

Verifikation von Hochwasservorhersagen mit LARSIM

Autorenschaft: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU-RLP)

Aufbauend auf den Ergebnissen der Nachkalibrierung der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle RLP und Mosel werden Vorhersagetests sowie statistische Auswertungen zur Bewertung der Vorhersagequalität von LARSIM durchgeführt. Für das WHM Mosel werden dazu LARSIM-Berechnungen für den Zeitraum 03.01.1997 bis 30.06.2024 durchgeführt, entsprechend der Verfügbarkeit von Inputdaten ab 1997. Bisher wurde bereits für jeden Tag im Auswertzeitraum ein Berechnungslauf mit VZP 07 Uhr durchgeführt, bei dem jeweils auch eine Zustandsdatei erzeugt wurde. Die Vorhersagen wurden mit gemessenen meteorologischen Daten berechnet. Für die Vorhersagetests wurde eine Kopie der operationellen Modellumgebung genutzt, jedoch wurden einzelne Optionen im Tape10 angepasst: Da keine Ensembleberechnungen durchgeführt werden, wurde die Option VORBEREITUNG VHS OHNE SIMULATION deaktiviert. Folgende Optionen wurden aktiviert:

- NGEM+KGEM FUER VHS,
- KLIMASTAMMDATEN EXTRA,
- Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSERTEILSTRECKEN,
- TROTZDEM Q-KOMPONENTEN und
- AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB.

Mit der Option AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB, die neu eingeführt wurde, ist eine Ausgabe des Gesamtabflusses für jedes Teilgebiet möglich. Die Vorhersagedauer wurde auf 96 Stunden festgelegt. In der Datei pegel.stm waren die Berechnungen für insgesamt 166 Pegel aktiviert, für diese erfolgte also eine WHM-Nachführung und/oder Vorhersagekorrektur. Es erfolgte jedoch für alle 175 Pegel eine Ausgabe. Grundsätzlich wurden für die Pegel in der pegel.stm die folgenden Parametereinstellungen gesetzt:

NQ-Bereich	MQ-Bereich	HQ-Bereich
☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten ☒ WHM-Nachführung	☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten ☒ WHM-Nachführung	☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten ☒ WHM-Nachführung
☒ Vorhersage-Korrektur 1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte 0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden	☒ Vorhersage-Korrektur 1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte 0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden	☒ Vorhersage-Korrektur 1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte 0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden
Schwellenwerte 2.7 Übergang vom NQ- in den MQ-Bereich m³/s 2.7 14.1 Übergang vom MQ- in den HQ-Bereich m³/s 14.1	4 Anschluss der Vorhersage an die Messung bei Fehlwerten (Maximale Anzahl Fehlwerte) 1 0 Timelag: Zeitliche Verschiebung der simulierten Ganglinie in Stunden 0	Lineare Reduktion der Vorhersage-Korrektur: - Start (Stunden nach dem VZP) - Anzahl der Stunden für den Übergang auf die nicht verschobene Vorhersage
Plage du débit NQ ☒ Transmission des débits mesurés ☒ Optimisation du modèle ☒ Correction de la prévision 1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits 0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes	Plage du débit MQ ☒ Transmission des débits mesurés ☒ Optimisation du modèle ☒ Correction de la prévision 1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits 0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes	Plage du débit HQ ☒ Transmission des débits mesurés ☒ Optimisation du modèle ☒ Correction de la prévision 1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits 0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes
Valeurs seuil 2.7 Seuil entre étiage et eaux moyennes m³/s 2.7 14.1 Seuil entre eaux moyennes et crue m³/s 14.1	4 Connexion de la prévision aux mesures en cas de valeurs manquantes (nombre maximale des valeurs manquantes) 1 0 Timelag: Décalage temporel de l'hydrogramme simulé en heures 0	Réduction linéaire de la correction de la prévision: - Début (nombre des heures après l'instant de la prévision) - Nombre des heures pour le passage à la prévision non décalée

Abbildung 1: Getroffene Standardeinstellungen für die Parameter der WHM-Nachführung und Vorhersagekorrektur für alle Pegel (Ausschnitt aus den Einstellungen „Berechnungsanforderungen“ in LARISSO beispielhaft für den Pegel Mirecourt).

Bei Pegeln mit schlechten Kalibrierergebnissen (30 Pegel) sowie Pegel, die bisher nicht kalibriert wurden, wurden die Parameter für die WHM-Nachführung (Opt_xQ) sowie die Weitergabe der gemessenen Pegelganglinie (Mes_xQ) deaktiviert (bzw. auf „N“ gesetzt), sodass nur eine Vorhersagekorrektur durchgeführt wurde.

Die Berechnungen starteten Anfang Januar 2025. Für die 07-Uhr-Läufe ergab sich eine Gesamtzahl von 10.041 Rechenläufen. Diese Berechnungen konnten Anfang Februar 2025 abgeschlossen werden. Es wurden, neben den Zustandsdateien, folgende Dateien von jedem Rechenlauf gesichert:

- LOG-Datei (mit Tabelle der Simulationsqualität),
- Tape11,
- flaeche-hqges.kala (flächenhafte Ausgabe des Gesamtabflusses als Tagessumme),
- flaeche-rbo.kala (flächenhafte Ausgabe der relativen Füllung des Bodenspeichers),

- flaeche-sweq.kala (flächenhafte Ausgabe des Schneewasseräquivalents),
- gts-alle-tgb-q.lila (stündliche Ausgabe des Abflusses für jedes Teilgebiet),
- pegel-qmes.lila,
- pegel-qsim.lila sowie
- pegel-qvhs.lila.

Da die Ausgabe der Datei gts-alle-tgb-q.lila aufgrund der kürzlich neu eingeführten Option AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB erst für die Rechenläufe ab 2021 verfügbar war, werden die VZP-07-Uhr-Läufe bei den nachfolgend beschriebenen Schritten noch einmal durchgeführt. Bei diesem Durchlauf wird dann auch auf die Ausgabe der Datei flaeche-hqges.kala verzichtet, da diese für die weiteren Betrachtungen nicht erforderlich ist.

Im nächsten Schritt sollen nun, neben den erneut berechneten 07-Uhr-Läufen, die weiteren ereignisbezogenen Rechenläufe eingerichtet und gestartet werden. Eine Berechnung für einen VZP findet dabei nur statt, wenn mindestens bei einem Pegel der 3*MQ-Wert im jeweiligen Vorhersagezeitraum überschritten wird. Daraus ergeben sich noch einmal insgesamt 79.139 LARSIM-Rechenläufe für den Zeitraum 03.01.1997 bis 30.06.2024. Zusammen mit den 07-Uhr-Läufen ergeben sich somit insgesamt 89.180 Rechenläufe.

Für die noch ausstehenden statistischen Auswertungen mit ProFoUnD werden unter anderem die folgenden Einstellungen verwendet:

Für die Einteilung der hydrologischen Fälle nach dem neuen IKSMS-Verfahren (weitere Informationen dazu finden sich in der Dokumentation von ProFoUnD, Kapitel 2.2.3) sollen zwei Schwellenwerte (MQ und HQ2) festgelegt werden, sodass sich drei Vorhersagebereiche ergeben ($\leq MQ$ | $\leq HQ2$ | $> HQ2$). Zusammen mit den drei Richtungen für Vorhersagen (überwiegend steigend, steigend und fallend, fallend) sowie dem Fall 0, bei dem die Gütemaße für alle Werte unabhängig von Bereich und Richtung ermittelt werden, ergeben sich so insgesamt 10 hydrologische Fälle. Als tolerierbares Zeitfenster bei kontinuierlichen Einzelfehlern sollen 3 Stunden angenommen werden (vgl. Kapitel 2.3.2 der ProFoUnD-Dokumentation). Bei der Auswertung kategorischer Gütemaße soll eine strenge Definition verwendet werden. Diese besagt, dass das Element „hit“ (Überschreitung eines Schwellenwerts wurde vorhergesagt und auch gemessen) nur vorliegt, wenn Vorhersage und Messwert über dem definierten Schwellenwert und der Wert zum VZP unterhalb des Schwellenwertes liegen (vgl. Kapitel 2.5.2 der ProFoUnD-Dokumentation). Als Schwellenwerte werden die HQ-Werte für HQ2, HQ10 und HQ20 festgelegt. Die Auswertung der Maximalwerte soll für die beiden Vorhersagebereiche 1h-24h und 25h-48h erfolgen (vgl. Kapitel 2.6 der ProFoUnD-Dokumentation). Die Einstellungen werden entsprechend in der Steuerdatei für ProFoUnD vorgenommen. Die Auswertung erfolgt jeweils für jeden Pegel getrennt.

Damit Ausreißer in den Ereignissen nicht in den Auswertungen berücksichtigt werden, müssen diese zunächst identifiziert werden. Nach einem ersten ProFoUnD-Durchlauf sollen die Ergebnisse für jede Vorhersagetiefe dahingehend untersucht werden, wo die LARSIM-Vorhersagen am jeweiligen Pegel deutlich von den Messungen abweichen. Dies kann beispielsweise durch die Betrachtung von Scatterplots und anschließender

Betrachtung des betreffenden Einzelereignisses geschehen. Die folgenden Abbildungen zeigen dazu Beispiele einer früheren, im Jahr 2017 durchgeführten Auswertung mit ProFoUnD für den Pegel Beinheim/Sauer (aus dem damaligen Projektbericht; Schweppe et al. 2017).

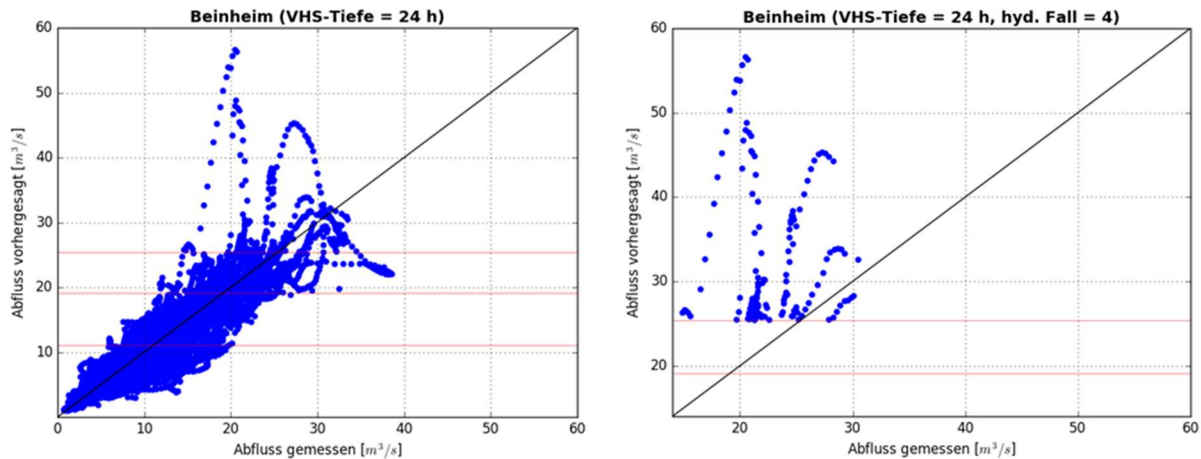


Abbildung 2: Scatterplots für alle hydrologischen Fälle (Fall 0) (links) und für Fall 4 (steigende Vorhersage, >HQ5) (rechts) bei einer Vorhersagetiefe von 24 Stunden für den Pegel Beinheim/Sauer (Schweppe et al. 2017).

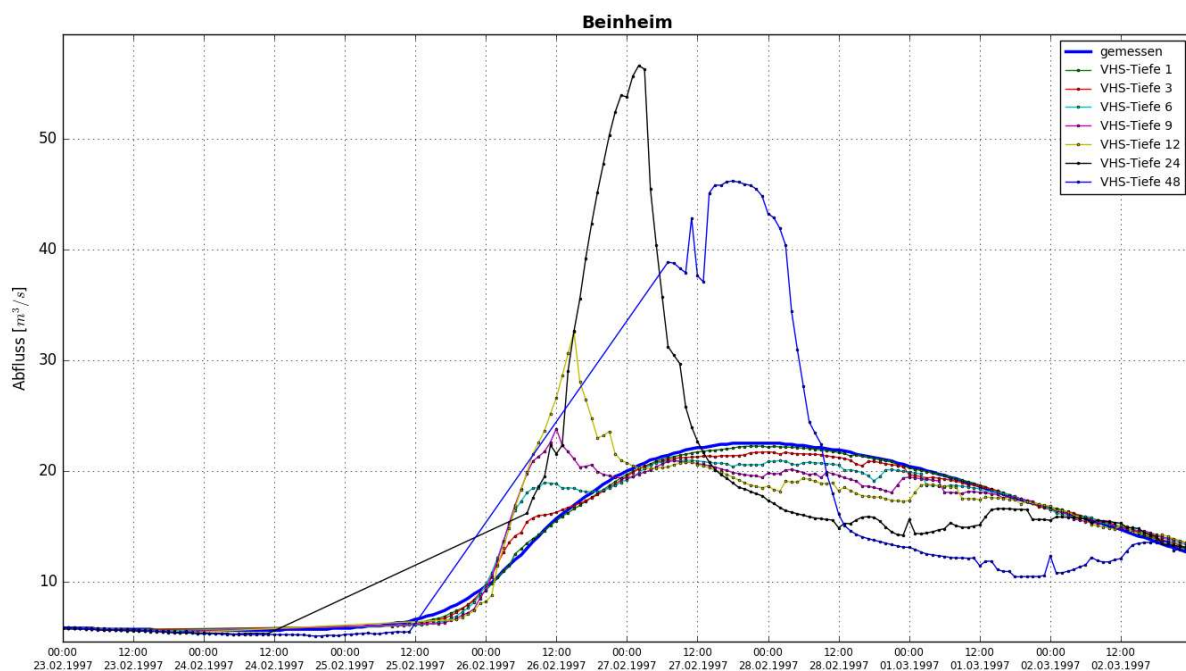


Abbildung 3: Ganglinien-Darstellung der verschiedenen Vorhersagetiefen für ein Ereignis im Jahr 1997 am Pegel Beinheim/Sauer (Schweppe et al. 2017).

Nachdem auf diese Weise die Ereignisse mit Ausreißern am jeweiligen Pegel identifiziert und herausgenommen worden sind, wird die ProFoUnD-Analyse erneut durchgeführt. Die Daten der von den Analysen ausgeschlossenen Ereignissen werden den jeweiligen Vorhersagezentralen zur Verfügung gestellt, sodass diese die Ereignisse analysieren und hinsichtlich der Gründe für die Abweichungen weiter untersuchen können.

Weitere Hintergrundinformationen zu den Auswertungen mit ProFoUnD finden sich in der Programmdokumentation sowie in der Projektbeschreibung:

Schweppe, R.; Aigner, D.; Gerlinger, K.; Demuth, N. & K. Gottschalk (2017): Interpretation der Auswertungen mit ProFoUnD für die Wasserhaushaltsmodelle Mosel, Maas und Elsass. *Interprétation des évaluations avec ProFoUnD pour les modèles de bilan hydrologique Moselle, Meuse et Alsace.*

Vérification des prévisions des crues avec LARSIM

Auteur : Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU-RLP)

Sur la base des résultats du recalage des modèles de bilan hydrologique LARSIM RLP et Moselle, des tests de prévision ainsi que des évaluations statistiques ont été réalisés pour évaluer la qualité des prévisions de LARSIM. Pour le modèle de bilan hydrologique (MBH Moselle), des calculs LARSIM ont été effectués pour la période du 03/01/1997 au 30/06/2024, conformément à la disponibilité des données d'entrée à partir de 1997. Jusqu'à présent, un tour de calcul était déjà effectué pour chaque jour de la période d'évaluation avec l'instant de prévision 07 h, au cours duquel un fichier d'état était également généré à chaque fois. Les prévisions ont été calculées à partir de données météorologiques mesurées. Pour les tests de prévision, une copie de l'environnement du modèle opérationnel a été utilisée, mais certaines options ont été adaptées dans le tape10 : Comme aucun calcul d'ensemble n'est effectué, l'option VORBEREITUNG VHS OHNE SIMULATION a été désactivée. Les options suivantes ont été activées :

- NGEM+KGEM FUER VHS,
- KLIMASTAMMDATEN EXTRA,
- Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSERTEILSTRECKEN,
- TROTZDEM Q-KOMPONENTEN et
- AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB.

Avec l'option AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB, récemment ajoutée, il est possible de générer une sortie du débit total pour chaque entité spatiale. La durée de prévision a été fixée à 96 heures. Dans le fichier pegel.stm, les calculs étaient activés pour au total 166 stations limnimétriques, pour lesquelles il y a donc eu un ajustement du MBH et/ou une correction des prévisions. Toutes les 175 stations limnimétriques ont toutefois généré une sortie. En principe, les paramètres suivants ont été définis pour les stations limnimétriques dans le fichier pegel.stm :

NQ-Bereich	MQ-Bereich	HQ-Bereich
☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten	☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten	☒ Weitergabe gemessene Pegeldaten
☒ WHM-Nachführung	☒ WHM-Nachführung	☒ WHM-Nachführung
☒ Vorhersage-Korrektur	☒ Vorhersage-Korrektur	☒ Vorhersage-Korrektur
1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte	1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte	1 4 Anzahl der Stunden zur Bildung der Mittelwerte
0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden	0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden	0 4 Übergangsbereich zwischen Messung und verschobener Vorhersage in Stunden
Schwellenwerte		
2.7 Übergang vom NQ- in den MQ-Bereich m³/s	4 Anschluss der Vorhersage an die Messung bei Fehlwerten (Maximale Anzahl Fehlwerte)	
2.7	1	
14.1 Übergang vom MQ- in den HQ-Bereich m³/s	0 Timelag: Zeitliche Verschiebung der simulierten Ganglinie in Stunden	
14.1	0	
Plage du débit NQ	Plage du débit MQ	Plage du débit HQ
☒ Transmission des débits mesurés	☒ Transmission des débits mesurés	☒ Transmission des débits mesurés
☒ Optimisation du modèle	☒ Optimisation du modèle	☒ Optimisation du modèle
☒ Correction de la prévision	☒ Correction de la prévision	☒ Correction de la prévision
1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits	1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits	1 4 Nombre des heures pour calculer les moyennes des débits
0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes	0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes	0 4 Nombre des heures pour le passage à la prévision décalée par les valeurs moyennes
Valeurs seuil		
2.7 Seuil entre étiage et eaux moyennes m³/s	4 Connexion de la prévision aux mesures en cas de valeurs manquantes (nombre maximale des valeurs manquantes)	
2.7	1	
14.1 Seuil entre eaux moyennes et crue m³/s	0 Timelag: Décalage temporel de l'hydrogramme simulé en heures	
14.1	0	
		Réduction linéaire de la correction de la prévision:
		- - Start (Stunden nach dem VZP)
		- - Anzahl der Stunden für den Übergang auf die nicht verschobene Vorhersage

Figure 1 : Paramètres par défaut définis pour l'ajustement du MCE et la correction des prévisions pour toutes les stations limnimétriques (extrait des paramètres « Exigences de calcul » dans LARISSO, à titre d'exemple pour la station de Mirecourt).

Pour les stations limnimétriques présentant de mauvais résultats de calibrage (30 stations), ainsi que pour les stations limnimétriques qui n'ont jusqu'à présent pas été calibrées, les paramètres pour l'ajustement du MBH (Opt_xQ) ainsi que la transmission de la courbe de l'hydrogramme mesurée (Mes_xQ) ont été désactivés (ou mis sur « N »), de sorte que seule une correction de prévision a été effectuée.

Les calculs ont commencé début janvier 2025. Pour les runs de 07 h, le nombre total de runs de calcul a été de 10 041. Ces calculs ont pu être achevés début février 2025. En plus des fichiers d'état, les fichiers suivants ont été sauvegardés pour chaque tour de calculs :

- Fichier LOG (avec un tableau sur la qualité de la simulation),
- Tape11,
- flaeche-hqges.kala (sortie surfacique du débit total sous forme de somme journalière),
- flaeche-rbo.kala (sortie surfacique du remplissage relatif du réservoir du sol),

- flaeche-sweq.kala (sortie surfacique de l'équivalent en eau de la neige),
- gts-alle-tgb-q.lila (sortie horaire du débit pour chaque entité spatiale),
- pegel-qmes.lila,
- pegel-qsim.lila ainsi que
- pegel-qvhs.lila.

Comme la sortie du fichier gts-alle-tgb-q.lila n'était disponible que pour les tours de calcul à partir de 2021 en raison de la nouvelle option AUSGABE Q-KOMP ALLE TGB, récemment ajoutée, les tours d'instant de prévision 07 h sont exécutés une nouvelle fois lors des étapes décrites ci-dessous. Lors de ce tour, on renonce également à la sortie du fichier flaeche-hqges.kala, car celui-ci n'est pas nécessaire pour la suite des observations.

L'étape suivante consiste à configurer et à lancer les autres tours de calcul liés aux événements, en plus des tours de 07 h recalculés. Un calcul pour un instant de prévision n'a lieu que si la valeur $3 \cdot QM$ est dépassée pour au moins une station pendant la période de prévision correspondante. Il en résulte à nouveau un total de 79 139 calculs LARSIM pour la période du 03/01/1997 au 30/06/2024. Si l'on ajoute les tours de 07 h, on obtient donc un total de 89 180 tours de calcul.

Pour les évaluations statistiques qui restent à effectuer avec ProFoUnD, les paramètres suivants, parmi d'autres, sont utilisés :

Pour la subdivision des cas hydrologiques selon la nouvelle procédure des CIPMS (pour plus d'informations, voir la documentation de ProFoUnD, chapitre 2.2.3), il convient de définir deux valeurs seuils (QM et $HQ2$), de sorte à obtenir trois plages de prévision ($\leq QM$ | $\leq HQ2$ | $> HQ2$). Si l'on ajoute les trois directions pour les prévisions (principalement ascendante, ascendante et descendante, descendante) ainsi que le cas 0, dans lequel les indices de qualité sont déterminés pour toutes les valeurs, indépendamment de la plage et de la direction, on obtient ainsi un total de 10 cas hydrologiques. En cas d'erreurs individuelles continues, la fenêtre de temps tolérable doit être de 3 heures (voir chapitre 2.3.2 de la documentation ProFoUnD). Pour l'évaluation des indices de qualité catégoriques, une définition stricte doit être utilisée. Cette dernière stipule que l'élément « hit » (le dépassement d'une valeur seuil a été prévu et également mesuré) n'existe que si la prédiction et la valeur mesurée sont supérieures à la valeur seuil définie et si la valeur relative à l'instant de prévision est inférieure à la valeur seuil (voir chapitre 2.5.2 de la documentation ProFoUnD). Les valeurs HQ fixées comme valeurs seuils sont $HQ2$, $HQ10$ et $HQ20$. L'évaluation des valeurs maximales doit être effectuée pour les deux plages de prévision 01 h-24 h et 25 h-48 h (voir chapitre 2.6 de la documentation ProFoUnD). Les paramètres sont configurés de manière adéquate dans le fichier de commande pour ProFoUnD. L'évaluation se fait séparément pour chaque station limnimétrique.

Pour que les valeurs aberrantes des événements ne soient pas prises en compte dans les analyses, il faut d'abord les identifier. Après un premier tour de ProFoUnD, les résultats doivent être examinés pour chaque délai de prévision afin de déterminer où les prévisions LARSIM diffèrent nettement des mesures pour chaque station limnimétrique. Cela peut se faire, par exemple, en observant les graphiques en nuage de points puis en examinant l'événement individuel concerné. Les figures suivantes montrent des exemples d'une

évaluation antérieure réalisée en 2017 avec ProFoUnD pour la station limnimétrique de Beinheim/Sûre (tirés du rapport de projet de l'époque ; Schweppe et al. 2017).

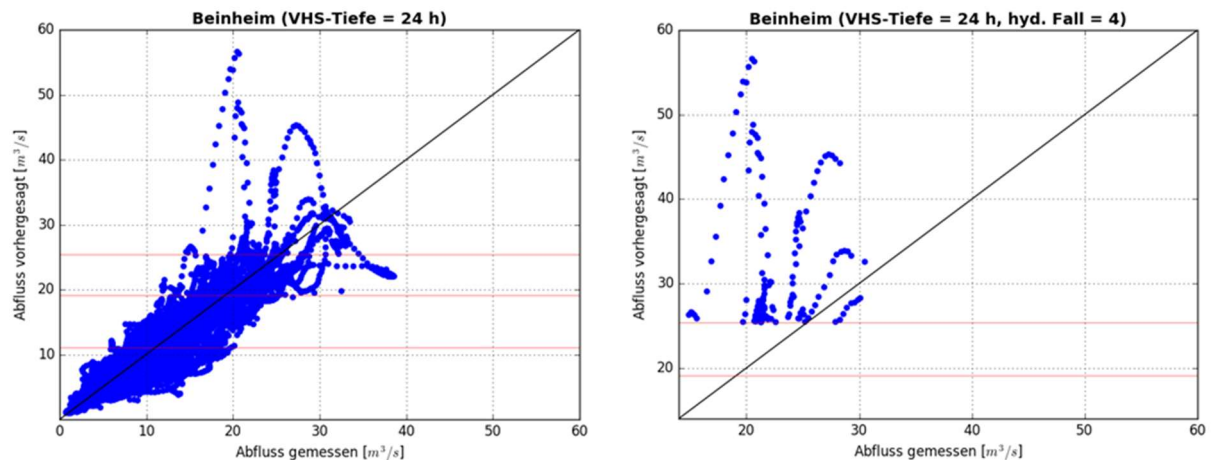


Figure 2 : Graphiques en nuage de points pour tous les cas hydrologiques (cas 0) (à gauche) et pour le cas 4 (prévision ascendante, >HQ5) (à droite) avec un délai de prévision de 24 heures pour la station limnimétrique de Beinheim/Sûre (Schweppe et al. 2017).

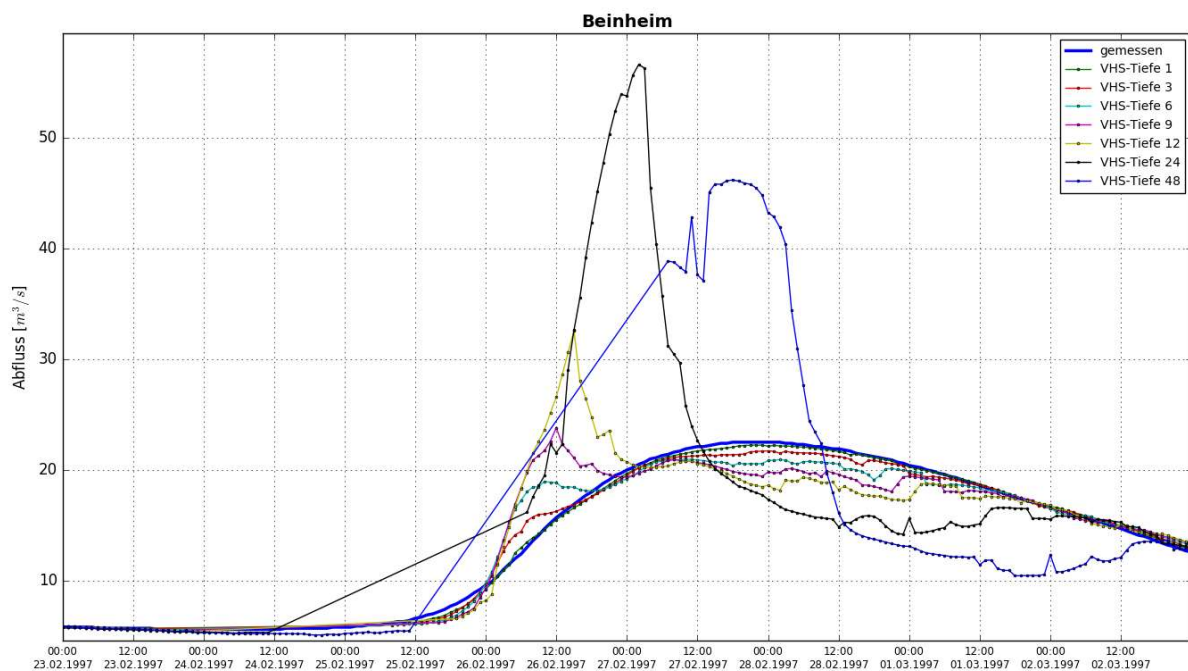


Figure 3 : Représentation des hydrogrammes des différentes profondeurs de prévision pour un événement survenu en 1997 à la station de Beinheim/Sûre (Schweppe et al. 2017).

Après avoir ainsi identifié et retiré les événements présentant des valeurs aberrantes à chaque station, l'analyse ProFoUnD est à nouveau réalisée. Les données relatives aux événements exclus des analyses sont mises à la disposition des centres de prévision concernés afin qu'ils puissent analyser les événements et étudier plus en détail les raisons des différences.

Vous trouverez de plus amples informations générales sur les évaluations réalisées avec ProFoUnD dans la documentation du programme ainsi que dans la description du projet:

Schweppe, R.; Aigner, D.; Gerlinger, K.; Demuth, N. & K. Gottschalk (2017): Interpretation der Auswertungen mit ProFoUnD für die Wasserhaushaltsmodelle Mosel, Maas und Elsass. Interprétation des évaluations avec ProFoUnD pour les modèles de bilan hydrologique Moselle, Meuse et Alsace.