

Das Teilmodell „Benthos“

Im Teilmodell „Benthos“ werden die Biomassendichten von Algen (Periphyton) und von verschiedenen Ernährungsgruppen* der Makroinvertebraten (Wirbellose) innerhalb eines Jahres abgeschätzt. Ausserdem wird die Gesamtbioasse an Makroinvertebraten modelliert, die vom Teilmodell „Fische“ zur Beschreibung der Nahrungsgrundlagen der Bachforellen verwendet wird.

* Folgende Ernährungsgruppen werden im Modell berücksichtigt: Weidegänger, Kollektoren, Prädatoren.

Das Teilmodell Benthos wurde für schweizerische Mittellandflüsse

- mit einem mittleren Abfluss zwischen 1 und 160 m³/s
- mit einer mittleren Korngrösse zwischen 1 und 30 cm
- mit einer mittleren Fliessgeschwindigkeit zwischen 0.3 und 1 m/s (bei MQ)
- mit einer mittleren Wassertiefe zwischen 0.1 und 1 m (bei MQ)

entwickelt.

Eine detaillierte Beschreibung des Teilmodells „Benthos“ findet sich in Schweizer et al. (2007) und Schweizer (2007).

Vorhersage der Algenbiomassendichte (Periphyton)

In diesem Untermodell wird die Biomassendichte der Algen (Periphyton) (in Gramm Aschefreies Trockengewicht pro Quadratmeter Flusssohle) innerhalb eines Jahres abgeschätzt.

Die Entwicklung des Periphyton-Teilmodells basiert auf Periphyton-Daten der Sihl (Elber et al. 1992 und 1996; Schuwirth et al. 2007), des Neckers (Uehlinger et al. 1996, Uehlinger 1991) und der Garonne (Bouletreau et al. 2006) (8 Stellen mit insgesamt 286 Periphytonmessungen) (vgl. Abb.1).

Folgende Modelleingangsgrössen werden in diesem Teilmodell verwendet:

- repräsentative Abflussganglinie eines Jahres (m³/s)
- Median Korngrösse d_{50} (m)
- mittlere Fliessgeschwindigkeit (V_{el}) bei mittlerem Abfluss (diese wird im Teilmodell Morphologie&Hydraulik/Habitatsverteilung berechnet)
- Tage seit dem letzten bettaufreissenden Hochwasser (Δt_{flood}): aus der repräsentativen Abflussganglinie wird die Ganglinie der Sohlenschubspannung berechnet. Jedes mal, wenn die Sohlenschubspannung einen kritischen Wert (berechnet nach Günther (1971) im Teilmodell Morphologie & Hydraulik/Kolmation) übersteigt, wird ein bettaufreissendes Hochwasser angenommen (dies wird im Modell automatisch durchgeführt)

Die Modellgleichung für die Berechnung der Periphyton-Biomasse $B_{\text{Periphyton}}$ (g AFDM/m²) hat folgende Form (mit AFDM = Aschefreies Trockengewicht):

$$B_{\text{Periphyton}} = \frac{B_{\text{max}} \cdot k_B \cdot \Delta t_{\text{flood}}}{B_{\text{max}} + k_B \cdot \Delta t_{\text{flood}}} \cdot e^{-\delta \cdot \text{Vel}} \cdot \frac{d_{50}}{k_{d50} + d_{50}}$$

B_{max} = maximal mögliche Periphyton-Biomasse (g AFDM/m²)

k_B = Periphyton-Wachstumsrate (g AFDM/m²/d)

Δt_{flood} = Tage seit letztem bettaufließendem Hochwasser (Tage)

d_{50} = Median Korngrösse (m)

k_{d50} = Halbsättigungskonstante für die mittlere Korngrösse (m)

δ = Modellparameter zur Beschreibung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit (s/m)

Vel = Fließgeschwindigkeit bei mittlerem Abfluss (m/s)

Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter B_{max} , k_B , k_{d50} und δ wird durch eine multivariate Normalverteilung berücksichtigt (Tabelle 1). Die Abschätzung der Unsicherheitsverteilung der Modellparameter basiert auf wissenschaftlicher Literatur und auf Erkenntnissen, die bei der Modellentwicklung gewonnen werden konnten (Schweizer et al. 2007).

Tabelle 1: Unsicherheitsverteilung (multivariate Normalverteilung) der Modellparameter für das Periphyton-Teilmodell

Modellparameter	geschätzter Mittelwert	angenommene Standardabweichung
B_{max}	1500 g AFDM/m ²	300 g AFDM/m ²
k_B	16.5 g AFDM/m ² /d	2.2 g AFDM/m ² /d
k_{d50}	0.2 m	0.04 m
δ	3.22 s/m	0.11 s/m

Bemerkung: In Analytica wird diese multivariate Normalverteilung mit den geschätzten Mittelwerten und der Kovarianzmatrix (dieser 4 Modellparameter) definiert.

Berücksichtigung der Unsicherheit in der Modellstruktur und bei der Datenerhebung (Messfehler)

Damit sich die Residuen (Abweichungen) der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern, wird eine so genannte Box-Cox-Transformation durchgeführt (Box & Cox 1964, 1982):

$$g(B) = \begin{cases} \frac{(B + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \lambda_1 \neq 0 \\ \ln(B + \lambda_2) & \lambda_1 = 0 \end{cases}$$

(mit $\lambda_1 = 0.3$ und $\lambda_2 = 1 \text{ g AFDM/m}^2$)

Diese Transformation erlaubt, dass anschliessend ein normal-verteilter Fehlerterm ($\mu = (0 \text{ g AFDM/m}^2)^{0.3}$, $\sigma = (1.63 \text{ g AFDM/m}^2)^{0.3}$) zum Modellergebnis hinzugefügt werden kann. Eine anschliessende Rücktransformation ergibt dann die Periphytonbiomasse unter Berücksichtigung aller oben beschriebener Unsicherheiten (Knoten „Vorhergesagte Periphyton Biomasse“, vgl. Abb.1).

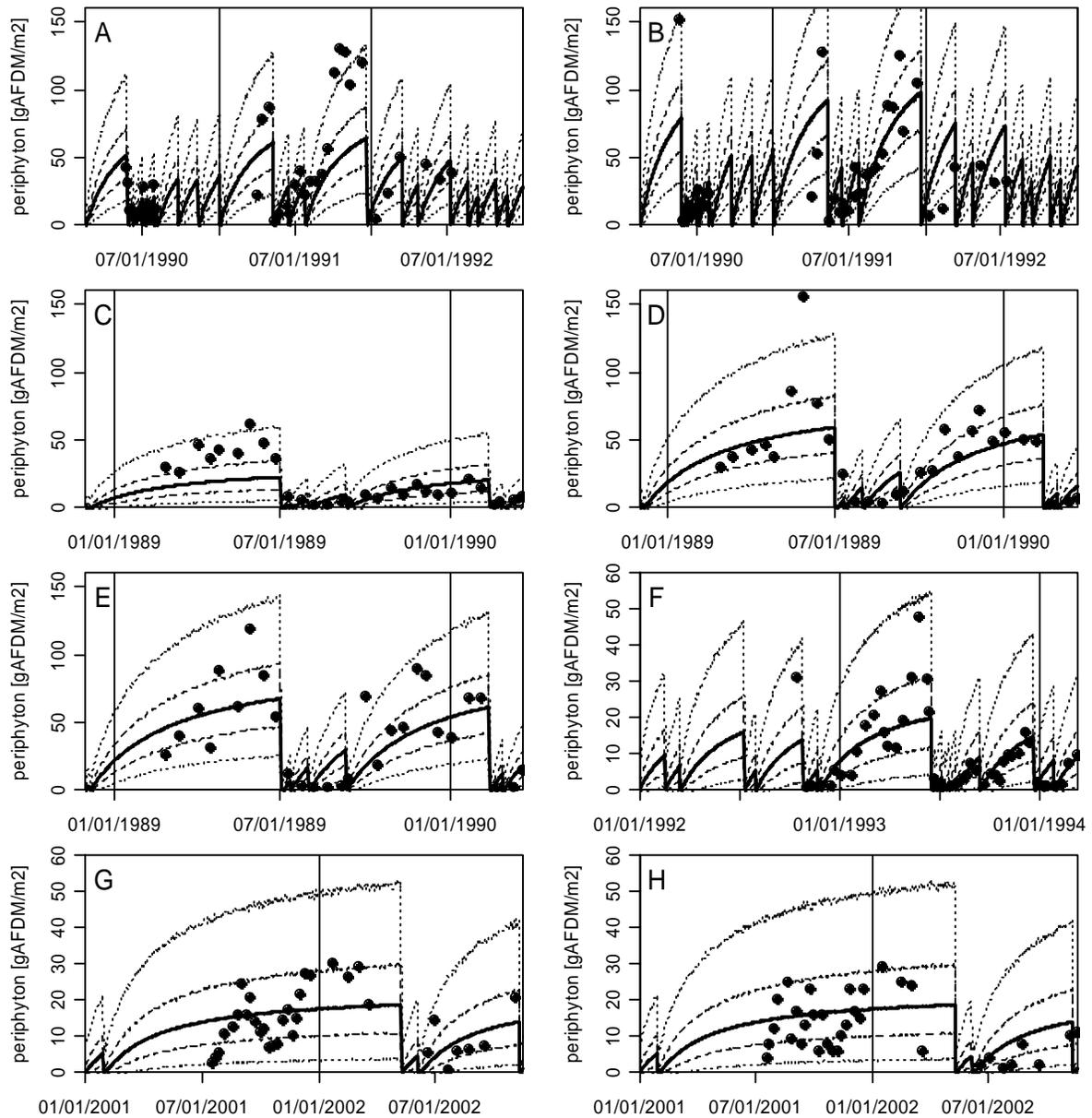


Abb. 1: Periphyton-Modellsimulationen und gemessene Periphyton Biomassendichten (schwarze Kreise) unter Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern, in der Modellstruktur und in der Messgenauigkeit. Die durchgezogene Linie zeigt die Median Modellergebnisse (50% der Modellergebnisse liegen darüber, 50% darunter), die gestrichelten Linien umschliessen jeweils 50%, bzw. 90% der Modellergebnisse.
 A: Sihl obere Stelle. B: Sihl untere Stelle. C: Necker Aachsäge Hauptkanal. D: Necker Aachsäge überflutete Kiesbank. E: Necker Aachsäge Seitenkanal. F: Necker untere Stelle. G: Garonne Gagnac. H: Garonne Auach.

Bemerkung: Da durch extreme Verteilungen der Modellparameter und dem Hinzufügen des Fehlerterms nach der Box-Cox-Transformation auch (sehr kleine) negative Werte vorhergesagt werden können, werden diese im Modell auf 0 g AFDM/m² gesetzt.

Gesamtbiomasse des Makrozoobenthos (MZB)

In diesem Untermodell wird die Biomassendichte des Makrozoobenthos (in Gramm Trockengewicht pro Quadratmeter Flusssohle) innerhalb eines Jahres abgeschätzt.

Die Entwicklung dieses Teilmodells basiert auf Makrozoobenthos-Daten der Sihl (Elber et al. 1992 und 1996; Schuwirth et al. 2007) (2 Stellen mit insgesamt 86 Invertebratenmessungen) (vgl. Abb. 2 obere Reihe).

Folgende Modelleingangsgrößen werden in diesem Teilmodell verwendet:

- repräsentative Abflussganglinie eines Jahres (m^3/s)
- Median Korngrösse d_{50} (m)
- Tage seit dem letzten bettaufreissenden Hochwasser (Δt_{flood}): aus der repräsentativen Abflussganglinie wird die Ganglinie der Sohlenschubspannung berechnet. Jedes mal, wenn die Sohlenschubspannung einen kritischen Wert (berechnet nach Günther (1971) im Teilmodell Morphologie & Hydraulik/Kolmation) übersteigt, wird ein bettaufreissendes Hochwasser angenommen (dies wird im Modell automatisch durchgeführt)
- Julianische Tage* Δt_{jul} zur Beschreibung der Saisonalität (werden im Modell automatisch als Index generiert)

* unter Julianischen Tagen versteht man die Zeit in Tagen seit dem 1. Januar - z.B. entspricht der 1. Februar dem Julianischen Tag 32.

Die Modellgleichung für die Berechnung der Biomasse des gesamten Makrozoobenthos B_{MZB} (g TW/ m^2) hat folgende Form (mit TW = Trockengewicht):

$$B_{MZB} = \frac{B_{max} \cdot k_B \cdot \Delta t_{flood}^b}{B_{max} + k_B \cdot \Delta t_{flood}^b} \cdot \frac{d_{50}}{k_{d50} + d_{50}} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{\Delta t_{jul} - \Delta t_{jul}^{max}}{365.25} \right) \right)$$

B_{max} = maximal mögliche MZB-Biomasse (g TW/ m^2)

k_B = Wachstumsrate des MZB (g TW/ m^2/d^b)

b = Modellparameter zur nicht-linearen Beschreibung der Wachstumsrate nach bettaufreissenden Hochwasserereignissen (-)

Δt_{flood} = Tage seit letztem bettaufreissenden Hochwasser (Tage)

d_{50} = Median Korngrösse (m)

k_{d50} = Halbsättigungskonstante für die mittlere Korngrösse (m)

α = Modellparameter zur Gewichtung des Einflusses der Saisonalität auf das MZB (-)

Δt_{jul} = Julianische Tage (wird vom Modell automatisch generiert)

Δt_{jul}^{max} = Tag im Jahr mit maximaler MZB-Biomasse (Julianischer Tag)

Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter B_{\max} , k_B , b , k_{d50} , α und Δt_{jul}^{\max} wird durch eine multivariate Normalverteilung berücksichtigt (Tabelle 2). Die Abschätzung der Unsicherheitsverteilung der Modellparameter basiert auf wissenschaftlicher Literatur, umfassenden Makrozoobenthosdatensätzen aus Österreich (Yoshimura 2006) und auf Erkenntnissen, die bei der Modellentwicklung gewonnen werden konnten (Schweizer et al. 2007).

Tabelle 2: Unsicherheitsverteilung (multivariate Normalverteilung) der Modellparameter für das Teilmodell „Total MZB“

Modellparameter	geschätzter Mittelwert	angenommene Standardabweichung
B_{\max}	150 g TW/m ²	30 g TW/m ²
k_B	2.26 g TW/m ² /d ^b	0.52 g TW/m ² /d ^b
k_{d50}	0.2 m	0.04 m
Δt_{jul}^{\max}	257	6
α	0.79	0.06
b	0.57	0.06

Bemerkung: In Analytica wird diese multivariate Normalverteilung mit den geschätzten Mittelwerten und der Kovarianzmatrix (dieser 6 Modellparameter) definiert.

Berücksichtigung der Unsicherheit in der Modellstruktur und bei der Datenerhebung (Messfehler)

Damit sich die Residuen (Abweichungen) der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern, wird eine so genannte Box-Cox-Transformation durchgeführt (Box & Cox 1964, 1982).

$$g(B) = \begin{cases} \frac{(B + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \lambda_1 \neq 0 \\ \ln(B + \lambda_2) & \lambda_1 = 0 \end{cases}$$

(mit $\lambda_1 = 0.3$ und $\lambda_2 = 1$ g TW/m²)

Diese Transformation erlaubt, dass anschliessend ein normal-verteilter Fehlerterm ($\mu = (0 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$, $\sigma = (0.75 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$) zum Modellergebnis hinzugefügt werden kann. Eine anschliessende Rücktransformation ergibt dann die Gesamtbioasse des Makrozoobenthos unter Berücksichtigung aller oben beschriebener Unsicherheiten (Knoten „Vorhergesagte Makrozoobenthos Biomasse“, vgl. Abb. 2 obere Reihe).

Bemerkung: Da durch extreme Verteilungen der Modellparameter und dem Hinzufügen des Fehlerterms nach der Box-Cox-Transformation auch (sehr kleine) negative Werte vorhergesagt werden können, werden diese im Modell auf 0 g TW/m² gesetzt.

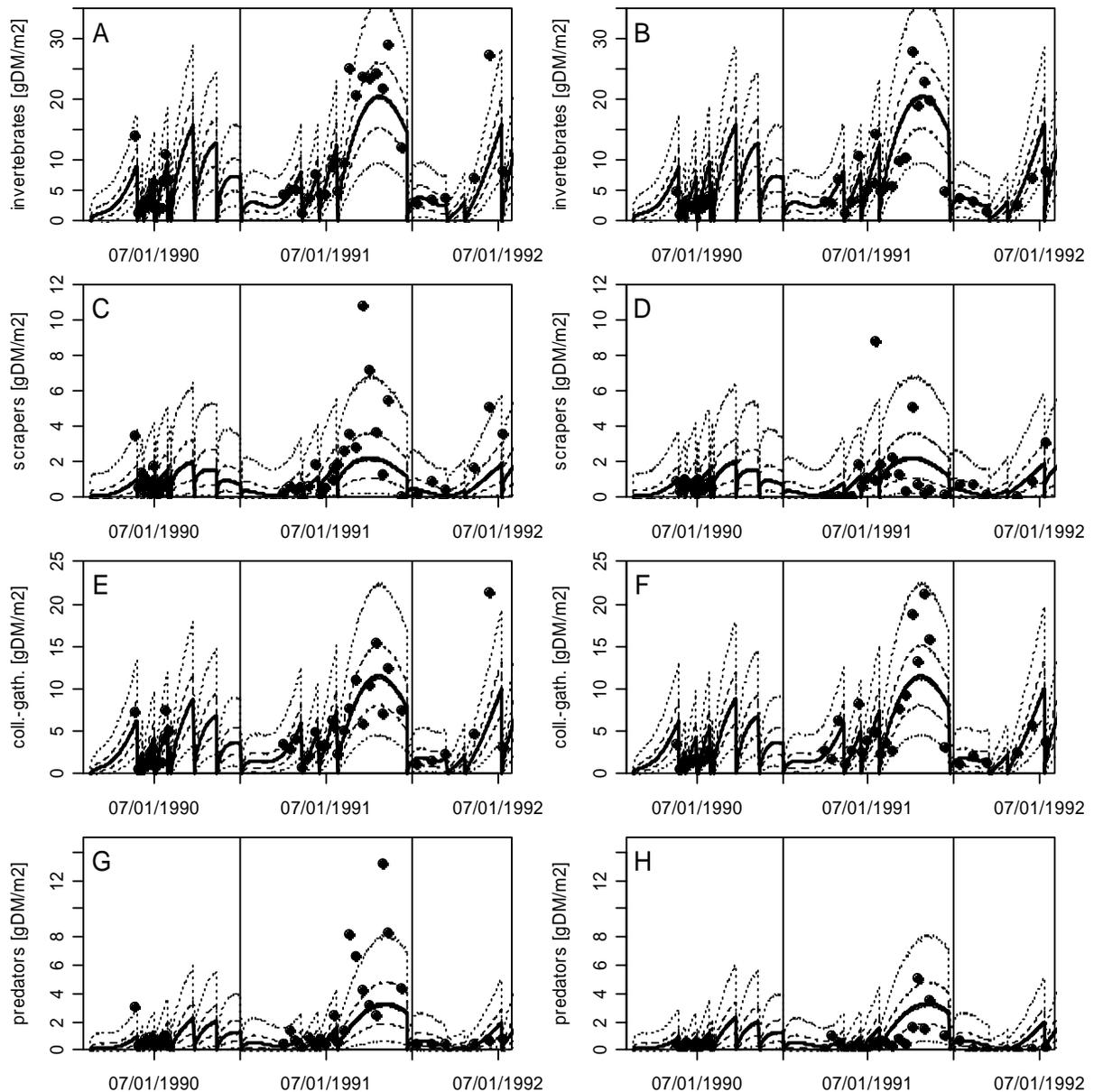


Abb. 2: Modellsimulationen der Biomassendichten von Invertebraten und gemessene Invertebraten Biomassendichten (schwarze Kreise) unter Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern, in der Modellstruktur und in der Messgenauigkeit. Die durchgezogene Linie zeigt den Median der Modellergebnisse (50% der Modellergebnisse liegen darüber, 50% darunter), die gestrichelten Linien umschliessen jeweils 50%, bzw. 90% der Modellergebnisse. Linke Spalte: Sihl obere Stelle, rechte Spalte: Sihl untere Stelle. 1.Reihe (Bild A und B): Gesamtbiomassendichten des Makrozoobenthos, 2.Reihe (Bild C und D): Biomassendichten der Weidegänger, 3.Reihe (Bild E und F): Biomassendichten der Kollektoren, 4.Reihe (Bild G und H): Biomassendichten der Prädatoren.

Biomasse der Weidegänger (Scraper)

In diesem Untermodell wird die Biomassendichte der Weidegänger (in Gramm Trockengewicht pro Quadratmeter Flusssohle) innerhalb eines Jahres abgeschätzt.

Die Entwicklung dieses Teilmodells basiert auf Makrozoobenthos-Daten der Sihl (Elber et al. 1992 und 1996; Schuwirth et al. 2007) (2 Stellen mit insgesamt 86 Invertebratenmessungen) (vgl. Abb. 2 zweite Reihe).

Folgende Modelleingangsgrößen werden verwendet:

- repräsentative Abflussganglinie eines Jahres (m^3/s)
- Median Korngrösse d_{50} (m)
- Tage seit dem letzten bettaufreissenden Hochwasser (Δt_{flood}): aus der repräsentativen Abflussganglinie wird die Ganglinie der Sohlenschubspannung berechnet. Jedes mal, wenn die Sohlenschubspannung einen kritischen Wert (berechnet nach Günther (1971) im Teilmodell Morphologie & Hydraulik/Kolmation) übersteigt, wird ein bettaufreissendes Hochwasser angenommen (dies wird im Modell automatisch durchgeführt)
- Julianische Tage Δt_{jul} * zur Beschreibung der Saisonalität (werden im Modell automatisch als Index generiert)

* unter Julianischen Tagen versteht man die Zeit in Tagen seit dem 1. Januar - z.B. entspricht der 1. Februar dem Julianischen Tag 32.

Die Modellgleichung für die Berechnung der Weidegänger Biomasse $B_{Weidegänger}$ (g TW/ m^2) hat folgende Form (mit TW = Trockengewicht):

$$B_{Weidegänger} = \frac{B_{max} \cdot k_B \cdot \Delta t_{flood}^b}{B_{max} + k_B \cdot \Delta t_{flood}^b} \cdot \frac{d_{50}}{k_{d50} + d_{50}} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{\Delta t_{jul} - \Delta t_{jul}^{max}}{365.25} \right) \right)$$

B_{max} = maximal mögliche Weidegänger Biomasse (g TW/ m^2)

k_B = Wachstumsrate der Weidegänger (g TW/ m^2/d^b)

b = Modellparameter zur nicht-linearen Beschreibung der Wachstumsrate nach bettaufreissenden Hochwasserereignissen (-)

Δt_{flood} = Tage seit letztem bettaufreissenden Hochwasser (Tage)

d_{50} = Median Korngrösse (m)

k_{d50} = Halbsättigungskonstante für die mittlere Korngrösse (m)

α = Modellparameter zur Gewichtung des Einflusses der Saisonalität auf die Weidegänger (-)

Δt_{jul} = Julianische Tage (wird vom Modell automatisch generiert)

Δt_{jul}^{max} = Tag im Jahr mit maximaler Weidegänger Biomasse (Julianischer Tag)

Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter B_{\max} , k_B , b , k_{d50} , α und Δt_{jul}^{\max} wird durch eine multivariate Normalverteilung berücksichtigt (Tabelle 3). Die Abschätzung der Unsicherheitsverteilung der Modellparameter basiert auf wissenschaftlicher Literatur, umfassenden Makrozoobenthosdatensätzen aus Österreich (Yoshimura 2006) und auf Erkenntnissen, die bei der Modellentwicklung gewonnen werden konnten (Schweizer et al. 2007).

Tabelle 3: Unsicherheitsverteilung (multivariate Normalverteilung) der Modellparameter für das Teilmodell „Weidegänger“

Modellparameter	geschätzter Mittelwert	angenommene Standardabweichung
B_{\max}	25 g TW/m ²	5 g TW/m ²
k_B	0.84 g TW/m ² /d ^b	0.33 g TW/m ² /d ^b
k_{d50}	0.2 m	0.04 m
Δt_{jul}^{\max}	251	12
α	0.89	0.13
b	0.27	0.11

Bemerkung: In Analytica wird diese multivariate Normalverteilung mit den geschätzten Mittelwerten und der Kovarianzmatrix (dieser 6 Modellparameter) definiert.

Berücksichtigung der Unsicherheit in der Modellstruktur und bei der Datenerhebung (Messfehler)

Damit sich die Residuen (Abweichungen) der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern, wird eine so genannte Box-Cox-Transformation durchgeführt (Box & Cox 1964, 1982).

$$g(B) = \begin{cases} \frac{(B + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \lambda_1 \neq 0 \\ \ln(B + \lambda_2) & \lambda_1 = 0 \end{cases}$$

(mit $\lambda_1 = 0.3$ und $\lambda_2 = 0.1$ g TW/m²)

Diese Transformation erlaubt, dass anschliessend ein normal-verteilter Fehlerterm ($\mu = (0 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$, $\sigma = 0.94 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$) zum Modellergebnis hinzugefügt werden kann. Eine anschliessende Rücktransformation ergibt dann die Biomasse der Weidegänger unter Berücksichtigung aller oben beschriebener Unsicherheiten (Knoten „Vorhergesagte Weidegänger Biomasse“, vgl. Abb.2 zweite Reihe).

Bemerkung: Da durch extreme Verteilungen der Modellparameter und dem Hinzufügen des Fehlerterms nach der Box-Cox-Transformation auch (sehr kleine) negative Werte vorhergesagt werden können, werden diese im Modell automatisch auf 0 g TW/m² gesetzt.

Biomasse der Kollektoren (Sammler, Collector-Gatherer)

In diesem Untermodell wird die Biomassendichte der Kollektoren (in Gramm Trockengewicht pro Quadratmeter Flusssohle) innerhalb eines Jahres abgeschätzt.

Die Herleitung dieses Teilmodells basiert auf Makrozoobenthos-Daten der Sihl (Elber et al. 1992 und 1996; Schuwirth et al. 2007) (2 Stellen mit insgesamt 86 Invertebratenmessungen) (vgl. Abb.2 dritte Reihe).

Folgende Modelleingangsgrößen werden verwendet:

- repräsentative Abflussganglinie eines Jahres (m³/s)
- Median Korngrösse d₅₀ (m)
- Tage seit dem letzten bettaufreissenden Hochwasser (Δt_{flood}): aus der repräsentativen Abflussganglinie wird die Ganglinie der Sohlenschubspannung berechnet. Jedes mal, wenn die Sohlenschubspannung einen kritischen Wert (berechnet nach Günther (1971) im Teilmodell Morphologie & Hydraulik/Kolmation) übersteigt, wird ein bettaufreissendes Hochwasser angenommen (dies wird im Modell automatisch durchgeführt)
- Julianische Tage Δt_{jul} * zur Beschreibung der Saisonalität (werden im Modell automatisch als Index generiert)

* unter Julianischen Tagen versteht man die Zeit in Tagen seit dem 1. Januar - z.B. entspricht der 1. Februar dem Julianischen Tag 32.

Die Modellgleichung für die Berechnung der Kollektoren Biomasse B_{Kollektoren} (g TW/m²) hat folgende Form (mit TW = Trockengewicht):

$$B_{Kollektoren} = \frac{B_{max} \cdot k_B \cdot \Delta t_{flood}^b}{B_{max} + k_B \cdot \Delta t_{flood}^b} \cdot \frac{d_{50}}{k_{d50} + d_{50}} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{\Delta t_{jul} - \Delta t_{jul}^{max}}{365.25} \right) \right)$$

B_{max} = maximal mögliche Kollektoren Biomasse (g TW/m²)

k_B = Wachstumsrate der Kollektoren (g TW/m²/d^b)

b = Modellparameter zur nicht-linearen Beschreibung der Wachstumsrate nach bettaufreissenden Hochwasserereignissen (-)

Δt_{flood} = Tage seit letztem bettaufreissenden Hochwasser (Tage)

d₅₀ = Median Korngrösse (m)

k_{d50} = Halbsättigungskonstante für die mittlere Korngrösse (m)

α = Modellparameter zur Gewichtung des Einflusses der Saisonalität auf die Kollektoren (-)

Δt_{jul} = Julianische Tage (wird vom Modell automatisch generiert)

Δt_{jul}^{max} = Tag im Jahr mit maximaler Kollektoren Biomasse (Julianischer Tag)

Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter B_{max} , k_B , b , k_{d50} , α und Δt_{jul}^{max} wird durch eine multivariate Normalverteilung berücksichtigt (Tabelle 4). Die Abschätzung der Unsicherheitsverteilung der Modellparameter basiert auf wissenschaftlicher Literatur, umfassenden Makrozoobenthosdatensätzen aus Österreich (Yoshimura 2006) und auf Erkenntnissen, die bei der Modellentwicklung gewonnen werden konnten (Schweizer et al. 2007).

Tabelle 4: Unsicherheitsverteilung (multivariate Normalverteilung) der Modellparameter für das Teilmodell „Kollektoren“

Modellparameter	geschätzter Mittelwert	angenommene Standardabweichung
B_{max}	100 g TW/m ²	20 g TW/m ²
k_B	1.01 g TW/m ² /d ^b	0.25 g TW/m ² /d ^b
k_{d50}	0.2 m	0.04 m
Δt_{jul}^{max}	249	7
α	0.77	0.07
b	0.62	0.07

Bemerkung: In Analytica wird diese multivariate Normalverteilung mit den geschätzten Mittelwerten und der Kovarianzmatrix (dieser 6 Modellparameter) definiert.

Berücksichtigung der Unsicherheit in der Modellstruktur und bei der Datenerhebung (Messfehler)

Damit sich die Residuen (Abweichungen) der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern, wird eine so genannte Box-Cox-Transformation durchgeführt (Box & Cox 1964, 1982).

$$g(B) = \begin{cases} \frac{(B + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \lambda_1 \neq 0 \\ \ln(B + \lambda_2) & \lambda_1 = 0 \end{cases}$$

(mit $\lambda_1 = 0.3$ und $\lambda_2 = 0.1$ g TW/m²)

Diese Transformation erlaubt, dass anschliessend ein normal-verteilter Fehlerterm ($\mu=(0 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$, $\sigma = 0.81 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$) zum Modellergebnis hinzugefügt werden kann. Eine anschliessende Rücktransformation ergibt dann die Biomasse der Kollektoren unter Berücksichtigung aller oben beschriebener Unsicherheiten (Knoten „Vorhergesagte Kollektoren Biomasse“, vgl. Abb.2 dritte Reihe).

Bemerkung: Da durch extreme Verteilungen der Modellparameter und dem Hinzufügen des Fehlerterms nach der Box-Cox-Transformation auch (sehr kleine) negative Werte vorhergesagt werden können, werden diese im Modell auf 0 g TW/m^2 gesetzt.

Biomasse der Prädatoren (räuberische Invertebraten, Predators)

In diesem Untermodell wird die Biomassendichte der Prädatoren (in Gramm Trockengewicht pro Quadratmeter Flusssohle) innerhalb eines Jahres abgeschätzt.

Die Entwicklung dieses Teilmodells basiert auf Makrozoobenthos-Daten der Sihl (Elber et al. 1992 und 1996; Schuwirth et al. 2007) (2 Stellen mit insgesamt 86 Invertebratenmessungen) (vgl. Abb.2 untere Reihe).

Folgende Modelleingangsgrössen werden verwendet:

- repräsentative Abflussganglinie eines Jahres (m^3/s)
- Median Korngrösse d_{50} (m)
- Tage seit dem letzten bettaufreissenden Hochwasser (Δt_{flood}): aus der repräsentativen Abflussganglinie wird die Ganglinie der Sohlenschubspannung berechnet. Jedes mal, wenn die Sohlenschubspannung einen kritischen Wert (berechnet nach Günther (1971) im Teilmodell Morphologie & Hydraulik/Kolmation) übersteigt, wird ein bettaufreissendes Hochwasser angenommen (dies wird im Modell automatisch durchgeführt)
- Julianische Tage Δt_{jul} * zur Beschreibung der Saisonalität (werden im Modell automatisch als Index generiert)

* unter Julianischen Tagen versteht man die Zeit in Tagen seit dem 1. Januar - z.B. entspricht der 1. Februar dem Julianischen Tag 32.

Die Modellgleichung für die Berechnung der Prädatoren Biomasse $B_{\text{Prädatoren}}$ (g TW/m^2) hat folgende Form (mit $\text{TW} = \text{Trockengewicht}$):

$$B_{\text{Prädatoren}} = \frac{B_{\text{max}} \cdot k_B \cdot \Delta t_{\text{flood}}^b}{B_{\text{max}} + k_B \cdot \Delta t_{\text{flood}}^b} \cdot \frac{d_{50}}{k_{d50} + d_{50}} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{\Delta t_{\text{jul}} - \Delta t_{\text{jul}}^{\text{max}}}{365.25} \right) \right)$$

B_{max} = maximal mögliche Prädatoren Biomasse (g TW/m^2)
 k_B = Wachstumsrate der Prädatoren ($\text{g TW/m}^2/\text{d}^b$)

b = Modellparameter zur nicht-linearen Beschreibung der Wachstumsrate nach bettaufreissenden Hochwasserereignissen (-)

Δt_{flood} = Tage seit letztem bettaufreissenden Hochwasser (Tage)

d_{50} = Median Korngrösse (m)

k_{d50} = Halbsättigungskonstante für die mittlere Korngrösse (m)

α = Modellparameter zur Gewichtung des Einflusses der Saisonalität auf die Prädatoren (-)

Δt_{jul} = Julianische Tage (wird vom Modell automatisch generiert)

$\Delta t_{\text{jul}}^{\text{max}}$ = Tag im Jahr mit maximaler Prädatoren Biomasse (Julianischer Tag)

Berücksichtigung der Unsicherheit in den Modellparametern

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Modellparameter B_{max} , k_B , b , k_{d50} , α und $\Delta t_{\text{jul}}^{\text{max}}$ wird durch eine multivariate Normalverteilung berücksichtigt (Tabelle 5). Die Abschätzung der Unsicherheitsverteilung der Modellparameter basiert auf wissenschaftlicher Literatur, umfassenden Makrozoobenthosdatensätzen aus Österreich (Yoshimura 2006) und auf Erkenntnissen, die bei der Modellentwicklung gewonnen werden konnten (Schweizer et al. 2007).

Tabelle 5: Unsicherheitsverteilung (multivariate Normalverteilung) der Modellparameter für das Teilmodell „Prädatoren“

Modellparameter	geschätzter Mittelwert	angenommene Standardabweichung
B_{max}	30 g TW/m ²	6 g TW/m ²
k_B	0.28 g TW/m ² /d ^b	0.12 g TW/m ² /d ^b
k_{d50}	0.2 m	0.04 m
$\Delta t_{\text{jul}}^{\text{max}}$	272	10
α	0.84	0.08
b	0.59	0.11

Bemerkung: In Analytica wird die multivariate Normalverteilung mit den geschätzten Mittelwerten und der Kovarianzmatrix (dieser 6 Modellparameter) beschrieben.

Berücksichtigung der Unsicherheit in der Modellstruktur und bei der Datenerhebung (Messfehler)

Damit sich die Residuen (Abweichungen) der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern, wird eine so genannte Box-Cox-Transformation durchgeführt (Box & Cox 1964, 1982):

$$g(B) = \begin{cases} \frac{(B + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \lambda_1 \neq 0 \\ \ln(B + \lambda_2) & \lambda_1 = 0 \end{cases}$$

(mit $\lambda_1 = 0.3$ und $\lambda_2 = 0.1 \text{ g TW/m}^2$)

Diese Transformation erlaubt, dass anschliessend ein normal-verteilter Fehlerterm ($\mu = (0 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$, $\sigma = 0.75 \text{ g TW/m}^2)^{0.3}$) zum Modellergebnis hinzugefügt werden kann. Eine anschliessende Rücktransformation ergibt dann die Biomasse der Prädatoren unter Berücksichtigung aller oben beschriebener Unsicherheiten (Knoten „Vorhergesagte Prädatoren Biomasse“, vgl. Abb.2 untere Reihe).

Bemerkung: Da durch extreme Verteilungen der Modellparameter und dem Hinzufügen des Fehlerterms nach der Box-Cox-Transformation auch (sehr kleine) negative Werte vorhergesagt werden können, werden diese im Modell auf 0 g TW/m^2 gesetzt.

Berücksichtige Unsicherheiten im Teilmodell „Benthos“

Modellparameter

Die Unsicherheit in den **Modellparametern** wird (wie bereits oben beschrieben) mit einer multivariaten Normalverteilung beschrieben. Diese multivariate Verteilung ist in den Knoten „X Parametermittelwerte“ und „X Parameter Kovarianzmatrix“ definiert (X kann hier für Periphyton, MZB, Weidegänger, Kollektoren, Prädatoren stehen).

Die verwendeten Mittelwerte der Benthos-Modellparameter sowie ihre berücksichtigte Unsicherheit sind in Tab.6 angegeben. Dort finden sich auch die statistisch errechneten Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Modellparametern.

Bemerkung: Die Kovarianzmatrix ergibt sich aus dem Produkt der verwendeten Standardabweichungen für die Modellparameter mit ihren Korrelationskoeffizienten. Zum Anzeigen der vom Modell automatisch berechneten Stichprobe der multivariaten Normal-Verteilung der Modellparameter klicken Sie auf den entsprechenden Knoten („X Modellparameter Verteilung“) in Analytica, anschliessend auf die Ergebnistaste „!?“ (show results) in der Benutzerleiste und wählen schliesslich „Sample“.

Modellstruktur und Messungenauigkeit

Die Unsicherheit in der Modellstruktur und in den gemessenen Daten wird mit einer **Box Cox Transformation** berücksichtigt.

Folgende normal-verteilte Fehlerterme werden nach der Box Cox Transformation den Modellergebnissen hinzugefügt (AFDM = Aschefreies Trockengewicht, TW = Trockengewicht):

- Periphyton: Mittelwert = 0, Standardabweichung = $1.63 \text{ (g AFDM/m}^2\text{)}^{0.3}$
- MZB: Mittelwert = 0, Standardabweichung = $0.75 \text{ (g TW/m}^2\text{)}^{0.3}$
- Weidegänger: Mittelwert = 0, Standardabweichung = $0.94 \text{ (g TW/m}^2\text{)}^{0.3}$
- Kollektoren: Mittelwert = 0, Standardabweichung = $0.81 \text{ (g TW/m}^2\text{)}^{0.3}$
- Prädatoren: Mittelwert = 0, Standardabweichung = $0.75 \text{ (g TW/m}^2\text{)}^{0.3}$

Anschliessend wird eine Rücktransformation durchgeführt, um das Ergebnis in den ursprünglichen Einheiten anzugeben.

Bemerkung: Die Box Cox Transformation wird durchgeführt, damit sich die Abweichungen der vorhergesagten Modellergebnisse von den gemessenen Werten einer Normalverteilung annähern und sich somit ein Normalverteilter Fehlerterm zum Modellergebnis hinzufügen lässt.

Tab.6: Unsicherheit in den Modellparametern und die Korrelationkoeffizienten zwischen den einzelnen Modellparametern

		Mittelwert	Std. Abw.	$\overline{B_{\max}}$	$\overline{k_B}$	k_{d50}	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	α	δ	b
Periphyton Modell	B_{\max}	1500	300	1	0	0	-	-	0	-
	k_B	16.5	2.2	0	1	0	-	-	0.84	-
	k_{d50}	0.2	0.04	0	0	1	-	-	0	-
	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	α	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	δ	3.22	0.11	0	0.84	0	-	-	1	-
	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MZB Modell	B_{\max}	150	30	1	0	0	0	0	-	0
	k_B	2.26	0.52	0	1	0	0.55	-0.31	-	-0.96
	k_{d50}	0.2	0.04	0	0	1	0	0	-	0
	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	257.1	6.2	0	0.55	0	1	-0.33	-	-0.46
	α	0.79	0.06	0	-0.31	0	-0.33	1	-	0.29
	δ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	b	0.57	0.06	0	-0.96	0	-0.46	0.29	-	1
Weidgänger Modell.	B_{\max}	25	5	1	0	0	0	0	-	0
	k_B	0.84	0.33	0	1	0	0.55	-0.30	-	-0.93
	k_{d50}	0.2	0.04	0	0	1	0	0	-	0
	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	250.5	11.5	0	0.55	0	1	-0.28	-	-0.41
	α	0.89	0.13	0	-0.30	0	-0.28	1	-	0.26
	δ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	b	0.27	0.11	0	-0.93	0	-0.41	0.26	-	1
Kollektoren Modell	B_{\max}	100	20	1	0	0	0	0	-	0
	k_B	1.01	0.25	0	1	0	0.51	-0.34	-	-0.95
	k_{d50}	0.2	0.04	0	0	1	0	0	-	0
	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	248.6	7.2	0	0.51	0	1	-0.30	-	-0.41
	α	0.77	0.07	0	-0.34	0	-0.30	1	-	0.32
	δ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	b	0.62	0.07	0	-0.95	0	-0.41	0.32	-	1
Predatoren Modell	B_{\max}	30	6	1	0	0	0	0	-	0
	k_B	0.28	0.12	0	1	0	0.58	-0.22	-	-0.96
	k_{d50}	0.2	0.04	0	0	1	0	0	-	0
	$\Delta t_{\text{jul}}^{\max}$	271.8	9.9	0	0.58	0	1	-0.28	-	-0.50
	α	0.84	0.08	0	-0.22	0	-0.28	1	-	0.22
	δ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	b	0.59	0.11	0	-0.96	0	-0.50	0.22	-	1

- = Modellparameter wird in diesem Untermodell nicht verwendet

Literatur

- Boulêtreau S., Garabétian F., Sauvage S. and Sanchez-Pérez J.-M. 2006: Assessing the importance of a self-generated detachment process in river biofilm models. *Freshwater Biology* **51(5)**: 901-912.
- Box G.E.P. & Cox D.R. 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 211-252.
- Box G.E.P. & Cox D.R. 1982. An analysis of transformations revisited, rebutted. *Journal of the American Statistical Association* **77(377)**: 209-210.
- Elber F., Hürlimann J. and Niederberger K. 1992: Biologische Begleitung der Schwallversuche vom Sommer 1990 in der Sihl. *Wasser, Energie, Luft* **84** (3/4): 42-50.
- Elber F., Hürlimann J. and Niederberger K. 1996: Algenmonitoring als Grundlage für das Abflussmanagement in der Sihl. *Wasser, Energie, Luft* **88** (3/4): 55-62.
- Günther A. 1971: Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankung. *Mitteilung Nr.3 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, ETH Zürich.
- Schuwirth N., Kühni M, Schweizer S, Uehlinger U and Reichert P. 2007: A mechanistic model of benthos community dynamics in the River Sihl, Switzerland. *Submitted to Freshwater Biology*.
- Schweizer S., Borsuk M., Uehlinger U., Bouletreau S., Reichert P. 2007: Predicting the biomass of periphyton and macroinvertebrate functional feeding groups in stream reaches. *Submitted to River Research and Applications*.
- Schweizer S. 2007: Predicting the consequences of river rehabilitation measures on morphology, hydraulics, periphyton and on invertebrates. Dissertation ETH Zürich No. 16838, Eawag.
- Uehlinger U. 1991: Spatial and temporal variability of the periphyton biomass in a prealpine river (Necker, Switzerland). *Arch. Hydrobiol.* **123(2)**: 219-237.
- Uehlinger U., Bühner H. and Reichert P. 1996: Periphyton dynamics in a floodplain prealpine river: evaluation of significant processes by modelling. *Freshwater Biology* **36**: 249-263.
- Yoshimura C. Tockner K., Omura T., Moog O. 2006: Species diversity and functional assessment of macroinvertebrate communities in Austrian rivers. *Limnology* **7(2)**: 63-74.