



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Volkmar Dunger

TU Bergakademie
Freiberg, Institut für
Geologie



Foto: H. Forberg

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Problemstellung:



**Modellierung
vs.
Messung**

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

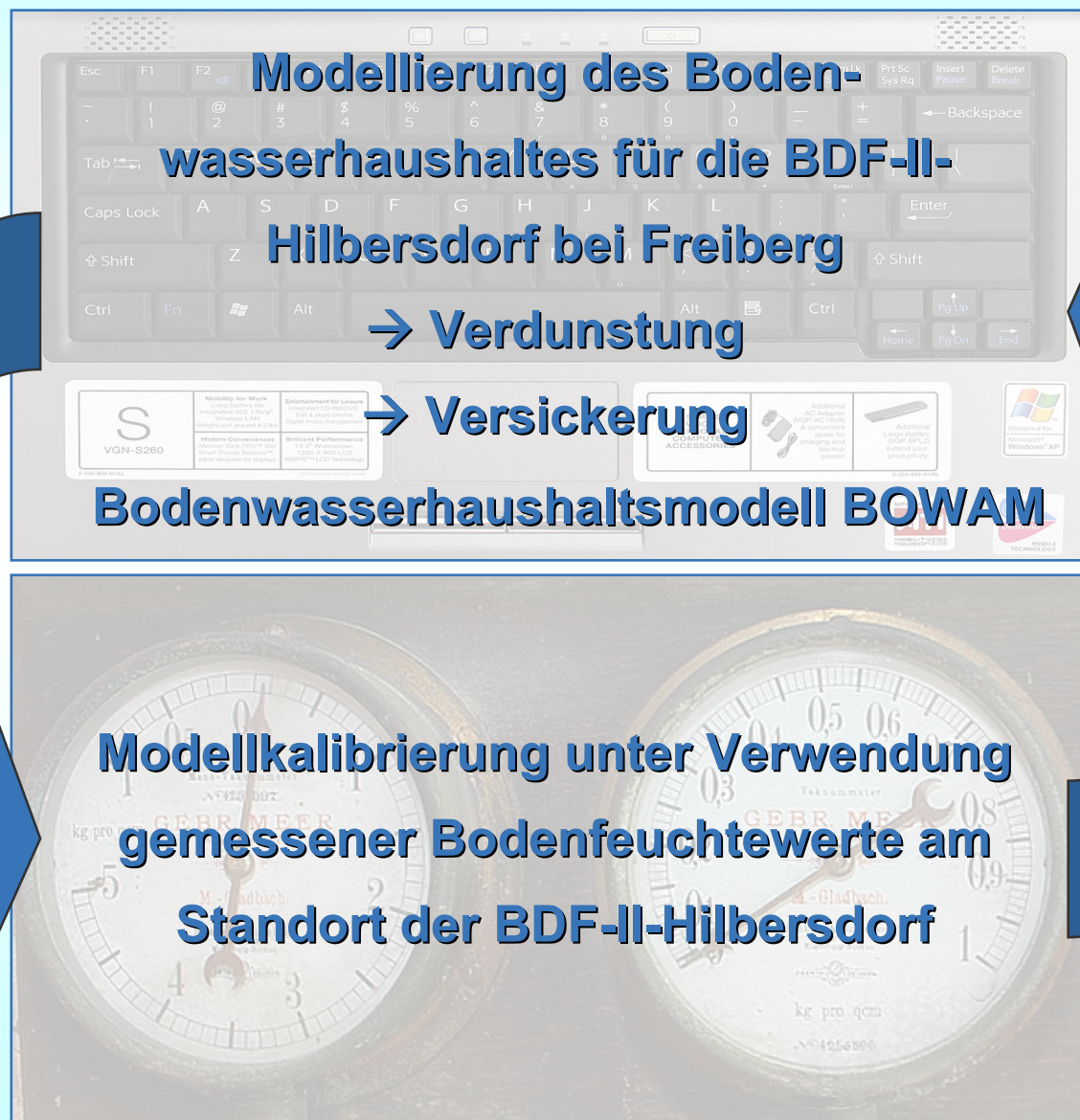
Problemstellung:

**Beschreibung bestimmter Zustände
bzw. nicht messbare Größen in
Lysimetern bzw. Testfeldern durch
mathematische Modelle**

**Kalibrierung (Eichung) und Validierung
(Nachweis der Gültigkeit)
mathematischer Modelle mittels in-situ-
Messungen**

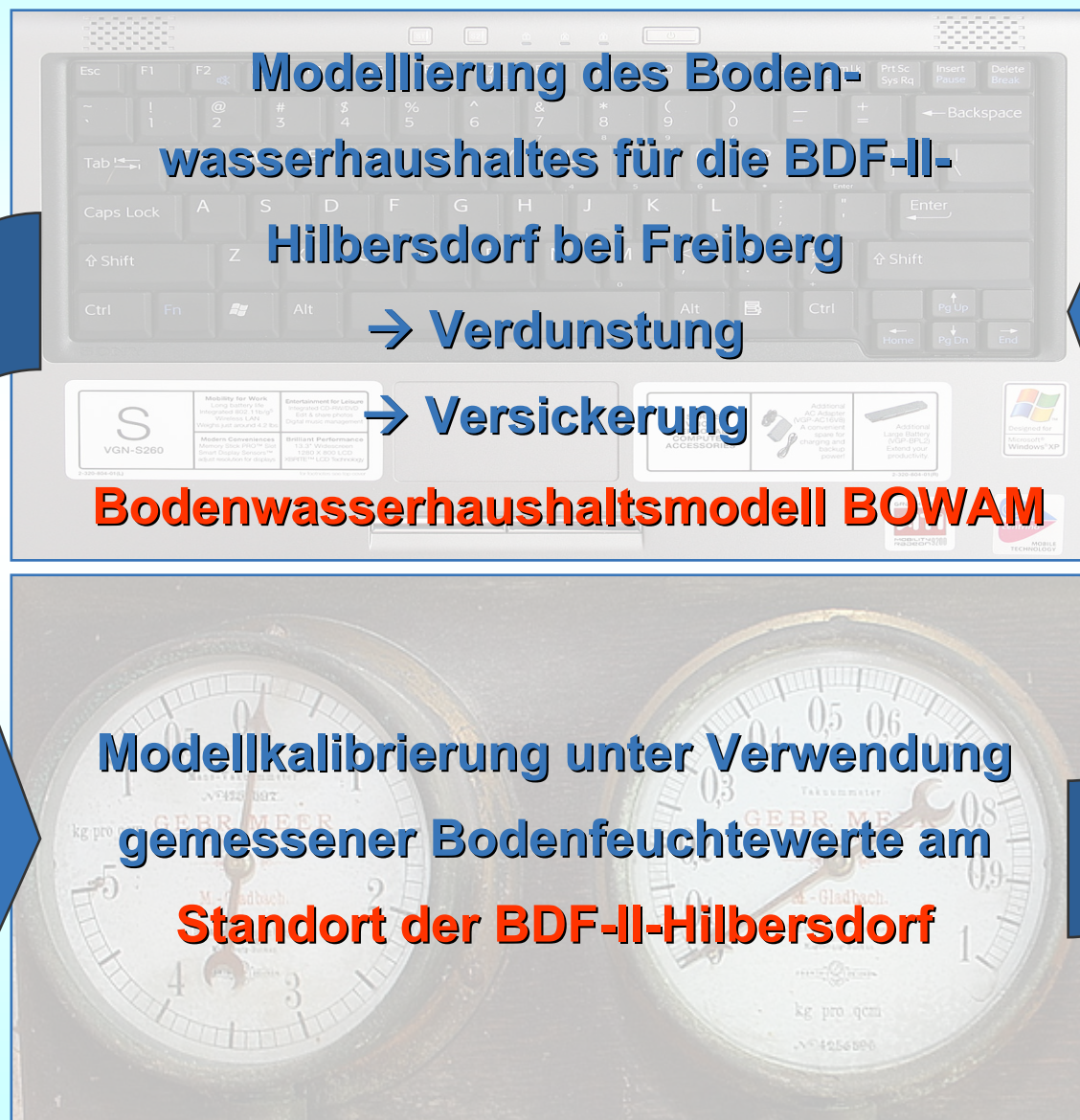
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Problemstellung:



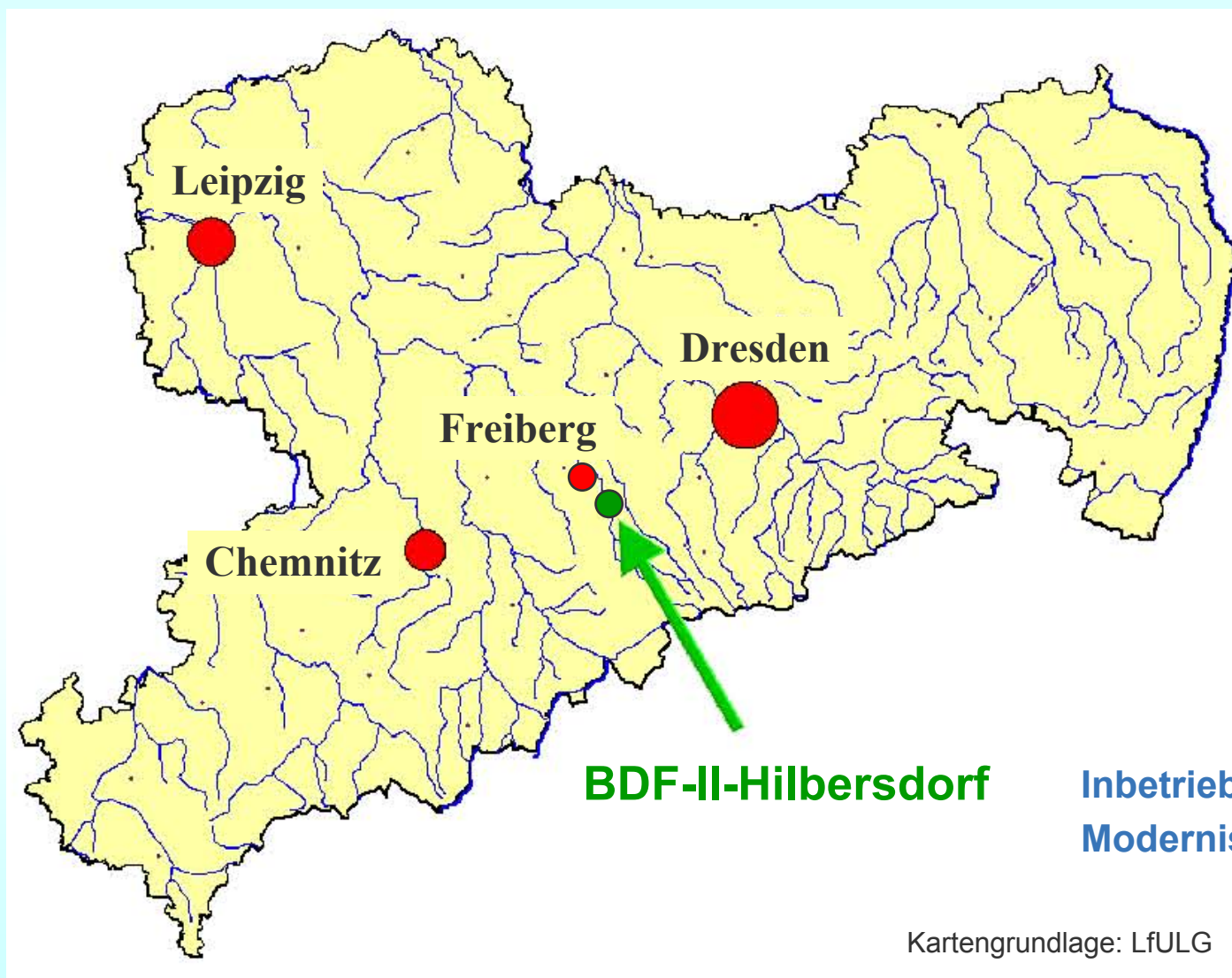
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Problemstellung:



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:

Allgemeine Charakteristik:

Naturraum: Osterzgebirge
Höhenlage: 425 m NN

Klima:

Jahresmitteltemperatur: 8 °C
mittlerer Jahresniederschlag: 628 mm

Nutzung, Bewuchs:

bis 2004: Grasbewuchs unabhängig von Bewirtschaftung im Umfeld
ab 2005: landwirtschaftliche Nutzung analog Bewirtschaftung im Umfeld



Bild: H. Forberg, LfULG

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:

Allgemeine Charakteristik:

Naturraum: Osterzgebirge
Höhenlage: 425 m NN

Klima:

Jahresmitteltemperatur: 8 °C
mittlerer Jahresniederschlag: 628 mm

Nutzung, Bewuchs:

bis 2004: Grasbewuchs unabhängig von Bewirtschaftung im Umfeld
ab 2005: landwirtschaftliche Nutzung analog Bewirtschaftung im Umfeld

2005:
Klee gras

2006:
Wintergerste

2007:
Raps

2008:
Wintergerste

2009:
Raps



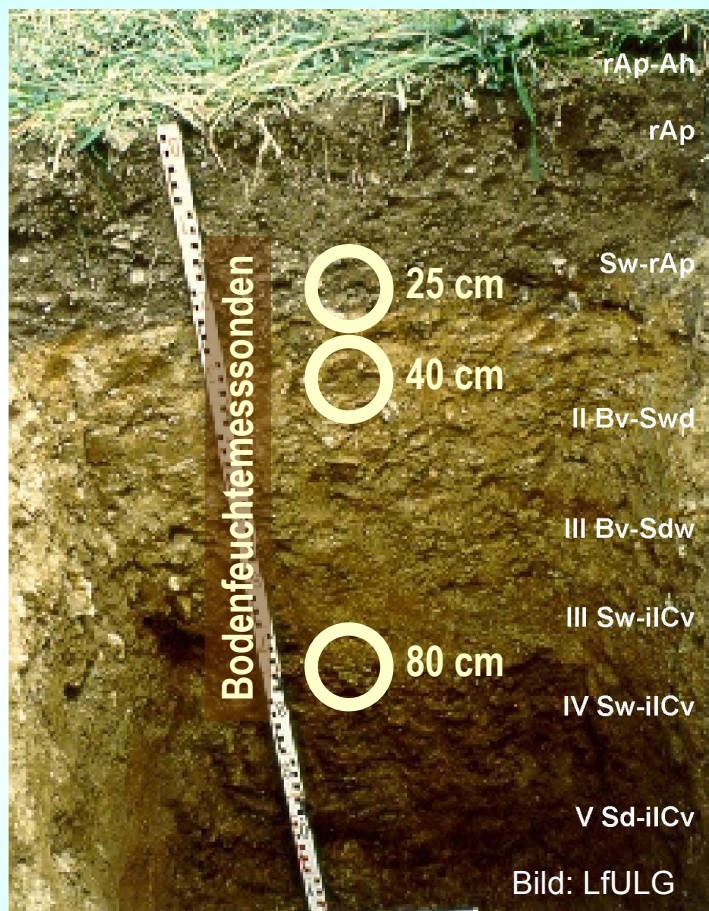
Leitbodengesellschaft nach BÜK 400:

Braunerde aus Hanglehm über basearmen bis mäßig basereichem metamorphem oder magmatischem Festgestein

Bild: H. Forberg, LfULG

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:



Oberboden	sandig-lehmiger Schluff	aus periglazialen Lösslehm / Gneis
	schluffig-lehmiger Sand	
Unterboden	schwach sandiger Lehm	aus periglazialer Deckschicht aus Gneis
	stark lehmiger Sand	
	mittel lehmiger Sand	
Untergrund	schwach lehmiger Sand	aus anstehendem verwittertem Gneis

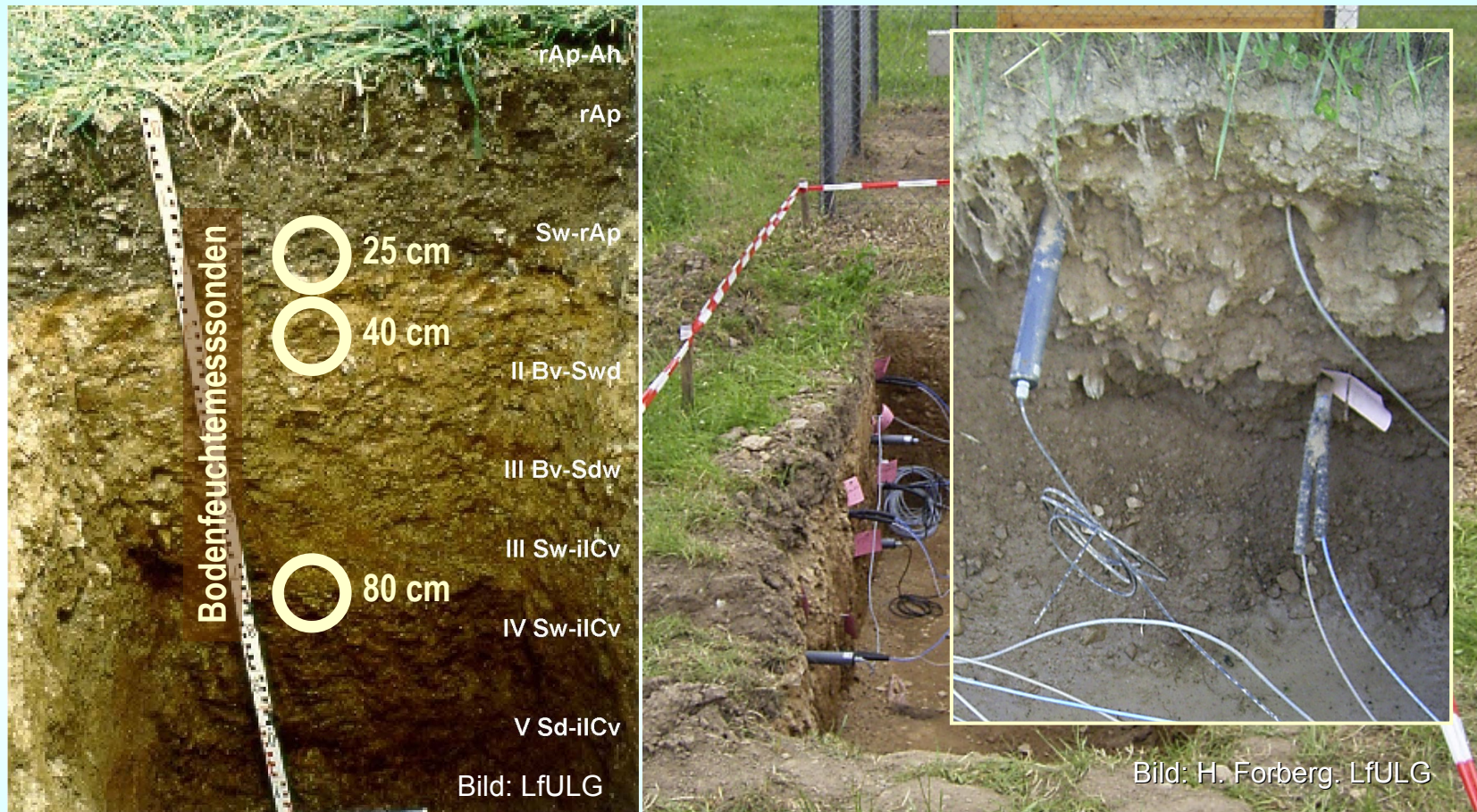
Humusgehalt

Leitbodengesellschaft nach BÜK 400:

Braunerde aus Hanglehm über basearmen bis mäßig basereichem metamorphem oder magmatischem Festgestein

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:

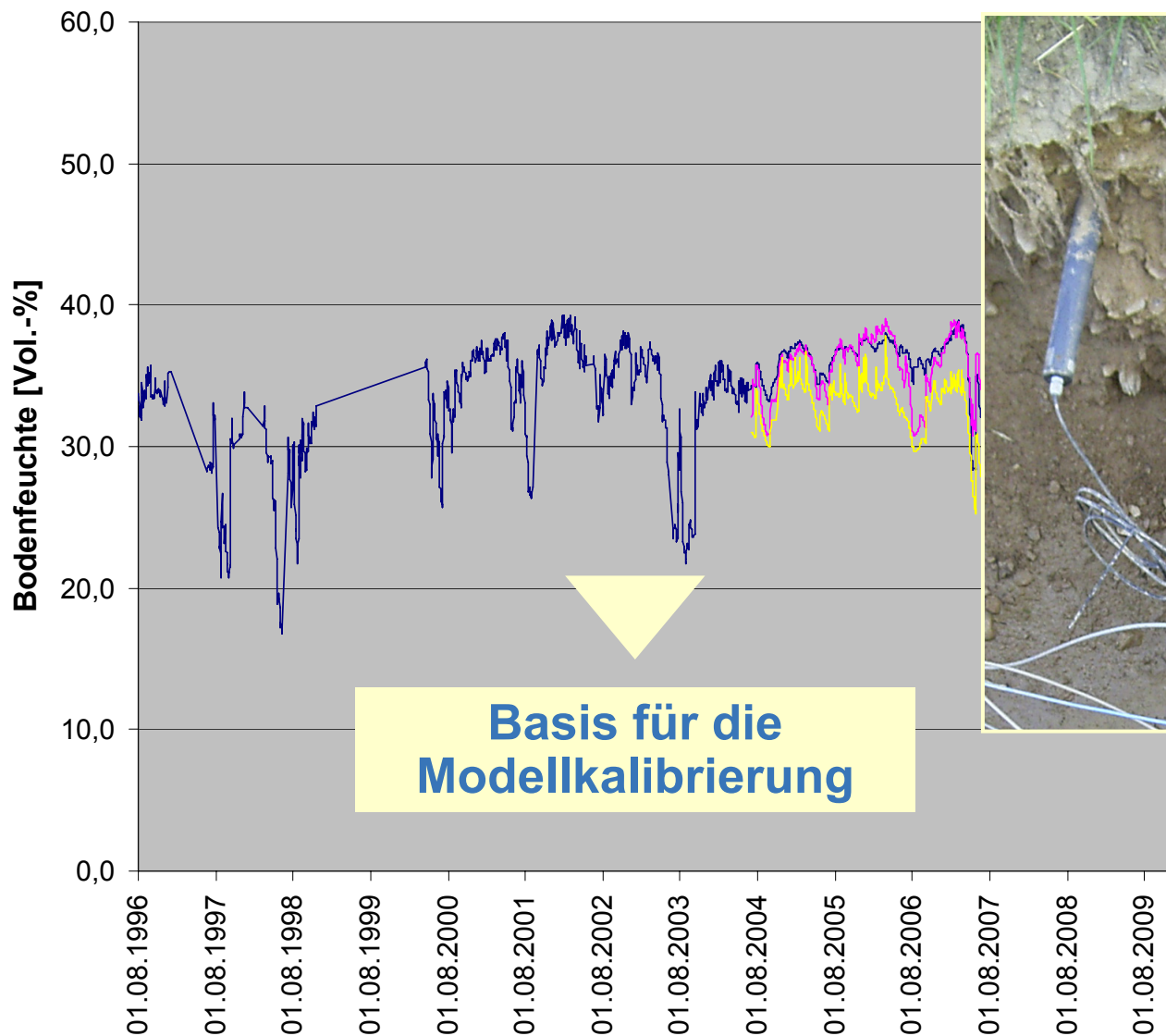


Leitbodengesellschaft nach BÜK 400:

Braunerde aus Hanglehm über basearmen bis mäßig basereichem metamorphem oder magmatischem Festgestein

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

BDF-II-Hilbersdorf – Standortcharakteristik:



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung – Modellkonzepte

Breite Palette von Verfahren

Einfache empirische Verfahren

z.B. nach **Renger, Wessolek** (1990), nach **TUB-BGR-Verfahren** bzw. **BAGLUVA-Verfahren**

Konzeptionelle Boxmodelle

Wasserhaushalts- und N-A-Modelle wie z.B. **CoupModel**, **WaSim-ETH**, **ArcEGMO**, **NASIM**, **BOWAM**, ...

Komplexe numerische Modelle

z.B. **HYDRUS-2D**, **SUMMIT**, **SiWaPro DSS**, ...



Abschätzung jährlicher Werte der Verdunstung und Versickerung von Böden mit unterschiedlicher Nutzung



Quantifizierung der wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen (u.a. Verdunstung, Oberflächen- und laterale Abflüsse, Sickerwasserbildung)



Schwerpunkt: prozessadäquate Modellierung des Wassertransports unter teilgesättigten Bedingungen

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung – Modellkonzepte

Breite Palette von Verfahren

Einfache empirische Verfahren

z.B. nach **Renger, Wessolek** (1990), nach **TUB-BGR-Verfahren** bzw. **BAGLUVA-Verfahren**

Konzeptionelle Boxmodelle

Wasserhaushalts- und N-A-Modelle wie z.B. **CoupModel**, **WaSim-ETH**, **ArcEGMO**, **NASIM**, **BOWAM**, ...

Komplexe numerische Modelle

z.B. **HYDRUS-2D**, **SUMMIT**, **SiWaPro DSS**, ...



Abschätzung jährlicher Werte der Verdunstung und Versickerung von Böden mit unterschiedlicher Nutzung



Quantifizierung der wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen (u.a. Verdunstung, Oberflächen- und laterale Abflüsse, Sickerwasserbildung)

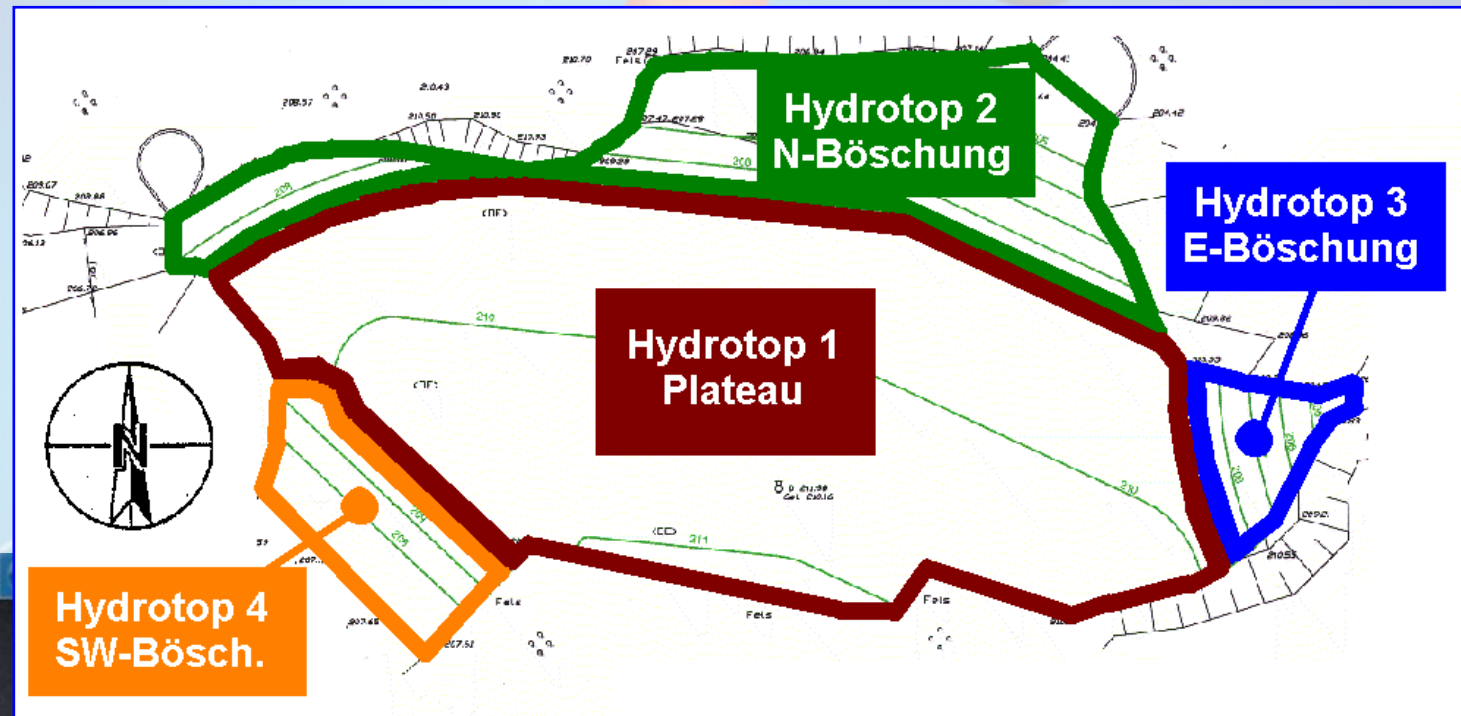


Schwerpunkt: prozessadäquate Modellierung des Wassertransports unter teilgesättigten Bedingungen

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

- **Modelltyp:** konzeptionelle Boxmodelle
- **Horizontaldiskretisierung:** Unterteilung in Hydrotope



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

- **Modelltyp:** konzeptionelle Boxmodelle
- **Horizontaldiskretisierung:** Unterteilung in Hydrotöpfe
- **Vertikaldiskretisierung:**
 - maximal 10 Schichten mit variablen Parametern
 - weitere Unterteilung in max. 200 Teilschichten

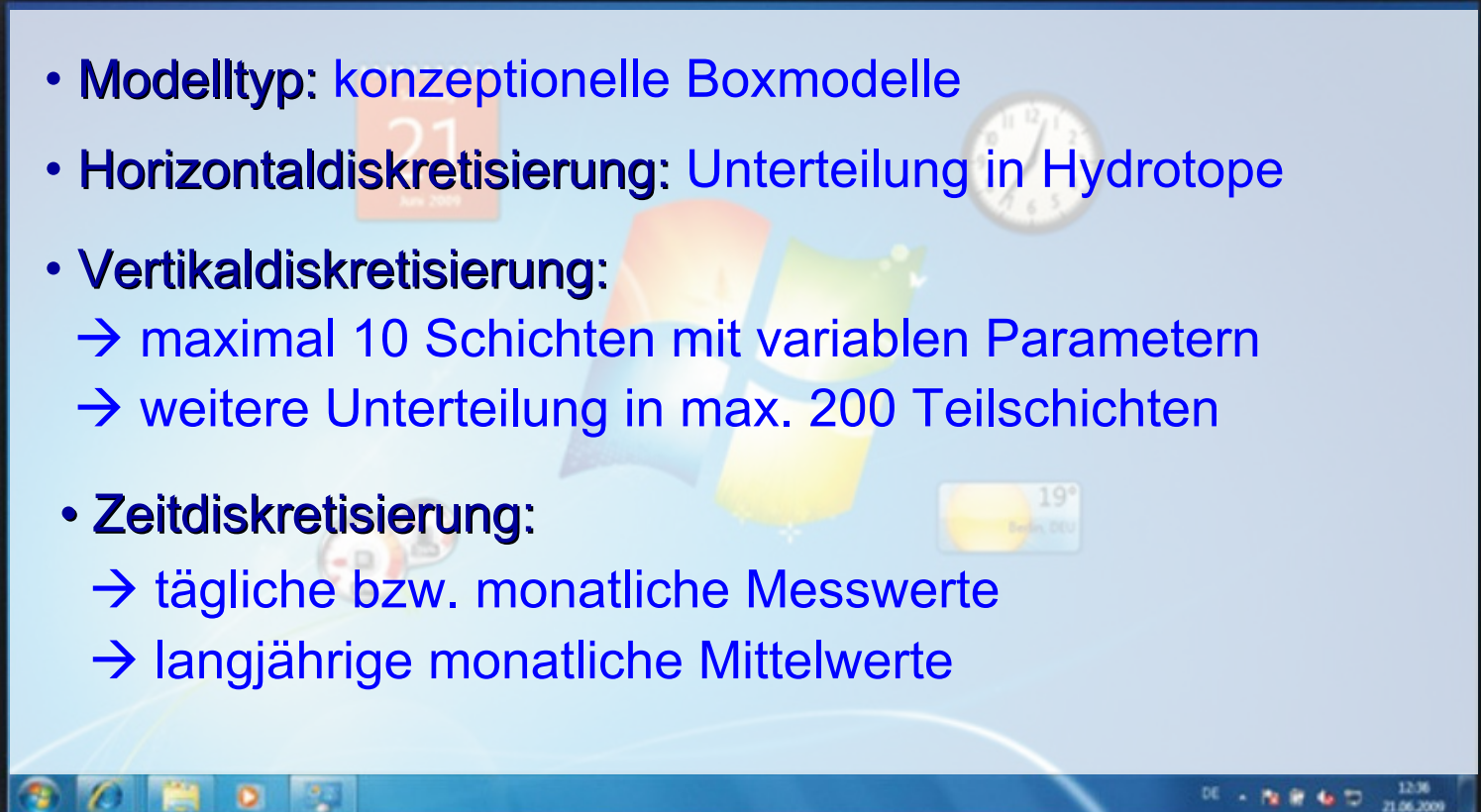
Oberfläche				
Schicht 1	kf 1	WP 1	FK 1	SAT 1
Schicht 2	kf 2	WP 2	FK 2	SAT 2
Schicht 3	kf 3	WP 3	FK 3	SAT 3
...	...	...	...	...
Schicht 10	kf 10	WP 10	FK 10	SAT 10

kf - Filtrationskoeffizient
WP - Welkepunkt
FK - Feldkapazität
SAT - Wassersättigung

Modellbasis

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

- 
- **Modelltyp:** konzeptionelle Boxmodelle
 - **Horizontaldiskretisierung:** Unterteilung in Hydrotupe
 - **Vertikaldiskretisierung:**
 - maximal 10 Schichten mit variablen Parametern
 - weitere Unterteilung in max. 200 Teilschichten
 - **Zeitdiskretisierung:**
 - tägliche bzw. monatliche Messwerte
 - langjährige monatliche Mittelwerte

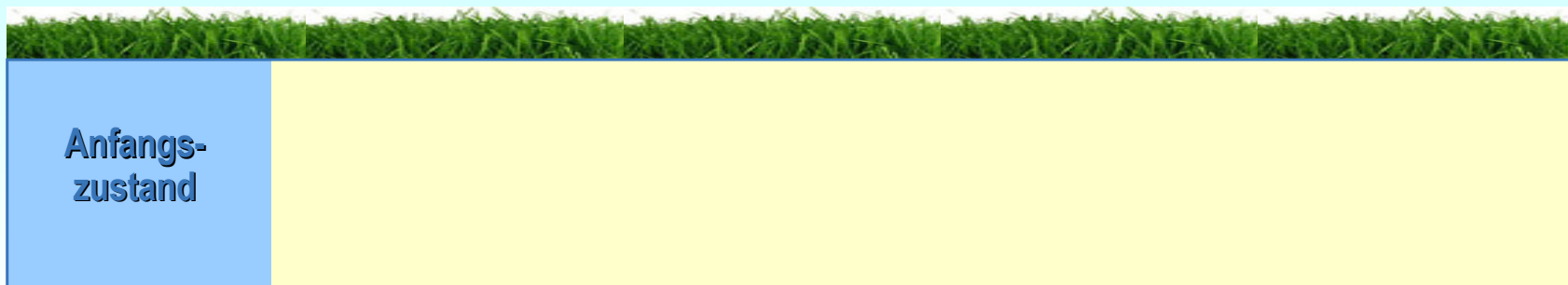
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

Teilprozess	Modellansatz in BOWAM
Niederschlag	Niederschlagskorrektur, Niederschlagssynthese
Interzeption	Interzeptions-SpeichermodeLL für verschiedene Bewuchsarten → unbewachsen, Grasbewuchs, Wald, landwirtschaftliche Kulturen
Schneeschnelze	Tagesgradverfahren (incl. Schmelzwasserretention in der Schneedecke)
Muldenspeicher	SpeichermodeLL → f(Bewuchs, Niederschlagsintensität, Hangneigung)
Infiltration/Oberflächenabfluss	Curve-Number-Verfahren des US Soil Conservation Service
Versickerung	DARCY-Gesetz für gesättigte Bedingungen (alle Schichten)
Hypodermischer Abfluss	Anwendung des DARCY-Gesetzes für geschichtete Verhältnisse für den Fall einer vertikalen Verschlechterung der Versickerungsbedingungen
Verdunstung	<u>potenzielle Verdunstung</u> : Formeln nach PENMAN, TURC, HAUDE bzw. IVANOV <u>reale Verdunstung</u> : Reduktionsfunktionen nach KOITZSCH → f(Bodenfeuchte, Wurzelgeometrie, Vegetationsbedeckungsgrad)

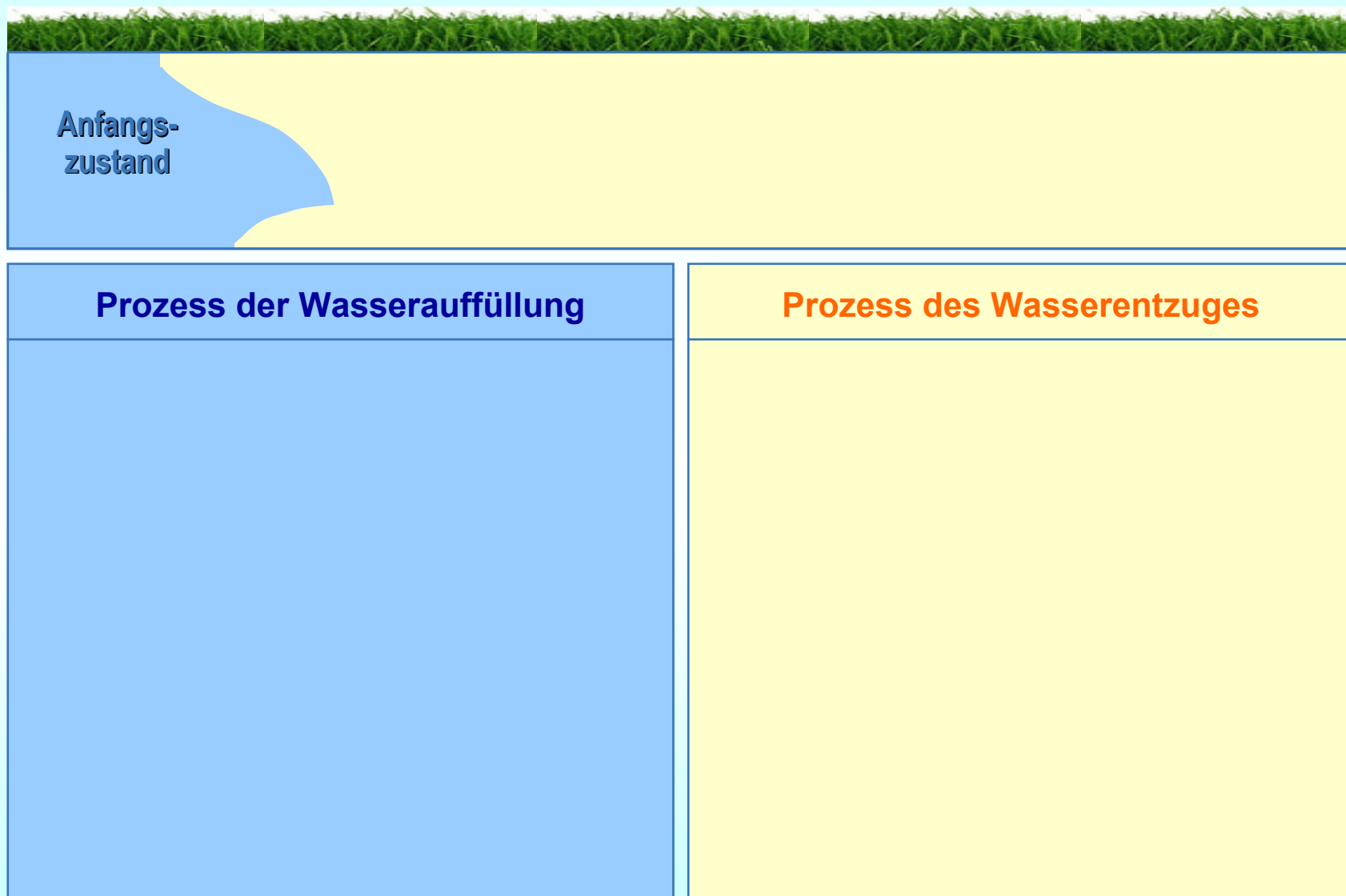
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Prozess der Wasserauffüllung

Natur



Modell



Berechnung mittels DARCY-Gesetz (gesättigt):

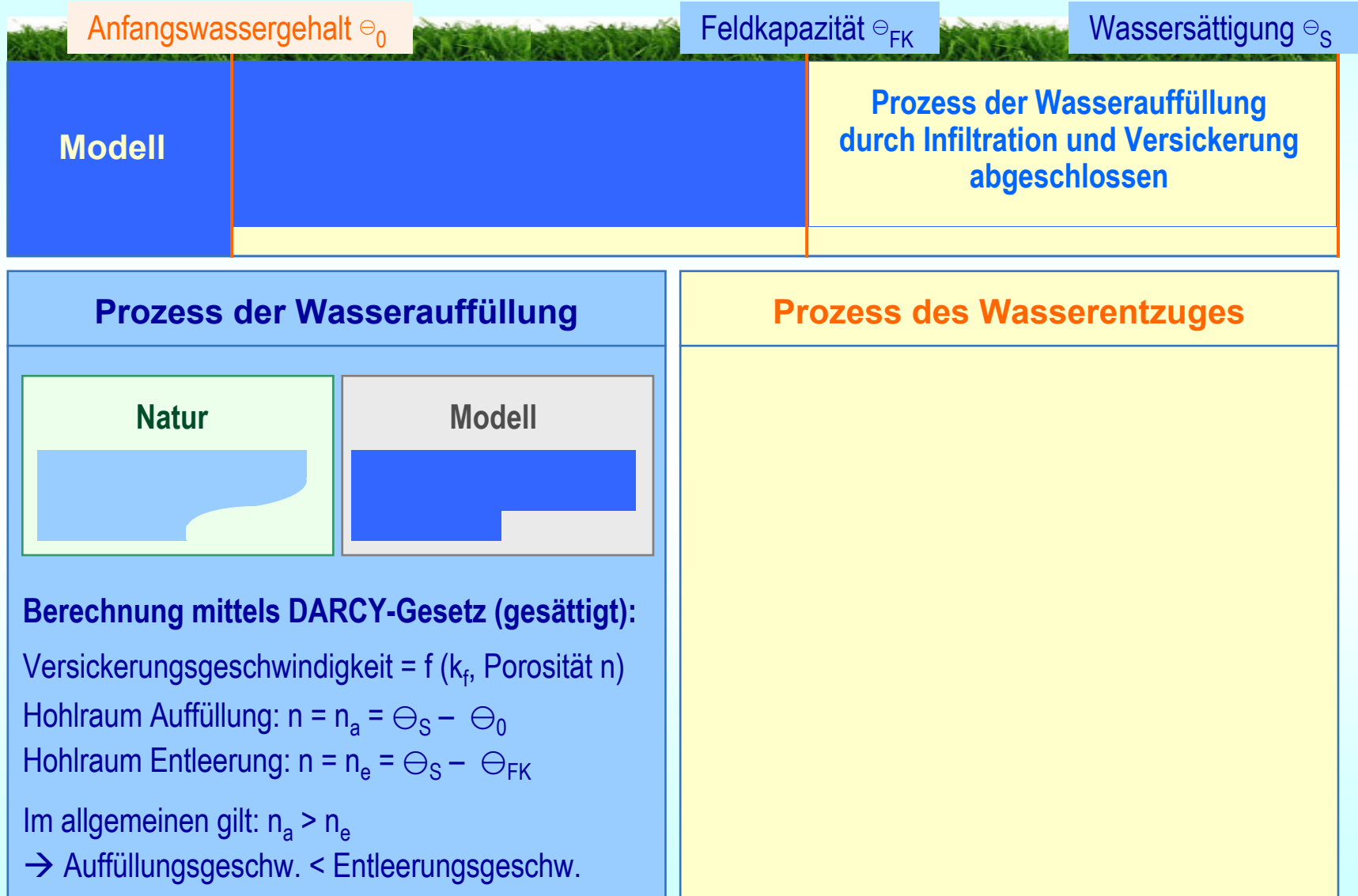
Versickerungsgeschwindigkeit = $f(k_f, \text{Porosität } n)$

Hohlraum Auffüllung: $n = n_a = \Theta_s - \Theta_0$

Prozess des Wasserentzuges

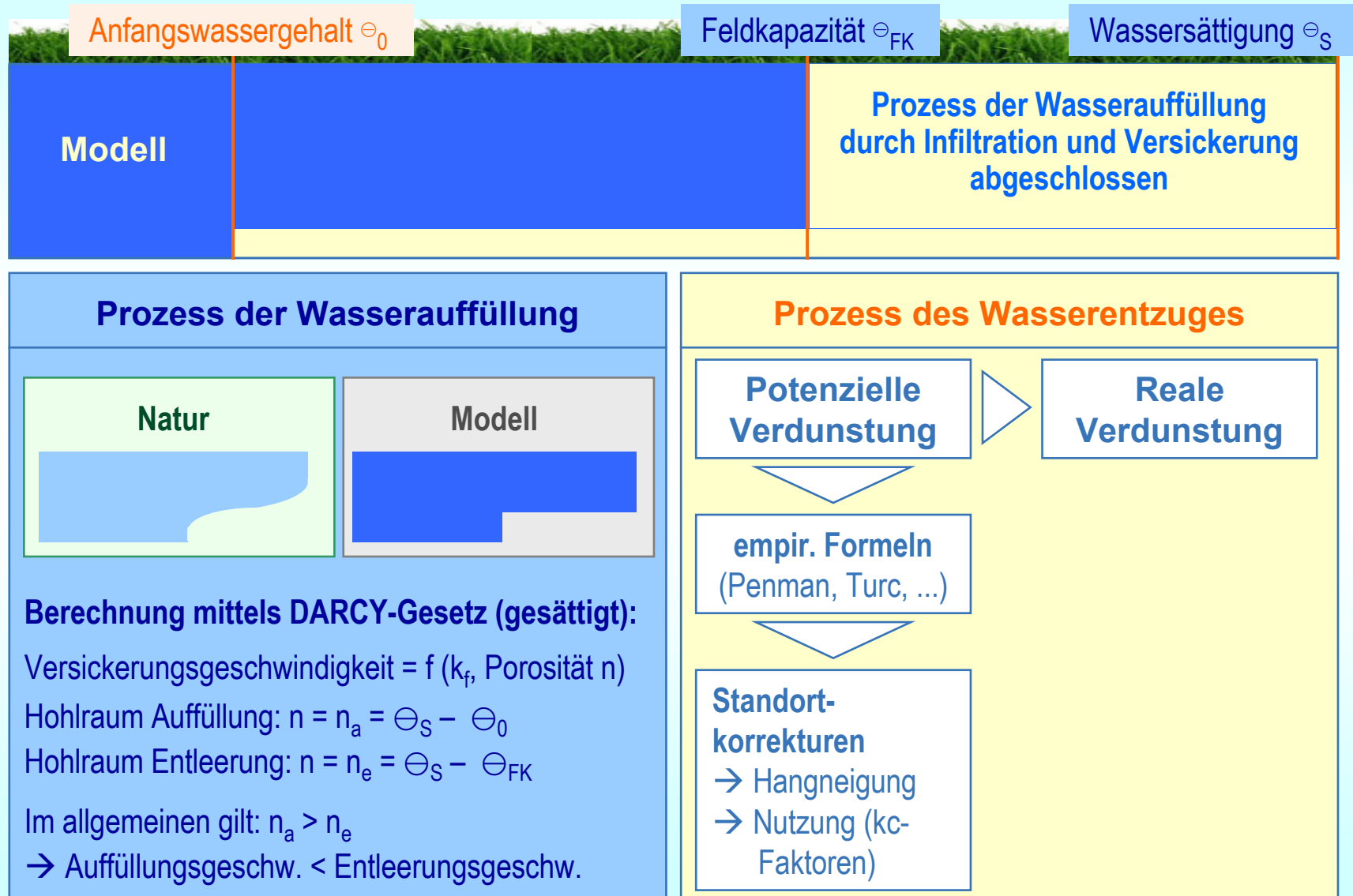
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



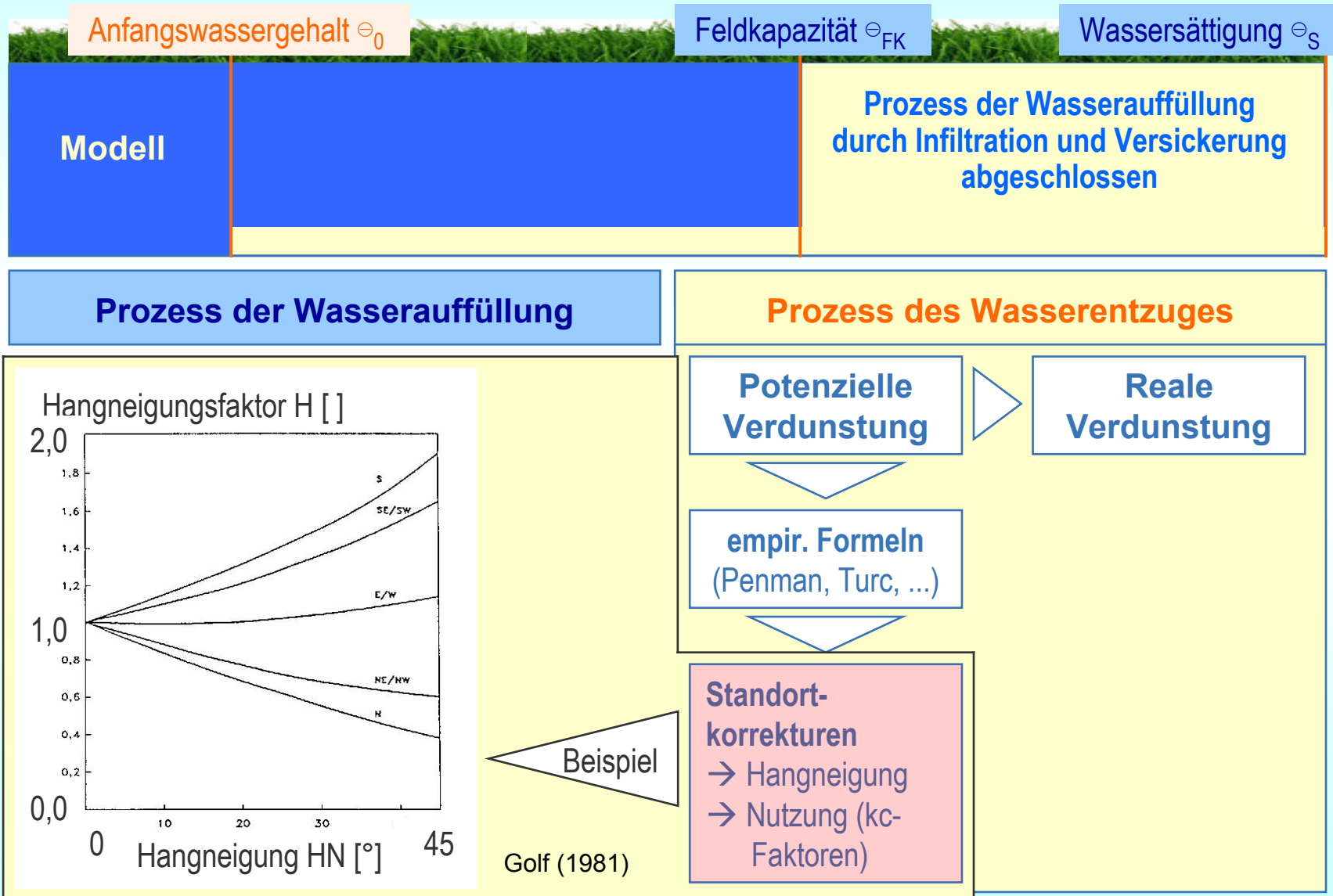
Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

Anfangswassergehalt ϑ_0

Feldkapazität ϑ_{FK}

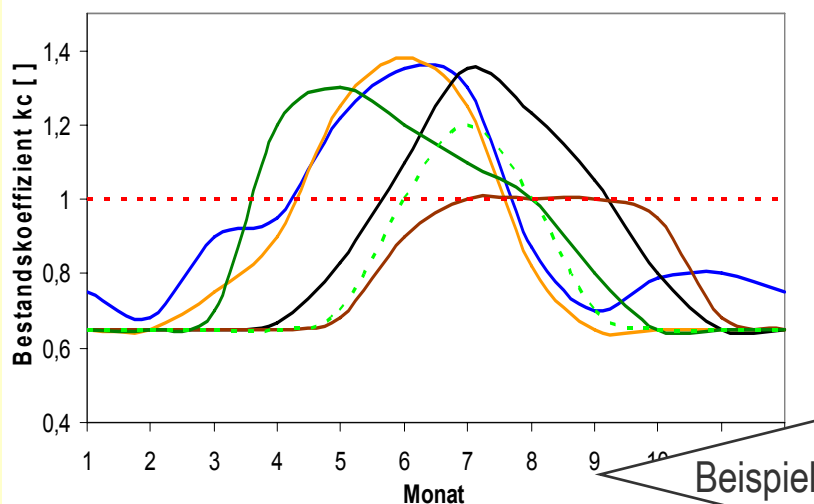
Wassersättigung ϑ_s

Modell

Prozess der Wasserauffüllung
durch Infiltration und Versickerung
abgeschlossen

Prozess der Wasserauffüllung

Prozess des Wasserentzuges



Beispiel

Potenzielle
Verdunstung

Reale
Verdunstung

empir. Formeln
(Penman, Turc, ...)

Standort-
korrekturen
→ Hangneigung
→ Nutzung (kc-
Faktoren)

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt

Anfangswassergehalt ϑ_0

Feldkapazität ϑ_{FK}

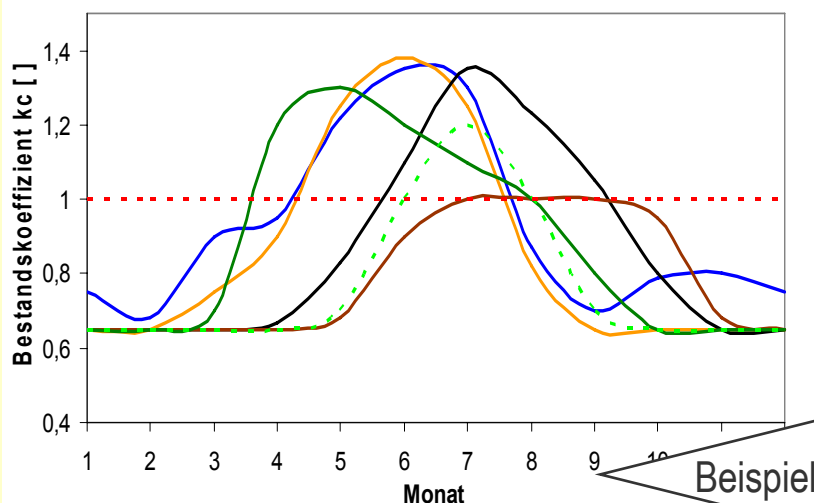
Wassersättigung ϑ_s

Modell

Prozess der Wasserauffüllung
durch Infiltration und Versickerung
abgeschlossen

Prozess der Wasserauffüllung

Prozess des Wasserentzuges



Beispiel

Potenzielle
Verdunstung

Reale
Verdunstung

empir. Formeln
(Penman, Turc, ...)

Reduktion der der
potenzielle
Verdunstung

Standort-
korrekturen
→ Hangneigung
→ Nutzung (kc-
Faktoren)

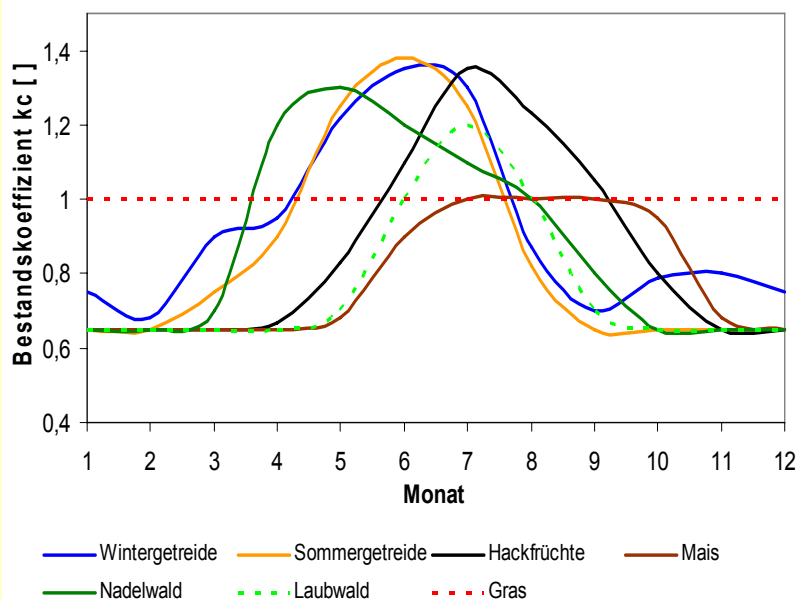
Reduktions-
funktionen
f (Bodenfeuchte,
Wurzeldichte)

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

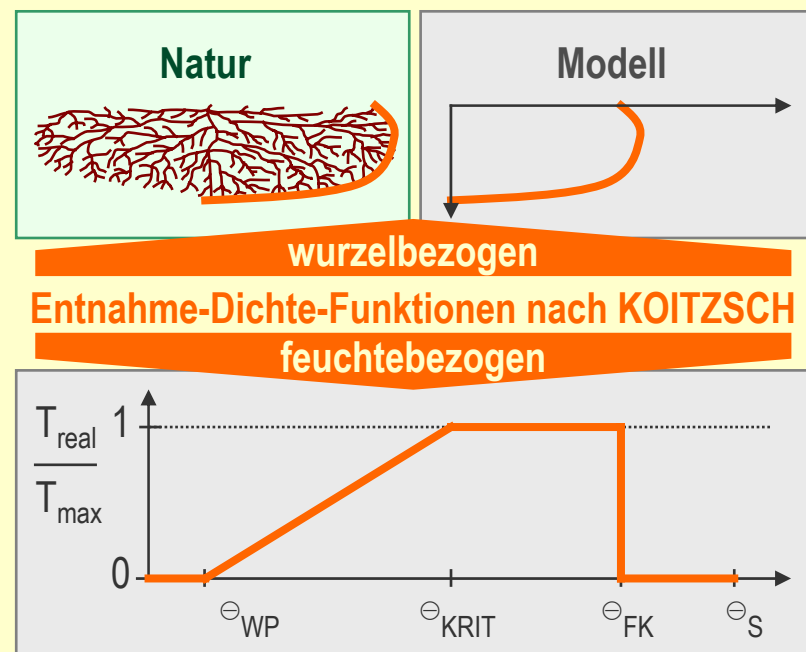
Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Prozess der Wasserauffüllung



Prozess des Wasserentzuges



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellinhalt



Prozess der Wasserauffüllung



Ackergaul im Gesamtsystem

Prozess des Wasserentzuges

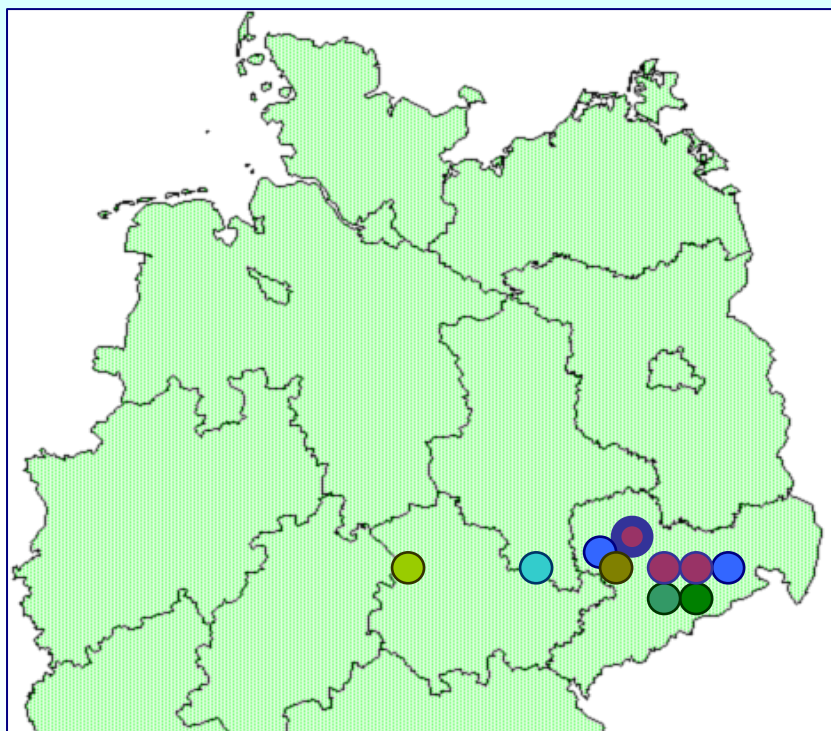


Rennpferd im Gesamtsystem

Wertung der Versickerungs- und Verdunstungsteilmodelle

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellkalibrierungen



Beteiligte Institutionen:

TU Freiberg, TU Dresden, LfULG Freiberg, UBG Brandis, StUFA Leipzig, Wismut GmbH Chemnitz, HGC GmbH Freiberg, C&E GmbH Chemnitz, Fresenius GmbH Frohburg, KUTEC GmbH Sondershausen, Aquila GmbH Markkleeberg, KELL GmbH Markranstädt, BEAK GmbH Freiberg

Kalibrierungsgröße

Bodenfeuchte → Standorte Wildacker und Deponie Deutzen

Abfluss- und Isotopenmessungen → Gänsebach (Erzgebirge)

Tritiumverteilung im Boden → Finne

Haldenwasserhaushaltsgrößen → Wismuthalden (Aue-Schlema)

Saugspannungs- /Bodenfeuchte-messungen → LfULG BDF Colditz, Hilbersdorf, Brandis

Sickerwasserstände → Deponie Frohbug

Sickerwassermessungen → Kali-Testfelder Bleicherode

Bodenwasserhaushaltsgrößen → Lysimeterstation Brandis

Zeitraum

1985 - 1989
2003

1997

1994 - 1997

1995 - 1999

ab 1999

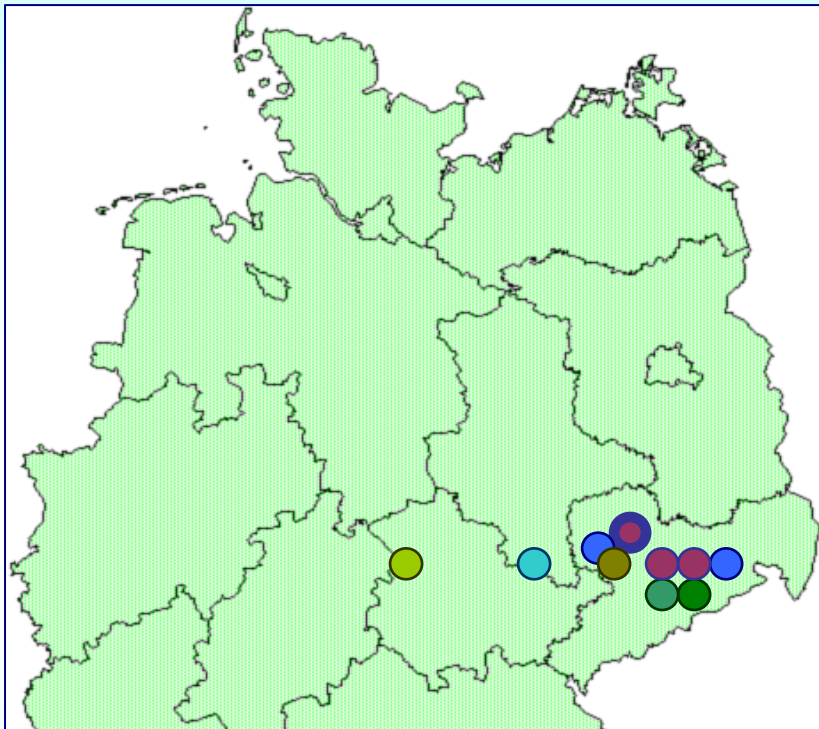
2000

2002

ab 2002

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellkalibrierungen



Beteiligte Institutionen:

TU Freiberg, TU Dresden, LfULG Freiberg, UBG Brandis, StUFA Leipzig, Wismut GmbH Chemnitz, HGC GmbH Freiberg, C&E GmbH Chemnitz, Fresenius GmbH Frohburg, KUTEC GmbH Sondershausen, Aquila GmbH Markkleeberg, KELL GmbH Markranstädt, BEAK GmbH Freiberg

Kalibrierungsgröße

Bodenfeuchte → Standorte Wildacker und Deponie Deutzen

Abfluss- und Isotopenmessungen → Gänsebach (Erzgebirge)

Tritiumverteilung im Boden → Finne

Haldenwasserhaushaltsgrößen → Wismuthalden (Aue-Schlema)

Saugspannungs- /Bodenfeuchte-messungen → LfULG BDF Colditz, Hilbersdorf, Brandis

Sickerwasserstände → Deponie Frohbug

Sickerwassermessungen → Kali-Testfelder Bleicherode

Bodenwasserhaushaltsgrößen → Lysimeterstation Brandis

Zeitraum

1985 - 1989
2003

1997

1994 - 1997

1995 - 1999

ab 1999

2000

2002

ab 2002

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Eingabeinformationen

Meteorologische Daten (Diskretisierung: Tages-, Monatswerte, langjährige Monatsmittel):
Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung ^{*)} bzw. Sonnenscheindauer ^{*)},
Windgeschwindigkeit ^{*)}, Niederschlagsmenge, ggf. Niederschlagsverteilung ^{*)}

Geographische und morphologische Parameter:

- Exposition
- Hangneigung
- Hanglänge

Pedologische Parameter:

- gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) ^{**)}
- Sättigungswassergehalt ^{**)}, Bereich der Feldkapazität ^{**)}, permantenter Welkepunkt ^{**)}
- kapillare Aufstiegshöhe ^{**)}
- Schichtenabfolge (vertikaler Aufbau)

Nutzungs- und Bewuchsparameter:

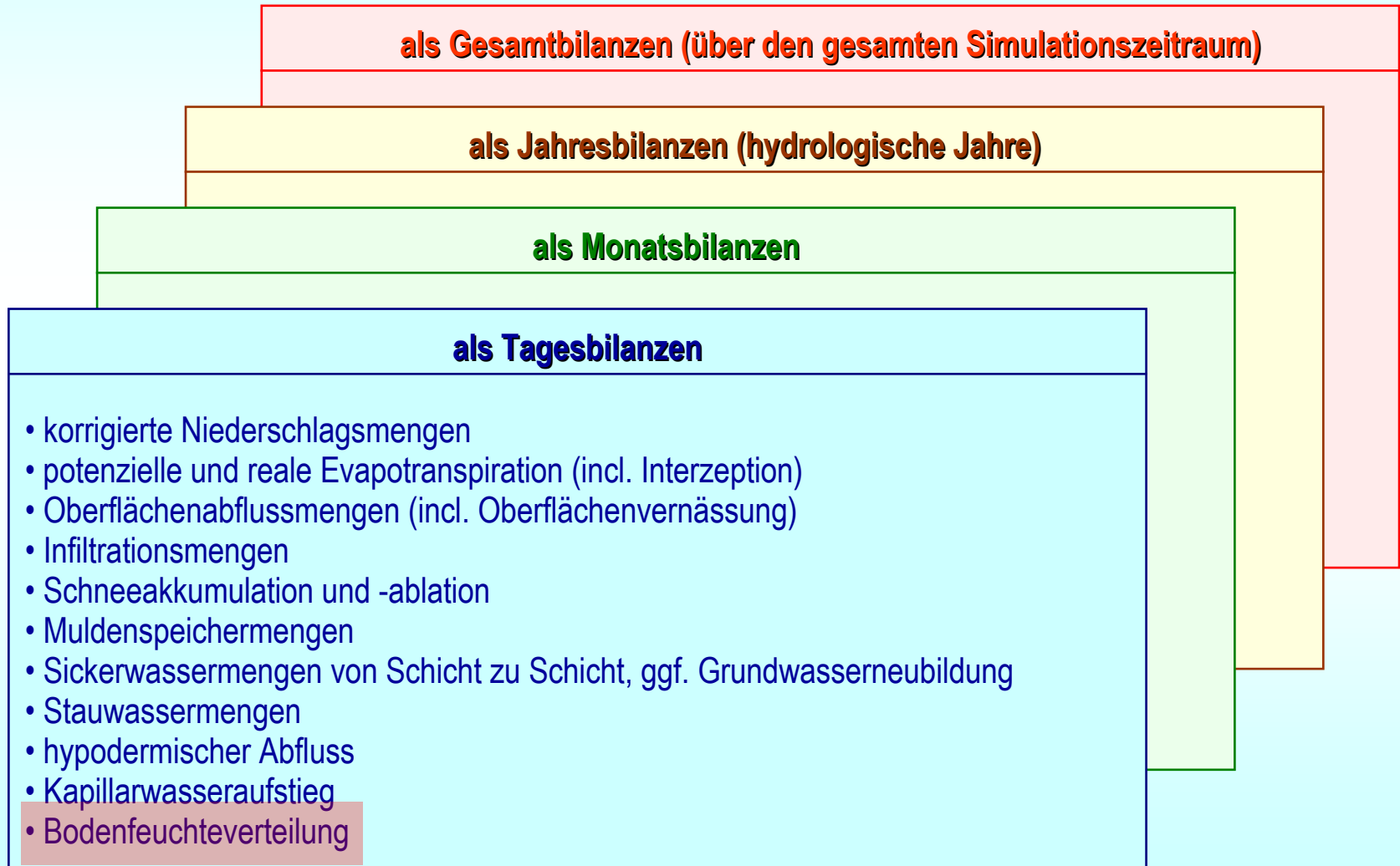
- Nutzung: Landwirtschaft, Grünland, Wald, unbewachsene Flächen, Ortschaft, Gewässer
- Vegetationsbedeckungs- bzw. Versiegelungsgrad ^{**)}
- Bewuchsüppigkeit
- Durchwurzelungstiefe ^{**)}
- Wurzeldichtevertelung ^{**)}

^{*)} Eingabe nicht zwingend notwendig

^{**) Es werden Default-Werte angeboten.}

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung mittels BOWAM – Modellausgaben

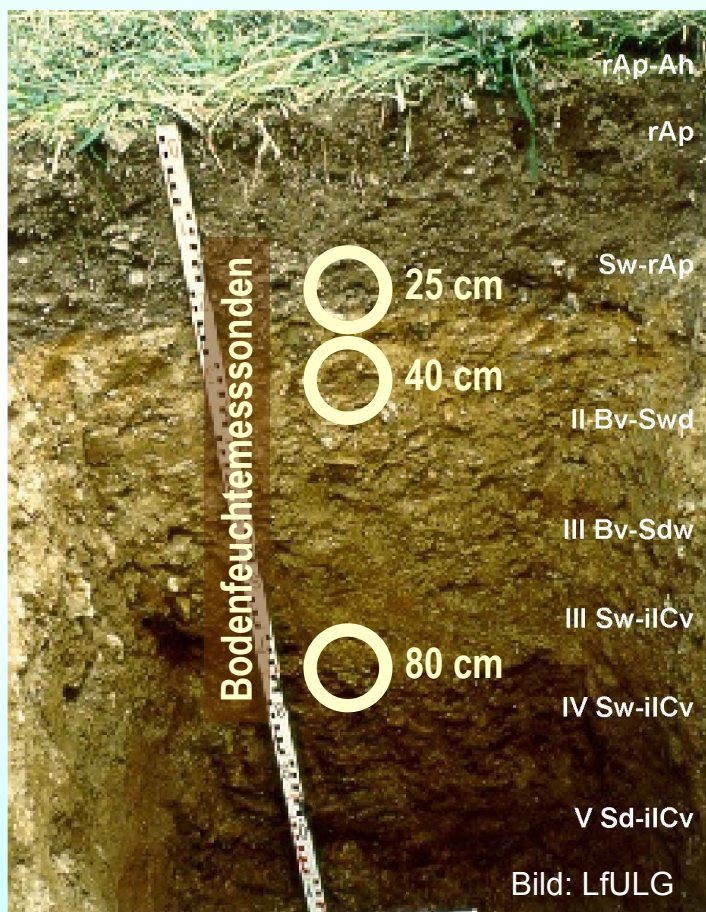


Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf

Modellparametrisierung:

Zur Erinnerung:



Parametersituation (k_f , Θ_s , Θ_{KF} , Θ_{PWP})		
Oberboden	sandig-lehmiger Schluff	aus periglazialen Lösslehm / Gneis
	schluffig-lehmiger Sand	
Unterboden	schwach sandiger Lehm	aus periglazialer Deckschicht aus Gneis
	stark lehmiger Sand	
	mittel lehmiger Sand	
Untergrund	schwach lehmiger Sand	aus anstehendem verwittertem Gneis

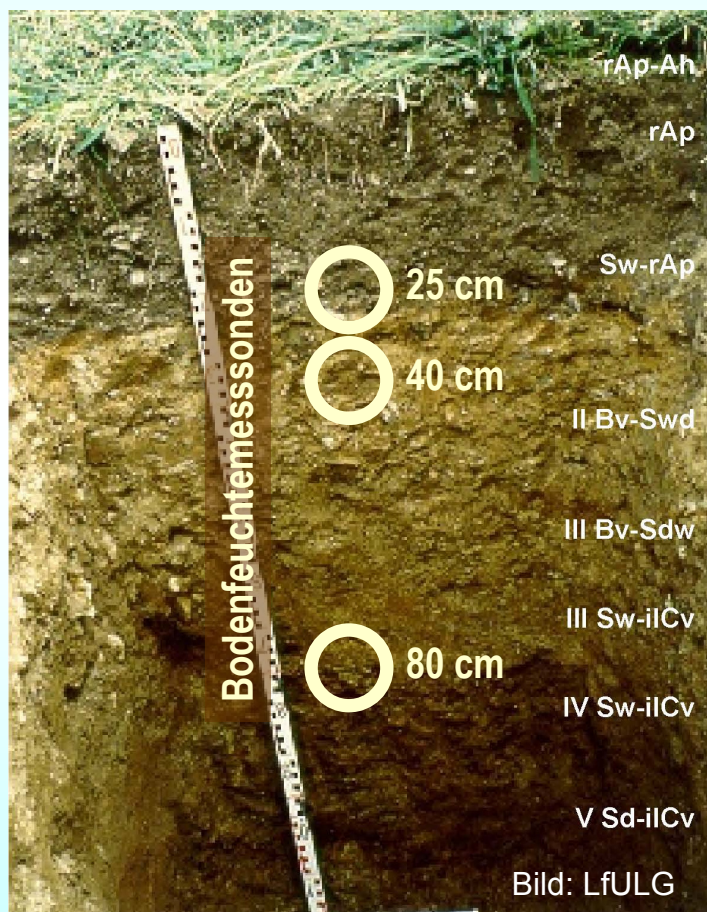
Humusgehalt

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf

Modellparametrisierung:

Zur Erinnerung:



Oberboden	sandig-lehmiger Schluff
	schluffig-lehmiger Sand
Unterboden	schwach sandiger Lehm
	stark lehmiger Sand
	mittel lehmiger Sand
Untergrund	schwach lehmiger Sand

Parametersituation (k_f , Θ_s , Θ_{KF} , Θ_{PWP})

Messung

Herleitung aus BKA

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf

Modellparametrisierung:

Meteorologische Daten:



Messung aller Daten
am Standort

Bild: H. Forberg.

BEACHTEN: 20 Datenlücken (1 Tag ... > 2 Monate)

Auffüllung mit Werten anderer Stationen:

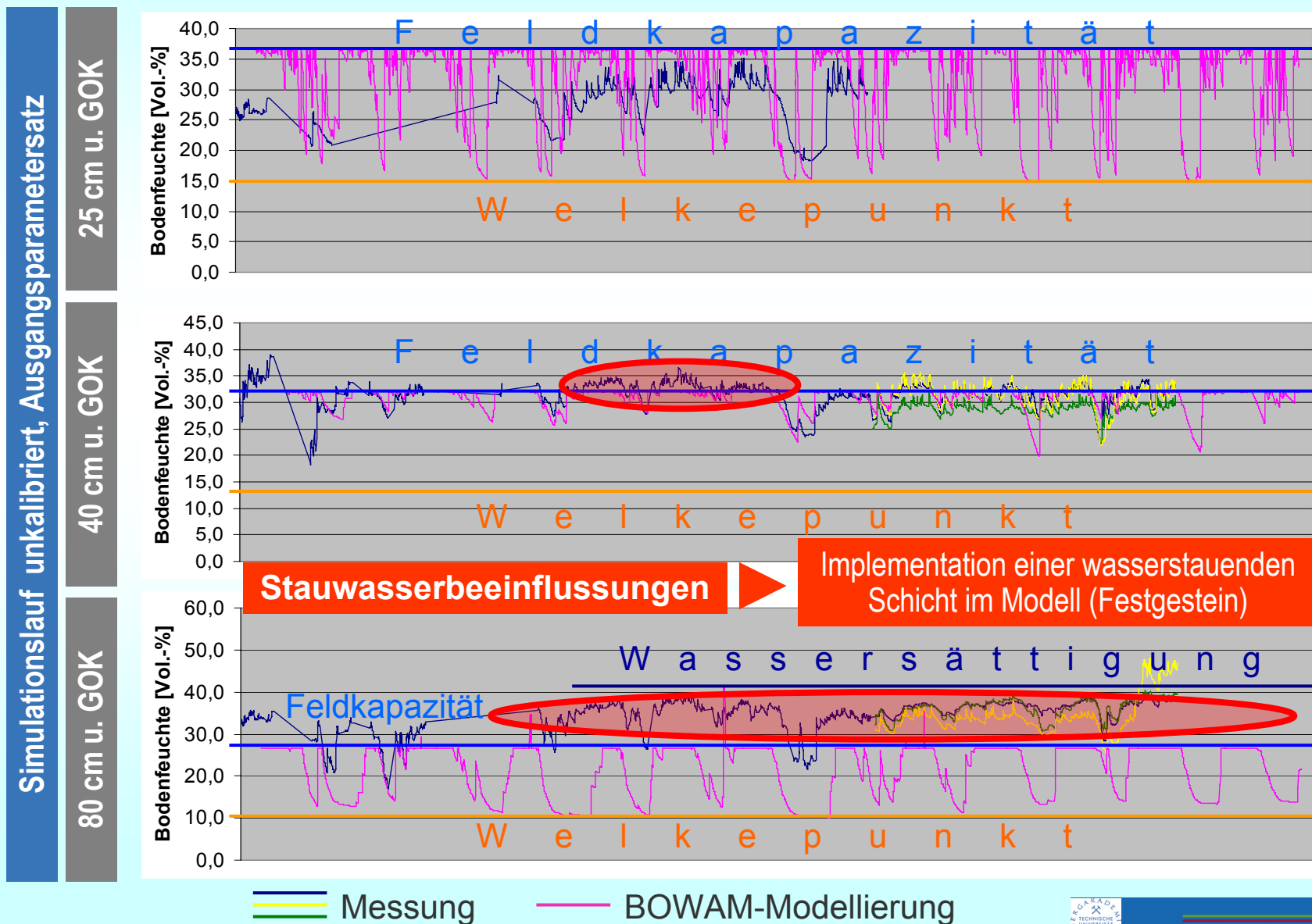
- Freiberg, Reiche Zeche
- Freiberg, LfULG Messcontainer
- Grillenburg, TU Dresden
- Dresden-Klotzsche, DWD-Station

Beispiele:

15.06.02 – 16.06.02	Globalstrahlung	Dresden-Klotzsche
17.06.02 – 19.06.02	Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag	Grillenburg
25.06.02 – 04.07.02	Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag	Grillenburg
01.10.02 – 09.10.02	Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag	Grillenburg
13.11.02 – 18.01.03	Globalstrahlung	Grillenburg
06.06.03 – 26.06.03	Temperatur, Luftfeuchte	Freiberg, Messcontainer
06.06.03 – 26.06.03	Globalstrahlung, Niederschlag	Grillenburg
17.06.04 – 30.06.04	Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag	Freiberg, Reiche Zeche

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf – Ergebnisse:



Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf – Ergebnisse:

Simulationslauf kalibriert, optimaler Parametersatz

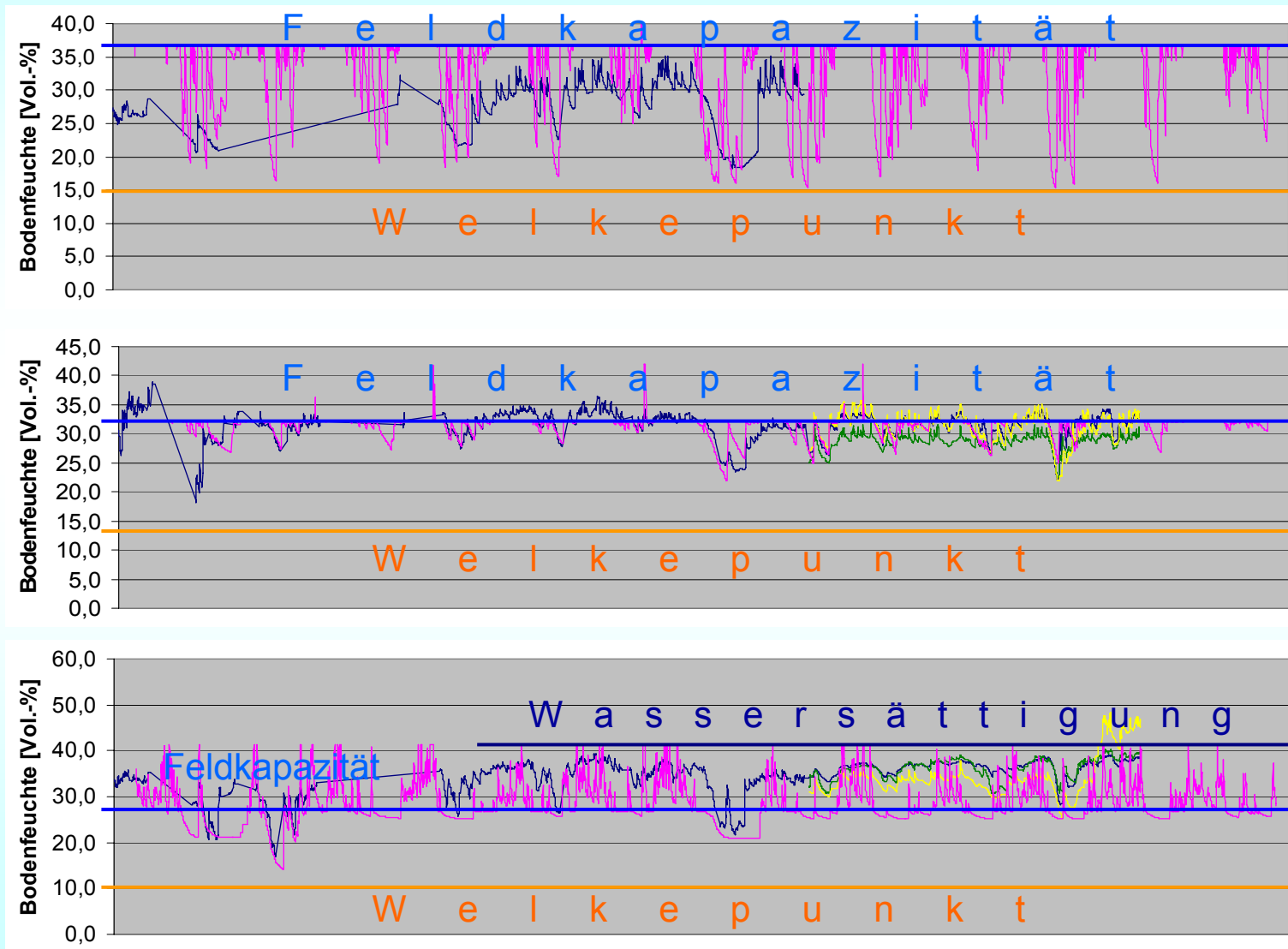
- Implementierung einer wasserstauenden Schicht an der Basis des Systems mit einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s
- Bewuchsüppigkeit: spärlich
- Anfangsbodenfeuchte: entsprechend den in den 3 Bodenhorizonten gemessenen Bodenfeuchtwerten
- Bestandskoeffizient und maximale Wurzeltiefen: zeitvariabel in Abhängigkeit von den gemessenen Bodenfeuchteverläufen
- Bewuchsbedeckungsgrad: BOWAM-Defaultwert

Simulationslauf kalibriert, optimaler Parametersatz

80 cm u. GOK

40 cm u. GOK

25 cm u. GOK



— Messung — BOWAM-Modellierung

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf – Ergebnisse:

Simulationslauf kalibriert, optimaler Parametersatz

Wasserbilanz (1997 – 2009)

hypodermischer
Abfluss
RH = 265 mm/a

Versickerung ins Festgestein
RU = 17 mm/a

reale Verdunstung
ETR = 454 mm/a

Oberflächenabfluss
RO = 5 mm/a

(alle Werte als mittlere Jahressummen)

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die BDF Hilbersdorf – Ergebnisse:

Wasserbilanz (1997 – 2009)

hypodermischer
Abfluss
RH = 265 mm/a

Versickerung ins Festgestein
RU = 17 mm/a

reale Verdunstung
ETR = 454 mm/a

Unsicherheiten bezüglich der Wasserbilanz:

- a) tendenziell kleinere Niederschläge der Station Hilbersdorf gegenüber anderen DWD-Stationen im Zeitraum 1997 – 2009
- b) Wasserdurchlässigkeit des Festgesteins → Beeinflussung des Aufsplittungsverhältnisses RH / RU

Oberflächenabfluss
RO = 5 mm/a

(alle Werte als mittlere Jahressummen)

Simulationslauf kalibriert, optimaler Parametersatz

Modellierung von hydrologischen Prozessen im Boden am Beispiel von BDF

Schlussfolgerungen:

Die Bodenfeuchtemessungen der BDF sind zur prinzipiell Kalibrierung von Modellen geeignet.

Die Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM brachte folgende Ergebnisse:

- Sowohl der jahreszeitliche Verlauf der Bodenfeuchte als auch die minimal gemessenen Bodenfeuchtwerte werden modellseitig gut erfasst.
- Bezüglich der Nachbildung der stauwasserbedingten hohen Bodenfeuchtwerte stößt das Modell BOWAM hingegen an seine Grenzen.
- Die modellierte Wasserbilanz für den Zeitraum 1997 – 2009 erscheint plausibel.

Kontakt:

Volkmar Dunger
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Geologie
Gustav-Zeuner-Straße 12
D-09596 Freiberg

Tel.: 00 49 (0) 37 31 / 39 32 27
E-Mail: dungerv@geo.tu-freiberg.de
www.geo.tu-freiberg.de/~dungerv/software/