

1. Einleitung

Die möglichst korrekte Modellierung des Wasserkreislaufs und der damit verbundenen Wasserflüsse zwischen den unterschiedlichen hydrologischen Komponenten des Einzugsgebiets der Oberen Donau ist eine zentrale Voraussetzung für Prognosen zu den zukünftigen Veränderungen des Wasserhaushalts und deren vielfältigen, sich daraus ergebenden Folgen. Das verwendete hydrologische Modell muss die Voraussetzung erfüllen, dass es prognosefähig ist, d.h., dass es in der Lage ist, die Wasserflüsse im betrachteten Einzugsgebiet auch unter zukünftig möglicherweise stark veränderten Randbedingungen richtig wiederzugeben. Die Veränderungen der Randbedingungen beziehen sich auf eine breite Palette von Faktoren, zu denen u.a. die Folgenden gehören:

- die Veränderung des Klimas,
- die Veränderung der Landnutzung und der Landbedeckung (hierin ist die Reaktion der Vegetation auf verstärkten Wasserstress und die Änderung der CO₂-Konzentration sowie die Intensivierung der Landwirtschaft eingeschlossen),
- die Veränderung des Gewässernetzes durch den Einbau neuer wasserbaulicher Strukturen (Speicherseen, Überleitungen, etc.) und
- die Veränderung der Wassernutzung, z.B. durch die Einführung von Bewässerung.

2. Das hydrologische Modell PROMET als Ergänzung zu DANUBIA

Bei der Entwicklung derjenigen Komponenten von DANUBIA, die die hydrologischen Landoberflächenprozesse beschreiben, wurde streng darauf geachtet, die gegenseitigen Wechselwirkungen durch die entsprechenden Schnittstellen zu realisieren. Dies führte zu den DANUBIA-Komponenten *Surface*, *Soil*, *Biological* und *Snow & Ice*. Sie bilden mit insgesamt über 100 Schnittstellen, über die Variablenwerte ausgetauscht werden, ein sehr umfangreiches Modellsystem, das die Komplexität der Landoberflächenprozesse widerspiegelt. Diese Komplexität der Struktur hat entsprechende Auswirkungen auf die Performanz der Komponente *Landsurface*. Aus diesem Grund wurde beschlossen, das außerhalb des Projektes entwickelte hydrologische Landoberflächenmodell PROMET (Mausser & Schädlich, 1998; Mausser & Bach, 2009) mit DANUBIA zu verbinden, um für die praktische Umsetzung von DANUBIA die Performanz zu steigern. PROMET ist in der Beschreibung der hydrologischen Landoberflächenprozesse weitgehend identisch mit den ursprünglichen *Landsurface* Komponenten, vermeidet aber die hohe Komplexität der Schnittstellen dadurch, dass die Komponenten intern verbunden sind. In DANUBIA wie auch in PROMET wurden folgende Prinzipien umgesetzt:

- eine vollständig physikalische und physiologische Beschreibung der Prozesse im Rahmen der Wasserflüsse in einem mesoskaligen Gebirgseinzugsgebiet. Folgende Prozesse sind abgedeckt:
 - meteorologische Antriebe entweder von regionalen Klimamodellen oder von Stationsdaten,
 - Energie- und Masseaustausch zwischen Landoberfläche und Atmosphäre unter Einschluss der physiologischen Kontrolle des Gasaustausches (Interzeption, Evapotranspiration, sensibler Wärmestrom, Kohlenstoffaustausch, Strahlungsbilanz, Impulsaustausch),
 - Schnee- und Eisdynamik,
 - Vertikaler und lateraler sowie gesättigter und ungesättigter Wasserfluss (Infiltration, Interflow, Oberflächenabfluss, Grundwasserfluss),
 - Gerinneabfluss und Fluss durch natürliche Seen als ein selbstorganisierter, reliefbedingter Vorgang und
 - Flüsse durch wasserbauliche Strukturen wie Laufkraftwerke, Speicherseen und Überleitungen.
- eine strikte Einhaltung der Erhaltungssätze (Masse und Energie),
- räumlich verteilte Modellierung der Prozesse auf Grundlage eines isotropen Rasters und

- Erhaltung der physikalischen Konsistenz und der Prognosefähigkeit durch weitgehenden Verzicht auf Kalibrierung. Das heißt, dass die Werte von Modellparametern nicht unter Nutzung gemessener Abflüsse an Pegeln durch Optimierung bestimmt werden. Vielmehr werden Literaturwerte, Messungen (im Gelände oder über Fernerkundung) sowie die detaillierte Analyse des Reliefs genutzt, um die Modellparameter zu initialisieren. Wichtig ist hierbei, dass alle Verfahren zur Bestimmung der Parameterwerte für das gesamte Gebiet in gleicher Weise angewendet werden und keine teileinzugspezifischen Regeln und Verfahren benutzt werden. Damit wird sichergestellt, dass die Verfahren zur Parameterbestimmung einen weiten Wertebereich abdecken.

Die hydrologische Modellierung wird wegen der auftretenden Performanzprobleme der *Land-surface* Komponente in DANUBIA für längere Modellläufe ab etwa 10 Jahren von PROMET übernommen. Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Wasserkreislauf-Komponenten in PROMET ist in Mausser & Bach (2009) in seiner aktuellen Version detailliert beschrieben und in Abbildung E4.1 in seinem Zusammenwirken mit DANUBIA dargestellt.

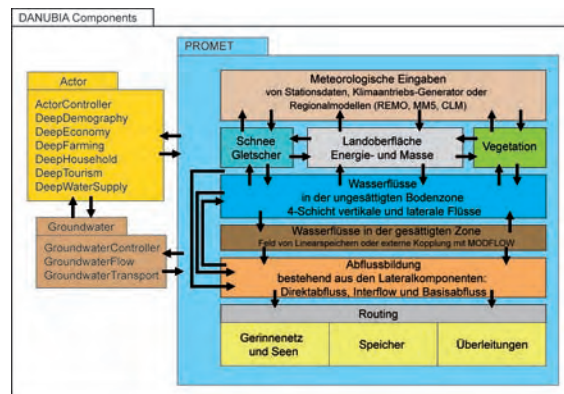


Abbildung E4.1: Vernetzung der Teilkomponenten des hydrologischen Modells PROMET (nach Mausser & Bach, 2009) mit DANUBIA.

3. Modellvalidierung

Mit PROMET wurden ohne Kalibrierung für das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau die Wasserflüsse für den meteorologischen Zeitraum von 1970 bis 2003 modelliert. Diese Untersuchungsperiode ist länger als die übliche Klimaperiode von 1971 bis 2000. Zum einen ermöglicht der Vorlauf von einem Jahr zur üblichen Klimaperiode, dass sich die Bodenspeicher einpendeln, zum anderen war beabsichtigt, das ungewöhnlich warme Jahr 2003 in die Analysen mit aufzunehmen. Die Modellierung des gesamten Zeitraums fand kontinuierlich und mit einem Modellzeitschritt von einer Stunde statt. Die Analyse der Ergebnisse erfolgte anhand gemessener Abflüsse an ausgewählten Pegeln im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Diese umfassen sowohl den Auslass am Pegel Achleiten bei Passau als auch Teileinzugsgebiete, die so ausgesucht wurden, dass sie eine breite Palette an Einzugsgebietsgrößen und hydrologischen Regimes abdecken. Die ausgewählten Pegel und ihre Einzugsgebiete sind in Tabelle E4.1 aufgelistet.

| Pegel/Fluss | Fläche [km ²] | Höhengradient | MQ [m ³ /sec] | Abflusskoeffizient |
|-------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------------|
| Achleiten/Donau | 76.673 | 2,96 | 1590 | 0,55 |
| Hofkirchen/Donau | 46.496 | 2,09 | 640 | 0,57 |
| Dillingen/Donau | 11.350 | 1,67 | 162 | 0,57 |
| Oberaudorf/Inn | 9.715 | 4,07 | 307 | 0,78 |
| Plattling/Isar | 8.435 | 2,34 | 175 | 0,58 |
| Laufen/Salzach | 6.112 | 3,46 | 239 | 0,80 |
| Heitzenhofen/Naab | 5.431 | 1,48 | 49,8 | 0,40 |
| Weilheim/Ammer | 607 | 1,63 | 15,4 | 0,74 |

Tabelle E4.1: Ausgewählte Pegel zur Validierung von PROMET im Zeitraum 1971-2003. Der Höhengradient ist hier definiert als das Verhältnis zwischen durchschnittlicher Höhe des Einzugsgebiets und der Höhenlage des betrachteten Pegels. Der Abflusskoeffizient gibt das Verhältnis des Jahresabflusses zum Jahresniederschlag an.

Die Tabelle E4.1 zeigt die große Spannweite der gewählten Teileinzugsgebiete. Sie unterscheiden sich z.T. erheblich im Höhengradienten und im

Abflusskoeffizienten vom Pegel Achleiten am Auslass der Oberen Donau, welcher das gesamte Einzugsgebiet repräsentiert. Der modellierte Bereich der Zentralalpen entwässert hauptsächlich über Inn und Salzach. Die entsprechenden Pegel in Oberaudorf und Laufen weisen hohe Werte des Abflusskoeffizienten und des Höhengradienten auf. Teile des nördlichen Alpenvorlandes entwässern über Isar und Ammer/Amper, ihre Pegel Plattling und Weilheim zeigen mittlere Werte des Abflusskoeffizienten und des Höhengradienten. Die niedrigsten Werte finden sich im Teileinzugsgebiet der Naab im Nordteil der Oberen Donau.

Die Validierung des hydrologischen Modells fand in drei Schritten statt: zunächst wurde die jährliche Wasserbilanz für das gesamte Einzugsgebiet und die Teileinzugsgebiete bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analyse geben Aufschluss über die Validität der Flächenmodellierung der Wasserbilanzen. Sie können wegen des hohen Grades an zeitlicher Aggregation nichts über die Validität der lateralen Flussmodellierung aussagen. Ergänzend dazu ist in Tabelle E4.2 das Ergebnis einer Regressionsanalyse (Steigung S, Bestimmtheitsmaß R²) dargestellt. Die Regressionsgerade wurde so gewählt, dass sie durch den Nullpunkt führt. Dies ergibt das strengstmögliche Kriterium für den Vergleich zwischen Messung und Modellierung, da damit angenommen wird, dass die Modellierung bei einem gemessenen Abfluss von Null m³/s ebenfalls Null m³/s ergibt und damit kein Offset existiert. Hat die Steigung der Geraden S einen Wert von 1,0, so besteht keine systematische Unter- bzw. Überschätzung des Abflusses durch das Modell. Läge der Wert des Bestimmtheitsmaßes R² gleichzeitig noch bei 1,0 so wären der gemessene und modellierte Datensatz identisch.

| Pegel | Steigung S | Bestimmtheitsmaß R ² |
|--------------|------------|---------------------------------|
| Achleiten | 1,05 | 0,93 |
| Hofkirchen | 1,12 | 0,93 |
| Dillingen | 1,14 | 0,93 |
| Oberaudorf | 0,99 | 0,80 |
| Plattling | 1,03 | 0,88 |
| Laufen | 0,93 | 0,85 |
| Heitzenhofen | 1,01 | 0,86 |
| Weilheim | 1,09 | 0,88 |

Tabelle E4.2: Steigung S und Bestimmtheitsmaß R² der linearen Regression zwischen dem modellierten und gemessenen jährlichen Abfluss an den ausgewählten Pegeln im Einzugsgebiet der Oberen Donau; Zeitraum 1971-2003.

Die Steigungen liegen in der Regel nahe bei einem Wert von 1,0, wobei die höchste positive Abweichung von 14% Überschätzung am Pegel Dillingen auftritt und die stärkste Unterschätzung mit 7% an der Salzach zu finden ist. Die jeweiligen Bestimmtheitsmaße sind durchweg hoch bis sehr hoch, was zu der Schlussfolgerung führt, dass sowohl in den Teilräumen als auch im Gesamtgebiet die gesamte Variabilität des Abflusses durch die Modellierung gut erfasst wird.

Als zweiter Schritt wurden die stündlich berechneten Abflüsse auf Tageswerte aggregiert und diese mit den an den Pegeln gemessenen Daten verglichen. Die Aggregation ist notwendig, da sich sonst größere Unstimmigkeiten im Vergleich der gemessenen und modellierten Abflüsse ergeben würden. Sie werden dadurch hervorgerufen, dass die zeitliche Zuordnung der stündlichen Niederschläge innerhalb der „Mannheimer Stunden“ – Zeitintervalle (zwischen 7:30, 14:30 und 21:30 Uhr) im Gegensatz zur stündlichen Abflussmessung – nicht eindeutig ist und damit nicht-definierte zeitliche Verschiebungen der modellierten stündlichen Abflüsse von im Mittel ca. 5 Stunden entstehen.

Abbildung E4.2 zeigt den Verlauf der gemessenen und modellierten täglichen Abflüsse am Pegel Achleiten für die Jahre 1971-2003. Hier wird veranschaulicht, dass die gemessenen und modellierten Verläufe generell sehr ähnliche Niedrig- und Hochwasserabflüsse aufweisen. Relativ feuchten Perioden um 1980 stehen trockene Perioden, z.B. der Jahre 1971 oder 2003 gegenüber. Um die Beziehung der beiden Abflusskurven in Abbildung E4.2 genauer zu untersuchen, wurden sie analog zur Vorgehensweise beim

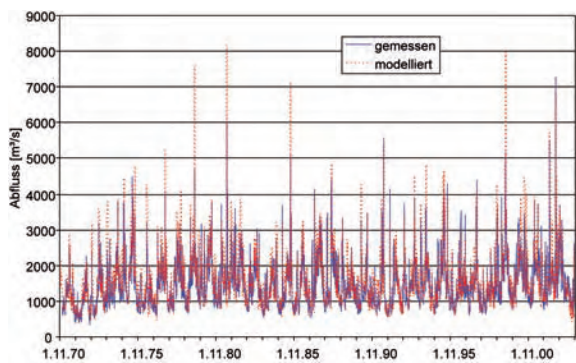


Abbildung E4.2: Gemessene und modellierte tägliche Abflüsse am Pegel Achleiten für die Periode 1971-2003.

jährlichen Abfluss (siehe Tabelle E4.2) einer Regressionsanalyse unterzogen. Das Ergebnis ist in Abbildung E4.3 zu sehen. Die modellierten Ergebnisse zeigen einen leichten Trend zur Überschätzung der Abflüsse von 3% bei einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,87$. Die extremen Abflüsse oberhalb von 4000 m³/s zeigen allerdings eine recht starke Streuung, was darauf hindeutet, dass die Hochwasserereignisse nicht mit der für mittlere Abflüsse erzielten Genauigkeit modelliert werden.

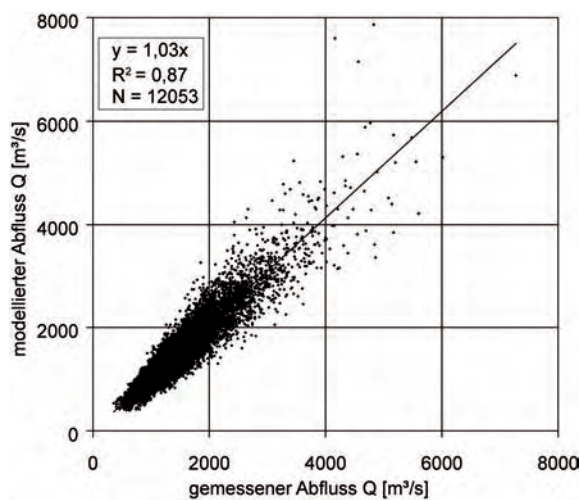


Abbildung E4.3: Vergleich der gemessenen und modellierten täglichen Abflüsse am Pegel Achleiten im Zeitraum 1971-2003.

Das in Abbildung E4.3 dargestellte Vorgehen wurde für alle ausgewählten Pegel durchgeführt und führte zu den Werten in Tabelle E4.3.

| Pegel | Steigung S | R² | Nash-Sutcliffe Koeffizient |
|--------------|------------|------|----------------------------|
| Achleiten | 1,03 | 0,87 | 0,84 |
| Hofkirchen | 1,11 | 0,87 | 0,81 |
| Dillingen | 1,13 | 0,84 | 0,72 |
| Oberaudorf | 0,94 | 0,81 | 0,80 |
| Plattling | 1,08 | 0,75 | 0,47 |
| Laufen | 0,86 | 0,85 | 0,80 |
| Heitzenhofen | 0,99 | 0,78 | 0,79 |
| Weilheim | 0,98 | 0,73 | 0,69 |

Tabelle E4.3: Steigung S und Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression sowie Nash-Sutcliffe Koeffizient zwischen dem modellierten und gemessenen täglichen Abfluss an den ausgewählten Pegeln im Einzugsgebiet der Oberen Donau; Zeitraum 1971-2003.

Gegenüber Tabelle E4.2, bei der die jährlichen Abflussvolumina für die unterschiedlichen Pegel gegenüber gestellt wurden, sind die Unterschiede in den Steigungen der täglichen Abflüsse ausgeprägter. Sie reichen von einer mittleren Überschätzung von 13% in Dillingen bis zu einer mittleren Unterschätzung der Abflüsse von 14% am Pegel Laufen/Salzach. Die Bestimmtheitsmaße der täglichen Abflüsse sind durchweg hoch, aber geringer als bei den jährlichen Abflüssen (siehe Tabelle E4.2), was sich aus der größeren Variabilität der täglichen Abflüsse erklärt. Bei der Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes und des Nash-Sutcliffe Koeffizienten fällt vor allem der Pegel Plattling auf. Hier sind beide Werte vergleichsweise niedrig und es kann in diesem Fall von keinem guten Modellierungsergebnis gesprochen werden. Die schlechte Übereinstimmung der gemessenen und modellierten täglichen Abflüsse erklärt sich an diesem Pegel vor allem durch den Einfluss des Sylvensteinspeichers und durch diverse Überleitungen u.a. in das Inn-Gebiet. Der Sylvensteinspeicher ist zwar im Modell implementiert, wird aber nach einfachen, normierten Regeln betrieben, die monatlich die aktuelle Wasserabgabe mit dem Füllstand regeln (siehe

auch Kapitel 2.7.1). Diese einfachen Regeln unterscheiden sich teilweise deutlich vom tatsächlichen Betrieb des Sylvensteinspeichers, der aus externer Sicht nur schwer nachzuvollziehen ist. An dieser Stelle werden die Grenzen deutlich, die der physikalisch basierten hydrologischen Modellierung durch menschliche Eingriffe gesteckt sind, vor allem wenn die Modellierung Ergebnisse zu zukünftigen Veränderungen von Abflüssen aufgrund von Klimaänderungen liefern soll.

Lässt man deshalb das Einzugsgebiet der Isar bis zum Pegel Plattling bei der weiteren Analyse außer Betracht, so kann man das Bestimmtheitsmaß zwischen den modellierten und gemessenen täglichen Abflüssen in Abhängigkeit von der Größe des Teileinzugsgebiets untersuchen. Es ergibt sich dabei eine lineare Beziehung zwischen Bestimmtheitsmaß und Logarithmus der Teileinzugsgebietsfläche (siehe Abbildung E4.4). Die Abnahme des Bestimmtheitsmaßes mit sich reduzierender Teileinzugsgebietsfläche ist zu erwarten, da die Anzahl der Proxel und damit die Anzahl der räumlichen Stützstellen bei der Modellierung gleichzeitig abnimmt. Aus der Tatsache, dass die gezeigte Gerade bereits 80% der Varianz der Daten erklärt, die der Abbildung E4.4 zugrunde liegen, ergibt sich allerdings auch, dass das Bestimmtheitsmaß offensichtlich nur unwesentlich von der Lage oder vom Regime des gewählten Teileinzugsgebietes abhängt.

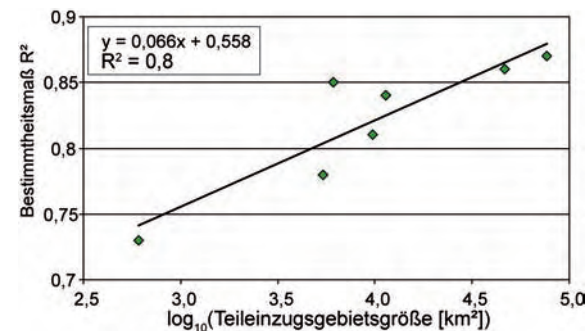


Abbildung E4.4: Abhängigkeit des Bestimmtheitsmaßes R^2 von der Fläche der gewählten Teileinzugsgebiete. Der Pegel Plattling wurde wegen der starken anthropogenen Einflüsse nicht berücksichtigt.

Als dritter Validierungsschritt wurden aus den gemessenen und modellierten jährlichen Abflussmaxima und -minima am Pegel Achleiten Wiederkehrintervalle berechnet und verglichen. Die gemessenen und modellierten höchsten Tagesabflüsse der Periode 1971-2003 sind in Abbildung E4.5 dargestellt.

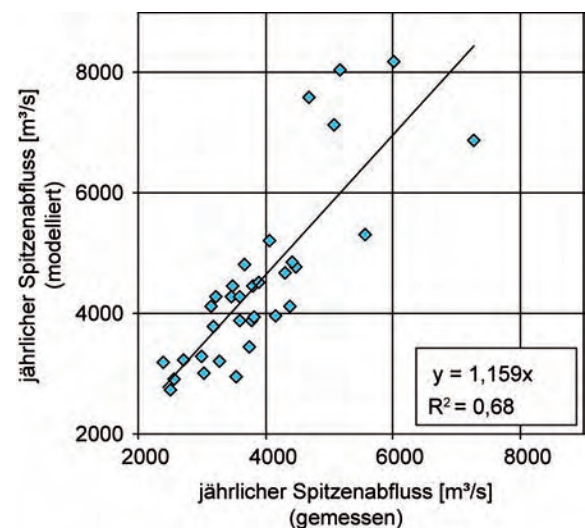


Abbildung E4.5: Vergleich der modellierten und gemessenen jährlichen Spitzenabflüsse am Pegel Achleiten für die Periode 1971-2003.

Wie in Abbildung E4.2 schon angedeutet zeigt sich hier eine systematische Überschätzung der Spitzenabflüsse um im Mittel etwa 16% bei der Modellierung. Der Grund dafür ist in der Vernachlässigung der Ausuferung im Fall größerer Hochwasser und der damit verbundenen Reduzierung der Hochwasserscheitelwerte zu suchen. Diese wird in der Modellierung des Abflusses im Gerinne zurzeit nicht berücksichtigt. Auch gehen gezielte Steuerungsmaßnahmen der im Einzugsgebiet verfügbaren Speicher zum teilweisen Rückhalt der Hochwasserwelle (z.B. durch Absenkung der Speicher vor Beginn des Ereignisses) nicht in die Modellierung der Hochwasserspitzen ein. Diese können, wie das Beispiel des Hochwassers in August 2005 gezeigt hat (LfU, 2006), ganz beträchtlich zur Reduzierung der Scheitelabflüsse beitragen, sind aber zurzeit im Modell noch nicht implementiert. Abbildung E4.6

zeigt die jährlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Achleiten. Hierbei wurde der mittlere 7-tägige Abfluss (NM7Q) berücksichtigt (siehe auch Kapitel 3.1.2).

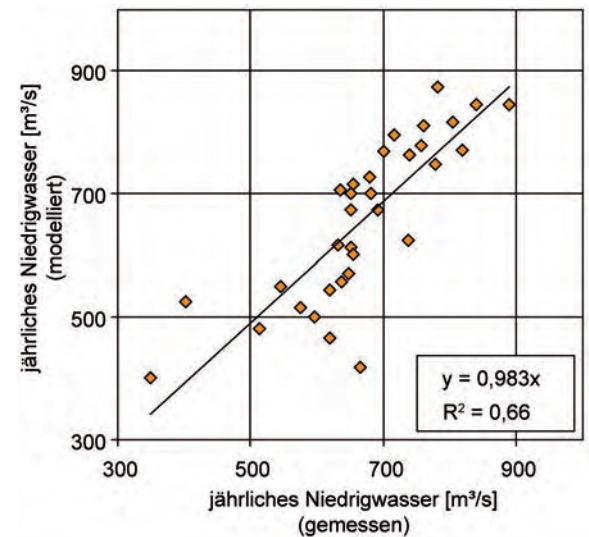


Abbildung E4.6: Vergleich der modellierten und gemessenen jährlichen Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) am Pegel Achleiten für die Periode 1971-2003.

Bei den Niedrigwasserabflüssen zeigt sich keine eindeutige systematische Abweichung zwischen Messung und Modellierung. Nur zwei Jahre fallen aus dem ansonsten recht stabilen Trend heraus und zeigen sehr viel höhere gemessene als modellierte Niedrigwasserabflüsse.

Aus den jährlichen Maxima bzw. Minima wurden durch Anpassung von Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen Jährlichkeiten bestimmt. Hierfür kam im Fall der Hochwasserspitzen die Richtlinie des DVWK (1999) zur Anwendung. Im Fall der Niedrigwasserabflüsse wurde angenommen, dass eine log-Normalverteilung die natürliche Variabilität des Niedrigwassers im Einzugsgebiet gut wiedergibt. Die bestimmten Wiederkehrintervalle für Hoch- und Niedrigwasser sind in Abbildung E4.7 gegenüber gestellt.

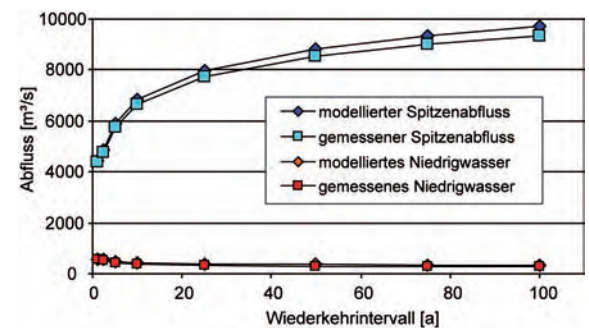


Abbildung E4.7: Vergleich der modellierten und gemessenen Wiederkehrintervalle für Hoch- bzw. Niedrigwasserabflüsse in Achleiten für die Periode 1971-2003.

4. Zusammenfassung

Die Validierung hat gezeigt, dass der in PROMET umgesetzte Ansatz die räumliche und zeitliche Variabilität der Wasserflüsse im Einzugsgebiet der Oberen Donau mit hoher Genauigkeit wiedergeben kann. Dies gilt sowohl für die saisonale als auch für die tägliche Skala und für Teileinzugsgebiete bis zu einer Fläche von etwa 1000 km². Die Dynamik der Extreme wird gut wiedergegeben, wobei eine leichte Tendenz zur Überschätzung der Hochwasserspitzen besteht. Da keine Kalibrierung mithilfe gemessener Abflüsse durchgeführt wurde und weil die Obere Donau ein sehr inhomogenes Einzugsgebiet darstellt, ist der Schluss zulässig, dass auch die zukünftigen hydrologischen Entwicklungen erfolgreich modelliert werden können.

Autor

W. Mauser
Department für Geographie, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2006): *Endbericht Hochwasser August 2005*, Augsburg, 2006.
Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (1999): *DVWK-Merkblatt 251/100, Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*, Bonn.
Mauser, W. & Bach, H. (2009): *PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds*. Journal of Hydrology, 376, pp. 362–377.
Mauser, W. & Schädlich, S. (1998): *Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data*. J. of Hydrology 212-213, 6 250-267.