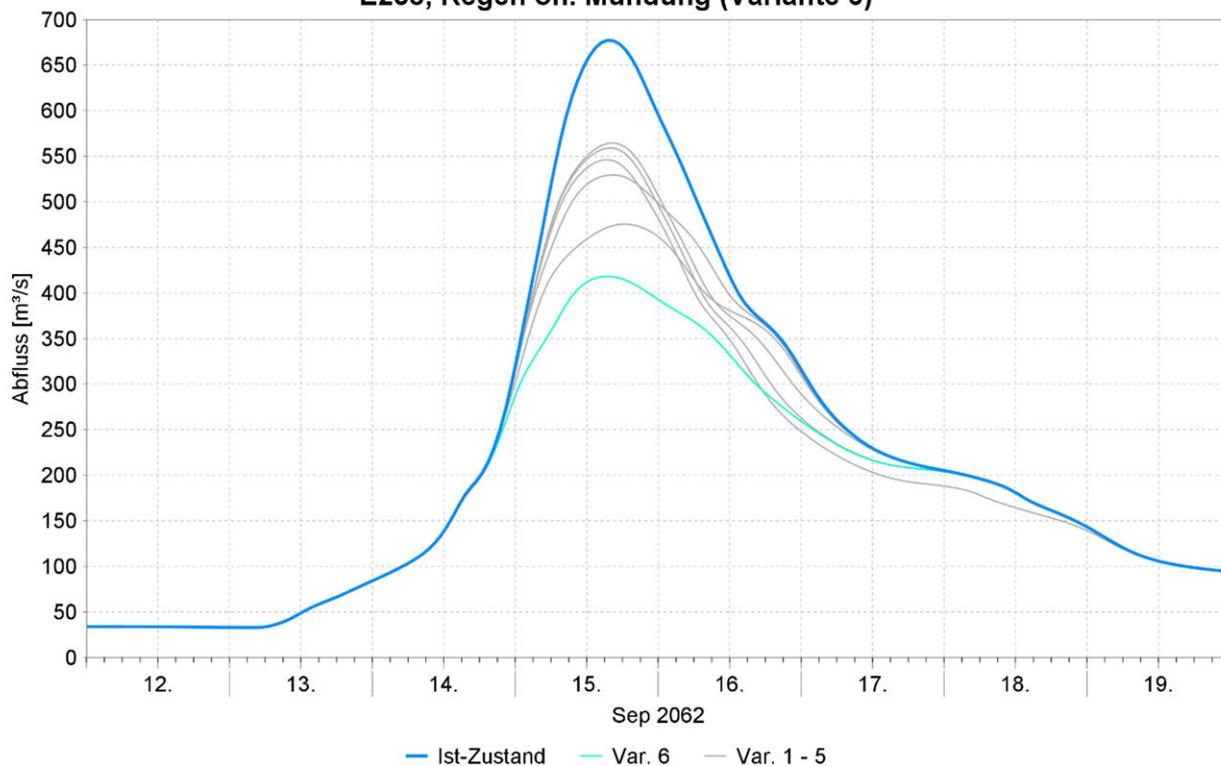


E258, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

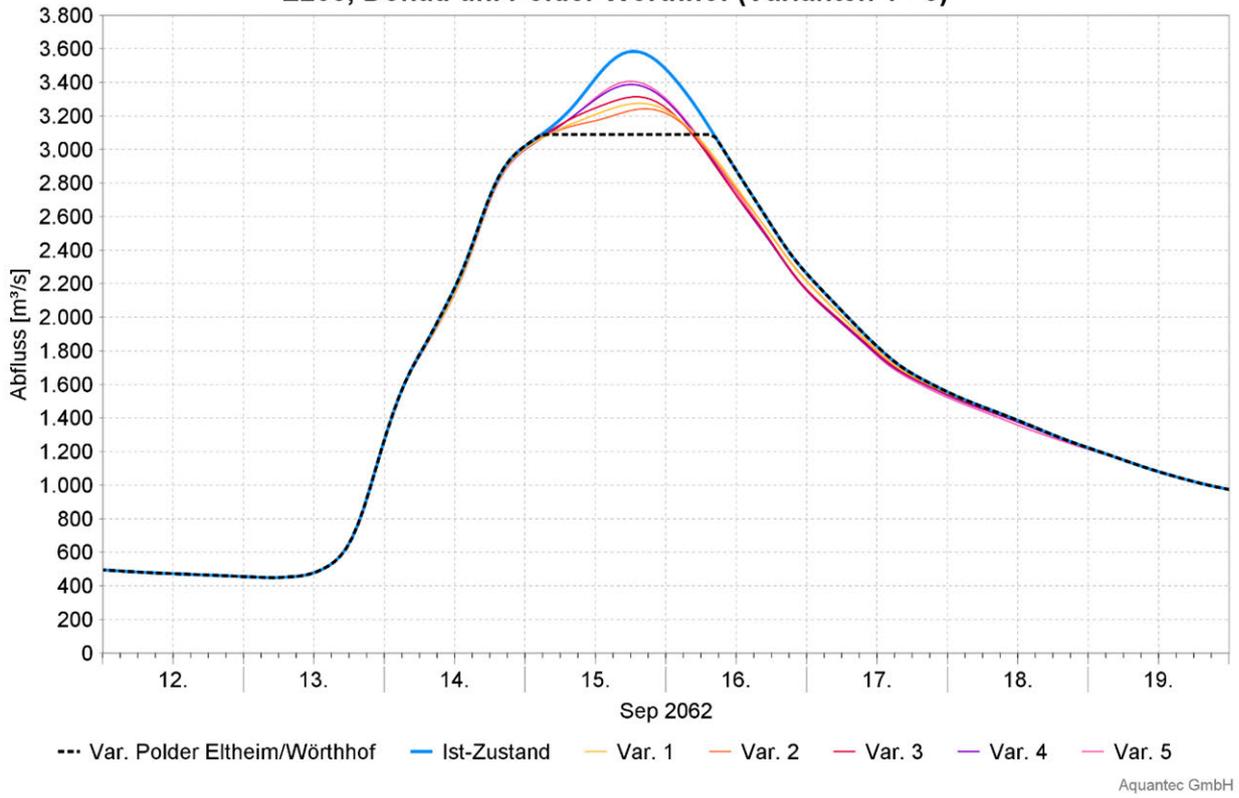
E258, Regen oh. Mündung (Variante 6)



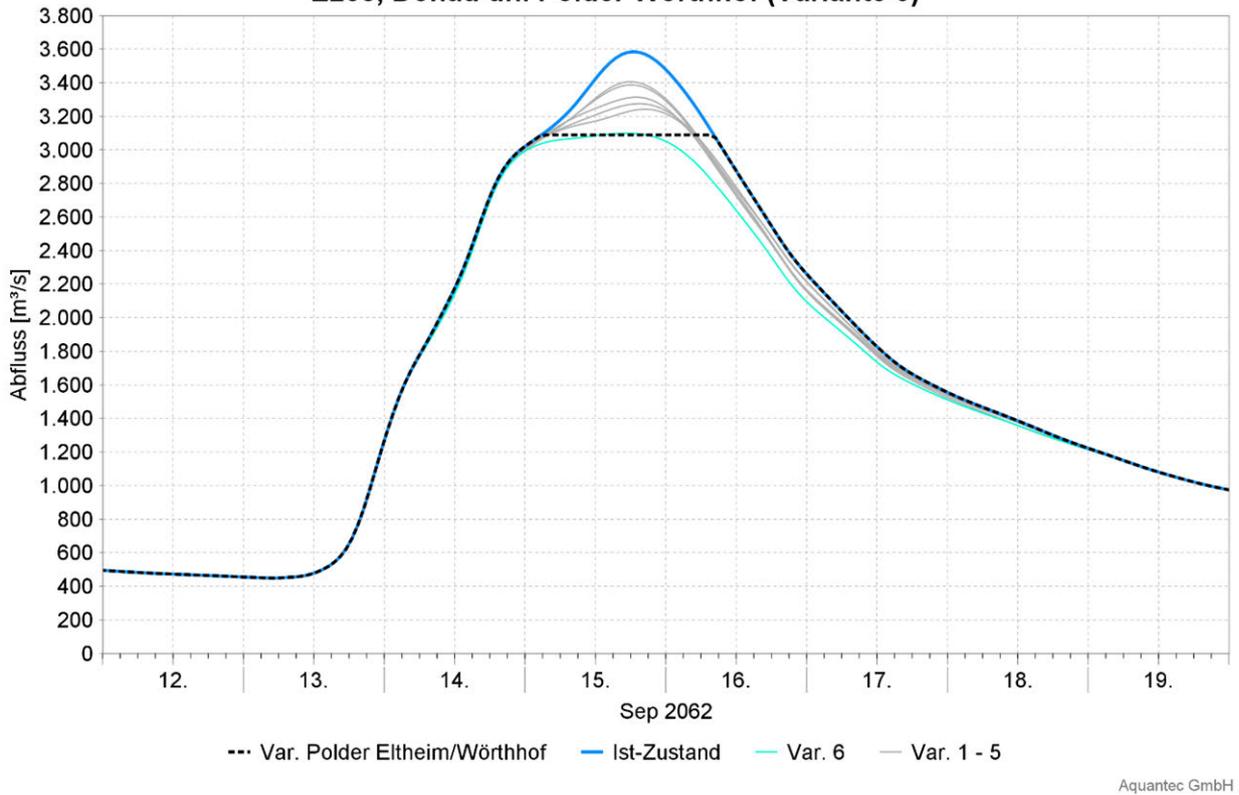
Aquantec GmbH



E258, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)

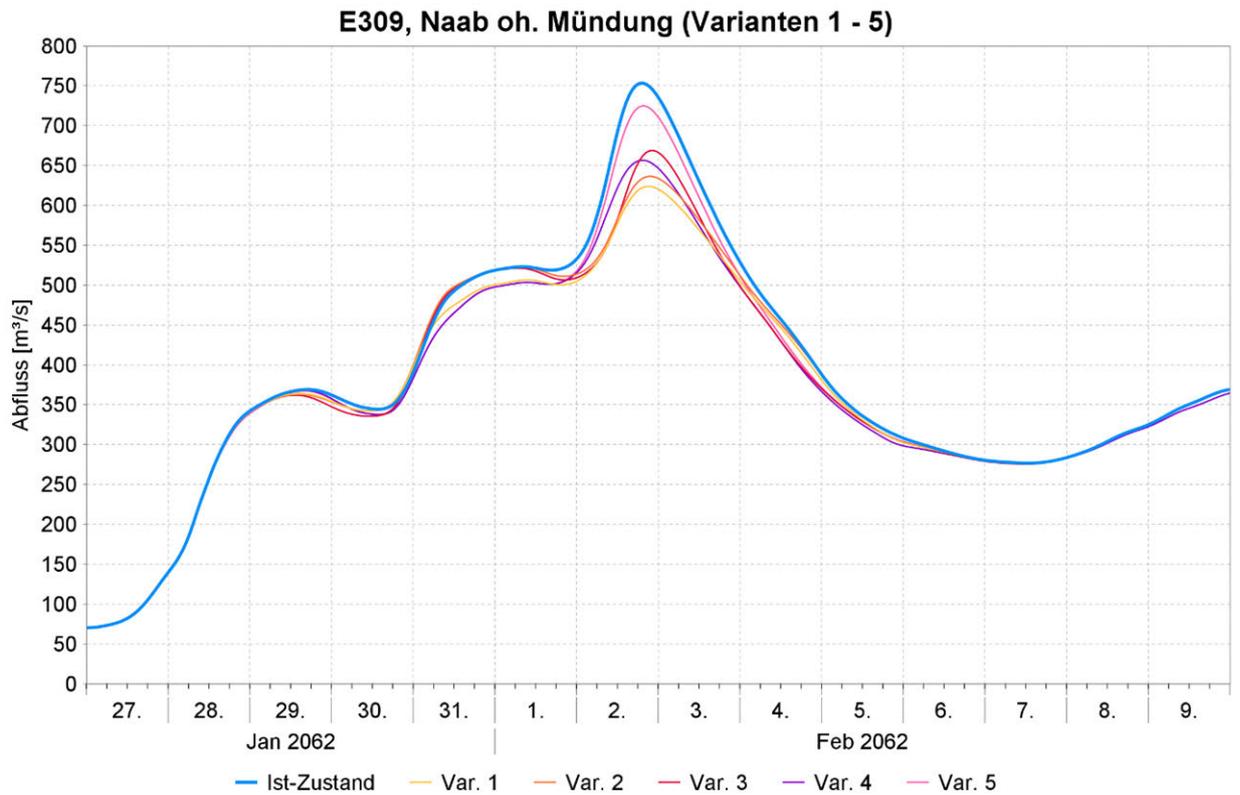


E258, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

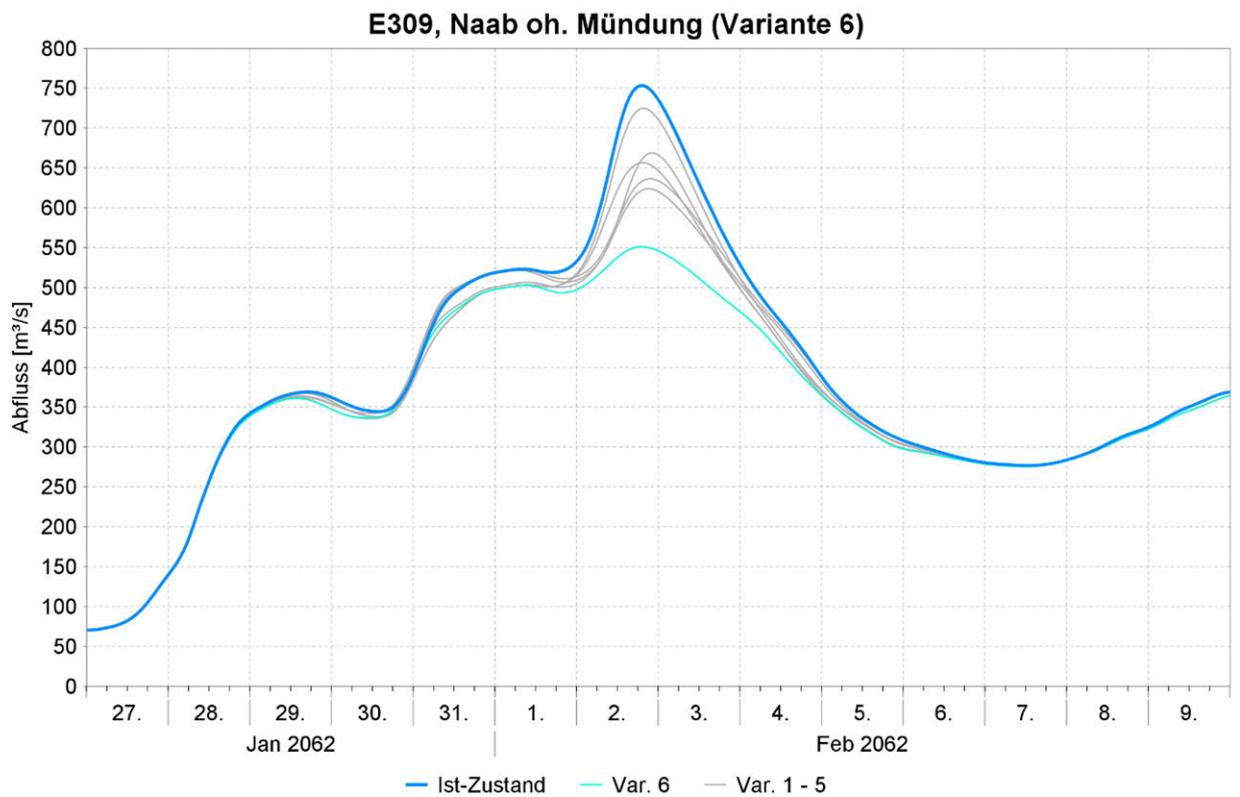




Anlage B.3.10 Ereignis E309



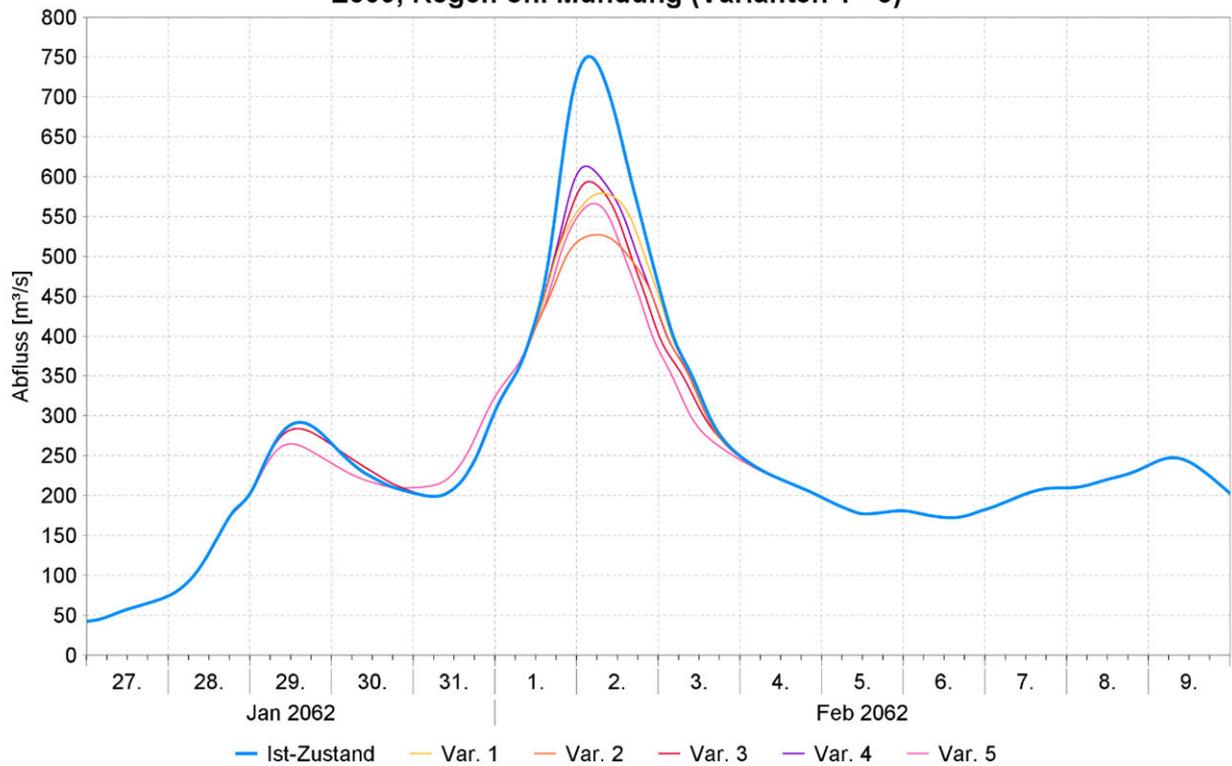
Aquantec GmbH



Aquantec GmbH

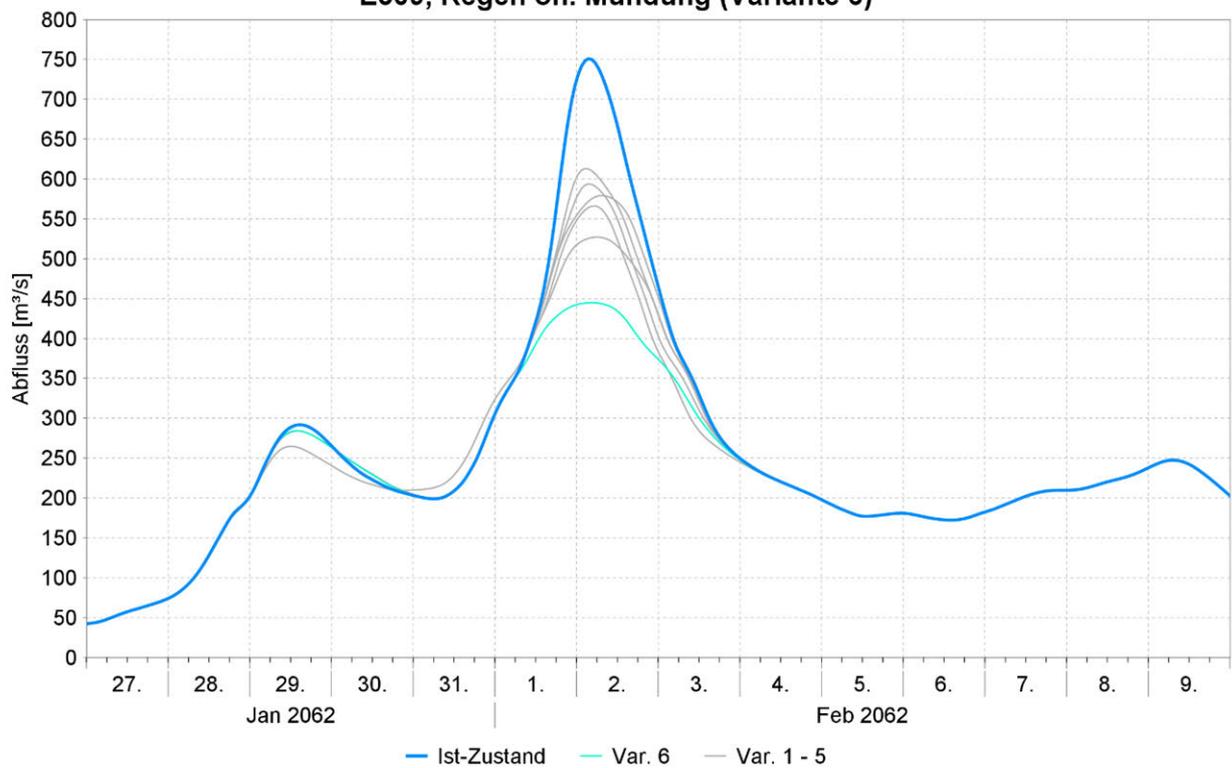


E309, Regen oh. Mündung (Varianten 1 - 5)



Aquantec GmbH

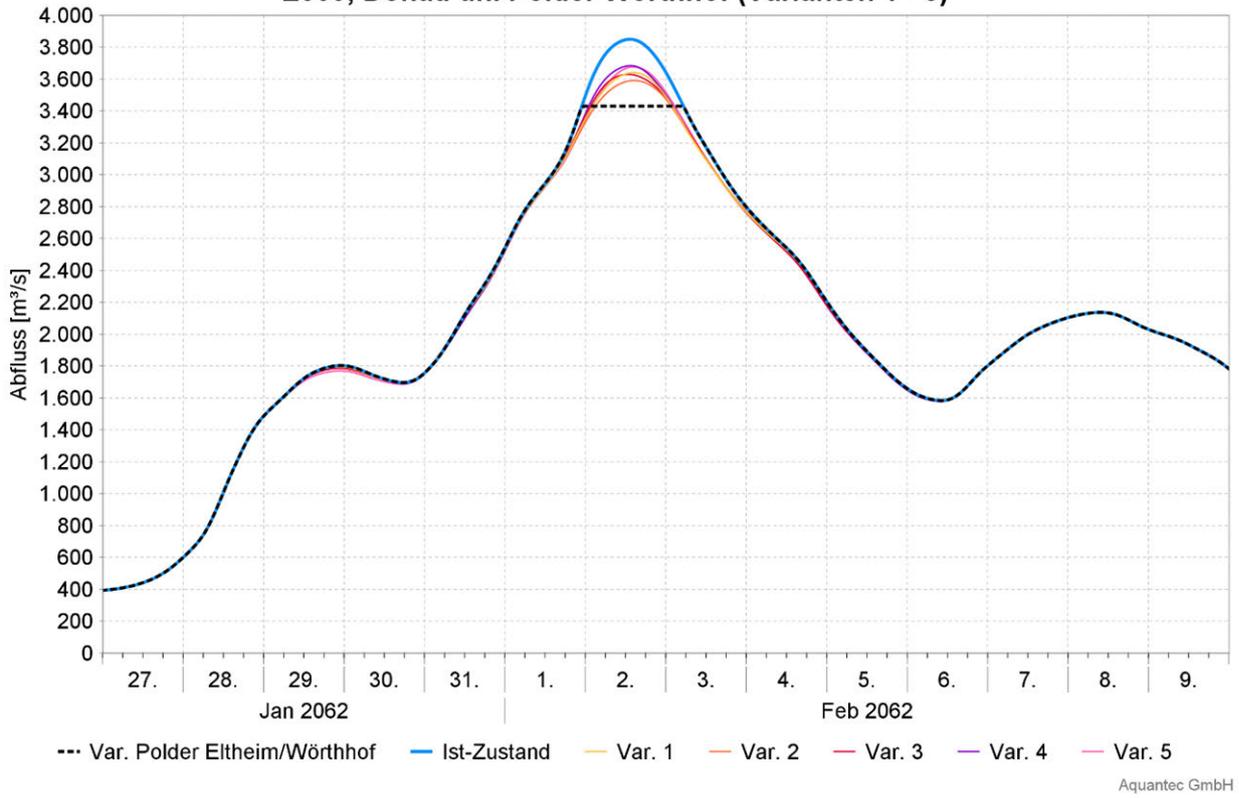
E309, Regen oh. Mündung (Variante 6)



Aquantec GmbH



E309, Donau uh. Polder Wörthhof (Varianten 1 - 5)



E309, Donau uh. Polder Wörthhof (Variante 6)

