



Vertiefte Wirkungsanalyse
zu:
„Verzögerung und Abschätzung von
Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau“

Schlussbericht

-

Teil II

München, im Juli 2017

Stefan Giehl M. Sc.
(Bearbeiter)

Dorothea Pörtge M. Sc.
(Bearbeiter)

Riccardo Scandroglio M. Sc.
(Bearbeiter)

Prof. Dr.-Ing. Peter Rutschmann
(Projektleiter)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
1.1	Untersuchungen zur optimierten Staustufenbewirtschaftung	4
1.2	Erweiterung der Wehrsteuerung in Hydro_As-2D.....	5
1.2.1	Neue Randbedingungen zur Umsetzung der Staustufensteuerung	5
1.2.2	Testrechnungen der Erweiterung	6
1.3	Gesetzte Randbedingungen an den Staustufen	9
1.3.1	Steuerungsvarianten.....	9
1.3.2	Beginn der Vorabsenkung im Variantenvergleich.....	11
1.3.3	Numerische Ergebnisoptimierung	16
2	Berechnungsergebnisse	18
2.1	Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ ₁₀₀ – Vergleich der StV1 und StV2.....	18
2.1.1	Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV2 (Szenario HQ ₁₀₀)	18
2.1.2	Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV2 (Szenario HQ ₁₀₀)	19
2.1.3	Abschnitt Kelheim bis Straubing StV1 – StV2 (Szenario HQ ₁₀₀)	21
2.2	Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ ₁₀₀ – Vergleich der StV1 und StV3.....	22
2.2.1	Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV3 (Szenario HQ ₁₀₀)	22
2.2.2	Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV3 (Szenario HQ ₁₀₀)	23
2.3	Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ ₁₀₀ +15% – Vergleich der StV1 und StV3	24
2.3.1	Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV3 (Szenario HQ ₁₀₀ +15%)	24
2.3.2	Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV3 (Szenario HQ ₁₀₀ +15%)	25
2.3.3	Abschnitt Kelheim bis Straubing StV1 – StV3 (Szenario HQ ₁₀₀ +15%)	26
3	Weiterführende Untersuchungen.....	27
3.1	Beurteilung der Ergebnisse hinsichtlich Wellenüberlagerung bei StV3	27
3.1.1	Neu-Ulm bis Donauwörth.....	27
3.1.2	Donauwörth bis Kelheim	28
3.1.3	Kelheim bis Straubing	29
3.1.4	Fazit zur Auswertung der Wellenüberlagerung.....	31
3.2	Auswirkungen der Stauraumverlandung.....	32
3.2.1	Stauraum Faimingen.....	32
3.2.2	Stauraum Bertoldsheim	34
3.2.3	Stauraum Geisling	36

4	Einschränkungen des theoretischen optimalen Potenzials	38
5	Fazit zu den Staustufen-Untersuchungen.....	41
	Literaturverzeichnis.....	43
	Anhang	44
	A1 Übersicht der Bescheidsangaben	44
	A2 Berechnungsergebnisse (Staufufen)	45
	A2.1 Vergleich StV1-StV2	45
	A2.1.1 Abschnitt NEUL-DONW StV1-StV2.....	45
	A2.1.2 Abschnitt DONW-KELH StV1-StV2.....	51
	A2.1.3 Abschnitt KELH-STRA StV1-StV2.....	54
	A2.2 Vergleich StV1-StV3	55
	A2.2.1 Abschnitt NEUL-DONW StV1-StV3.....	55
	A2.2.2 Abschnitt DONW-KELH StV1-StV3.....	61

1 Einführung

1.1 Untersuchungen zur optimierten Staustufenbewirtschaftung

Im Zuge der öffentlichen Diskussion um die potenziellen Flutpolder entlang der Donau, kam wiederholt die Frage nach den Möglichkeiten des Hochwasserrückhalts durch angepasste Staustufenbewirtschaftung auf. Die Untersuchung dieser Fragestellung ist daher Teil der vertieften Wirkungsanalyse.

Asenkerschbaumer et al. (2012) untersuchten bereits die Möglichkeiten veränderter Bewirtschaftungsstrategien an den Staustufen Bertoldsheim, Bergheim, Ingolstadt, Geisling und Straubing. Es konnten folgende Aspekte herausgearbeitet werden:

- Ein durch Vorabsenkung geschaffenes Stauvolumen kann sich bei sehr großen Hochwasserereignissen bereits beim Anlaufen der Welle wieder weitgehend auffüllen.
- Theoretisch stehen in den großen Stauräumen bei Berücksichtigung einer Vorabsenkung und eines Höherstaus noch bis zu 3 Mio. m³ (Staustufe Geisling bei HQ₁₀₀) zur Verfügung.
- Optimierungsmöglichkeiten der Steuervarianten liegen zumeist in der geänderten Beaufschlagung von Überlaufstrecken.

Bisher wurden jedoch keine Berechnungen mit dem 2d-numerischen TUM-Modell durchgeführt, in denen das maximale Rückhaltepotenzial der gesamten Staustufenkette aufgezeigt wird. Durch die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen sollen folgende Fragestellungen zur Staustufenbewirtschaftung beantwortet werden:

- Wie groß ist das Retentionspotenzial an der Donau durch optimierte Staustufenbewirtschaftung?
- Welchen Einfluss haben Verlandungen in den Stauräumen?

Betrachtet wird dabei eine Vorabsenkung an den Staustufen zwischen Neu-Ulm und Straubing, an denen dies theoretisch bei den untersuchten Abflüssen möglich ist, sowie der zeitlich optimierte Wiederaufstau auf den im Bescheid vorgegebenen Höchststau. Für die Untersuchungen werden verschiedene Steuerungsvarianten simuliert, die teilweise von den Festlegungen in den Bescheiden und Betriebsvorschriften abweichen. Eventuelle Auswirkungen von größeren Vorabsenkungen auf die Standsicherheit der Dämme müssen ggf. gesondert untersucht werden.

Die Berechnungen umfassen folgende Staustufen (vgl. Abbildung 1):

- Neu-Ulm bis Donauwörth: Oberelchingen, Leipheim, Günzburg, Offingen, Gundelfingen, Faimingen, Dillingen, Höchstädt, Schwenningen, Donauwörth (alle BEW)
- Donauwörth bis Kelheim: Bertoldsheim, Bittenbrunn, Bergheim, Ingolstadt, Vohburg (alle Uniper)
- Kelheim bis Straubing: Bad Abbach, Regensburg, Geisling, Straubing (alle Uniper)

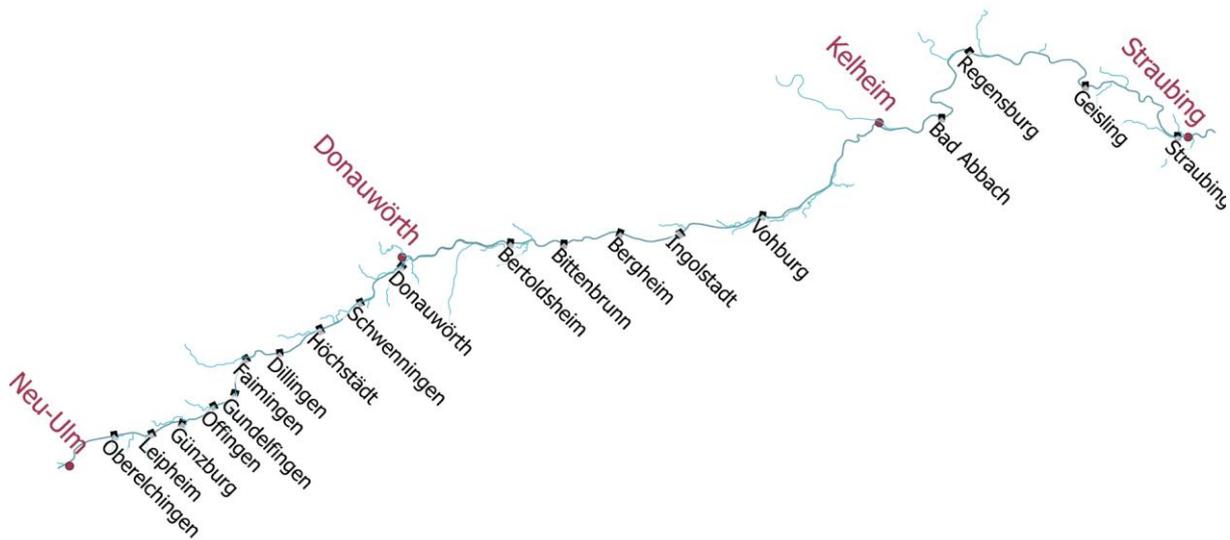


Abbildung 1: Staustufen des betrachteten Donauabschnitts

Detailbetrachtungen zum Verlandungszustand werden in Faimingen, Bertoldsheim und Geisling exemplarisch für einen Stauraum je Donauabschnitt durchgeführt.

Ausgewertet werden die Berechnungen nach Ganglinienverlauf und erreichbarer Scheitelreduktion an maßgebenden Pegeln.

Die bisherige Version der verwendeten Numerik-Software Hydro_As-2D ließ die Simulation komplexer Steuerungsvorgänge an Wehren (z. B. sinkende Wasserstände bei steigenden Zuflüssen) nicht zu. Für die Untersuchungen zur Staustufenbewirtschaftung wurde daher die Hydrotec AG mit der Weiterentwicklung der Software beauftragt. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse beinhalten daher auch eine kurze Vorstellung des neuen Moduls, sowie der notwendigen Testrechnungen.

1.2 Erweiterung der Wehrsteuerung in Hydro_As-2D

Die Erweiterung der Wehrsteuerung wird als Modellrandbedingung „H-Wehr“ mit einer neuen Auslauf-Randbedingung in das Programm eingebracht und stellt eine Erweiterung der bisherigen Randbedingung W-Q-Wehr dar. Die Randbedingung teilt sich in die beiden Typen „H-Wehr (Zeit)“ und „H-Wehr (Steuerung)“ auf, deren Funktion im Folgenden näher erläutert wird.

1.2.1 Neue Randbedingungen zur Umsetzung der Staustufensteuerung

H-Wehr (Zeit): Mit dieser Randbedingung kann der Modellierer zeitabhängig einen gewünschten Oberwasserstand am Wehr bzw. Auslauftrand definieren (Angabe von Oberwasserpegel, Abflusskoeffizient und WSP-Zeitreihe)

H-Wehr (Steuerung): Der Modellierer gibt hierfür einen Kontrollquerschnitt und einen Oberwasserpunkt an. Während einer Simulation wird am Kontrollquerschnitt der Abfluss und am Oberwasserpunkt der Wasserstand ausgelesen. Der Modellierer kann nun Bedingungen

vorgeben, in welchen Abflussspektren welcher Wasserstand im Oberwasserpunkt durch die Wehrsteuerung eingehalten werden soll.

1.2.2 Testrechnungen der Erweiterung

Die Erweiterung der Wehrsteuerung wurde primär mithilfe zweier einfacher Modelle getestet. Abbildung 2 zeigt das ca. 40 km lange akademische Gerinne mit mittig angeordneter Staustufe (roter Kreis). Das Netz umfasst 42 453 Knoten. Abbildung 3 zeigt die Draufsicht auf die Staustufe, wobei die Farben die verwendeten Materialien erkennen lassen. Abbildung 4 zeigt das für die Testrechnungen verwendete, verkürzte TUM-Donau-Modell, welches den Abschnitt der Donau zwischen Steppberger Enge und Kraftwerk Bittenbrunn mit 7 046 Knoten darstellt. Insgesamt umfassen die Testrechnungen 100 Simulationen mit dem akademischen Modell und 20 Simulationen mit dem größeren Ausschnittmodell.

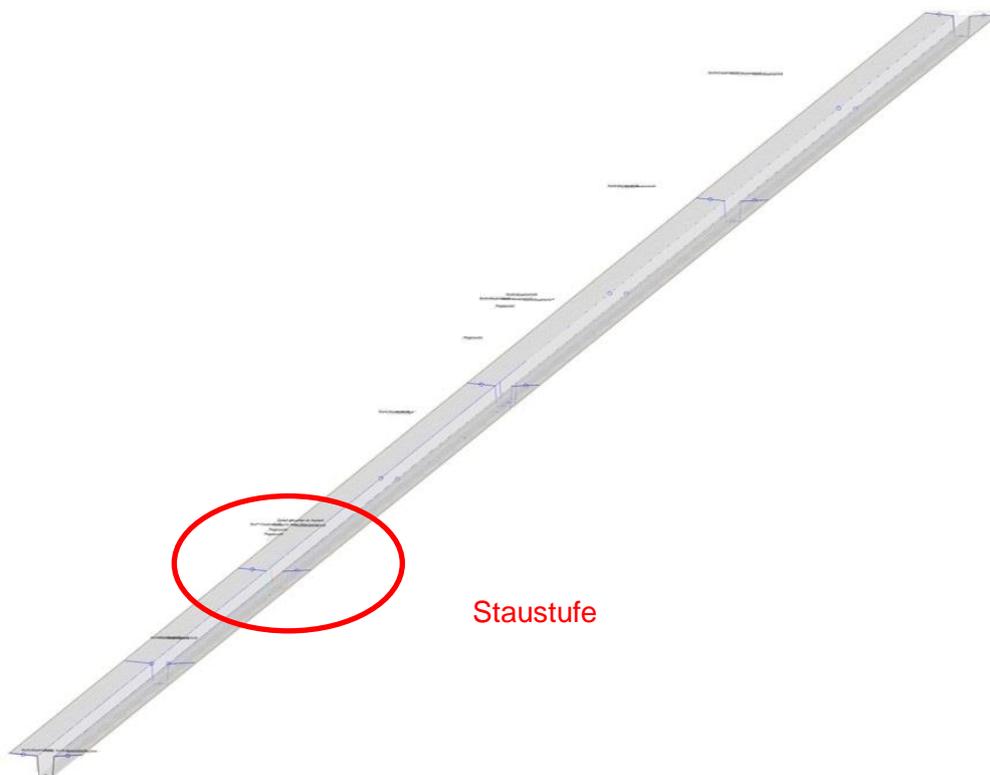


Abbildung 2: Akademisches Gerinne mit mittig angeordneter Staustufe

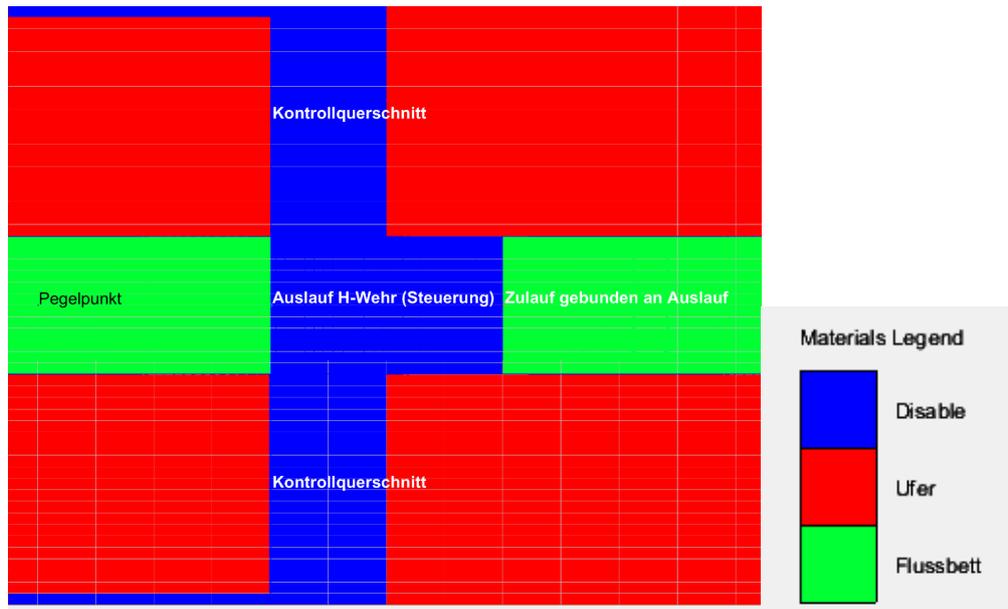


Abbildung 3: Darstellung der im akademischen Gerinne verwendeten Materialien im Bereich der Staustufe

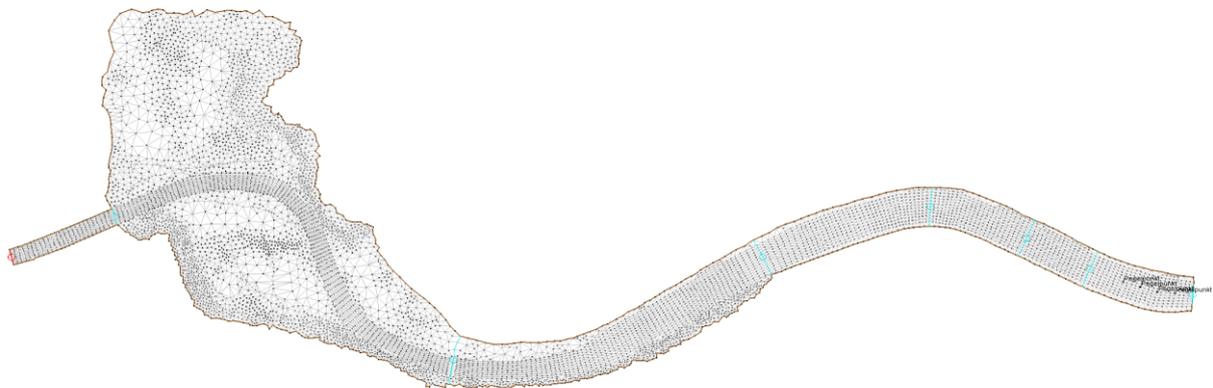


Abbildung 4: Ausschnittmodell der Donau zwischen Steppberger Enge und Kraftwerk Bittenbrunn

Dabei zeigt sich, dass das Programm sehr sensibel auf die Eingabeparameter und die Netzgeometrie reagiert (Tabelle 1 und Abbildung 5). Hier lässt sich unter anderem mit der manuellen Veränderung des Relaxationsparameters im Input-File der Simulation auf die Berechnungsergebnisse einwirken.

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

Tabelle 1: Gesetzte Parameter für die Randbedingung „Auslauf H-Wehr (Steuerung)“ für das Beispiel zur Testrechnung mit dem Ausschnittmodell

Parameter	Wert	Einheit	Erklärung
Pegel X	4436676,3	[m]	Rechtswert des Oberwasserpegels
Pegel Y	5400041,05	[m]	Hochwert des Oberwasserpegels
Abflusskoeffizient	0,32	[-]	
Abfluss X	4434637,13	[m]	Rechtswert des Querschnitts für die Zuflussmessung
Abfluss Y	5400169,40	[m]	Hochwert des Querschnitts für die Zuflussmessung
Q1	2000	[m³/s]	Abflussgrenze 1
Q2	2140	[m³/s]	Abflussgrenze 2
Q3	2100	[m³/s]	Abflussgrenze 3
W1	384,5	[m ü NN]	Wasserstand Spektrum 1
W2	384,49	[m ü NN]	Wasserstand Spektrum 2
W3	385,0	[m ü NN]	Wasserstand Spektrum 3
W4	384,5	[m ü NN]	Wasserstand Spektrum 4
Wehrgeschw.	10e-5	[m/s]	Zulässige Wehrgeschwindigkeit
Wehrtyp	0 - ohne Abminderung	-	-

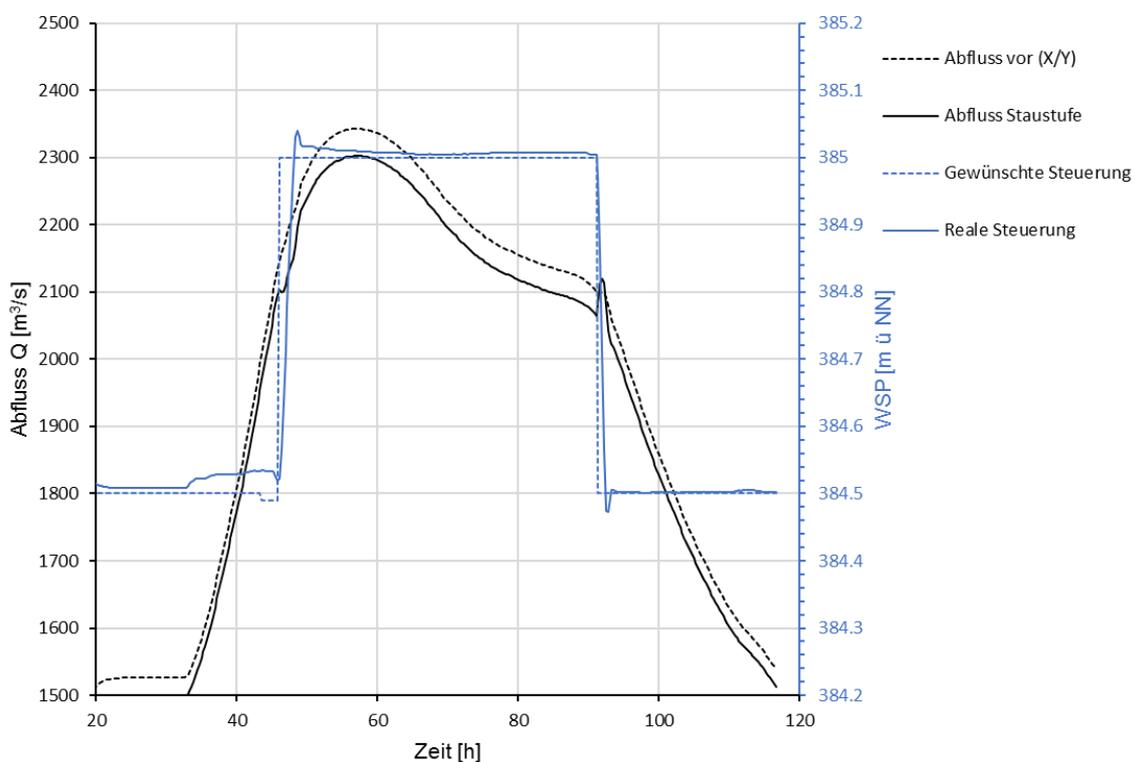


Abbildung 5: Ergebnis einer Testrechnung mit dem Ausschnittmodell

Insbesondere für das Modul „Auslauf H-Wehr (Steuerung)“ sind die Schwankungen des Abflusses bzw. Wasserstandes bei nicht optimal gesetzten Parametern zu stark, was zu nicht plausiblen Ergebnissen führen kann. Besonderes Augenmerk gilt hier der korrekten

Kombination aus realen Größen (Wahl des Abflussquerschnitts im OW, Steuerpegel) und numerischen Einstellungen (z. B. Wehrgeschwindigkeit und Relaxationsparameter).

Mit dem Modul „Auslauf H-Wehr (Zeit)“ kann eine genauere Steuerung erreicht werden, weshalb es für die Durchführung der Untersuchungen verwendet wird.

1.3 Gesetzte Randbedingungen an den Staustufen

1.3.1 Steuerungsvarianten

Die Untersuchungen zur optimierten Staustufenbewirtschaftung im Hochwasserfall beinhalten drei verschiedene Steuerungsvarianten (StV1-3) für das hydrologische Szenario HQ₁₀₀, welches aus der Einzelwirkungsanalyse der Flutpolder übernommen wurde (Asenkerschbaumer et al. (2012)). Basierend auf diesem Szenario werden auch die Einzelbetrachtungen der Verlandungszustände der Staustufen Faimingen, Bertoldsheim und Geisling durchgeführt. Für das hydrologische Szenario HQ₁₀₀+15%, welches ebenfalls von Asenkerschbaumer et al. (2012) übernommen wurde, werden StV1 und StV3 betrachtet.

Die Steuerungsvarianten (StV1-3) sind wie folgt definiert:

- StV1: Bescheidssteuerung (siehe Tabelle 2). Die Bescheidssteuerung stellt den Istzustand dar, mit dem die Steuerungsvarianten 2 und 3 verglichen werden.
- StV2: Vorabsenkung und Aufstau auf bescheidsgemäßen Höchststau nach Angaben im Bescheid. Sofern im Bescheid keine Vorgaben zur Einstellung bestimmter Stauziele enthalten sind, erfolgt der Wiederaufstau auf Stauziel im Bereich des Hochwasserscheitels (siehe Tabelle 3).
- StV3: Vorabsenkung und Aufstau auf bescheidsgemäßes (Höchst-)Stauziel erst im Bereich des Hochwasserscheitels (siehe Tabelle 3).

Die Daten der StV1 sind den jeweiligen wasserrechtlichen Bescheiden entnommen. Sofern dort keine Angaben zu maximalen Aufstau- bzw. Absenkgeschwindigkeiten enthalten sind, wurden in Rücksprache mit den Betreibern plausible Werte z. T. auf Basis abgelaufener Hochwasserereignisse angenommen.

Für StV2 und StV3 ist eine Vorabsenkung an allen Staustufen, an denen dies theoretisch bei den untersuchten Abflüssen möglich ist, vorgesehen. Die Stauhöhen beider Varianten entsprechen einander. StV2 und StV3 unterscheiden sich darin, wann der Wiederaufstau auf den bescheidsgemäßen Höchststau erfolgt. Bei StV2 wird nur dann im Bereich des Hochwasserscheitels aufgestaut, wenn der Wiederaufstau nicht durch eine Bescheidsangabe vorgegeben ist. Für StV3 erfolgt dagegen der Wiederaufstau bei allen Staustufen, bei denen eine Vorabsenkung möglich ist, optimiert auf den jeweiligen Hochwasserscheitel.

Mit den Steuerungsvarianten werden somit die Optimierungsmöglichkeiten im Rahmen der bescheidsgemäßen maximalen Stauziele bzw. Vorabsenkziele untersucht. Ein Höherstau über die bescheidsgemäßen Stauziele hinaus, würde das Retentionspotenzial vergrößern. Überlegungen dazu wurden angestellt, aus folgenden Gründen aber nicht weiterverfolgt:

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

- Aufstau in sicherheitsrelevante Bereiche problematisch für die Standsicherheit der Dämme
- Lamelle über dem bescheidsgemäßen Stauziel an Staustufen könnte bei Ausfall eines oder mehrerer Wehre, aber auch generell bei HW-Abflüssen deutlich über dem HQ₁₀₀ u. U. nicht mehr zur Verfügung stehen

Des Weiteren beeinflusst auch die Wahl der maximal möglichen Vorabsenkung bzw. des minimalen Stauziels das zur Verfügung stehende Retentionspotenzial. Die maximal mögliche Vorabsenkung wird von verschiedenen (teils staustufenabhängigen) Faktoren beeinflusst, dazu zählen u.a.:

- Unterwasserstand
- Höhe der Einlaufbauwerke der Kraftwerkseinläufe (Lufteintrag vermeiden)
- Betriebliche Vorschriften der Schifffahrt (minimal zulässige Wasserstände)
- Standsicherheit der Staudämme

Die Vorabsenkziele für StV2 und StV3 sind der TUM von den Betreibern als realisierbare Werte vorgeschlagen worden.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Staustufendaten für Steuerungsvariante 1

Staustufe	Vorabsenkziel/ minimales Stauziel	Normalstau/ Stauziel gem. Bescheid	Höchststau/ Überstau gem. Bescheid	zul. max. Absenk- geschw.	zul. max. Aufstau- geschw.	Absenk- geschw. auf Stauziel	Abfluss- koeffizient
	[m ü NN]	[m ü NN]	[m ü NN]	[cm/h]	[cm/h]	[cm/h]	[-]
Oberelchingen		459,09					0,5
Leipheim		452,62					0,5
Günzburg		446,11					0,5
Offingen		439,62					0,5
Gundelfingen		434,62					0,5
Faimingen		429,61	430,31		10	10	0,5
Dillingen		423,00	423,50		10	10	0,5
Höchstädt		417,45	417,70		10	10	0,5
Schwenningen		410,00					0,5
Donauwörth		403,70					0,5
Bertoldsheim	391,50	391,80	392,00	12	6	1	0,5
Bittenbrunn		384,50	385,00		3,5	1	0,5
Bergheim		377,00	377,50		12	3	0,5
Ingolstadt		369,50	370,00		5	7	0,5
Vohburg		361,50					0,5
Bad Abbach		338,20					0,5
Regensburg		332,50					0,5
Geisling		327,30					0,5
Straubing		320,00					0,5

Tabelle 3: Zusammenstellung der Staustufendaten für Steuerungsvariante 2 und 3

Staustufe	Vorabsenkziel/ minimales Stauziel [m ü NN]	Normalstau/ Stauziel gem. Bescheid [m ü NN]	Höchststau/ Überstau gem. Bescheid [m ü NN]	zul. max. Absenk- geschw. [cm/h]	zul. max. Aufstau- geschw. [cm/h]	Absenk- geschw. auf Stauziel [cm/h]	Abfluss- koeffizient [-]
				10	10		
Oberelchingen	457,59	459,09		10	10		0,5
Leipheim	451,62	452,62		10	10		0,5
Günzburg	445,41	446,11		10	10		0,5
Offingen	438,62	439,62		10	10		0,5
Gundelfingen	433,62	434,62		10	10		0,5
Faimingen	428,61	429,61	430,31	10	10	10	0,5
Dillingen	422,80	423,00	423,50	30	10	10	0,5
Höchstädt	417,25	417,45	417,70	30	10	10	0,5
Schwenningen	409,80	410,00		30	10		0,5
Donauwörth	403,50	403,70		30	10		0,5
Bertoldsheim	390,30	391,80	392,00	12	6	1	0,5
Bittenbrunn		384,50	385,00		3,5	1	0,5
Bergheim	375,50	377,00	377,50		12	3	0,5
Ingolstadt	368,00	369,50	370,00		5	7	0,5
Vohburg	359,50	361,50					0,5
Bad Abbach		338,20					0,5
Regensburg		332,50					0,5
Geisling	326,30	327,30		10	10		0,5
Straubing	319,00	320,00		10	10		0,5

1.3.2 Beginn der Vorabsenkung im Variantenvergleich

Um eine Überlagerung von Vorabsenkungswellen zu vermeiden, wird an allen Stauräumen eines Abschnitts die Vorabsenkung gleichzeitig begonnen. Je nach Steuerungsvariante ergeben sich unterschiedliche Startzeitpunkte für die Vorabsenkung, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Bedingt durch die Bescheidsregelungen (siehe Anhang A1) in Kombination mit der betrachteten Hochwasserwelle, erfolgt die Vorabsenkung für die Abschnitte 1 und 2 und StV1 bzw. StV2 bereits 6 h bzw. 13 h nach Beginn der Simulation, wie in den Übersichten in Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 8 zu erkennen ist. Für Abschnitt 3 sind keine derartigen Regelungen im Bescheid verankert, weshalb der Startzeitpunkt der Vorabsenkung frei gewählt werden kann.

Für StV2 im Abschnitt 1 ist die Staustufe Faimingen maßgebend für den Beginn der Vorabsenkung, da sie die erste Staustufe im Abschnitt 1 ist, bei der ein bescheidsgemäßer Überstau vorgesehen ist. Das heißt, unter Berücksichtigung der Bescheidsangaben wird ein Zeitpunkt gesucht, an dem die Vorabsenkung in Faimingen spätestens beginnen muss, welcher dann wiederum für die anderen Staustufen übernommen wird. Im Bescheid ist festgelegt, dass der Aufstau auf Höchststau beginnen soll, wenn in Faimingen ein Abfluss von 700 m³/s überschritten wird. Um diese Bedingung auch dann einzuhalten, wenn eine Vorabsenkung durchgeführt wird, sollte der Wiederaufstau zum Zeitpunkt des Überschreitens der 700 m³/s beendet und das Stauziel wieder erreicht sein. Unter Berücksichtigung der

maximal zulässigen Auf- und Abstaugeschwindigkeiten erhält man den Startzeitpunkt der Vorabsenkung in Faimingen. Das Vorgehen ist in Abbildung 6 verdeutlicht.

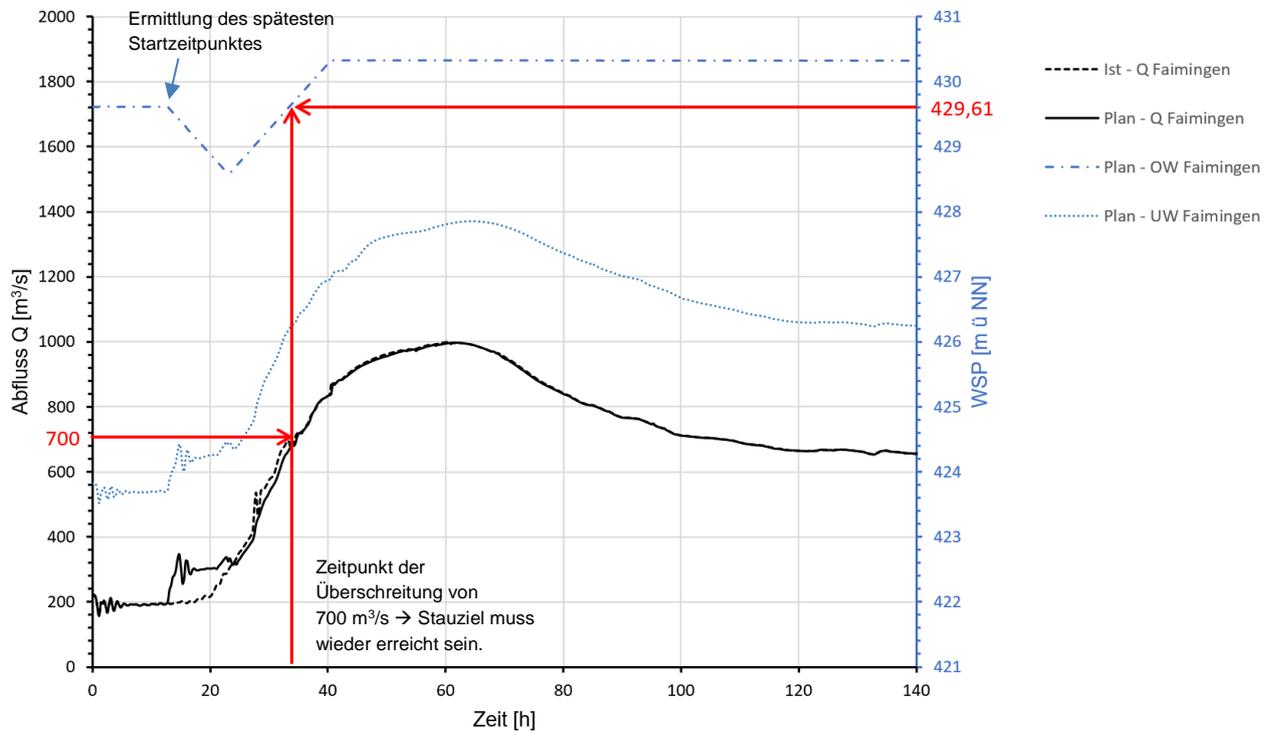


Abbildung 6: Vorgehensweise zur Festlegung des spätesten Startzeitpunkts der Vorabsenkung unter Berücksichtigung der Bescheidsvorgaben

Der so ermittelte Startzeitpunkt wird für alle Staustufen des Abschnitts übernommen. Durch dieses Vorgehen wird die Generierung einer künstlich erzeugten Welle vermieden, da sich die erhöhten Abflüsse aus den Stauräumen nicht von Stufe zu Stufe überlagern können. Das Ende der Vorabsenkung erfolgt individuell an jeder Staustufe je nach zulässiger Absenkgeschwindigkeit und Wasserspiegeldifferenz zwischen Stauziel und Absenkziel. Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die für Abschnitt 1 geltenden Steuerungszeiträume der StV2. Durch die Bescheidsvorgaben errechnet sich der Startzeitpunkt der Vorabsenkung auf 37 h vor Scheiteldurchgang Oberelching (oberste Staustufe des Abschnitts) bzw. 60 h vor Scheiteldurchgang an der Staustufe Donauwörth (unterste Staustufe des Abschnitts).

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

Tabelle 4: Überblick über den Steuerungsbeginn für StV2 im Abschnitt NEUL-DONW

NEUL-DONW StV2	Betrachteter Standort		
	Oberste Staustufe (Oberelchingen)	Maßgebende Staustufe (Faimingen)	Unterste Staustufe (Donauwörth)
Scheiteldurchgang nach Beginn der Simulation	50 h	60 h	73 h
Startzeitpunkt Vorabsenkung	13 h	13 h	13 h
Zeitraum zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang	37 h	47 h	60 h

Ebenso wie für Abschnitt 1 wird auch für Abschnitt 2 ein spätester Beginn der Vorabsenkung festgelegt. Für StV1 und StV2 im Abschnitt 2 ist die Staustufe Bertoldsheim die maßgebende, welche den Zeitpunkt der Vorabsenkung beeinflusst. Der Bescheid sieht vor, dass die Absenkung ab einem Durchfluss von 500 m³/s erfolgen soll. Die 500 m³/s werden 67 h vor Scheiteldurchgang der Hochwasserwelle in Bertoldsheim, welches sogleich die oberste Staustufe des Abschnitts ist, überschritten. Zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang in Vohburg liegen 89 h (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Überblick über den Steuerungsbeginn für StV2 im Abschnitt DONW-KELH

DONW-KELH StV2	Betrachteter Standort		
	Oberste Staustufe (Bertoldsheim)	Maßgebende Staustufe (Bertoldsheim)	Unterste Staustufe (Vohburg)
Scheiteldurchgang nach Beginn der Simulation	73 h	73 h	95 h
Startzeitpunkt Vorabsenkung	6 h	6 h	6 h
Zeitraum zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang	67 h	67 h	89 h

Da für Abschnitt 3 keine Steuerung im Bescheid verankert ist, folgt, dass der Beginn der Vorabsenkung frei gewählt werden kann. Daher wird dieser auf 48 h vor Scheiteldurchgang an der untersten Staustufe gewählt (siehe Tabelle 6). Eine maßgebende Staustufe existiert für diesen Abschnitt nicht.

Tabelle 6: Überblick über den Steuerungsbeginn für StV2 im Abschnitt KELH-STRA

KELH-STRA StV2	Betrachteter Standort		
	Oberste Staustufe (Bad Abbach)	Maßgebende Staustufe --	Unterste Staustufe (Straubing)
Scheiteldurchgang nach Beginn der Simulation	162 h	x	150 h
Startzeitpunkt Vorabsenkung	102 h	x	102 h
Zeitraum zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang	60 h	x	48 h

Für die Optimierung der Staustufensteuerung (StV3) wird von den Bescheidsvorgaben mit relativ frühem Hochfahren auf die Höchststauziele abgewichen, wodurch der Startzeitpunkt der Vorabsenkung basierend auf realistischen Vorhersagezeiträumen gewählt werden kann. Nach Einschätzung der Hydrologen des LfU kann „der Beginn einer Vorabsenkung an den Staustufen der Donau ca. 24 Stunden vor Durchlauf des Hochwasserscheitels als realistisch angesehen werden. Für eine Potenzialuntersuchung, bei der eher günstige Randbedingungen gewählt werden, kann aber durchaus eine Vorlaufzeit von 2 oder 3 Tagen gewählt werden.“

Der Beginn der Vorabsenkung wird demnach für jeden Donauabschnitt auf den Zeitpunkt 48 h vor Scheiteldurchgang in der untersten Staustufe des jeweiligen Abschnitts festgelegt, dieses Vorgehen ermöglicht die Situation für den gesamten betrachteten Abschnitt bewerten zu können bevor eine Steuerung beginnt. Bezogen auf den Beginn des jeweiligen Abschnitts entspricht dies 25 h Vorlauf im Abschnitt 1 und 26 h im Abschnitt 2 (siehe Tabelle 7). Die Vorabsenkung erfolgt wiederum zeitgleich unter Berücksichtigung der jeweiligen maximalen Absenkgeschwindigkeiten.

Tabelle 7: Überblick über den Steuerungsbeginn für StV3 in Abschnitt 1 und 2

NEUL-DONW StV3	Betrachteter Standort	
	Oberste Staustufe (Oberelchingen)	Unterste Staustufe (Donauwörth)
Scheiteldurchgang nach Beginn der Simulation	50 h	73 h
Startzeitpunkt Vorabsenkung	25 h	25 h
Zeitraum zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang	25 h	48 h

DONW-KELH StV3	Betrachteter Standort	
	Oberste Staustufe (Bertoldsheim)	Unterste Staustufe (Vohburg)
Scheiteldurchgang nach Beginn der Simulation	73 h	95 h
Startzeitpunkt Vorabsenkung	47 h	47 h
Zeitraum zwischen Vorabsenkung und Scheiteldurchgang	26 h	48 h

Wie in Tabelle 8 zu erkennen ist, existiert für den Abschnitt Kelheim bis Straubing keine StV3. Grund hierfür ist, dass im Bescheid lediglich eine konstante Steuerung der Staustufen auf Stauziel vorgesehen ist und deswegen laut Definition bereits für StV2 die scheideloptimierte Implementierung erfolgt.

Der Vorgang des Wiederaufstaus in StV3 wird für jede Staustufe separat ermittelt. Startzeitpunkt und Dauer werden im Wesentlichen vom verfügbaren Stauraumvolumen, sowie von Form und Scheitelvolumen der Hochwasserwelle bestimmt.

Es wird darauf hingewiesen, dass der Abstauvorgang vom bescheidsgemäßen Höchststauziel zum Stauziel nach Durchlauf der Hochwasserwelle bei einigen Staustufen bewusst nicht abgebildet wird. Grund hierfür sind die Angaben der Bescheidssteuerung (StV1), in der der Abstauvorgang erst zu beginnen ist, wenn ein bestimmter Durchfluss dauerhaft unterschritten wird. Allerdings tritt eine dauerhafte Unterschreitung dieser Abflüsse im simulierten Zeitraum an diesen Staustufen noch nicht auf. Die Simulation ist daher zu kurz, als dass für StV1 der Abstau simuliert werden könnte – dieses Verhalten wird für StV2 und StV3 aus Gründen der Konsistenz übernommen.

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

Tabelle 8: Zusammenfassung: Beginn der Vorabsenkung für die einzelnen Steuerungsvarianten; Zeitangaben entsprechend der jeweiligen numerischen Simulation

	Szenario	NEUL-DONW	DONW-KELH	KELH-STRA
StV1	HQ ₁₀₀	-	6 h <ul style="list-style-type: none"> Bertoldsheim maßgebend Entspricht 89 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Vohburg 	-
	HQ ₁₀₀ +15%	-	6 h <ul style="list-style-type: none"> Bertoldsheim maßgebend Entspricht 138 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Vohburg 	-
StV2	HQ ₁₀₀	13 h <ul style="list-style-type: none"> Faimingen maßgebend Entspricht 60 h vor Scheiteldurchgang in Donauwörth 	6 h <ul style="list-style-type: none"> Bertoldsheim maßgebend Entspricht 89 h vor Scheiteldurchgang in Vohburg 	102 h <ul style="list-style-type: none"> Beginn frei gewählt Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang in Straubing**
StV3	HQ ₁₀₀	25 h <ul style="list-style-type: none"> Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Donauwörth** 	47 h <ul style="list-style-type: none"> Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Vohburg** 	(wie StV2)*
	HQ ₁₀₀ +15%	49 h <ul style="list-style-type: none"> Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Donauwörth** 	96 h <ul style="list-style-type: none"> Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Vohburg** 	58 h <ul style="list-style-type: none"> Entspricht 48 h vor Scheiteldurchgang Staustufe Straubing**

* StV2 und StV3 für Abschnitt 3 KELH-STRA identisch

** Nach Vorschlag LfU

1.3.3 Numerische Ergebnisoptimierung

Die Steuerungsvarianten (insbesondere StV3) sehen eine auf den Hochwasserscheitel optimierte Steuerung der Stauanlagen vor, um eine möglichst große Scheitelkappung zu erzielen. Hier wird kurz auf die Umsetzung bei der numerischen Ergebnisoptimierung eingegangen.

Beginnen wird mit der obersten Staustufe eines Abschnitts. Für diese wird eine Steuerung implementiert – die flussabwärts liegenden Staustufen werden zunächst konstant auf Stauziel

gesteuert. Der Zeitpunkt des Vorabsenkungsbeginns wird wie oben beschrieben bestimmt und in die Steuerung des numerischen Modells implementiert. Um nun den optimalen Zeitpunkt des Wiederaufstaus auf Stauziel bzw. Höchststau zu finden werden mehrere Optimierungsläufe mit dem numerischen Modell durchgeführt. Ausgehend vom Zeitpunkt des Scheiteldurchgangs an der betrachteten Staustufe, wird auf den Startzeitpunkt des Wiederaufstaus zurückgerechnet. Dieser hängt von den staustufenspezifischen Wehrgeschwindigkeiten ab. Durch Ergebnisevaluierung des ersten Rechenlaufes wird der Wiederaufstau angepasst. Es werden mindestens drei Rechenläufe durchgeführt (bis zu sechs Rechenläufe). Die Steuerung, mit der die besten Ergebnisse erzielt werden, wird dann für die erste Staustufe gewählt und es wird mit der nächsten Staustufe nach demselben Vorgehen fortgefahren.

Es hat sich gezeigt, dass eine optimale Kappungswirkung dann erzielt wird, wenn der Wiederaufstau nicht direkt auf den Hochwasserscheitel gesteuert wird, sondern stattdessen etwas vor Scheiteldurchgang.

2 Berechnungsergebnisse

2.1 Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ₁₀₀ – Vergleich der StV1 und StV2

2.1.1 Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV2 (Szenario HQ₁₀₀)

Im Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth wurden die Berechnungen für die Staustufen Oberelchingen, Leipheim, Günzburg, Offingen, Gundelfingen, Faimingen, Dillingen, Höchstädt, Schwenningen und Donauwörth durchgeführt. Diese Staustufen werden alle von der BEW betrieben. Das Ergebnis der Scheitelkappung am Pegel Donauwörth ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Anhang A2.1.1 befinden sich die Ergebnisse für die einzelnen Staustufen.

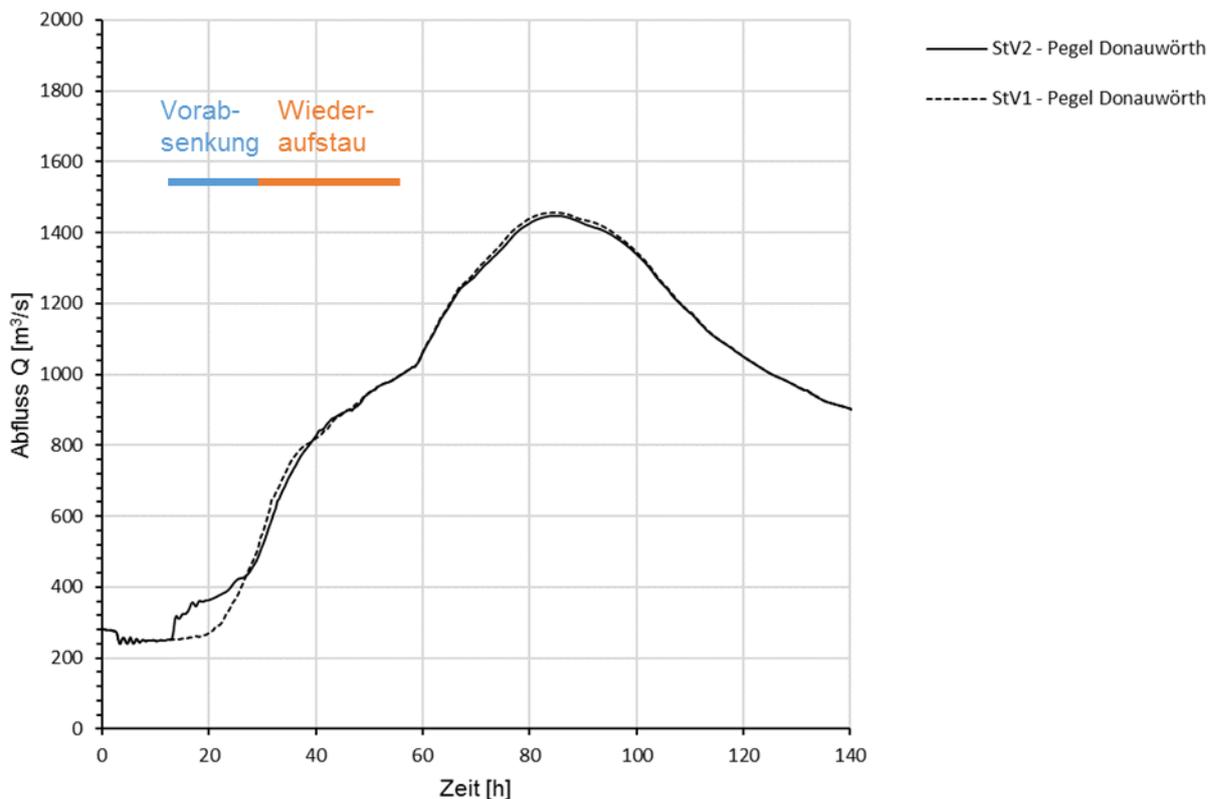


Abbildung 7: Ergebnis der StV2 beim Szenario HQ₁₀₀ für den Pegel Donauwörth

In Abbildung 7 sind die Veränderungen der Welle in Donauwörth aufgrund der geänderten Staustufensteuerung (Vorabsenkung, Wiederaufstau) zu erkennen. Die durchgeführten Vorabsenkungen (Beginn bei ca. 13 h) haben eine Abflusserhöhung des Basisabflusses zur Folge (Vorabsenkungswelle). Die Vorabsenkungswelle geht anschließend in den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle über. In StV2 werden die Staustufen Oberelchingen, Leipheim, Günzburg, Offingen und Gundelfingen, sowie Donauwörth im Bereich des Hochwasserscheitels wiederaufgestaut. Für Faimingen, Dillingen, Höchstädt und Schwenningen findet der Wiederaufstau auf Grundlage der jeweiligen Bescheide statt.

Letztendlich kann durch StV2 eine Scheitelminderung von $9 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $0,6 \%$ am Pegel Donauwörth erreicht werden. Das Potenzial für diese Variante wird als nicht nennenswert eingestuft, da es im Bereich der Modellungenauigkeit liegt.

2.1.2 Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV2 (Szenario HQ₁₀₀)

Im Abschnitt Donauwörth bis Kelheim werden die Berechnungen für die Staustufen Bertoldsheim, Bittenbrunn, Bergheim, Ingolstadt und Vohburg durchgeführt. Diese Staustufen werden alle von Uniper betrieben. Das Ergebnis der Scheitelkappung an den Pegeln Ingolstadt und Kelheim ist in Abbildung 8 dargestellt. Im Anhang A2.1.2 befinden sich die entsprechenden Ergebnisse für die einzelnen Staustufen.

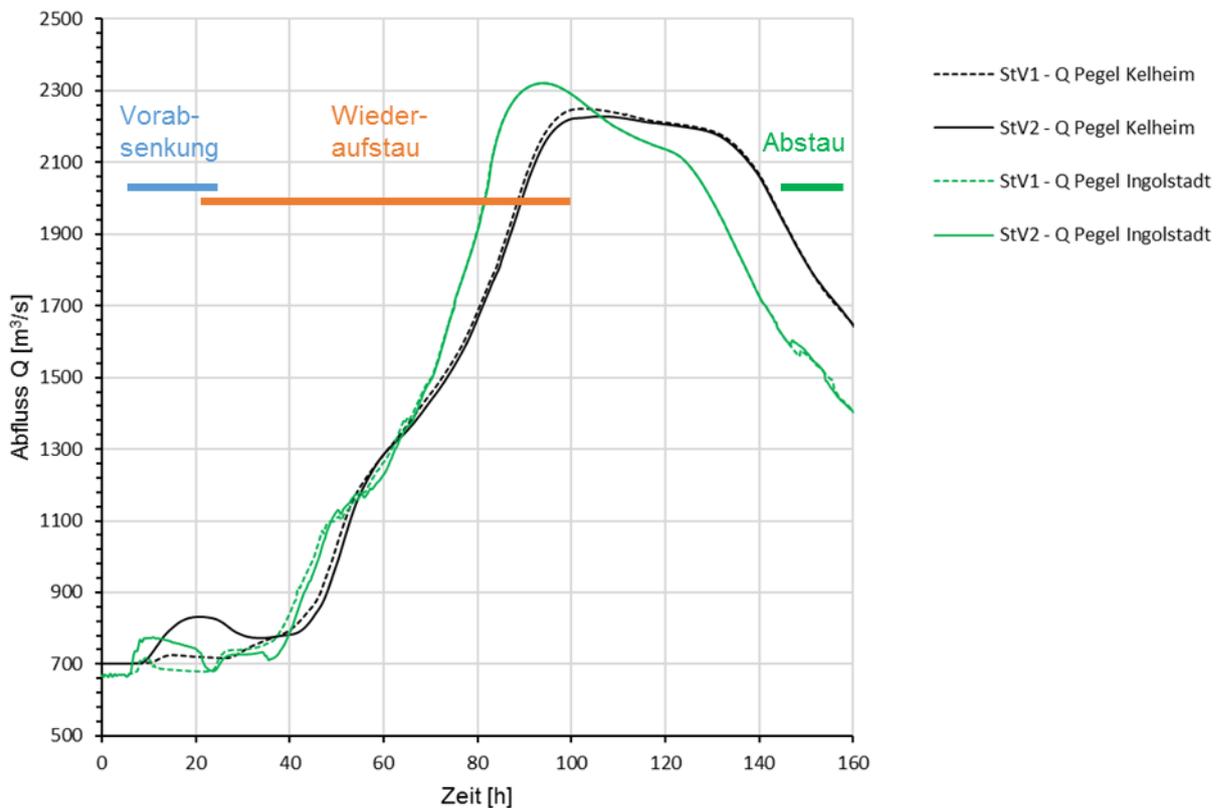


Abbildung 8: Ergebnisse der StV2 beim Szenario HQ₁₀₀ für die Pegel Ingolstadt und Kelheim

StV2 sieht vor, dass die Vorabsenkung genau dann bis auf Stauziel wiederaufgestaut sein muss, wenn der Durchfluss überschritten wird, bei dem nach Bescheid der Aufstau auf das Höchststauziel beginnen soll. Deshalb hat die Vorabsenkung an den Staustufen Bertoldsheim, Bergheim und Ingolstadt in StV2 keine sichtbare Auswirkung auf eine Scheitelkappung. Mit Wiederaufstau auf Stauziel sind die Stauräume bereits wieder gefüllt und es erfolgt kein scheideloptimierter Wiederaufstau. Vohburg ist die einzige Staustufe in dieser Steuerungsvariante, bei der durch die Vorabsenkung eine Scheitelkappung erzielt werden kann, da diese in StV1 konstant auf Stauziel gesteuert war und somit die geänderte Steuerung vollständig wirken kann.

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

In Kelheim (Abbildung 8) zeigt sich eine gute Kappung der Welle, die somit ausschließlich auf die Kappungswirkung der Staustufe Vohburg zurückzuführen ist.

Bedingt durch die frühe Vorabsenkung ist die daraus resultierende Welle bereits vor dem Anstieg der Hochwasserwelle abgelaufen.

Durch StV2 kann im Abschnitt Donauwörth bis Kelheim eine Scheitelminderung von $19 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $0,8 \%$ am Pegel Kelheim erreicht werden. Am Pegel Ingolstadt, der oberhalb der Staustufe Vohburg liegt, beträgt die Scheitelminderung rechnerisch lediglich $1 \text{ m}^3/\text{s}$ und hat somit keine Wirkung.

2.1.3 Abschnitt Kelheim bis Straubing StV1 – StV2 (Szenario HQ₁₀₀)

In diesem Donauabschnitt liegen die Staustufen Bad Abbach, Regensburg, Geisling und Straubing (alle Uniper). Aufgrund hoher Unterwasserstände an den Staustufen Bad Abbach und Regensburg muss auf eine Vorabsenkung an diesen Staustufen verzichtet werden (vgl. Übersicht StV2 in Tabelle 3). Die Ergebnisdarstellung im Anhang A2 beinhaltet daher keine Auswertung der Staustufen Bad Abbach und Regensburg.

Das Ergebnis der Scheitelkappung für StV2 am Modellauslauf in Straubing ist in Abbildung 9 dargestellt. Im Anhang A2.1.3 befinden sich die entsprechenden Ergebnisse für die einzelnen Staustufen. Dort ist für die Staustufe Straubing zu erkennen, dass aufgrund des hohen Unterwasserstandes, ein Wiederaufstau im Bereich des Hochwasserscheitels nicht möglich ist. Das zur Verfügung stehende Kappungsvolumen ist dadurch vor dem Eintreffen des Scheitels zum Teil wieder aufgebraucht. Die Kappungswirkung am Modellauslauf Straubing ist daher zum größten Teil auf die Wirkung der Staustufe Geisling zurückzuführen.

Hier soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass für den Abschnitt Kelheim bis Straubing StV2 der StV3 entspricht (vgl. Kapitel 1.3.1). Die Vorabsenkungen, welche in diesem Fall 48 h vor dem Durchlaufen der untersten Staustufe (Straubing) bzw. 60 h vor der obersten Staustufe stattfinden, resultieren in einer Vorabsenkungswelle im ansteigenden Ast. Am Modellauslauf in Straubing kann eine Scheitelreduktion von 33 m³/s bzw. 1 % erreicht werden.

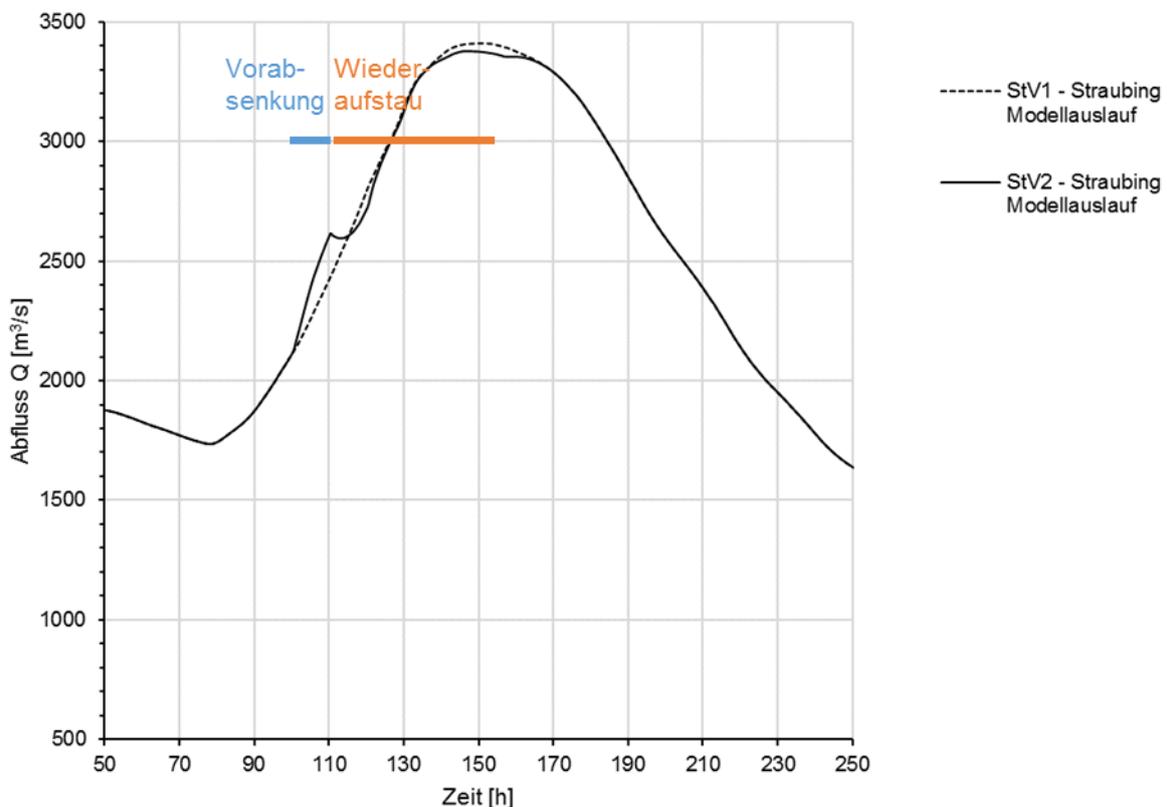


Abbildung 9: Ergebnis der StV2 beim Szenario HQ₁₀₀ am Modellauslauf Straubing

2.2 Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ₁₀₀ – Vergleich der StV1 und StV3

2.2.1 Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV3 (Szenario HQ₁₀₀)

Durch die Optimierung des Wiederaufstaus im Scheitelbereich kann mit StV3 das Potenzial der Scheitelkappung im Vergleich zu StV2 etwas vergrößert werden. Die Vorabsenkung erfolgt gleichzeitig an allen Staustufen 25 h vor Scheiteldurchgang am Beginn des Abschnitts (Staustufe Oberelchingen) bzw. 48 h vor Scheiteldurchgang an der untersten Staustufe des Abschnitts (Donauwörth). Die Vorabsenkungswelle verschiebt sich somit in den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle, was ihre Auswirkung relativiert.

Durch den – im Vergleich zu StV2 – später gewählten Startzeitpunkt der Vorabsenkung gestaltet es sich an der Staustufe Oberelchingen schwierig, eine Scheitelkappung zu erzielen. Allerdings ist auch bei StV2 der durch Oberelchingen bedingte Anteil der Kappung nicht nennenswert, weshalb auf eine Steuerung der Staustufe Oberelchingen für StV3 verzichtet wird. Eine optimale horizontale Scheitelkappung kann trotz Optimierung nicht an allen Staustufen erzielt werden (vgl. Anhang A2.2.1).

Insgesamt wird am Pegel Donauwörth mit einer Scheitelkappung von 17 m³/s bzw. 1,2 % ein geringes Retentionspotenzial erzielt.

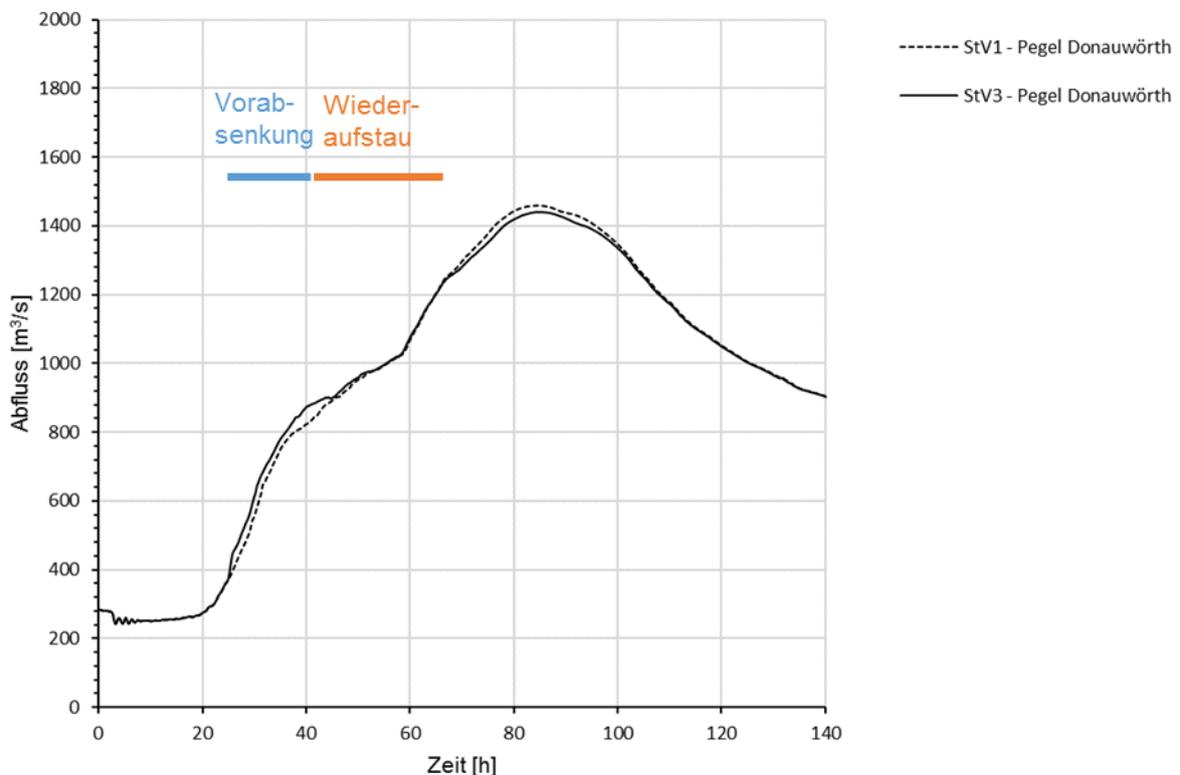


Abbildung 10: Ergebnis der StV3 beim Szenario HQ₁₀₀ für den Pegel Donauwörth

2.2.2 Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV3 (Szenario HQ₁₀₀)

Analog zum Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth gelingt auch im Abschnitt Donauwörth bis Kelheim nicht für jede Staustufe eine optimale horizontale Kappung der Welle. Insbesondere eine Steuerung von Bertoldsheim gestaltet sich aufgrund der Ausuferung ins südliche Vorland schwierig. Für die Staustufen Bergheim und Vohburg können die Scheitelminderungen als gut bezeichnet werden (vgl. Anhang A2.2.2). Durch den später gewählten Startzeitpunkt der Vorabsenkung im Vergleich der StV2 verschiebt sich auch hier die Vorabsenkungswelle in den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle.

Am Pegel Kelheim ergibt sich eine Scheitelkappung von 40 m³/s bzw. 1,7 %. In Ingolstadt sind es 51 m³/s bzw. 2,2 %.

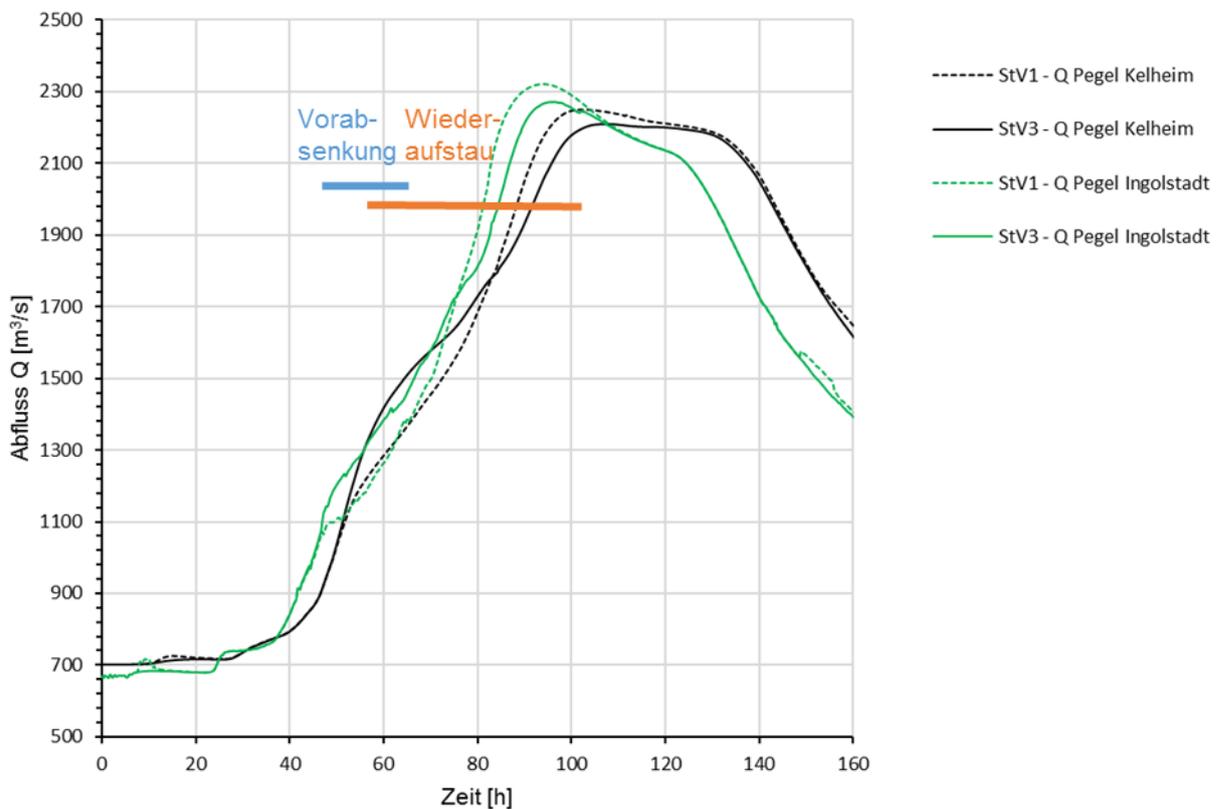


Abbildung 11: Ergebnisse der StV3 beim Szenario HQ₁₀₀ für die Pegel Ingolstadt und Kelheim

2.3 Berechnungsergebnisse und Abschätzung des Retentionspotenzials bei den Szenarien HQ₁₀₀+15% – Vergleich der StV1 und StV3

2.3.1 Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth StV1 – StV3 (Szenario HQ₁₀₀+15%)

Beim Szenario HQ₁₀₀+15% ist die Scheitelkappung am Pegel Donauwörth (Abbildung 12) für die StV3 anders als erwartet etwas höher als beim Szenario HQ₁₀₀. Die Scheitelreduktion beträgt 30 m³/s bzw. 1,8 %. Dies kommt vor allem daher, dass das hydrologische Szenario HQ₁₀₀+15% zu einem etwas spitzeren Scheitel in Donauwörth führt (vgl. Asenkerschbaumer et al. (2012)). Allgemein funktioniert das Prinzip der Scheitelkappung bei spitzen Scheiteln besser als bei flachen, weshalb die Auswirkungen hier dementsprechend höher sind. Generell sind für größere Hochwasserereignisse mit ähnlicher Form geringere Kappungswirkungen zu erwarten (vgl. Ergebnisse beim Szenario HQ₁₀₀+15% für die Donauabschnitte 2 und 3 in den folgenden Kapiteln), da bei höheren Abflüssen mit entsprechend höheren Wasserständen in den Stauräumen weniger Rückhaltevolumen für eine Scheitelkappung verbleibt. Die These, dass bei großen Hochwasserereignissen eine geringere Kappungswirkung erzielt werden kann, wird beispielsweise von einer Studie zur Hochwasserspitzen-Dämpfung durch Vorabsenkung von der Task Force Donau (2016) bestätigt. Die Studie, herausgegeben vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, untersucht das theoretische Potenzial der Dämpfung von Hochwasserspitzen an der Donau unter Einsatz der Stauräume Jochenstein und Aschach, sowie die Übertragbarkeit der theoretischen Ergebnisse auf die Praxis.

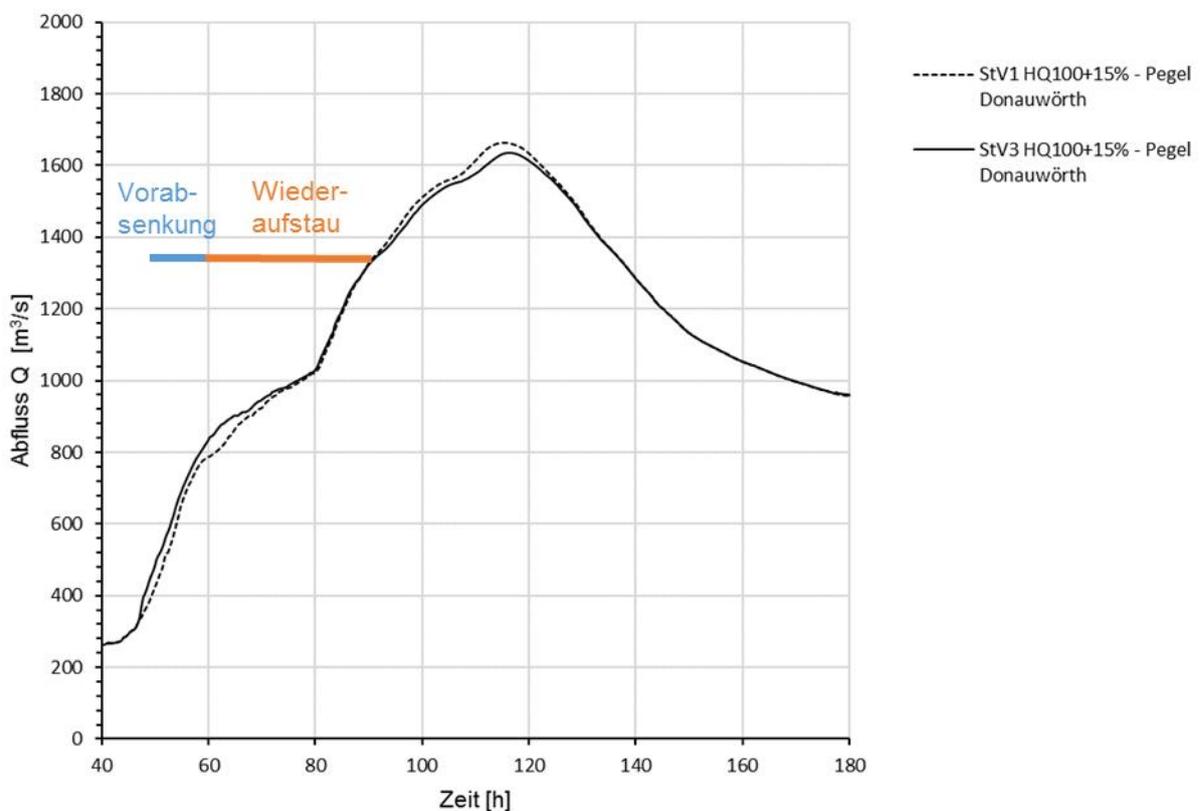


Abbildung 12: Ergebnis der StV3 beim Szenario HQ₁₀₀+15% für den Pegel Donauwörth

2.3.2 Abschnitt Donauwörth bis Kelheim StV1 – StV3 (Szenario HQ₁₀₀+15%)

Die optimierte Steuerung angewendet auf das hydrologische Szenario HQ₁₀₀+15% ergibt im Abschnitt Donauwörth bis Kelheim am Pegel Kelheim eine Scheitelreduktion von 31 m³/s bzw. 1,2 %. Am Pegel Ingolstadt sind es 28 m³/s bzw. 1,1 %. Wie erwartet vermindert sich hier das Potenzial der Scheitelkappung im Gegensatz zum Szenario HQ₁₀₀. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 dargestellt.

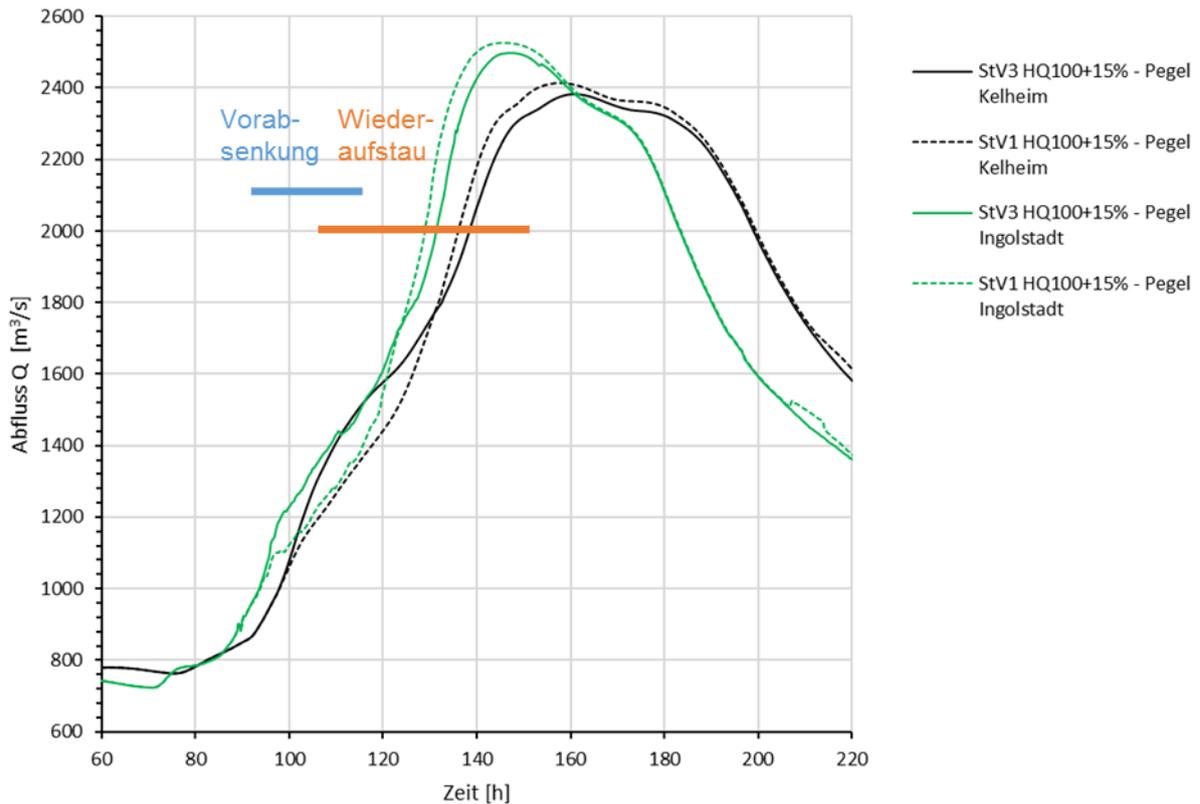


Abbildung 13: Ergebnisse der StV3 beim Szenario HQ₁₀₀+15% für die Pegel Ingolstadt und Kelheim

2.3.3 Abschnitt Kelheim bis Straubing StV1 – StV3 (Szenario HQ₁₀₀+15%)

Beim Szenario HQ₁₀₀+15% im Abschnitt Kelheim bis Straubing ergibt sich eine Scheitelkappung von 20 m³/s bzw. 0,6 %. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis am Modellauslauf in Straubing. Auch für diesen Fall verringert sich das Potenzial im Gegensatz zum Szenario HQ₁₀₀. Der Vergleich mit Abbildung 9 zeigt, dass sich die Form der Ganglinie am Modellauslauf Straubing für HQ₁₀₀+15% ändert. Dies lässt sich damit erklären, dass beim größeren Hochwasserereignis Überströmungen stattfinden, die bei einem HQ₁₀₀ nicht auftreten. Somit erfolgt eine nicht gesteuerte Aktivierung von Überschwemmungsflächen, was sich in der Form der Abflussganglinie bemerkbar macht.

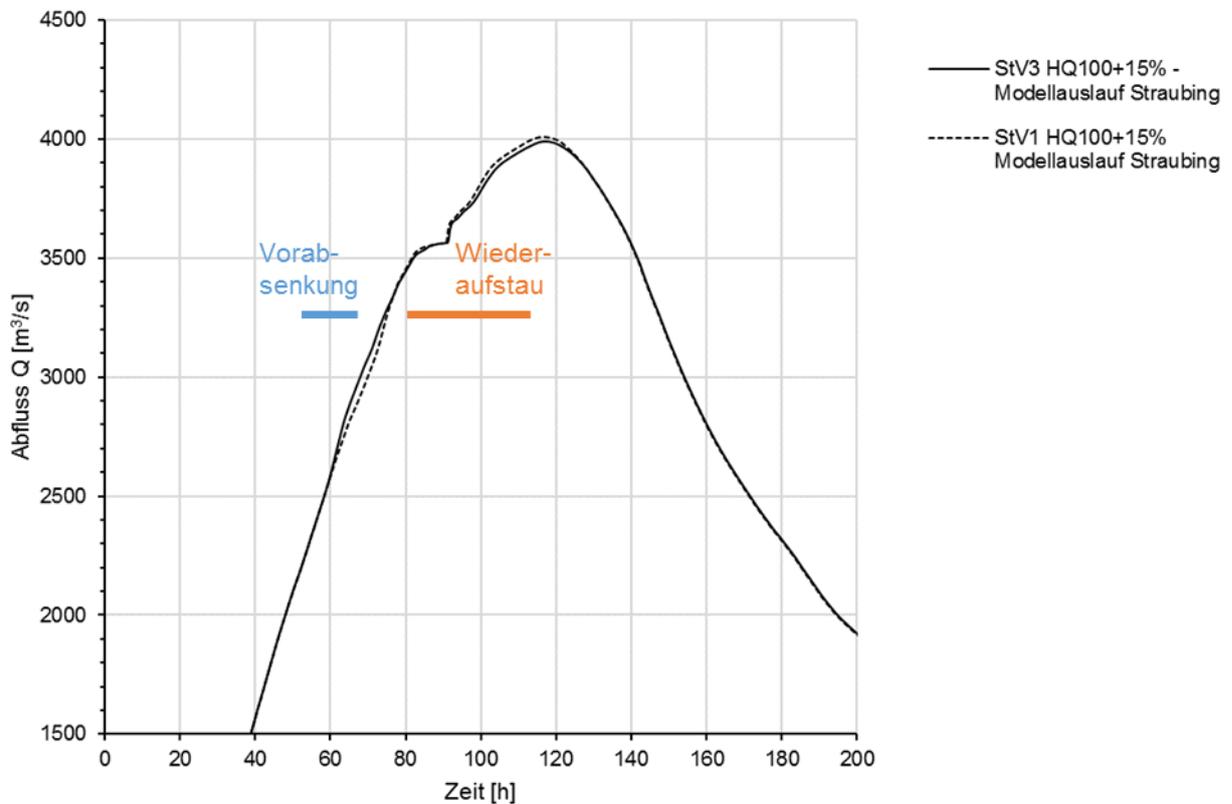


Abbildung 14: Ergebnis der StV3 beim Szenario HQ₁₀₀+15% für den Modellauslauf in Straubing

3 Weiterführende Untersuchungen

3.1 Beurteilung der Ergebnisse hinsichtlich Wellenüberlagerung bei StV3

In diesem Kapitel werden mögliche negative Effekte, die durch Überlagerung der Vorabsenkungswellen mit Zuflüssen aus seitlich einmündenden Gewässern entstehen, betrachtet. Hierzu werden für das hydrologische Szenario HQ_{100} die Auswirkungen der Vorabsenkungswellen auf den jeweils nächsten Abschnitt evaluiert. Zeitliche Verschiebungen der Welle durch die für die jeweilige Strecke benötigte Fließzeit ist in die Betrachtung mit einbezogen worden. Dieses Kapitel soll nur eine erste Abschätzung möglicher Wellenüberlagerungen geben, daher wurde lediglich ein hydrologisches Szenario ausgewertet (HQ_{100}). Die Abbildungen dienen vor allem der zeitlichen Analyse der Überlagerung der jeweiligen Wellenscheitel. Auf eine quantitative Auswertung wird verzichtet.

3.1.1 Neu-Ulm bis Donauwörth

Für den Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth werden die seitlichen Zuflüsse Wörnitz und Lech ausgewertet. Die Wörnitz mündet noch im ersten Abschnitt in die Donau, der Lech folgt im zweiten Abschnitt nach 11 km Fließstrecke.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse für Wörnitz und Lech. Dargestellt ist die Differenz der Ganglinien der StV3 und StV1 am Pegel Donauwörth (schwarz). Die Ganglinien in Abbildung 15 – und in den darauf folgenden – sind so auf der Zeitachse verschoben, dass der Scheitel der Differenzganglinie exakt auf $t = 0$ liegt. Somit kann auf der Zeitskala das Eintreffen der jeweiligen Scheitel relativ zum Scheitel der Vorabsenkungswelle abgelesen werden. Die Differenzganglinie zeigt zum einen um $t = 0$ die Vergrößerung des Abflusses durch die Vorabsenkung bedingt durch die Steuerung in StV3, zum anderen die Reduktion des Abflusses im Scheitelbereich (ca. 35 h bis 80 h). Des Weiteren enthält die Abbildung die Ganglinien der Zuflüsse Lech und Wörnitz (gestrichelte Linien). Der Vollständigkeit halber ist zudem die Ganglinie der Donau in Donauwörth bei StV3 dargestellt (blau durchgezogen).

Die Abbildung zeigt, dass der Scheitel der Wörnitz nicht zeitgleich mit der Vorabsenkungswelle der Donau eintrifft. Im Gegenteil, der Scheitel der Wörnitz trifft dann in die Donau, wenn gerade die Kappung der Steuerung wirkt (Differenzlinie im negativen Abflussbereich). Der Scheitel des Lechs hingegen trifft zusammen mit der abklingenden Vorabsenkungswelle ein.

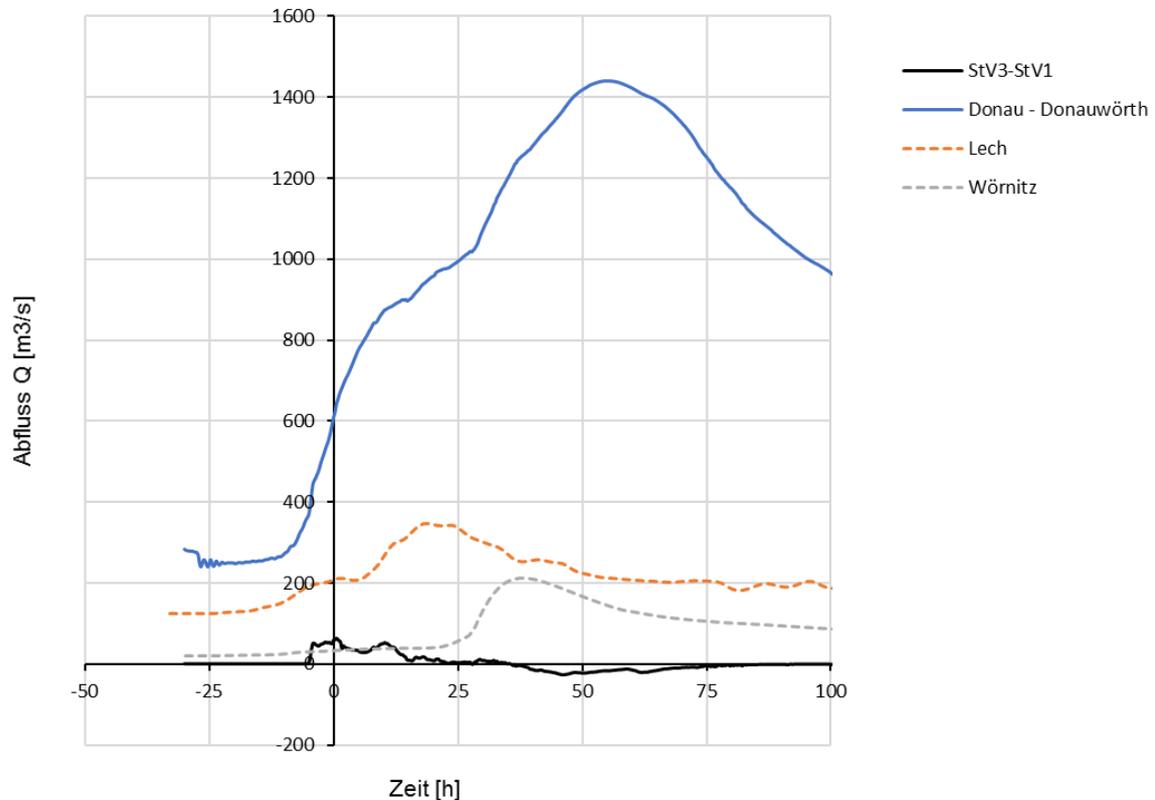


Abbildung 15: Zeitliche Analyse der Auswirkung der Vorabsenkung des ersten Donauabschnitts auf darunter folgende Zuflüsse

3.1.2 Donauwörth bis Kelheim

Für den zweiten Donauabschnitt werden die Auswirkungen der optimierten Steuerung auf die Zuflüsse Altmühl, Naab und Regen evaluiert. Analog zu Abschnitt 1 wird hier für Abschnitt 2 die zeitliche Überlagerung mit der Differenzwelle der StV3 und StV1 ausgewertet. Die Ergebnisse der Wellenüberlagerung, dargestellt in Abbildung 16, zeigen, dass Überlagerungen zu erwarten sind. Der Scheitel der Vorabsenkungswelle und der des Regen überlagern sich. Die Scheitel von Naab und Altmühl treffen kurz nach dem Scheitel der Vorabsenkungswelle in die Donau ein (Differenzlinie im positiven Abflussbereich). Analog zu Abschnitt 1 ist in der Abbildung die Donauganglinie am Ende des Abschnitts in Kelheim für StV3 dargestellt.

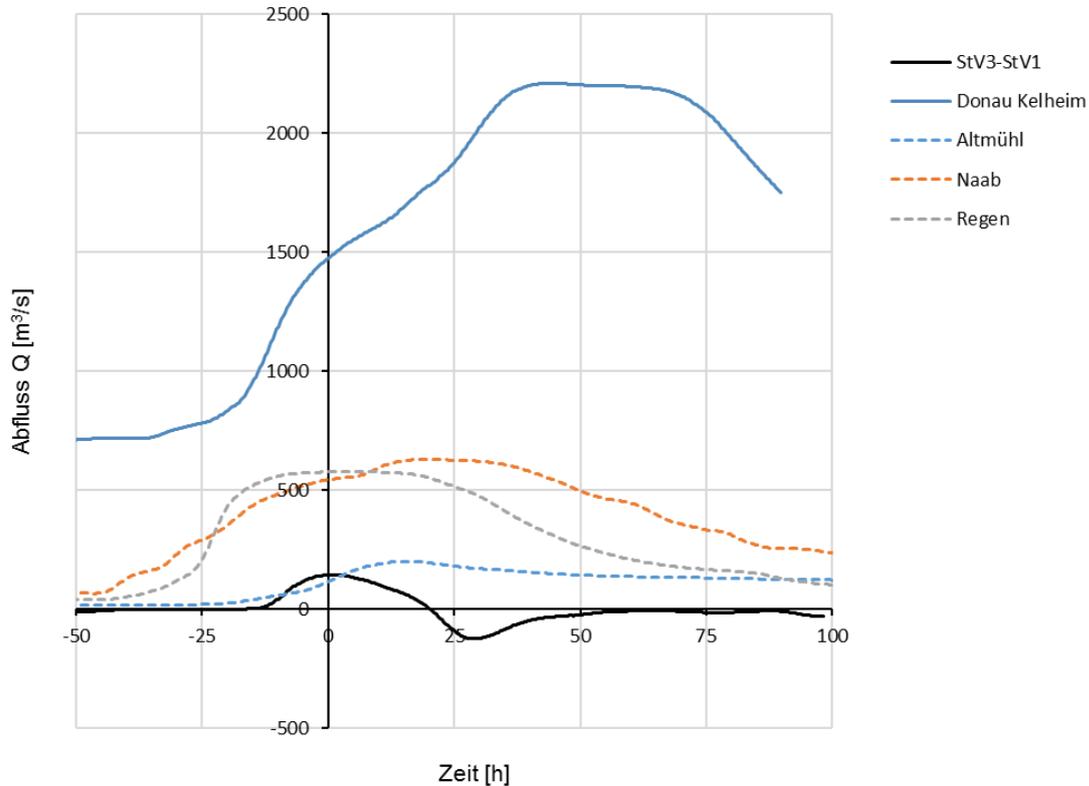


Abbildung 16: Zeitliche Analyse der Auswirkung der Vorabsenkung des zweiten Donauabschnitts auf darunter folgende Zuflüsse

3.1.3 Kelheim bis Straubing

Für den dritten Donauabschnitt wird die Auswirkung der Wellenüberlagerung der Differenzwelle der StV3 und StV1 am Modellauslauf Straubing mit der Isarwelle betrachtet. Da das hydrologische Szenario aus Abschnitt 3 auf dem Hochwasser von 2011 basiert, soll zunächst die Isarwelle von 2011 ausgewertet werden. Zudem sollen die Ergebnisse auf das Hochwasserereignis vom Mai/Juni 2013 übertragen werden. Dabei wird angenommen, dass die Vorabsenkungswelle, welche durch optimierte Steuerung auf den Donauscheitel entsteht, auch für das Ereignis 2013 mit der gleichen zeitlichen Differenz, wie im simulierten Jahr 2011, dem Donauscheitel vorausgeht. Die Überlegungen unterliegen zudem der Annahme, dass die Form der Vorabsenkungswelle auch für das Ereignis 2013 gilt. Beim Hochwasser 2013 spielte der extreme Abfluss des Inn eine entscheidende Rolle, weshalb für 2013 der Inn in die Betrachtung mit einbezogen werden soll.

Abbildung 17 zeigt die Wellenüberlagerung mit der Isarwelle für das Hochwasserereignis 2011. Die Isarwelle hat ein ausgeprägtes Scheitelplateau. Auch wenn der eigentliche Scheitel der Isar erst kurz nach dem Scheitel der Vorabsenkungswelle in der Donau eintrifft ($t = 15\text{h}$), ist eine negative Überlagerung der Vorabsenkungswelle mit der Isarwelle nicht auszuschließen.

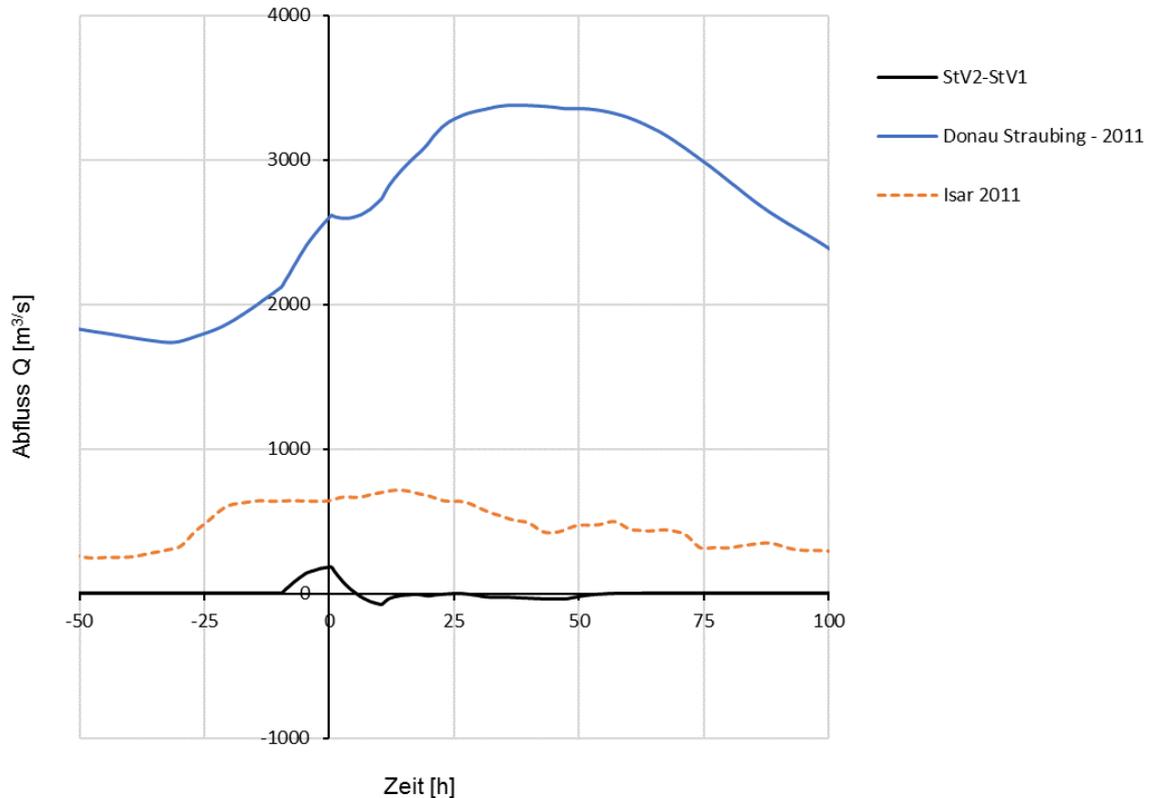


Abbildung 17: Zeitliche Analyse der Auswirkung der Vorabsenkung des ersten Donauabschnitts auf darunter folgende Zuflüsse (Ereignis 2011)

Die gleiche Auswertung wird abschließend für das Hochwasser 2013 unter Berücksichtigung der Innwelle durchgeführt (siehe Abbildung 18). 2013 wäre die Isarwelle erst nach Durchlaufen der Vorabsenkungswelle in die Donau eingetroffen. Anders sieht es bei Betrachtung des Inns aus. Der Scheitel des Inn trifft zeitgleich mit der Vorabsenkungswelle in der Donau ein, eine Vorabsenkung der Staustufen (wie in den Simulationen zum HW2011) hätte somit durch ungünstige Wellenüberlagerung die Hochwassersituation in Passau noch verschärft. Die Daten der Isar- und Innabflüsse stammen vom Gewässerkundlichen Dienst Bayern (GKD). Hinweis: Der Pegel Passau Ingling ist während des Hochwassers 2013 ausgefallen, daher liegt im Bereich des Scheitels eine Datenlücke vor. Auf Grundlage der im Wasserwirtschaftlichen Bericht über das Junihochwasser 2013 (LfU, 2014) vorgestellten Daten, wurde die Ganglinie vervollständigt.

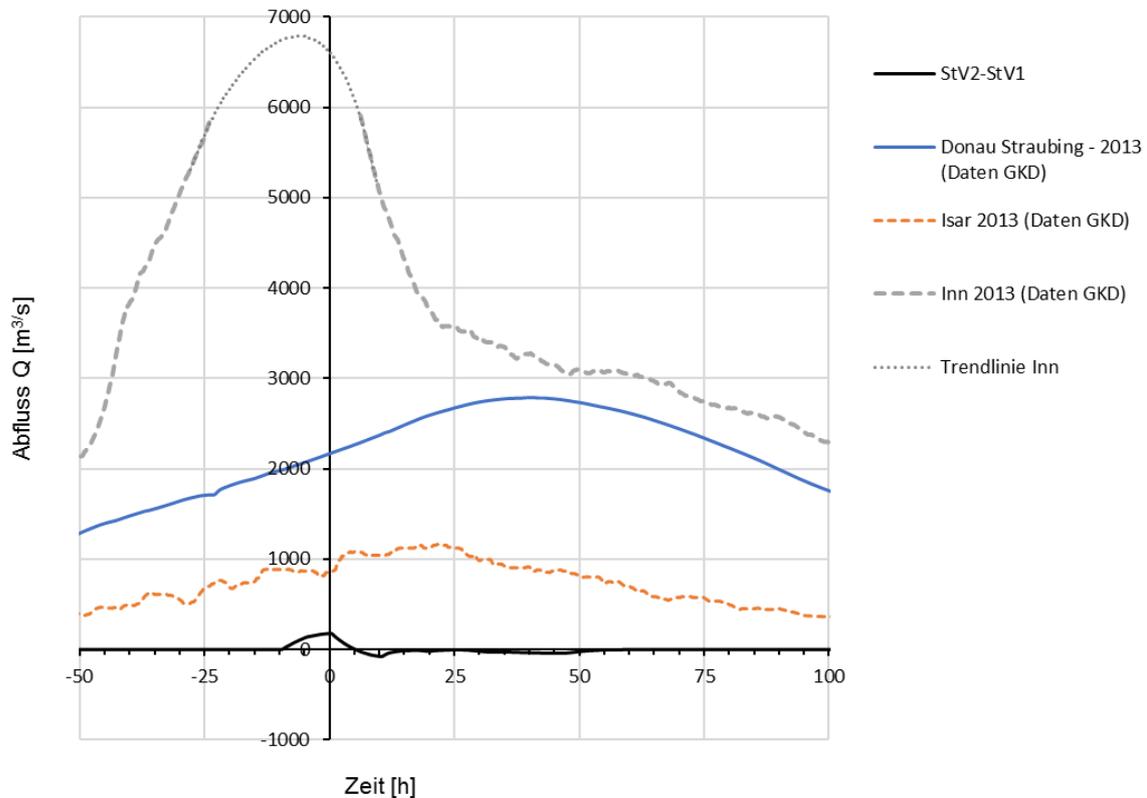


Abbildung 18: Zeitliche Analyse der Auswirkung der Vorabsenkung des ersten Donauabschnitts auf darunter folgende Zuflüsse (Ereignis 2013)

3.1.4 Fazit zur Auswertung der Wellenüberlagerung

Die Auswertung der Wellenüberlagerung zeigt, dass es durch Vorabsenkung durchaus zu Abflusserhöhungen in der Donau (und evtl. Rückstau in die Mündungsbereiche der Zuflüsse) kommen kann, da sich der Scheitel der Vorabsenkungswelle mit den Scheiteln seitlicher Zuflüsse überlagern kann. Es ist allerdings aufgrund der Komplexität des Flusssystemes nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage zu treffen. Jedes Ereignis ist unterschiedlich. Insgesamt betrachtet, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Situation flussabwärts einer Staustufe aufgrund von Steuerungsprozessen (Vorabsenkung und daraus generierten Wellen) verschärfen kann. Für Unterlieger negative Auswirkungen sollten stets vermieden werden.

3.2 Auswirkungen der Stauraumverlandung

Neben der Frage nach der Optimierung der Staustufensteuerung zur Hochwasserreduktion soll in dieser Studie auch untersucht werden, ob die Verlandung der Staustufen einen nachteiligen Effekt auf den Hochwasserabfluss hat. Hierfür wird der Ablauf einer Hochwasserwelle bei heutigem Sohlzustand mit dem bei ursprünglichem Sohlzustand – direkt nach Erstellung der Staustufe – verglichen. Die Simulationen werden exemplarisch für einen Stauraum je Donauabschnitt (Faimingen, Bertoldsheim und Geisling) durchgeführt.

3.2.1 Stauraum Faimingen

Datengrundlage für die Ursohle sind Querprofilmessungen aus den Jahren 1956/57 (vor Einstau). Da nur der Einfluss der Verlandung des eigentlichen Stauraums ausgewertet werden soll, werden nur Querprofile verwendet, die innerhalb des Stauraums liegen. Dadurch bleibt auch die Sohle in den Bereichen mit Ausleitungsstrecken in den Riedstrom unverändert, was eine Interpretation der Ergebnisse leichter macht. Die Kote der Stauhaltungsdämme soll nicht verändert werden, daher werden Anteile der Querprofile, die außerhalb des Stauraums liegen, nicht auf das Netz übertragen. Die Daten werden mittels linearer Interpolation auf das numerische Netz übertragen (Abbildung 19). Abbildung 20 zeigt Ausschnitte des numerischen Modells für die unterschiedlichen Sohlagen.

Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass die durchgeführten numerischen Simulationen keine Sedimentsimulationen enthalten; die Sohle bleibt während der Simulationen unverändert.

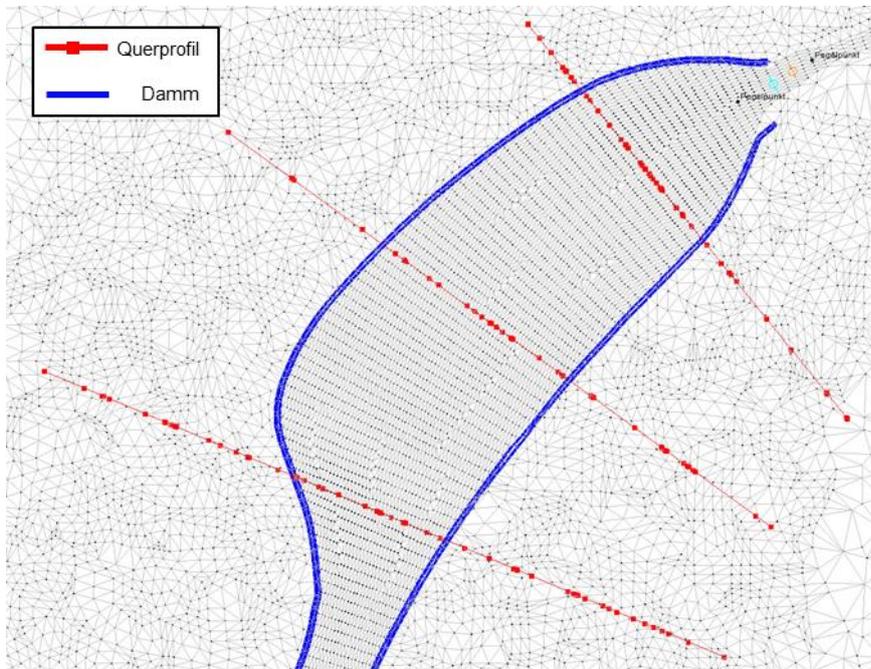


Abbildung 19: Draufsicht auf den Stauraum Faimingen

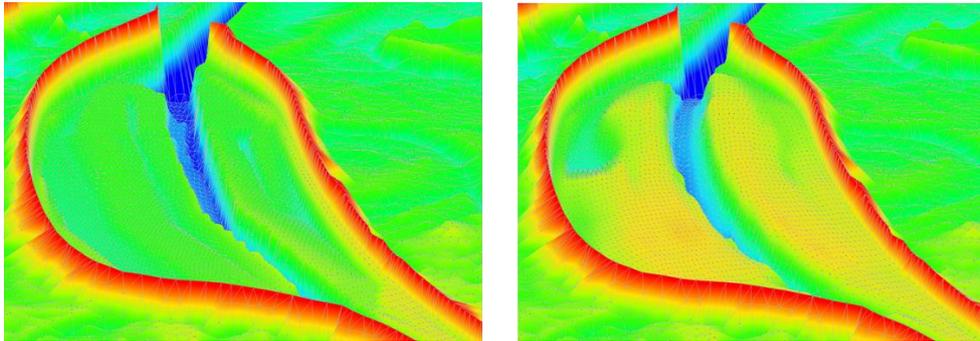


Abbildung 20: Links: Sohlzustand bei Urpeilung, rechts: Sohlzustand heute.

Für die Simulation mit der Ursohle wird das hydrologische Szenario HQ₁₀₀ in Kombination mit StV3 (also mit Vorabsenkung und Wiederaufstau im Bereich des Hochwasserscheitels) verwendet. Die resultierenden Ganglinien werden dementsprechend mit den Ergebnissen der StV3 bei heutiger Sohlage verglichen.

Die Auswertung der Abflussganglinie am Pegel Donauwörth (Abbildung 21) zeigt, dass durch Verwendung der Ursohle keine merkliche Veränderung erzielt wird.

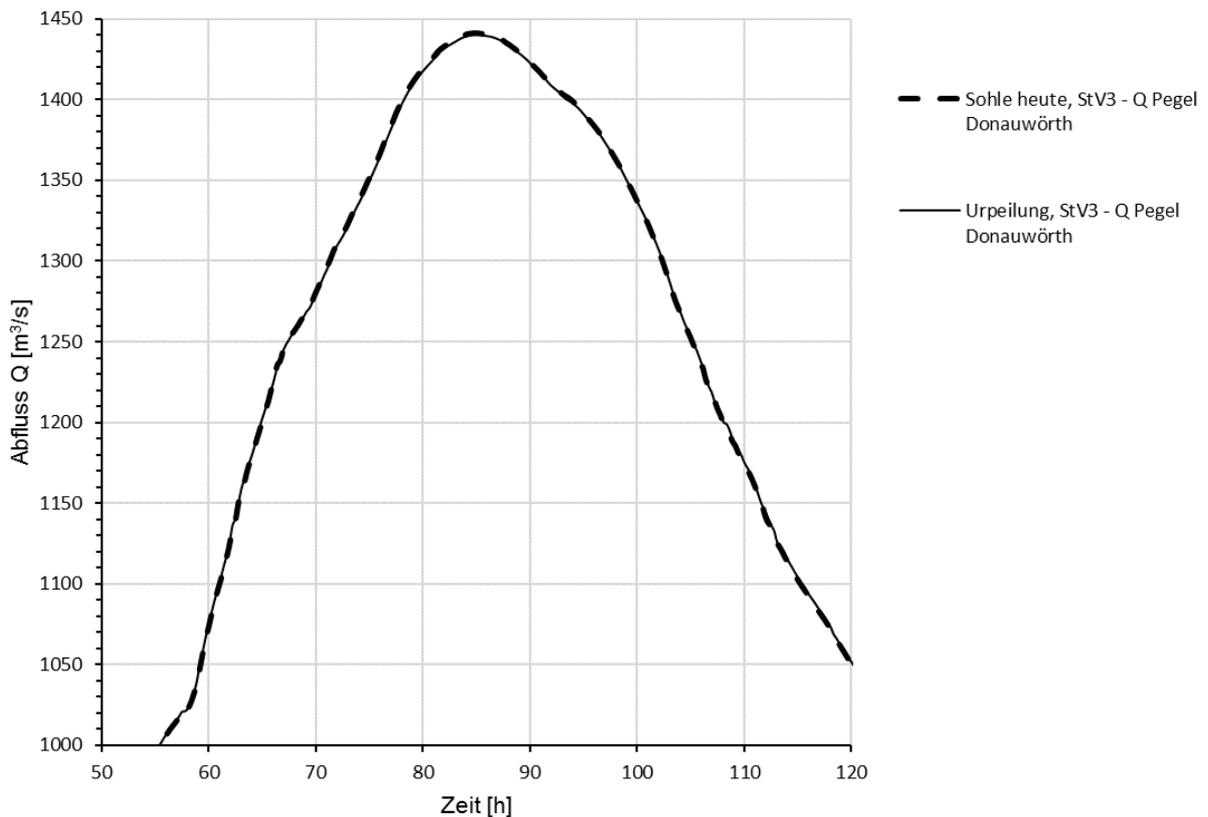


Abbildung 21: Detail des Scheitels der Abflussganglinie am Pegel Donauwörth – Vergleich StV3 bei Urpeilung und heutiger Sohlage

3.2.2 Stauraum Bertoldsheim

Bei der Generierung der Ursohle des Stauraums Bertoldsheim wird ebenso vorgegangen wie unter 3.2.1 für die Staustufe Faimingen beschrieben. Auch bei Bertoldsheim wird darauf geachtet, die Sohle im Bereich der oberhalb des Stauraums liegenden Ausleitungsstrecken unberührt zu lassen, um somit die Wirkung der Sohländerung besser interpretieren zu können. Die Querprofildaten stammen aus dem Jahr 1967. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen Ausschnitte aus dem numerischen Netz.

Für die Simulation wird das hydrologische Szenario HQ₁₀₀ in Kombination mit StV3 verwendet. Es zeigt sich, dass die Änderung der Sohlage auf den ursprünglichen Zustand keinen Einfluss auf die Abflussganglinie am Pegel Kelheim hat (siehe Abbildung 24).

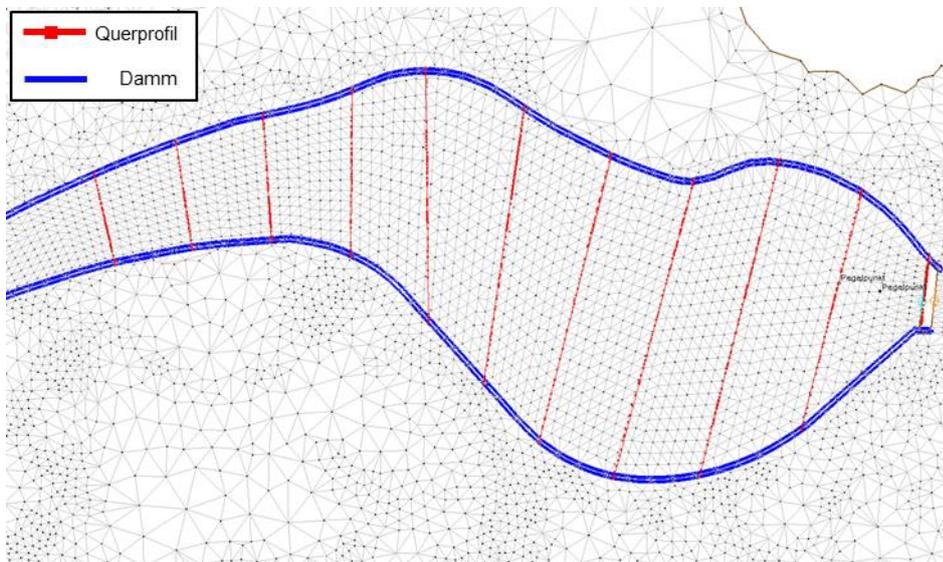


Abbildung 22: Draufsicht auf den Stauraum Bertoldsheim

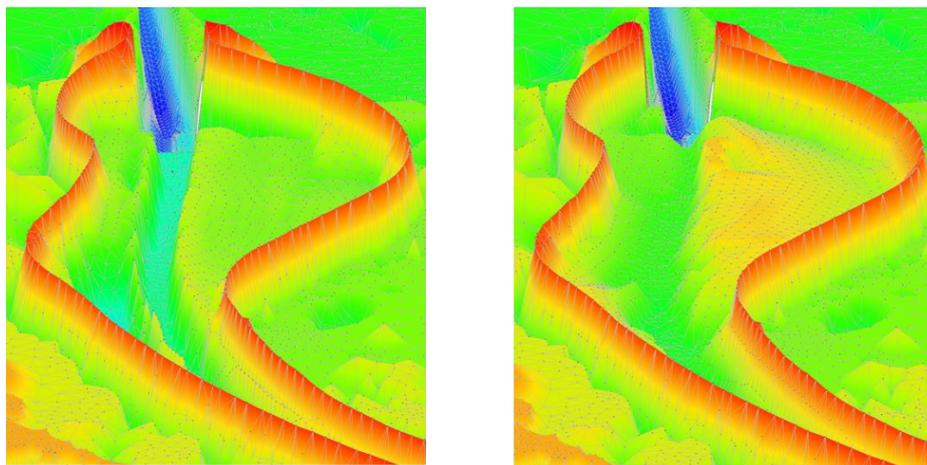


Abbildung 23: Links: Sohlzustand bei Urpeilung. Rechts: Sohlzustand heute

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

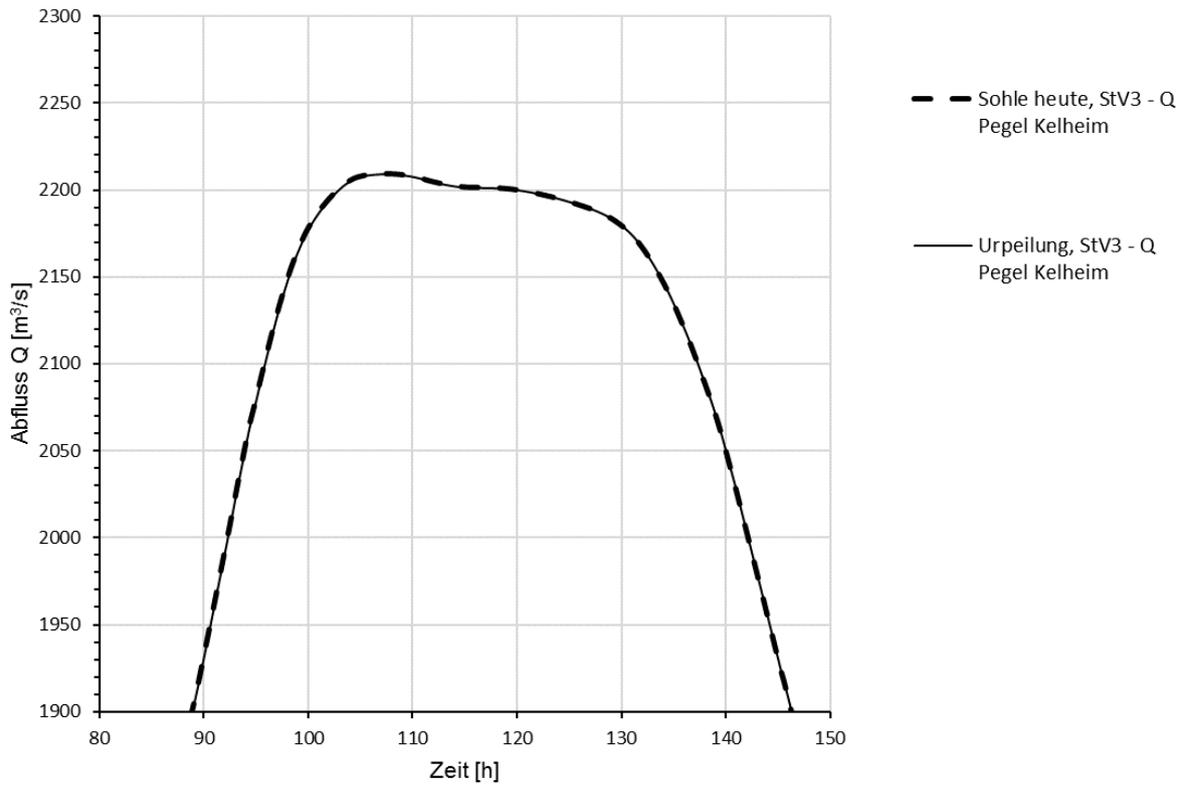


Abbildung 24: Detail des Scheitels der Abflussganglinie am Pegel Kelheim – Vergleich StV3 bei Urpeilung und heutiger Sohlage

3.2.3 Stauraum Geisling

Im Gegensatz zu den Staustufen Faimingen und Bertoldsheim handelt es sich bei Geisling um eine Flusstaustufe, die nicht als Speicherbecken für den Schwellbetrieb ausgelegt ist. Zudem befinden sich flussaufwärts der Staustufe keine Ausleitungsstrecken ins Vorland. Daher werden alle verfügbaren Querprofile in das Ursohlennetz einbezogen. Die Querprofilaten stammen aus dem Jahr 1986. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen Ausschnitte aus dem numerischen Netz.

Für die Simulation wird das hydrologische Szenario HQ₁₀₀ in Kombination mit StV2 (StV2 und StV3 für Abschnitt Kelheim bis Straubing identisch) verwendet. Abbildung 27 zeigt, dass durch Verwenden der Ursohle keine nennenswerte Änderung der Abflussganglinie am Modellauslauf in Straubing erzielt werden kann.

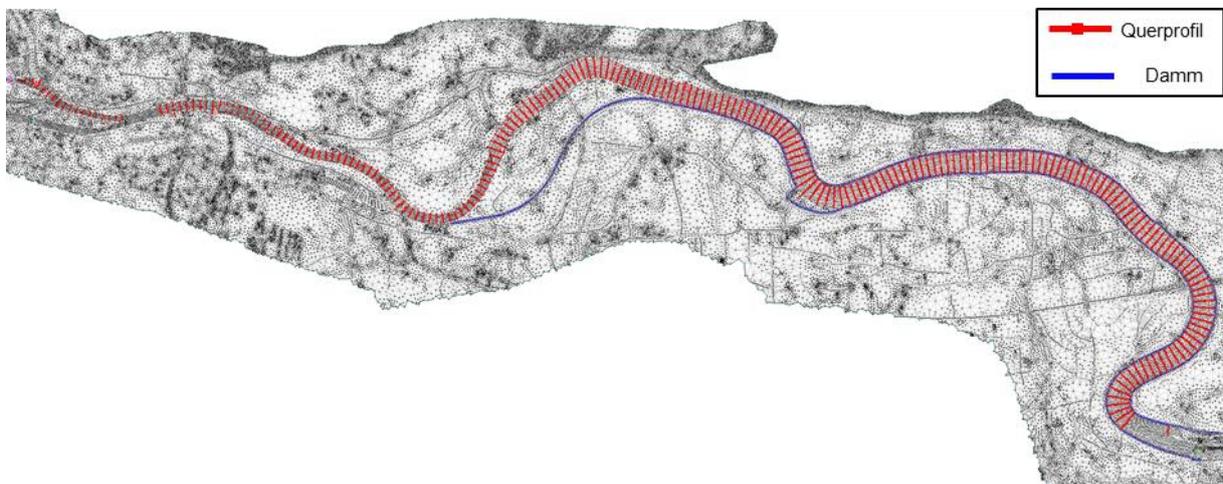


Abbildung 25: Draufsicht auf den Stauraum Geisling

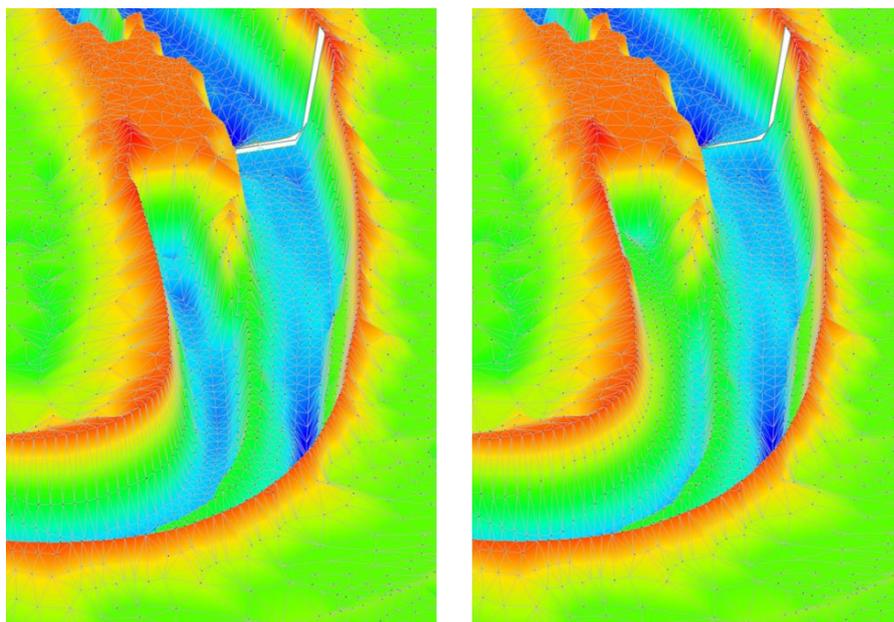


Abbildung 26: Links: Sohlzustand bei Urpeilung. Rechts: Sohlzustand heute

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

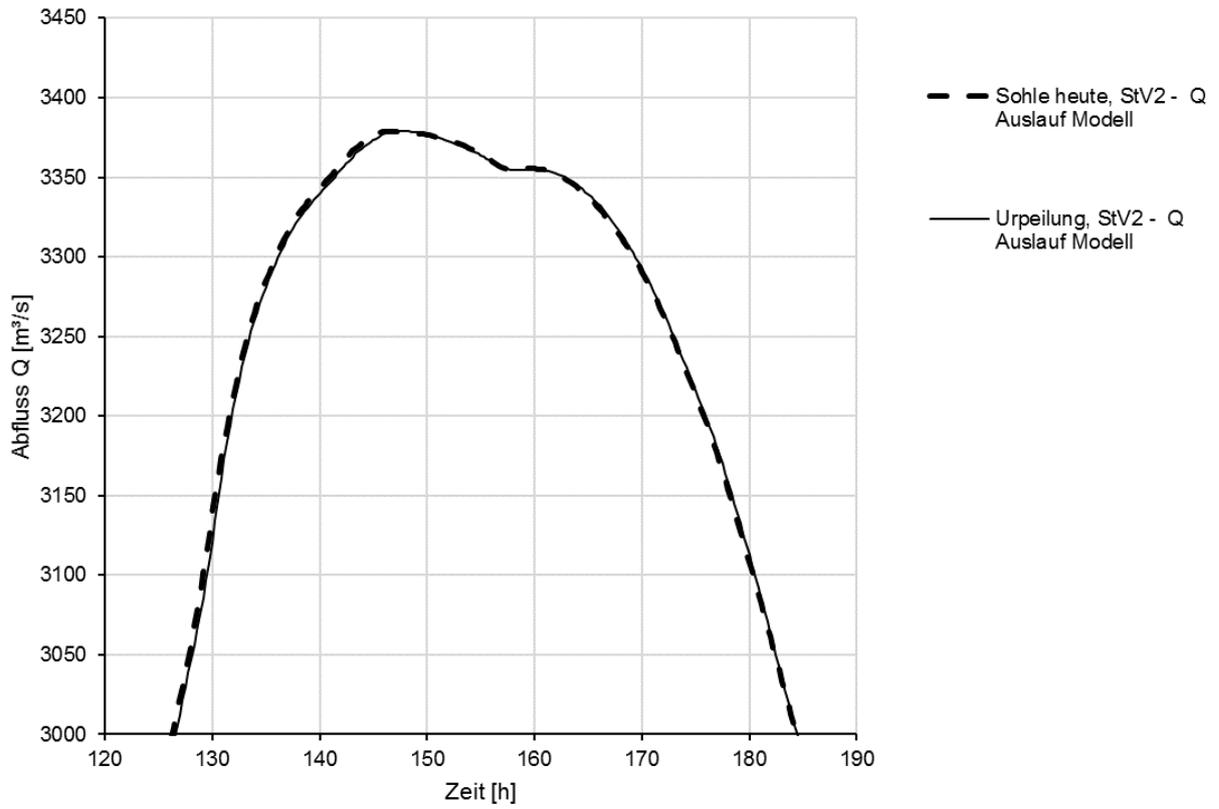


Abbildung 27: Detail des Scheitels der Abflussganglinie am Modellauslauf Straubing – Vergleich StV3 bei Urpeilung und heutiger Sohlage

4 Einschränkungen des theoretischen optimalen Potenzials

Die in den vorherigen Kapiteln 2 und 3 vorgestellten Ergebnisse beschreiben ein rechnerisch vorhandenes theoretisches Potenzial der Scheitelkappung von Hochwasserwellen an der Donau insbesondere durch Vorabsenkung der Stauräume. Dieses Potenzial ist jedoch zu relativieren bzw. ist bedingt durch betriebliche Einschränkungen nur teilweise oder nur verbunden mit baulichen Maßnahmen und Reduzierung der Sicherheiten nutzbar, wie im Folgenden erläutert wird.

Folgende Randbedingungen können zu erheblichen Abweichungen zwischen theoretischem und realisierbarem Potenzial führen und sind nur teilweise durch begleitende Maßnahmen zu beeinflussen:

- An Stauanlagen sind regelmäßig Revisionen durchzuführen, wodurch einzelne Wehrfelder für eine Wasserabführung nicht zur Verfügung stehen. Daher muss davon ausgegangen werden, dass nicht alle Staustufen wie gewünscht gesteuert werden können. Ebenso kann es durch nicht vorhersehbare Störfälle (z. B. Verklausung) zu Ausfall von Wehrfeldern kommen. Hinzu kommt, dass eine Revision nicht immer planbar ist und oft mehrere Monate andauert. Dadurch vergrößert sich die Unsicherheit. Die simulierte Bewirtschaftung entfaltet ihre volle Wirkung jedoch nur dann, wenn alle Staustufen wie angesetzt (d. h. unter der Annahme, dass alle Wehrfelder uneingeschränkt betrieben werden können) gesteuert werden können. Jegliche Einschränkungen behindern die Funktionalität und führen hinsichtlich des Kappungspotenzials zu Einbußen.
- Durch den Vergleich der verschiedenen Szenarien HQ_{100} und $HQ_{100+15\%}$ kann gezeigt werden, dass mit zunehmender Größe der Hochwasserereignisse das Rückhaltepotenzial im Allgemeinen abnimmt, da mit zunehmendem Abfluss bzw. Wasserstand das im Stauraum für eine Scheitelkappung zur Verfügung stehende Volumen, immer kleiner wird. Zu diesem Ergebnis ist auch die Potenzialstudie der Task Force Donau (2016) gekommen, in der der Themenschwerpunkt „Hochwasserspitzendämpfung durch Vorabsenkung“ behandelt wurde. Gerade für die sehr großen Hochwasserereignisse deutlich über HQ_{100} ist aber ein verringertes Potenzial ungünstig. Im Gegensatz hierzu kann der Retentionsraum von Flutpoldern bis zum gewünschten Flutungszeitpunkt in vollem Umfang freigehalten werden.
- Bei großen Hochwasserereignissen, die ein HQ_{100} überschreiten, sind wegen der i.d.R. geringen Differenz zwischen Ober- und Unterwasser, nur noch sehr reduzierte Möglichkeiten zur optimierten Steuerung von Staustufen vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass es nicht möglich ist, die Anlagen gezielt zur Vermeidung von Überlastfällen an unterhalb liegenden Hochwasserschutzanlagen einzusetzen und gleichzeitig die Sicherheit der Anlage vollumfänglich zu garantieren.
- Die hier vorgestellte Potenzialuntersuchung beinhaltet keine Sedimentsimulationen. Bedingt durch die in der optimierten Wehrsteuerung implementierten Vorabsenkung

kann jedoch Sedimenttransport stattfinden, da bei niedrigem Wasserstand plötzlich stark erhöhter Abfluss stattfindet (entspricht einer Stauraumpülung). Durch Sedimenttransport werden auch die Wasserspiegellagen beeinflusst. Zudem muss geprüft werden, ob – bedingt durch Sedimenttransport – eine Beschränkung der Vorabsenkung aus ökologischen Gründen (Auswirkungen auf Flora und Fauna) erfolgen muss. Dadurch verringert sich ggf. das zur Verfügung stehende Kappungsvolumen und somit auch das Potenzial. Um den Einfluss von Sedimenttransport auf das Scheitelkappungspotenzial bewerten zu können, müssten Sedimentbetrachtungen durchgeführt werden. Des Weiteren sollte geprüft werden, ob – bedingt durch Vorabsenkung – Schäden durch Auskolkung zu erwarten sind. Auch dieser Gesichtspunkt kann eine Beschränkung der Vorabsenkung und somit eine Verringerung des Potenzials bedeuten.

- Die Vorhersageunsicherheit von Abflüssen beeinflusst das Potenzial des Hochwasserrückhalts durch Scheitelkappung grundlegend. Durch ungenaue Abflussvorhersagen kann es zu falschen Wehrsteuerungen kommen, was wiederum die Scheitelkappung negativ beeinflusst. Zum einen kann es passieren, dass Vorabsenkziele nicht erreicht werden und somit nicht das gewünschte Volumen zur Verfügung steht. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass durch ungenaue Prognosen der Aufstau auf Stauziel bzw. Höchststau zu spät erfolgt und der Scheitel somit unvollständig oder gar nicht gekappt wird. Die Gründe für Vorhersageunsicherheiten sind vielfältig (Unsicherheiten der Datengrundlage, Messunsicherheiten, Modellfehler etc.) und beginnen bereits bei der Niederschlagsvorhersage. Mit steigendem Prognosehorizont steigt die Unsicherheit der Abflussprognose. Zwar gelten dieselben Unsicherheiten auch für die Flutpolder, allerdings fallen diese bei der Betrachtung der Flutpolder weniger ins Gewicht, da das zur Verfügung stehende Volumen das an Stauanlagen um ein Vielfaches übersteigt und außerdem ein Flutpolder bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme freigehalten werden kann. Im Gegensatz dazu muss das Volumen an Stauanlagen erst durch Vorabsenkung geschaffen werden, wodurch sich Beeinflussungszeiten verlängern und Prognosegenauigkeiten verringern.
- Vorabsenkungswellen können sich mit seitlichen Zuflüssen überlagern. Dadurch kann sich die Hochwassersituation für Unterlieger verschärfen. Die Komplexität des Flusssystems lässt es jedoch nicht zu, eine allgemeingültige Aussage darüber zu treffen, ob es zu einer Überlagerung kommt. Daher muss im Zweifel auf eine Vorabsenkung verzichtet werden.

Aus betrieblicher Sicht führen die nachfolgenden Punkte zu Einschränkungen, die ohne zusätzliche bauliche Maßnahmen das Potenzial verringern:

- In der Praxis muss der laufende Betrieb der Staustufen gewährleistet werden. Sicherheitskonzepte einiger Anlagen sehen vor, im Hochwasserfall die Turbinen so lange wie möglich für die Eigenstromversorgung zu betreiben. Durch Vorabsenkung wird den Anlagen frühzeitig Fallhöhe genommen, mit der Folge, dass die

Eigenstromversorgung nicht mehr sichergestellt werden kann und die Notversorgung frühzeitig beginnen muss. Für mehr Redundanz müssen die Anlagen, die nur für das Bahnnetz Strom produzieren, an das öffentliche Netz angegliedert oder andere Notversorgungen eingerichtet werden. Andernfalls kann die optimierte Steuerung nicht realisiert werden.

- Um die Sicherheit für die Schifffahrt zu gewährleisten können durch eine geänderte Staustufensteuerung betriebliche Einschränkungen für die Schifffahrt entstehen. Eine Vorabsenkung hat zur Folge, dass Schiffe – bedingt durch niedrige Wasserstände – frühzeitig einen Liegehafen aufsuchen müssen. Dies führt einerseits zu finanziellen Einbußen, andererseits beschränkt es die Realisierbarkeit der Staustufensteuerung. Mit der geänderten Staustufensteuerung gehen geänderte Wasserspiegellagen einher. Die Liegehäfen müssen daher hinsichtlich minimaler Wasserspiegellagen überprüft werden. Gegebenenfalls sind bauliche Maßnahmen zur Ertüchtigung notwendig.
- Bei Auf- und Abstauvorgängen sind die entsprechenden Standsicherheitsnachweise der Deiche und Dämme zu erbringen. Sollte dabei festgestellt werden, dass bei einzelnen Stauräumen die Standsicherheit nicht gewährleistet ist, so können diese nicht, wie in der vorliegenden Studie angenommen, auf den Hochwasserrückhalt optimiert betrieben werden. Dadurch verringert sich das insgesamt erreichbare Rückhaltepotenzial bzw. muss einer Minderung des Potenzials durch bauliche Maßnahmen entgegengewirkt werden. Ebenso muss der Einfluss dynamischer Stauziele auf Massivbauwerke, Antriebsorgane und Stahlwasserbau geprüft werden.
- Die Implementierung einer optimierten Wehrsteuerung in die an den Staustufen vorhandene Steuerungsautomatik muss gesondert auf Machbarkeit geprüft werden, da sie sich von den jetzigen Vorgaben aus den Bescheiden unterscheidet. Des Weiteren müssen die Regelungen über das Verhalten in Extremfällen in den Betriebsvorschriften aktualisiert werden.

5 Fazit zu den Staustufen-Untersuchungen

Die vertiefte Wirkungsanalyse hat gezeigt, dass durch eine geänderte Bewirtschaftung der Staustufen im Hochwasserfall mit Vorabsenkung lediglich ein geringes theoretisches Potenzial für eine Scheitelkappung besteht. Tabelle 9 fasst die Ergebnisse der unterschiedlichen Steuerungsvarianten zusammen.

Tabelle 9: Mit den unterschiedlichen Steuerungsvarianten der Staustufen theoretisch erreichbare Scheitelkappung in den untersuchten Donauabschnitten

	NEUL-DONW Pegel Donauwörth	DONW-KELH Pegel Kelheim Pegel Ingolstadt	KELH-STRA Pegel Straubing
StV1-StV2 HQ ₁₀₀	9 m ³ /s 0,6 %	19 m ³ /s 0,8 %	33 m ³ /s 1 %
		keine Änderung -	
StV1-StV3 HQ ₁₀₀	17 m ³ /s 1,2 %	40 m ³ /s 1,7 % 51 m ³ /s 2,2 %	33 m ³ /s 1 % entspricht StV1-StV2
StV1-StV3 HQ ₁₀₀ +15%	30 m ³ /s* 1,8 %*	31 m ³ /s 1,2 % 28 m ³ /s 1,1 %	20 m ³ /s 0,6 %

*Hinweis: Hier ergibt sich für das HQ₁₀₀+15% verglichen mit HQ₁₀₀ ein größeres Kappungspotenzial, da die Wellenform im Scheitel eine schmalere Spitze aufweist (vgl. Kapitel. 2.3.1)

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Ein rechnerisch nachgewiesenes theoretisches Potenzial der Scheitelkappung ist vorhanden und unterscheidet sich in seiner Höhe je nach Donauabschnitt, Staustufe, Steuerungsvariante und hydrologischem Szenario.
- Die Sohländerungen seit Einstau der Staustufen haben keinen Einfluss auf den Hochwasserablauf.
- Einschränkungen dieses theoretisch optimalen Potenzials ergeben sich aber durch mehrere Faktoren (z. B. Ausfall von Wehrfeldern infolge Revision oder Verklausung, Verschärfung der Hochwassersituation unterhalb durch Überlagerungen der Vorabsenkungswelle mit seitlichen Zuflüssen).

Eine geänderte Bewirtschaftung der Staustufen im Hochwasserfall mit Vorabsenkung kann somit zu einer gewissen Entlastung der Hochwassersituation beitragen, die im Vergleich zur Wirkung von Flutpoldern gering ist. Entscheidend ist auch, dass das theoretische Potenzial an den Staustufen nicht immer nutzbar ist, wodurch eine geänderte Staustufenbewirtschaftung kein planbares Element des Hochwasserschutzes darstellen kann. Sie sollte eher als eine

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

zusätzliche Möglichkeit gesehen werden, die ergänzend und im Einzelfall durch Behörden und Krisenstab veranlasst werden kann, unter Beachtung aller möglichen, negativen Auswirkungen einer solchen Steuerung. Insbesondere muss eine Verschärfung der Hochwassergefährdung für Unterlieger in jedem Fall und mit Sicherheit ausgeschlossen werden können.

Schlussbericht Vertiefte Wirkungsanalyse, Juli 2017

Literaturverzeichnis

Asenkerschbaumer, M., Skublics, D. und Rutschmann, P. (2012): Verzögerung und Abschätzung von Hochwasserwellen entlang der bayerischen Donau. München: TUM.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2014): Junihochwasser 2013 Wasserwirtschaftlicher Bericht. 2. überarbeitete Auflage.

Task Force Donau (2016): Hochwasserspitzen-Dämpfung durch Vorabsenkung Endbericht. Wien. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Anhang

A1 Übersicht der Bescheidsangaben

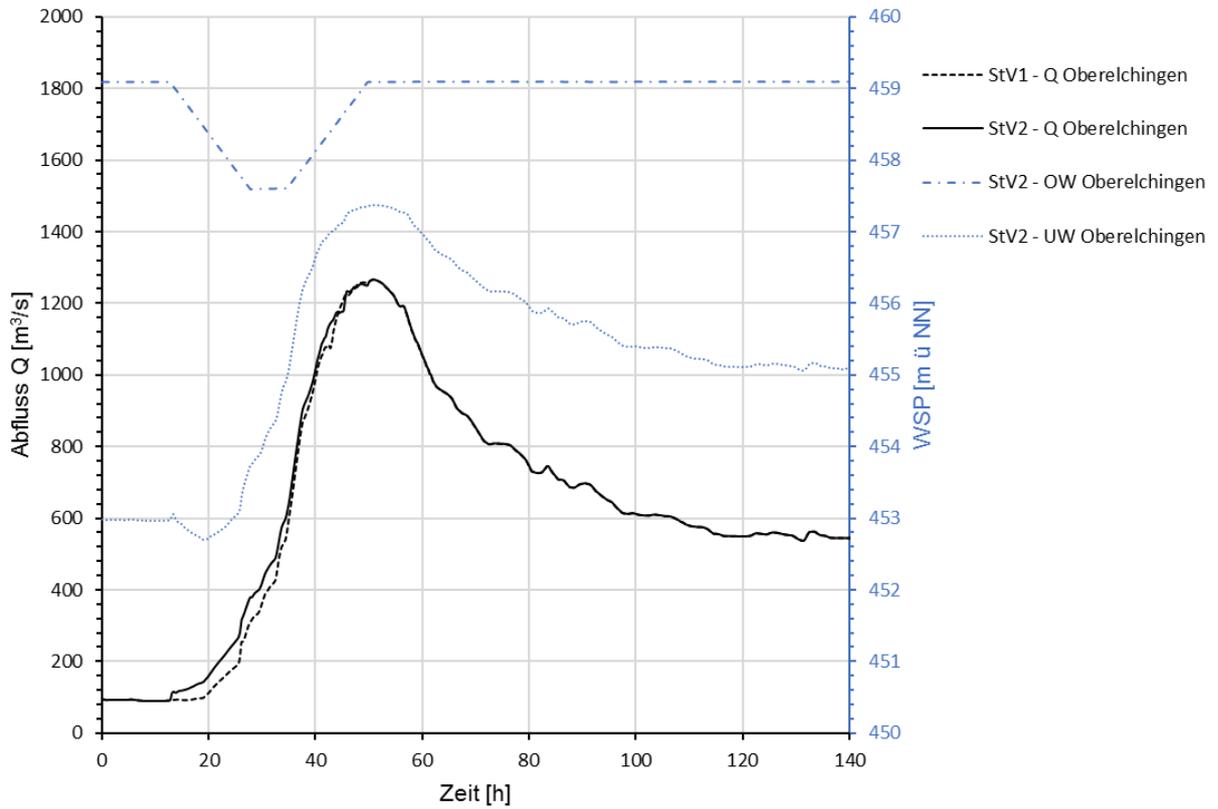
	Vorabsenkziel/ minimales Stauziel	Normalstau/ Stauziel gem. Bescheid	Höchststau/ Überstau gem. Bescheid
Staustufe	[m ü NN] [m³/s]	[m ü NN] [m³/s]	[m ü NN] [m³/s]
Oberelchingen		459,09	
Leipheim		452,62	
Günzburg		446,11	
Offingen		439,62	
Gundelfingen		434,62	
Faimingen		429,61 Q<700	430,31 Q>700 Q<700
Dillingen		423,00 Q<750	423,50 Q>750 Q<750
Höchstädt		417,45 Q<750	417,70 Q>750 Q<750
Schwenningen		410,00	
Donauwörth		403,70	
Bertoldsheim	391,50 500<Q<960	391,80 Q<500	392,00 Q>960 Q<700
Bittenbrunn		384,50 Q<1400	385,00 Q>1400 Q<1100
Bergheim		377,00 Q<1100	377,50 Q>1100 Q<700
Ingolstadt		369,50 Q<1400	370,00 Q>1400 Q<1530
Vohburg		361,50	
Bad Abbach		338,20	
Regensburg		332,50	
Geisling		327,30	
Straubing		320,00	

A2 Berechnungsergebnisse (Staustufen)

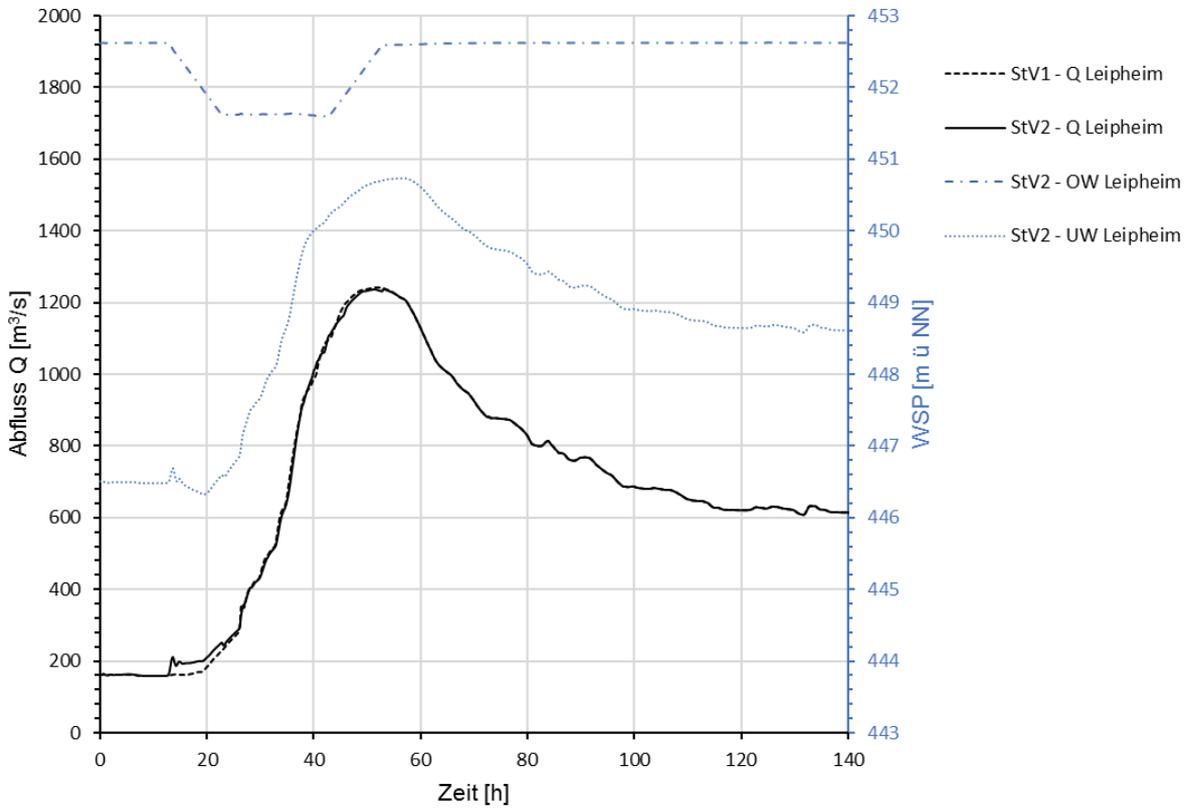
A2.1 Vergleich StV1-StV2

A2.1.1 Abschnitt NEUL-DONW StV1-StV2

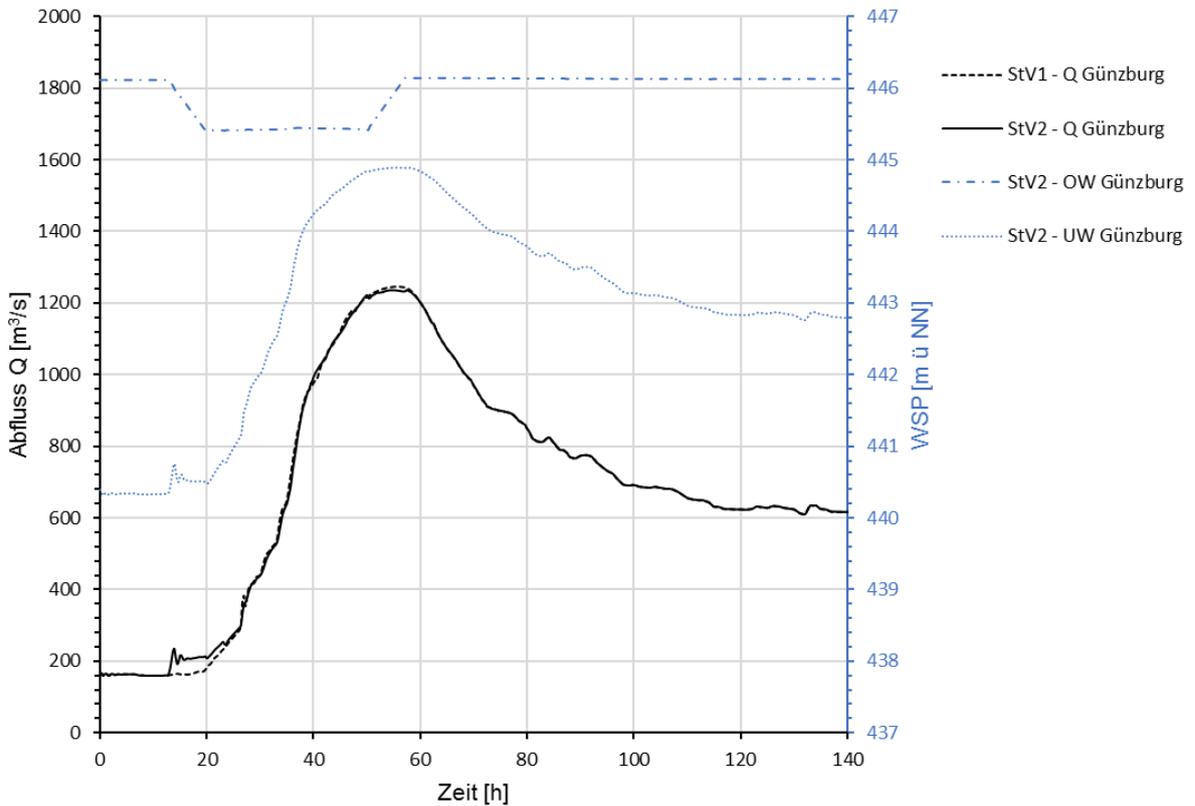
Oberelchingen StV1-StV2



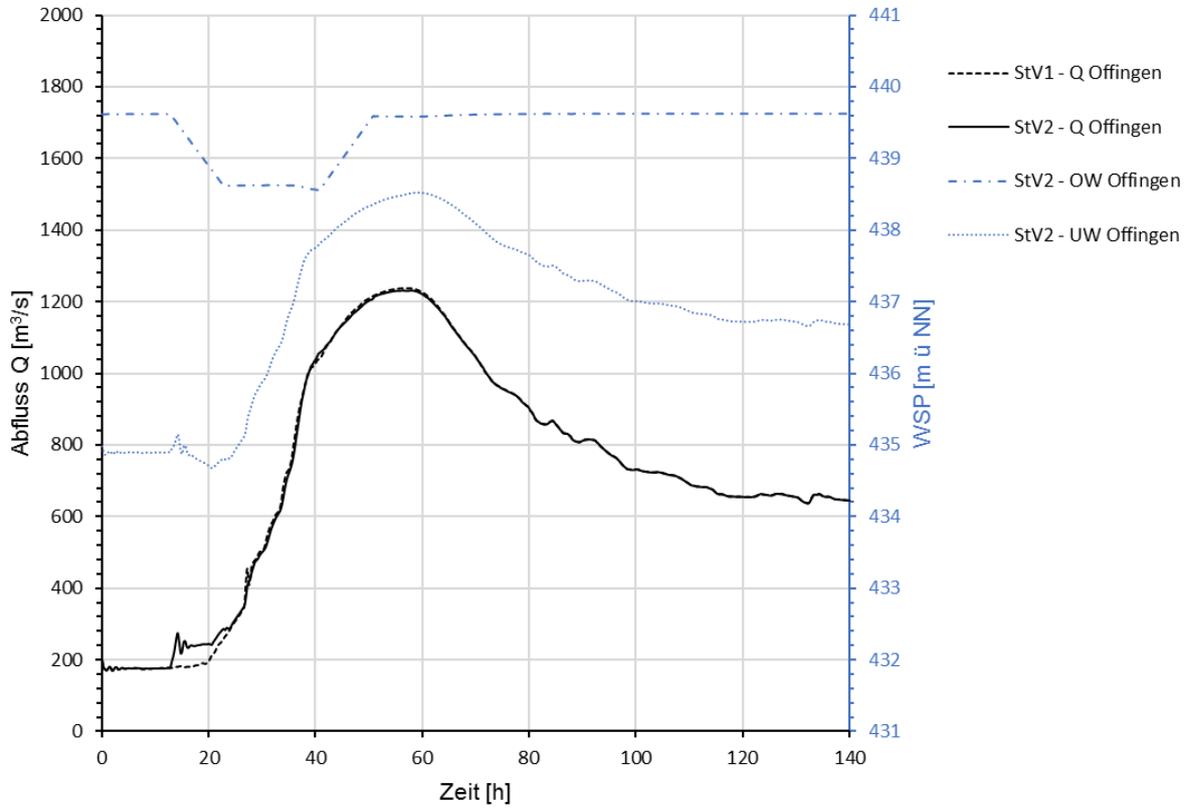
Leipheim StV1-StV2



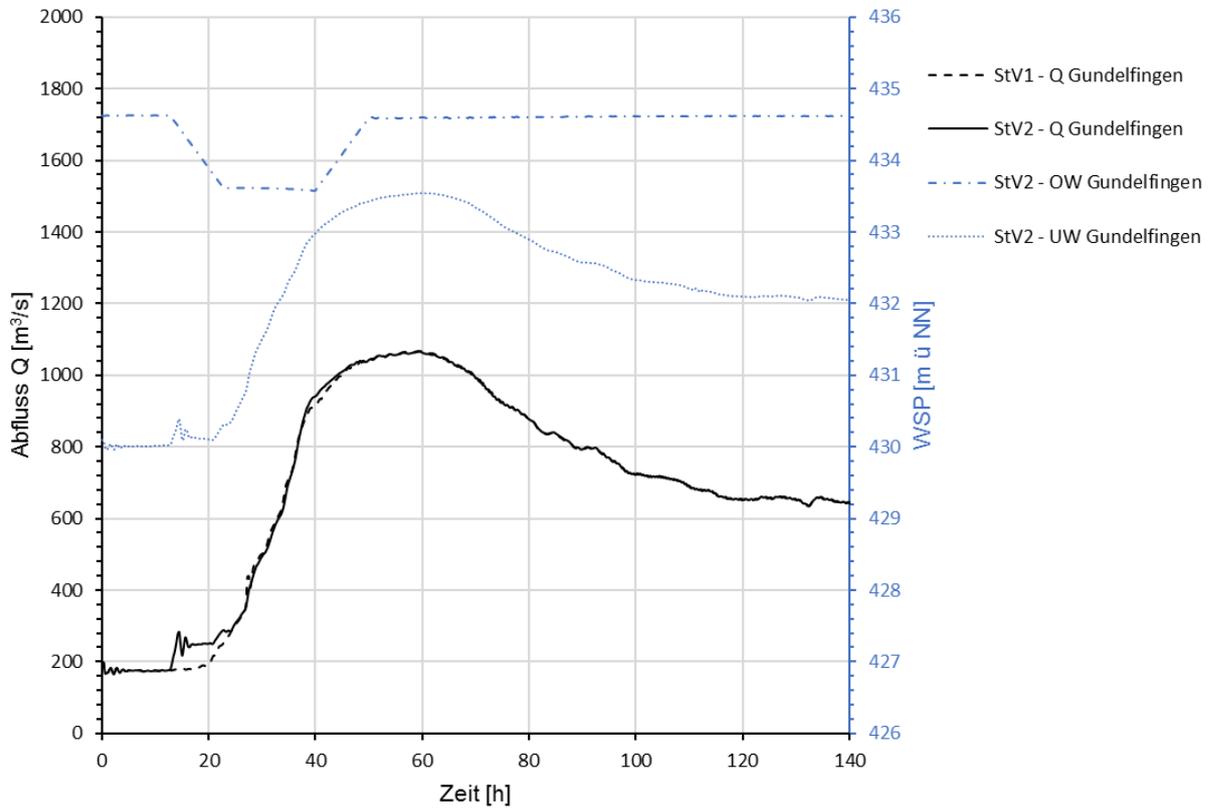
Günzburg StV1-StV2



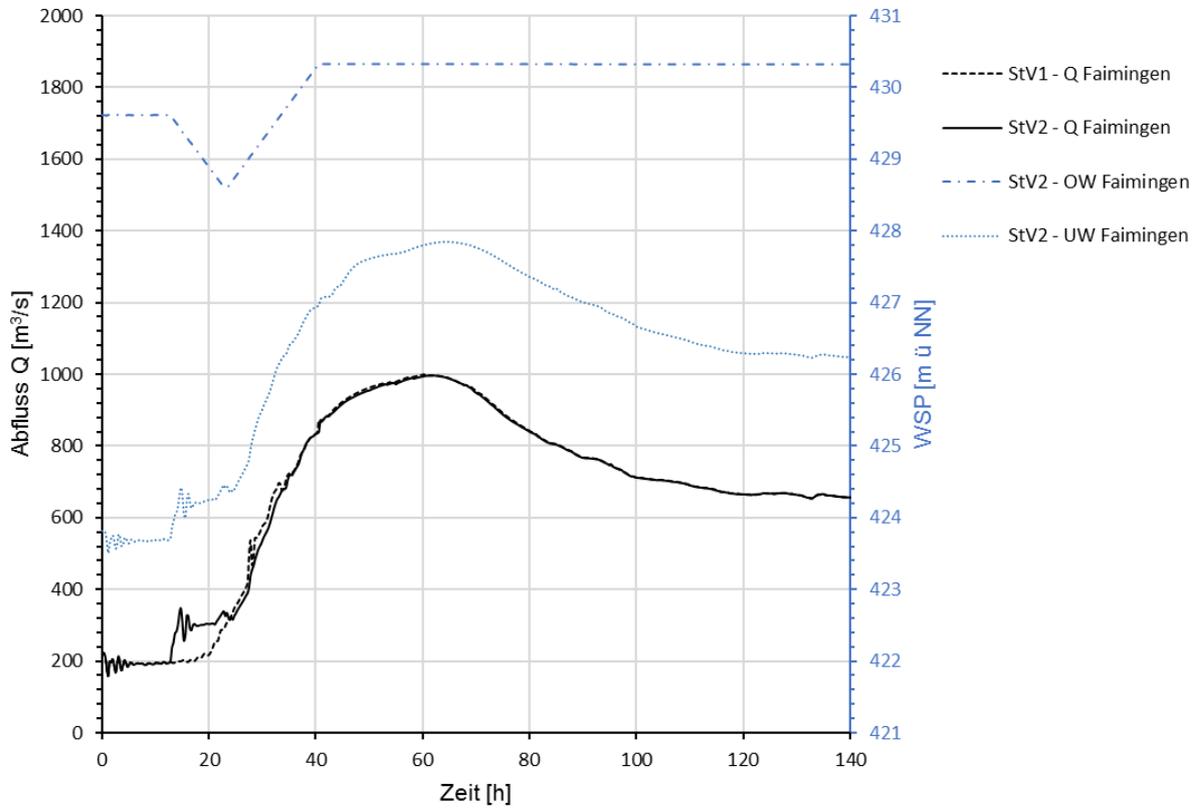
Offingen StV1-StV2



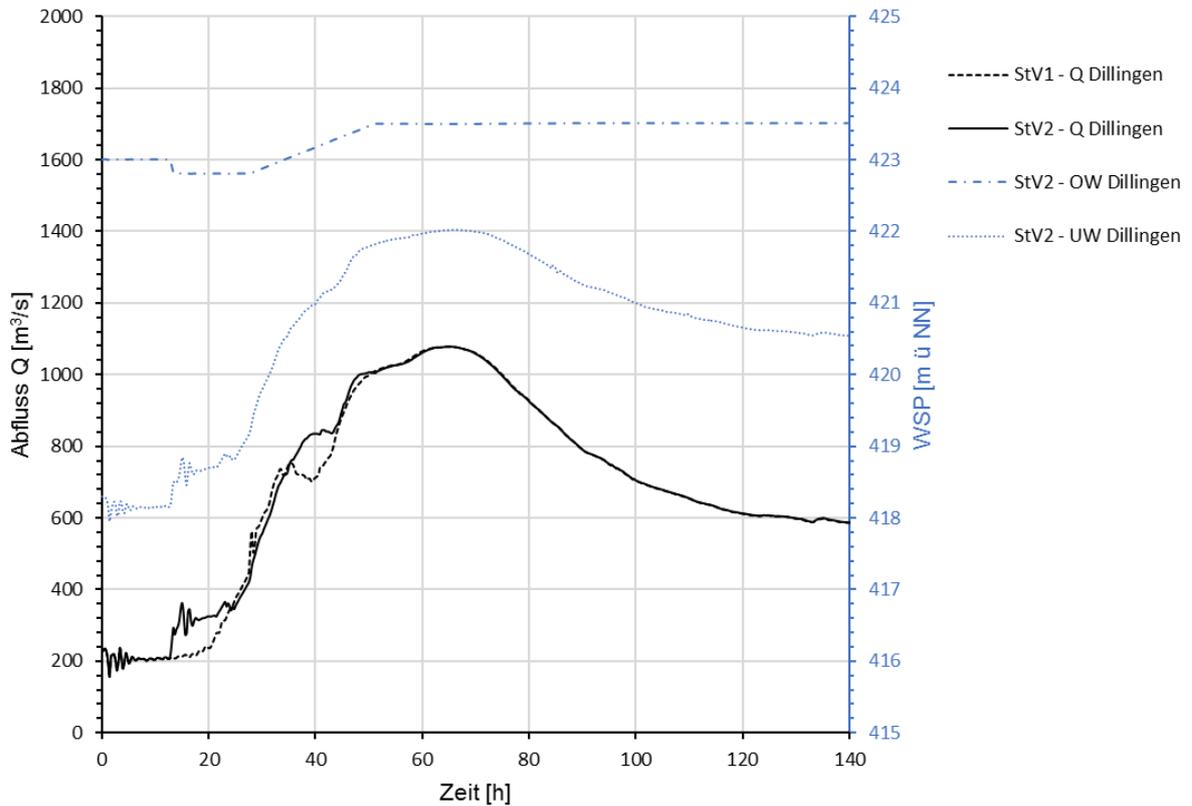
Gundelfingen StV1-StV2



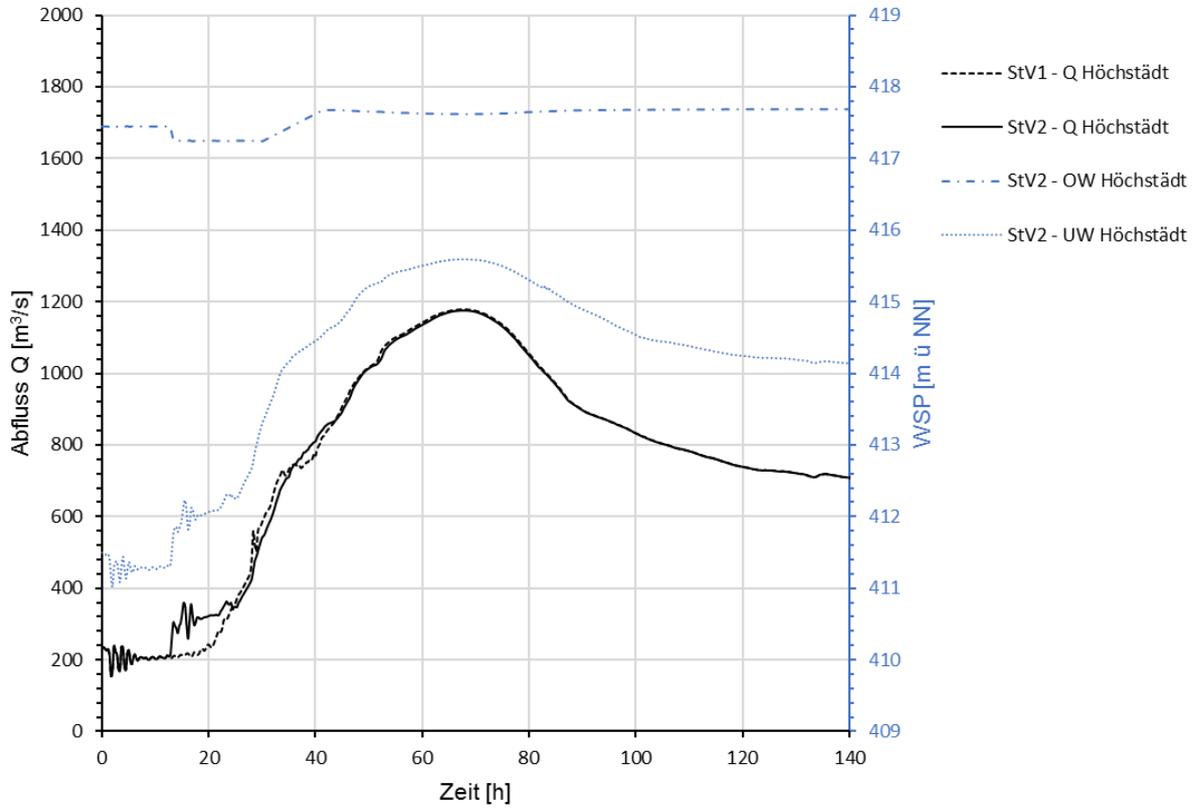
Faimingen StV1-StV2



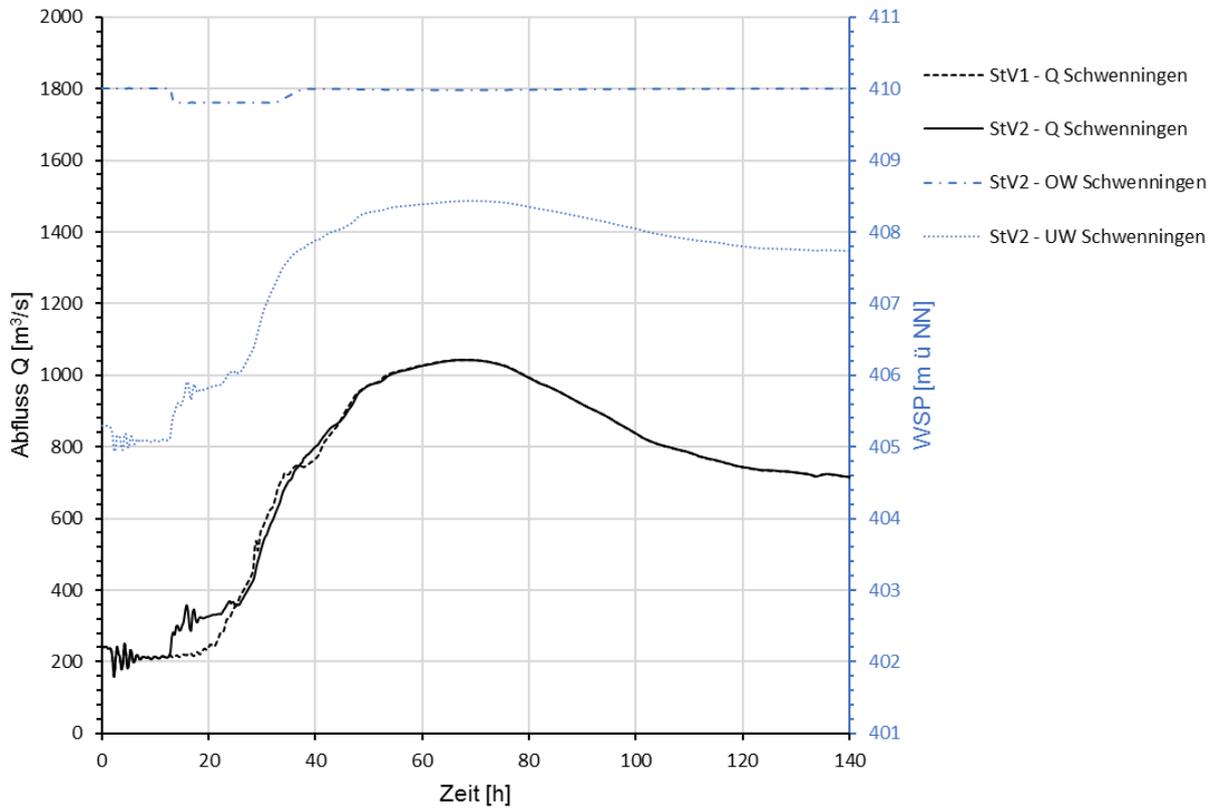
Dillingen StV1-StV2



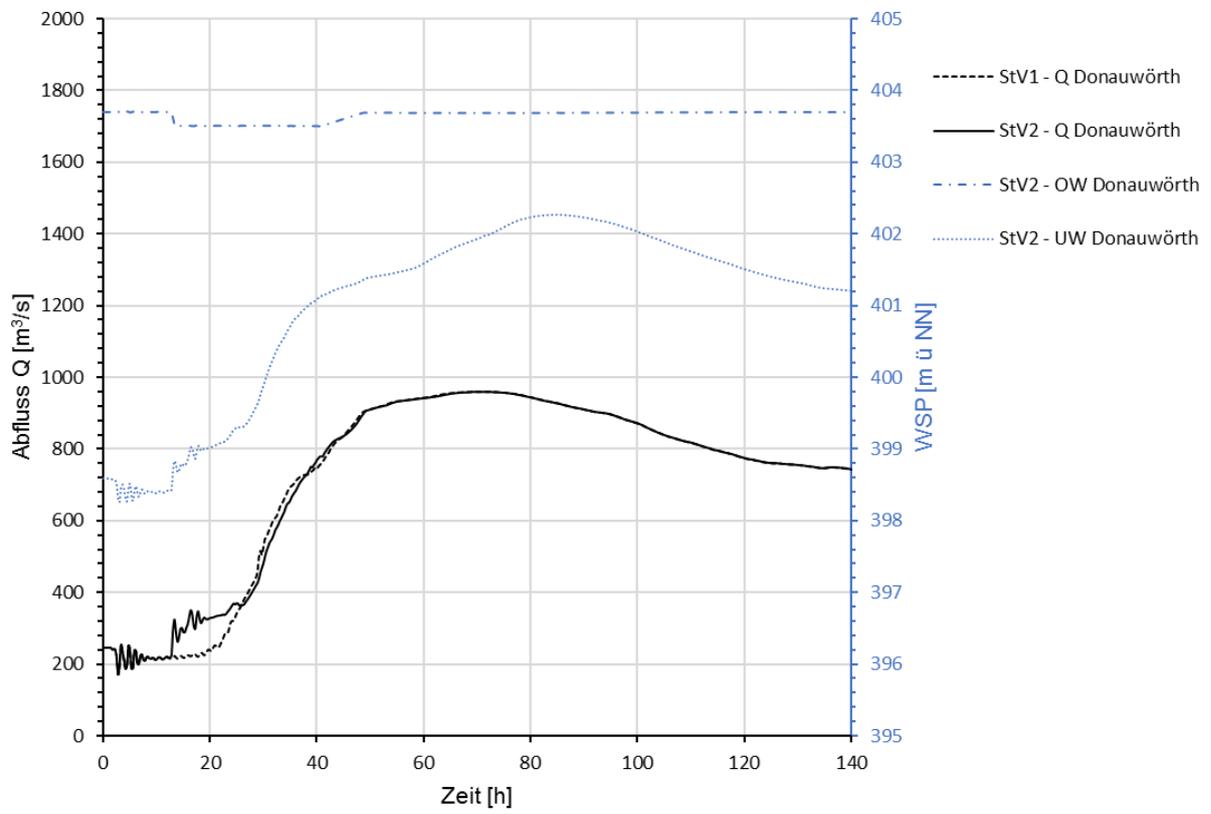
Höchstädt StV1-StV2



Schwenningen StV1-StV2

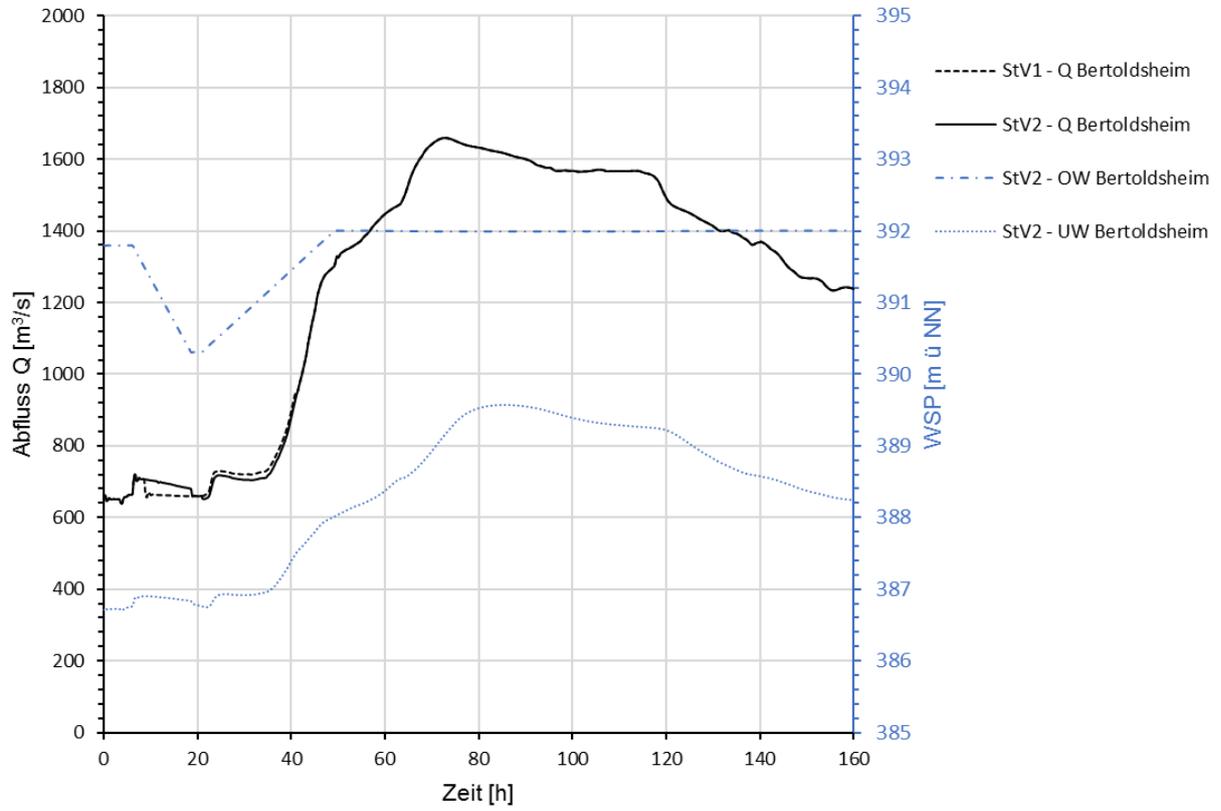


Donauwörth StV1-StV2

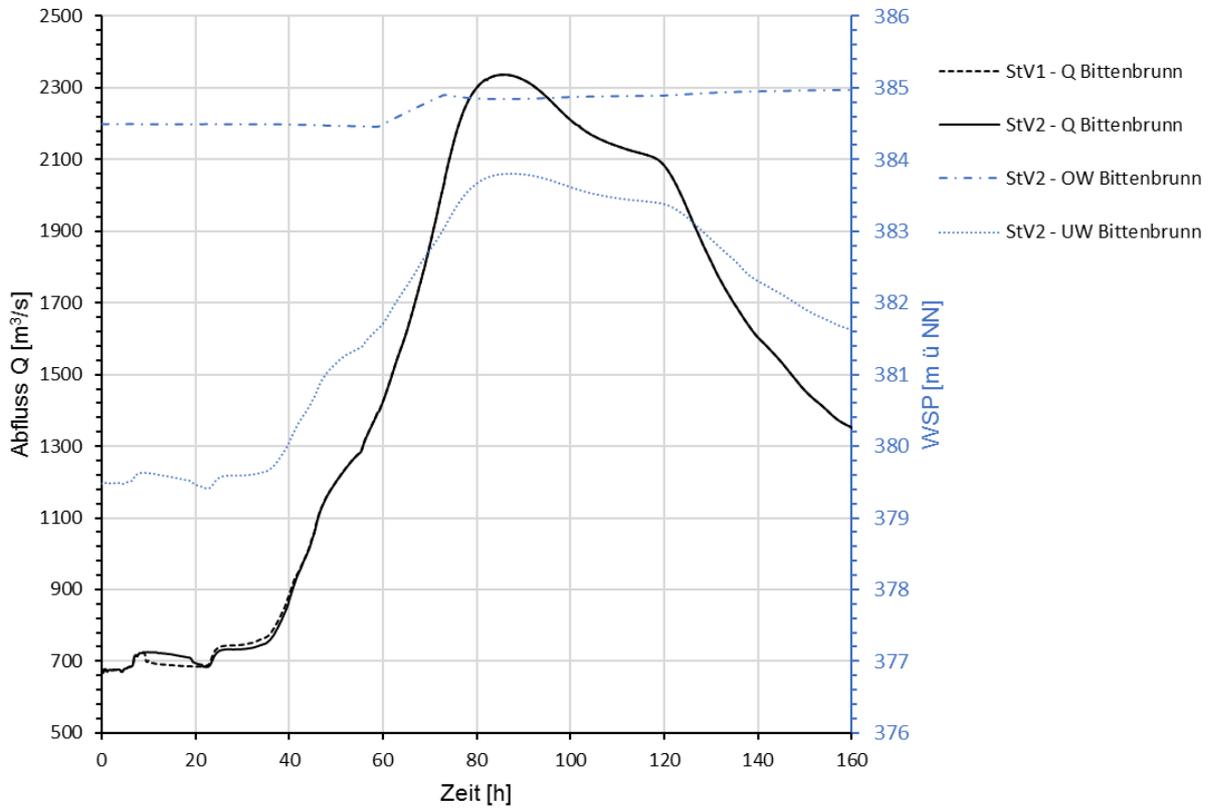


A2.1.2 Abschnitt DONW-KELH StV1-StV2

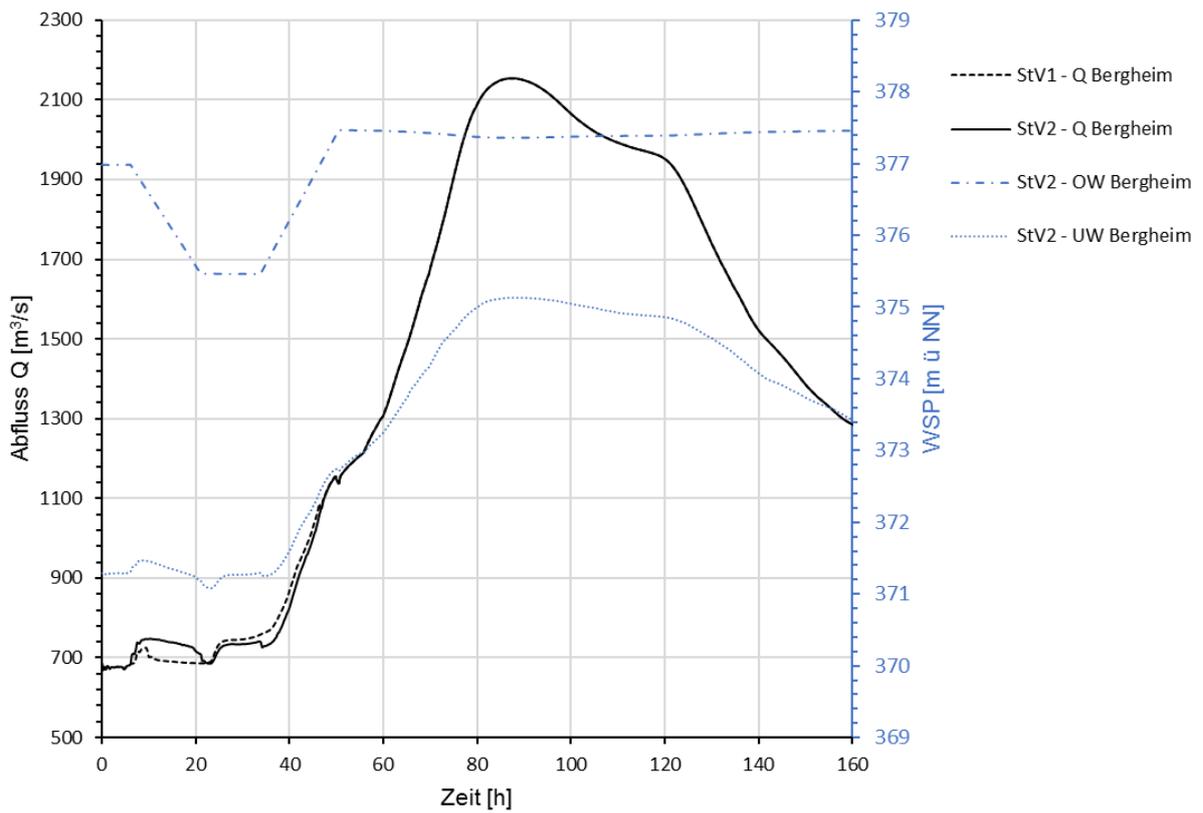
Bertoldsheim StV1-StV2



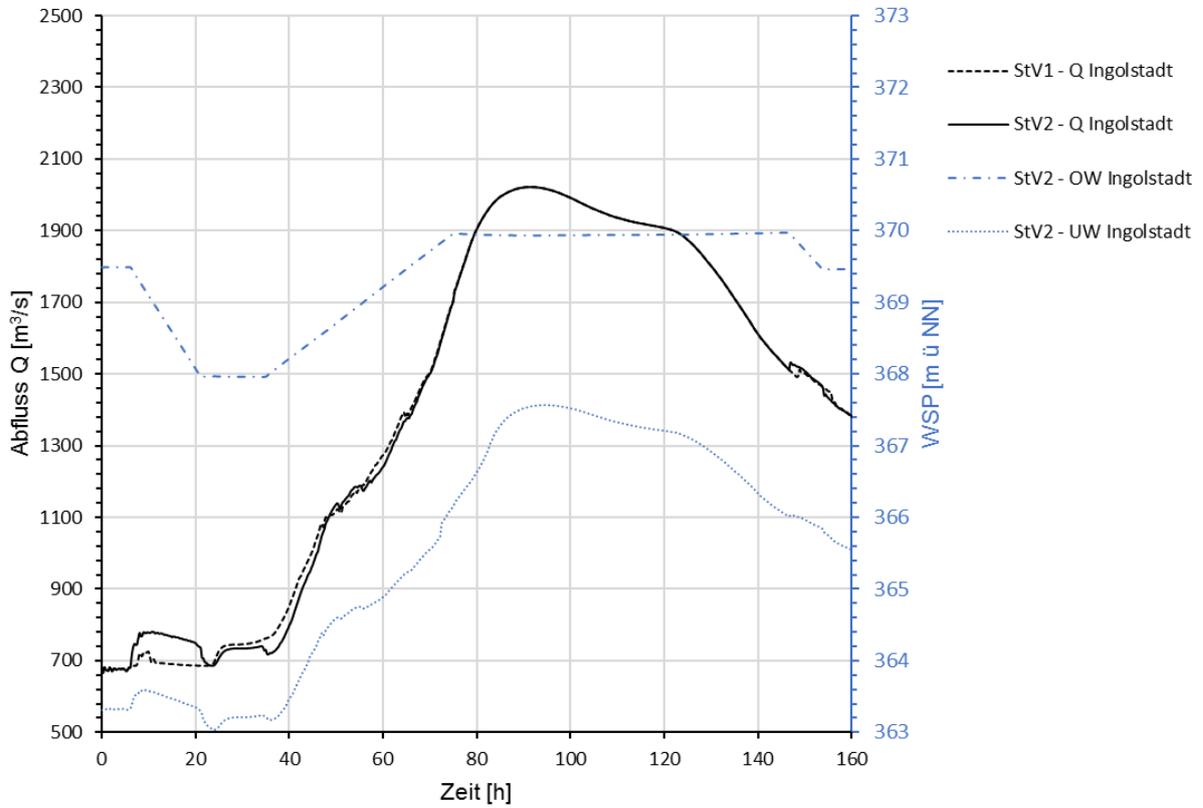
Bittenbrunn StV1-StV2



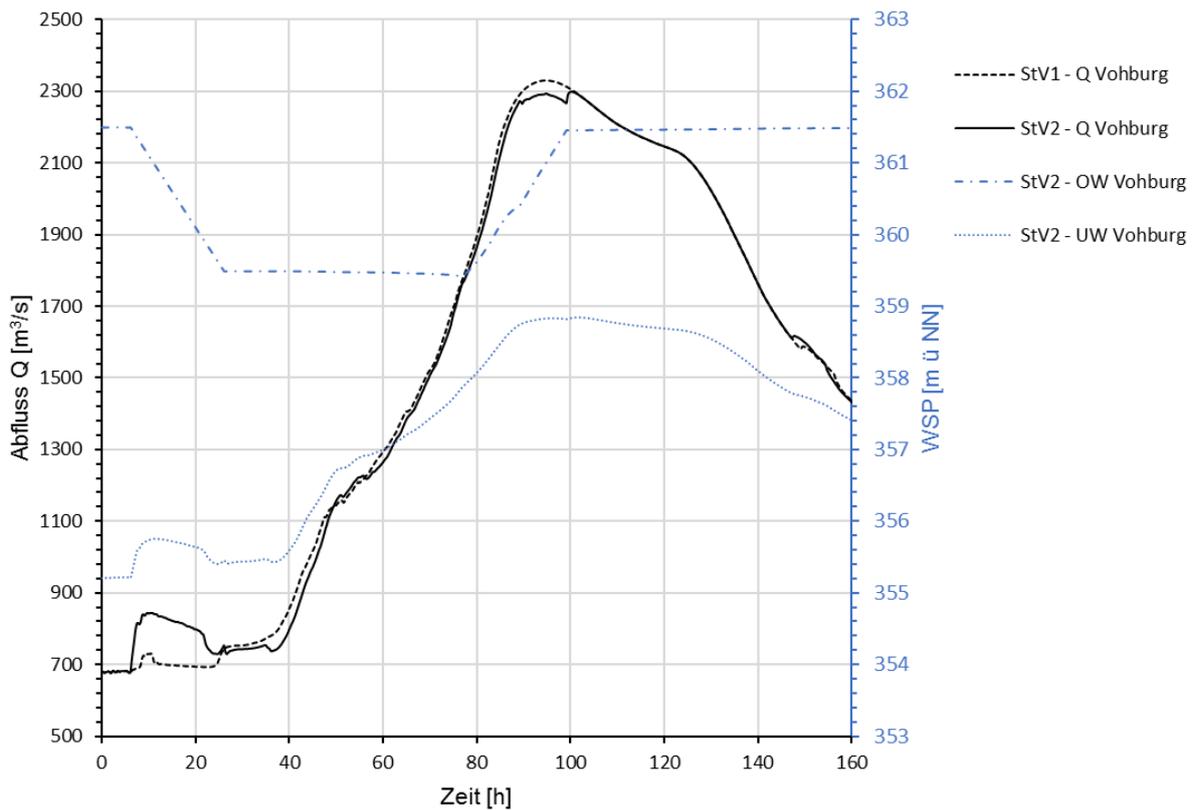
Bergheim StV1-StV2



Ingolstadt StV1-StV2

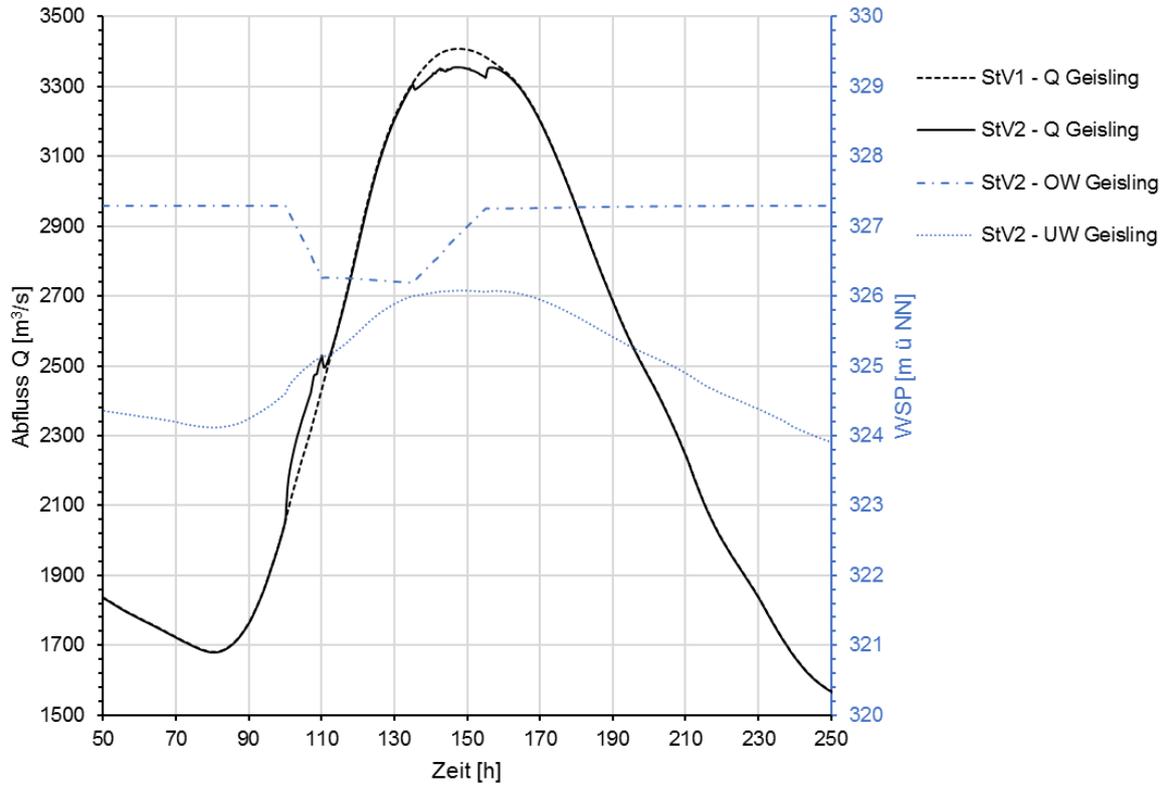


Vohburg StV1-StV2

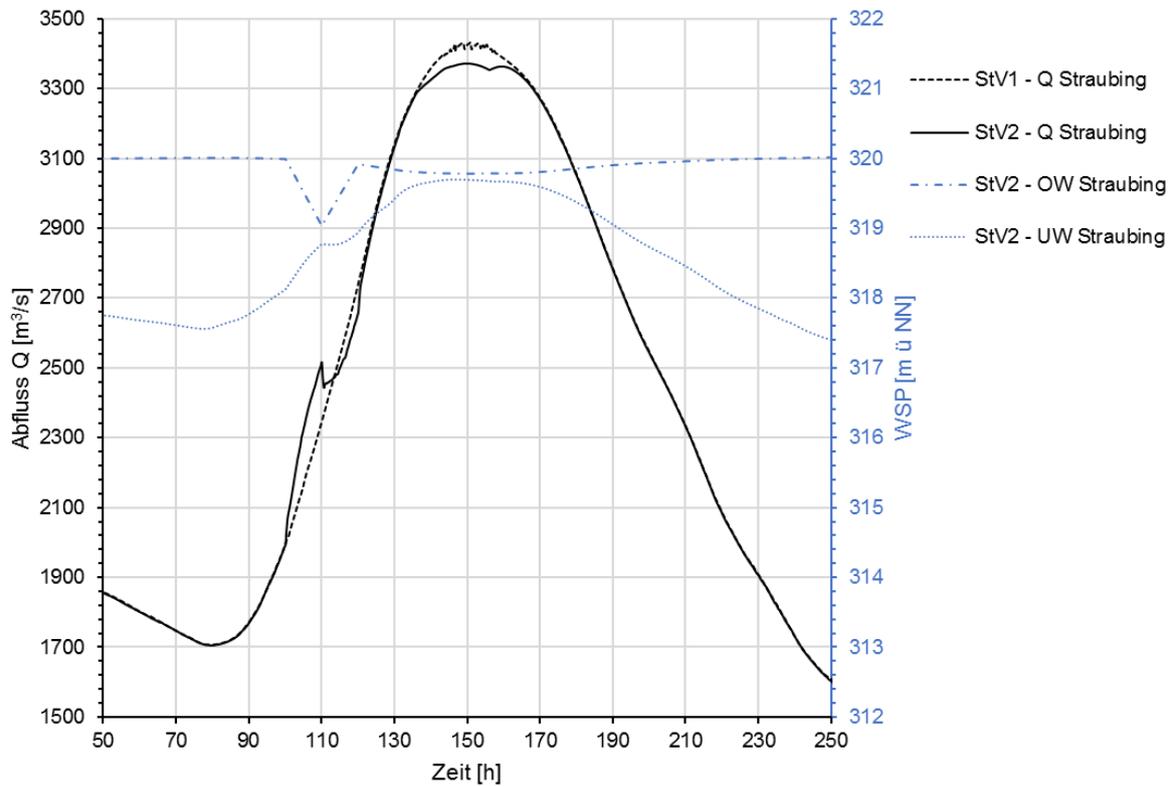


A2.1.3 Abschnitt KELH-STRA StV1-StV2

Geisling StV1-StV2



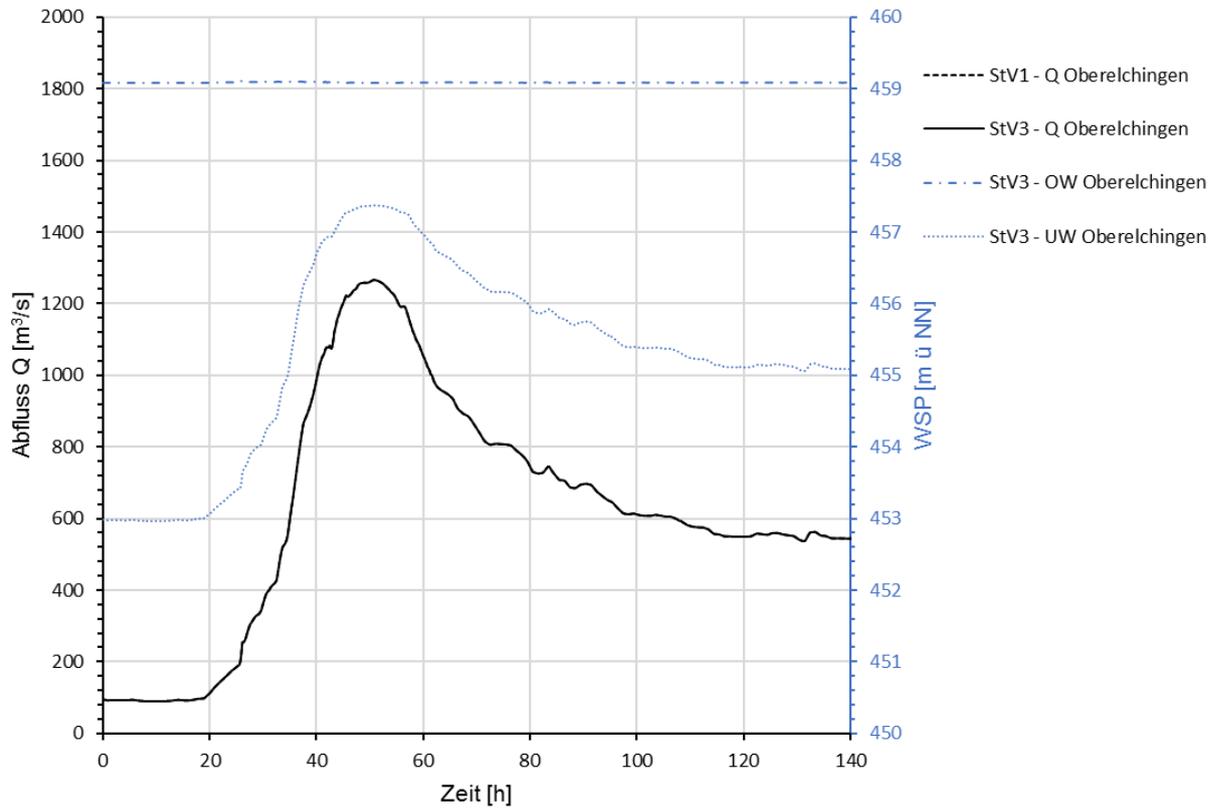
Straubing StV1-StV2



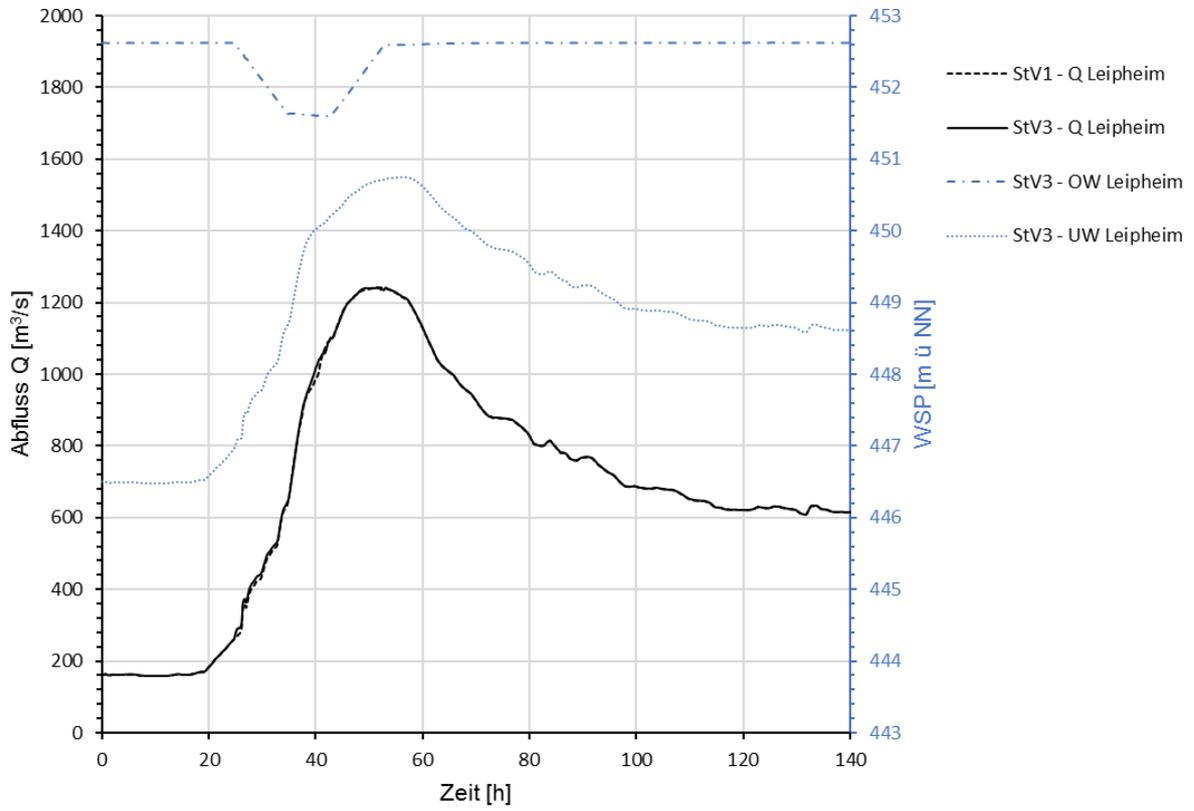
A2.2 Vergleich StV1-StV3

A2.2.1 Abschnitt NEUL-DONW StV1-StV3

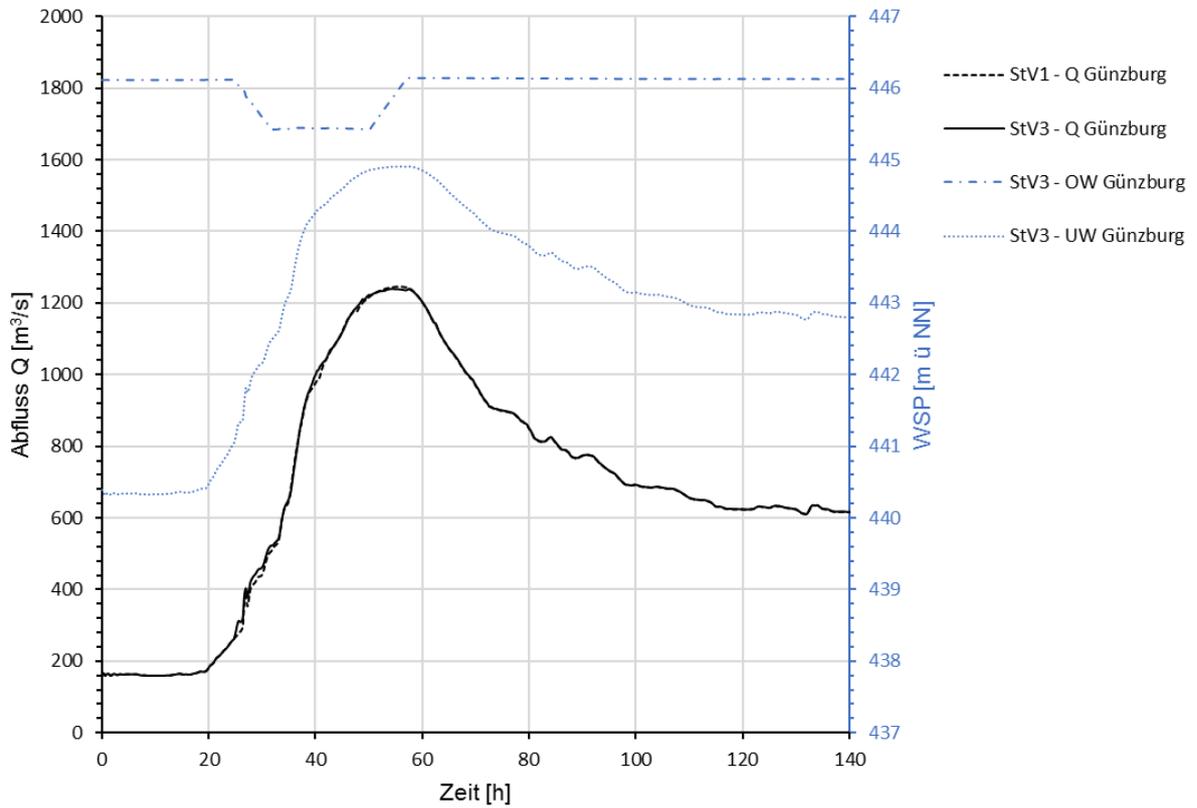
Oberelchingen StV1-StV3



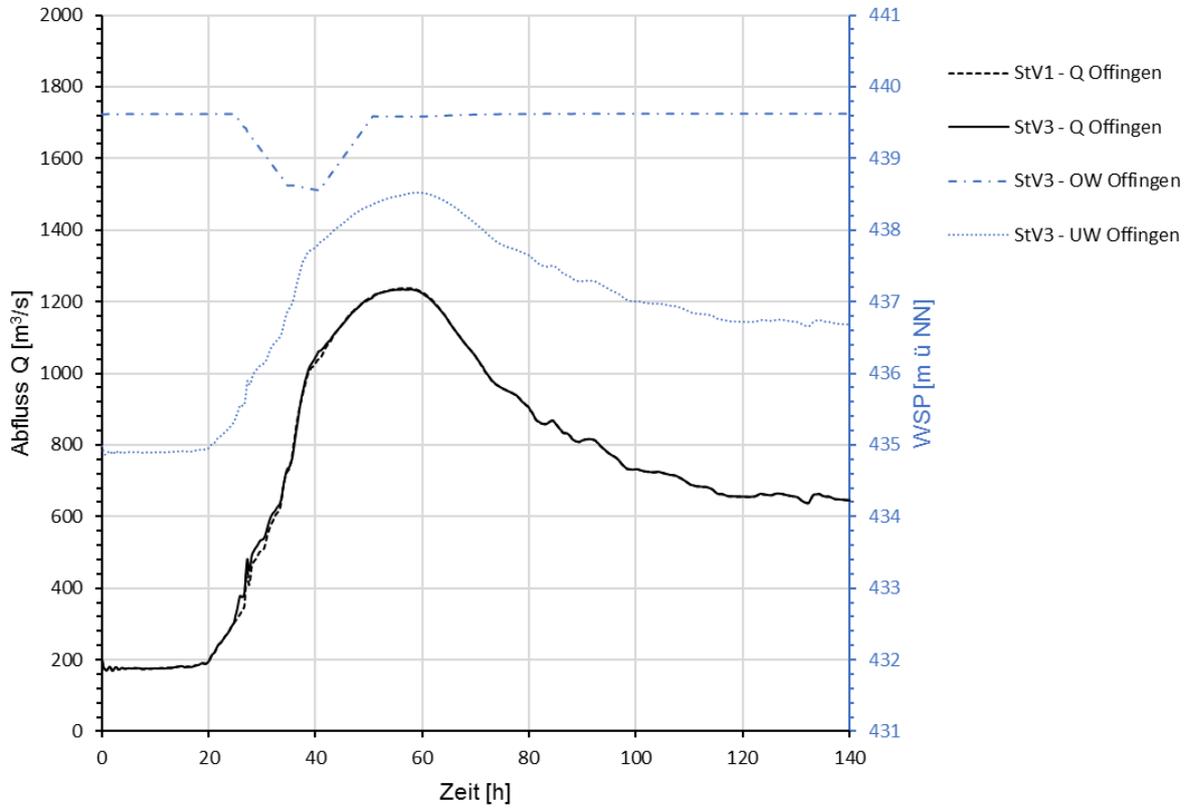
Leipheim StV1-StV3



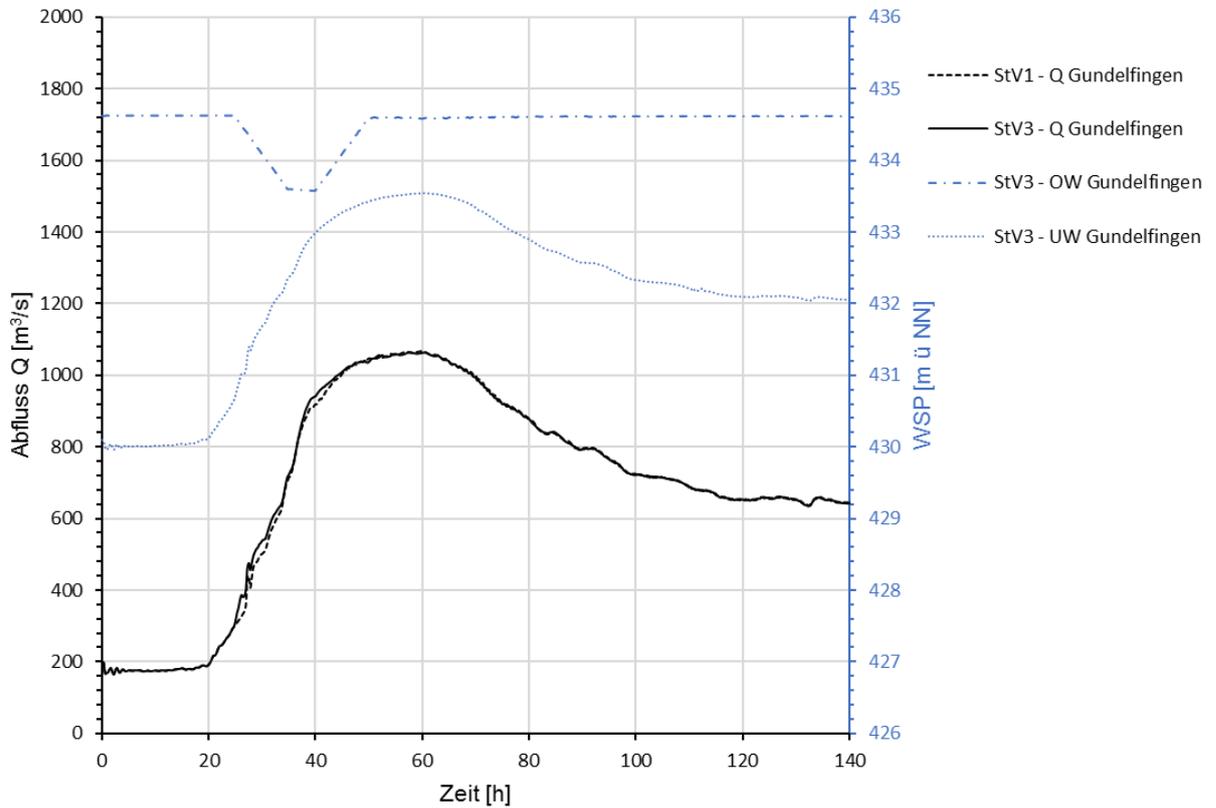
Günzburg StV1-StV3



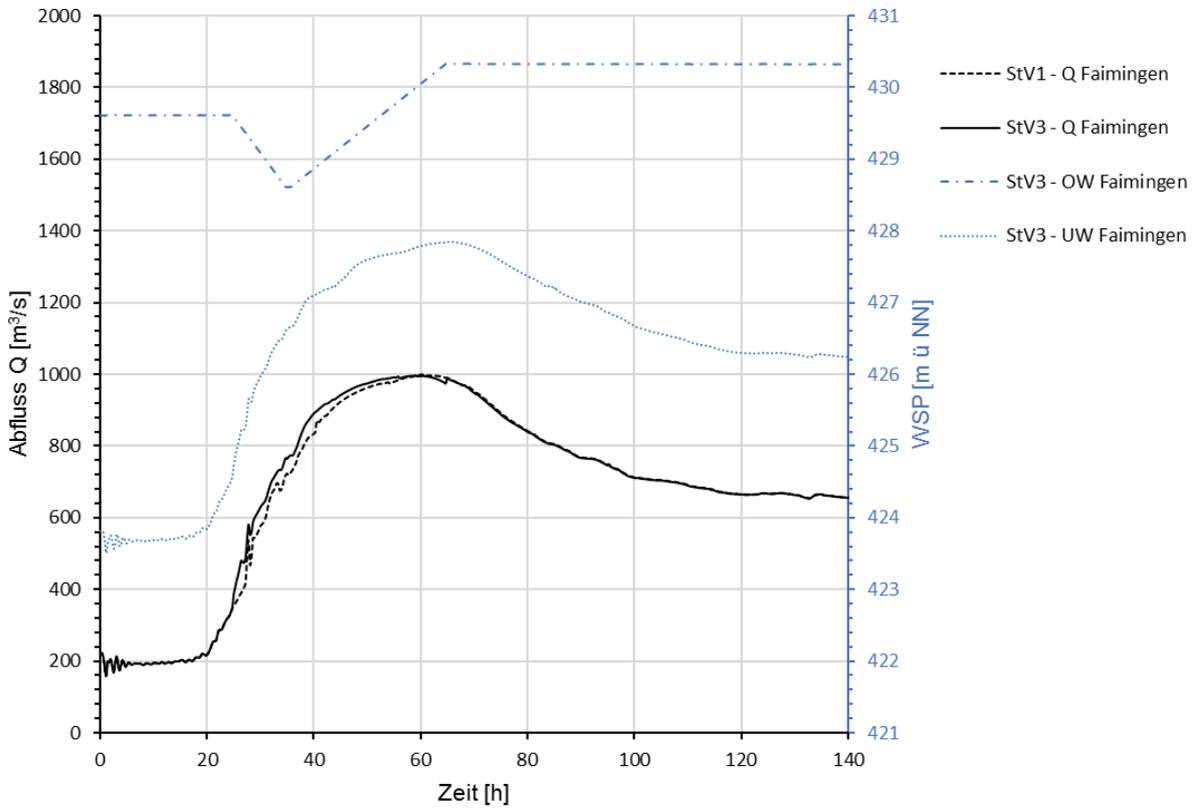
Offingen StV1-StV3



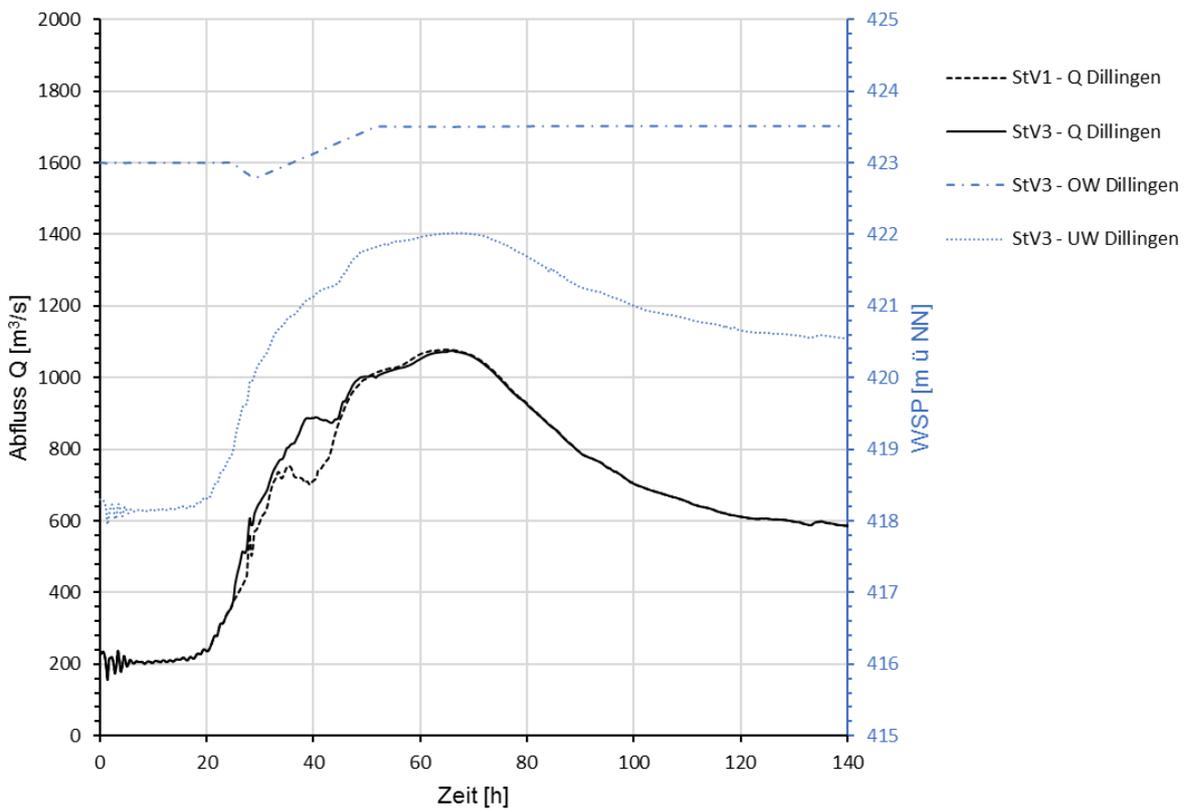
Gundelfingen StV1-StV3



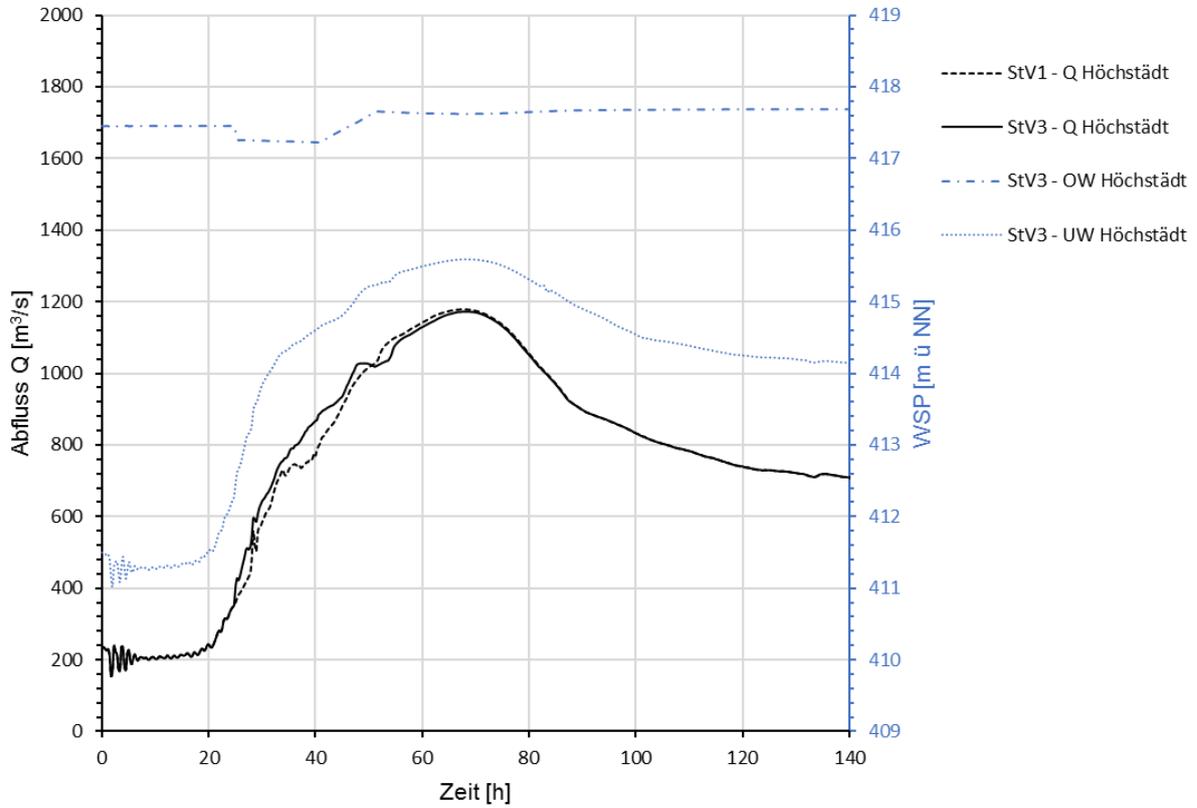
Faimingen StV1-StV3



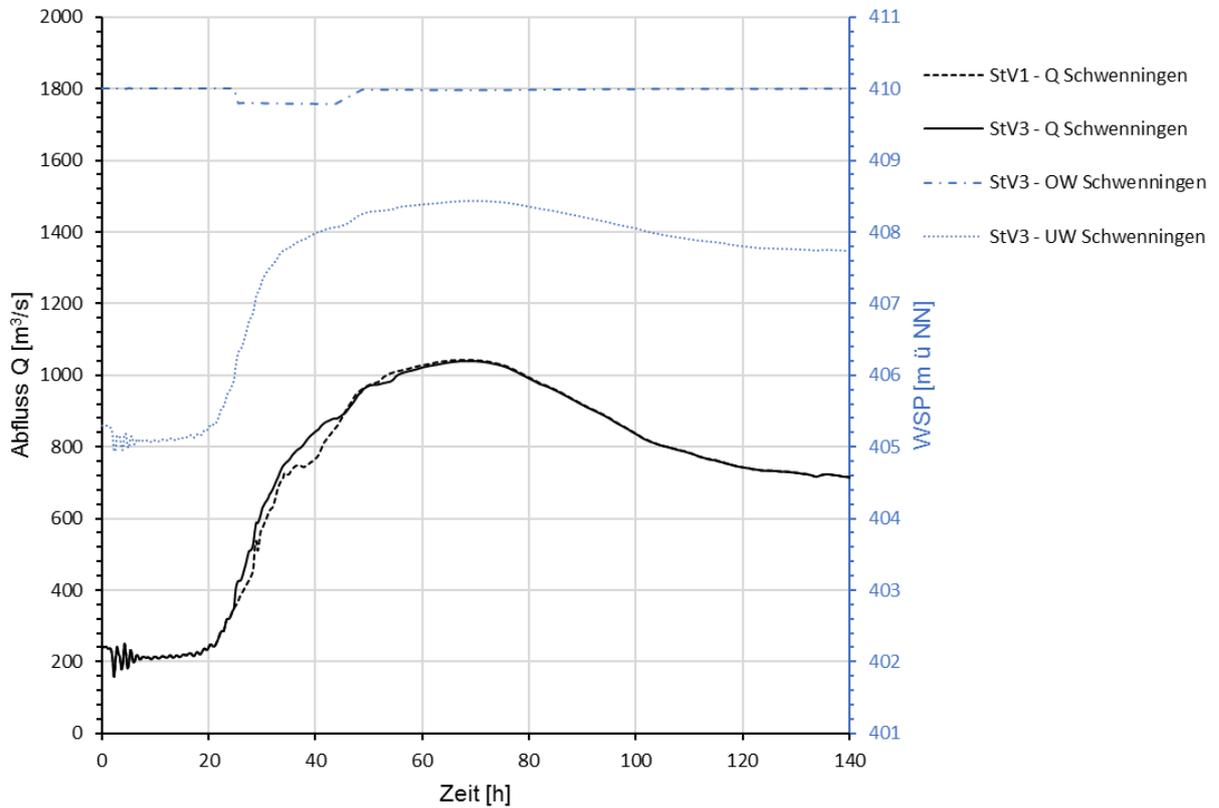
Dillingen StV1-StV3



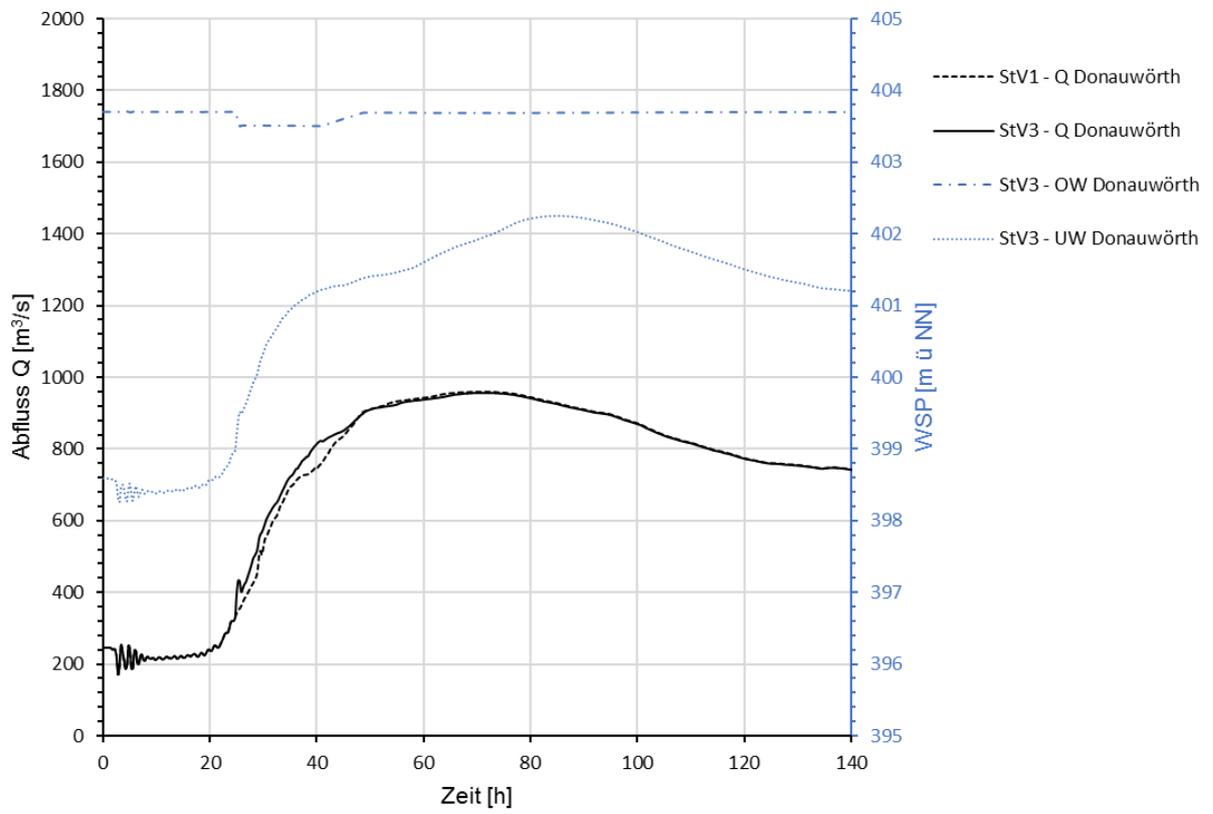
Höchstädt StV1-StV3



Schwenningen StV1-StV3

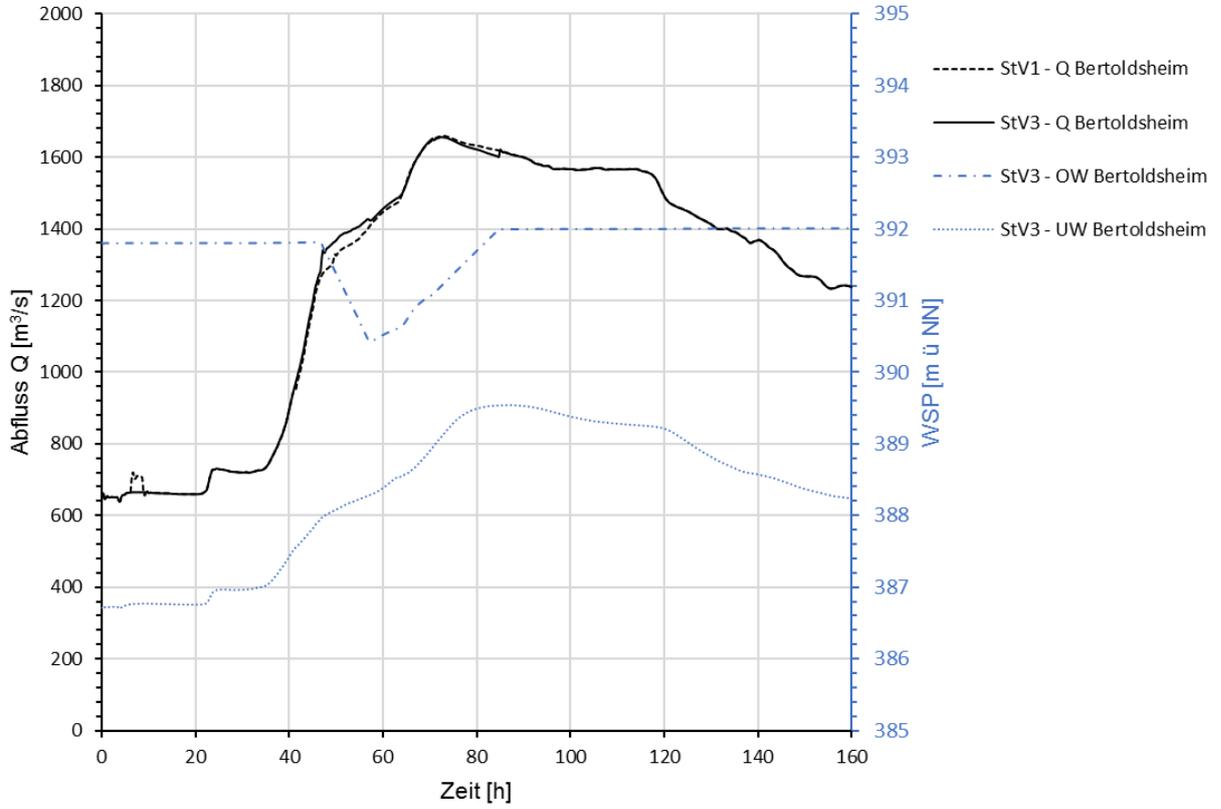


Donauwörth StV1-StV3

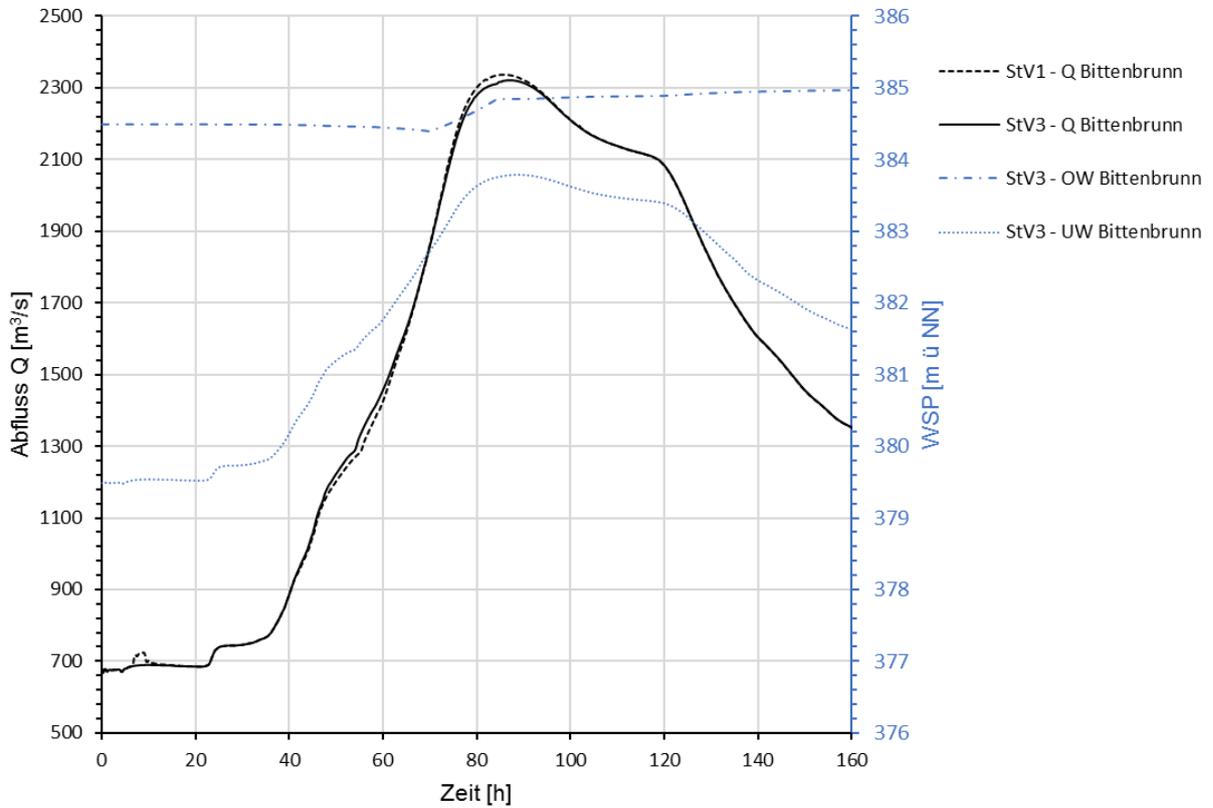


A2.2.2 Abschnitt DONW-KELH StV1-StV3

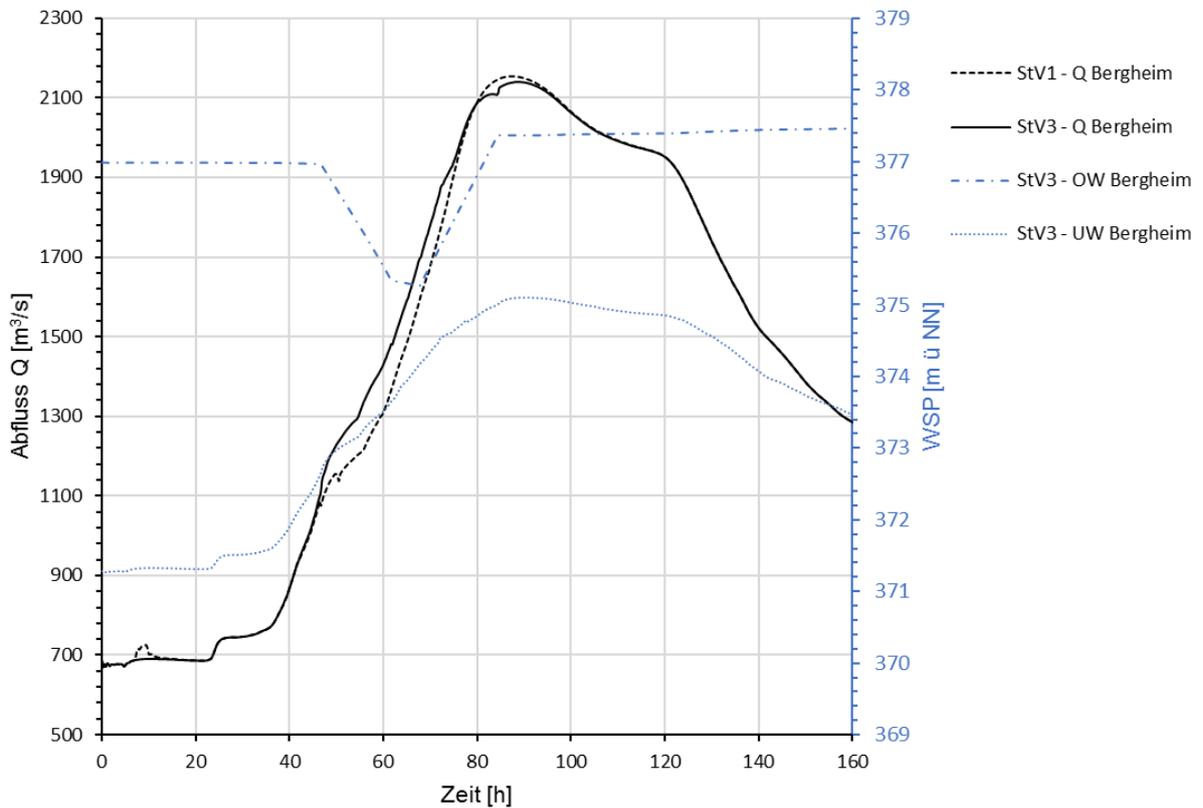
Bertoldsheim StV1-StV3



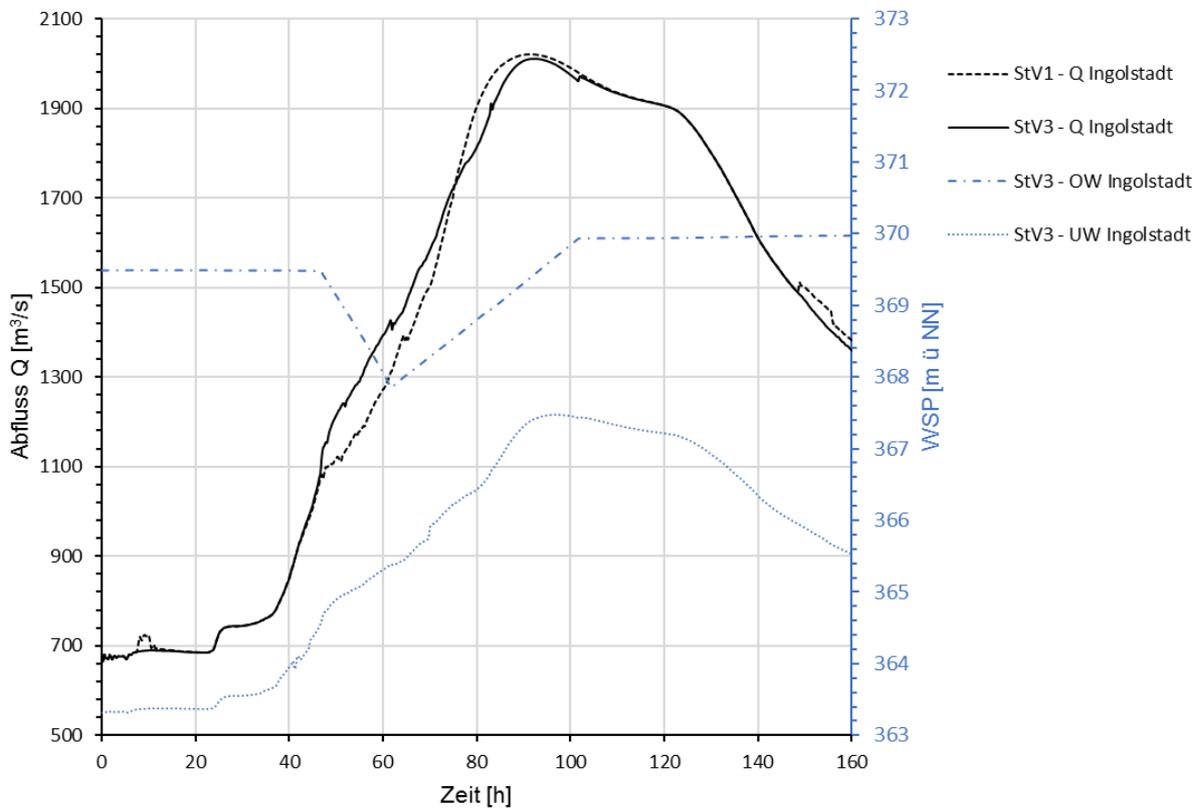
Bittenbrunn StV1-StV3



Bergheim StV1-StV3



Ingolstadt StV1-StV3



Vohburg StV1-StV3

