

Waldernährung  
in der DVFFA  
Schleswig  
07. Mai 2015



# Abschätzungen von Nährstoffausträgen mit dem Sickerwasser für Punkte der zweiten Bodenzustandserhebung

Wendelin Weis, Thomas Schäff, Christian Kölling

*Abteilung 2 Boden und Klima, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft*



Bayerische Landesanstalt  
für Wald und Forstwirtschaft

BAYERISCHE FORSTVERWALTUNG



ZENTRUM WALD FORST HOLZ  
WEIHENSTEPHAN

## Energieholznutzung und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland

### Förderung (Juni 2013 – Mai 2016):

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft  
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

### Leitung:

Klaus von Wilpert

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Projektpartner:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft



### Projektziel:

Methodischer Rahmen zur Ermittlung der nachhaltig mobilisierbaren Holzbiomasse unter Erhaltung der natürlichen Nährstoffressourcen.

# Sickerwasseraustrag

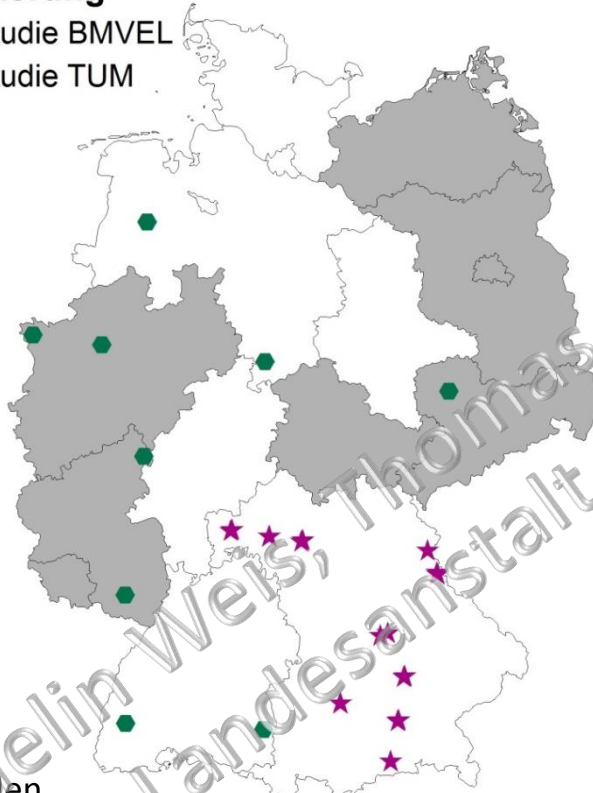
## Vorgehen:

- Treibende Kraft der Nährelementexporte mit dem Sickerwasser sind die Anionenflüsse ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{HCO}_3$ ).
- Der Anionenaustrag in Ionenäquivalenten entspricht dem Kationenaustrag.
- Die Konzentration starker Anionen ( **$\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}$** ) werden aus den Anionenkonzentrationen im wässrigen Bodenextrakt berechnet.
- die  **$\text{HCO}_3$** -Konzentration wird aus dem pH Wert im Boden ( $\text{H}_2\text{O}$ ) geschätzt.
- Die **Kationenanteile** im Sickerwasser werden aus deren Anteilen an der Kationenaustauschkapazität ermittelt. Die **Kationenkonzentrationen** ergeben sich dann durch Multiplikation mit den Anionenkonzentrationen.
- Aus Konzentrationen und **modellierten Wasserflüssen** werden die Stoffflüsse berechnet.
- Statistische Modellbildung mit R:  
lineare Modell, GAM (Summen Polynome 2. Grades als Alternative)

# verwendete Flächen zur Modellierung der Anionenkonzentrationen im Sickerwasser

## Anionen Modellierung

- ◆ Sickerwasserstudie BMVEL
- ★ Sickerwasserstudie TUM

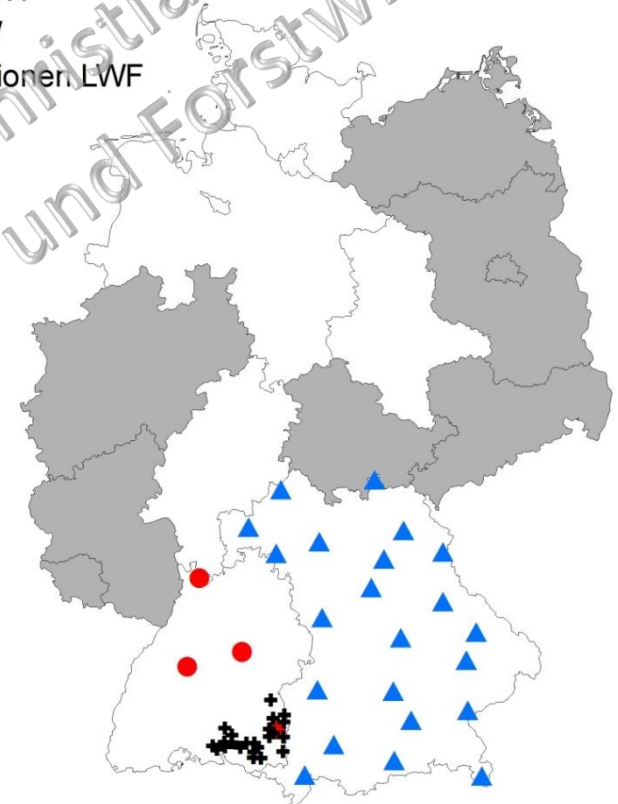


### Quellen

Evers et al. 2002 / Schlötter et al. 2009	BZE <sup>2</sup> Vorstudie BMVEL 10 Flächen, 4 Parallelen
Lutz, Weis, Göttlein (TUM/LWF)	F&E-Studie TUM 21 Flächen, 5 Parallelen

## Anionen Validierung

- Level II FVA-BW
- + BZE<sup>2</sup> FVA-BW
- ▲ Waldklimastationen, LWF



### Quellen

Schlötter, v. Wilpert (FVA-BW)	„Oberschwabenstudie“ (39 BZE <sup>2</sup> Punkte) Level II (7 Flächen, 8 Horizonte)
Raspe, Weis, Kölling (LWF)	Bay. Waldklimastationen (20 Flächen, 64 Horizonte)



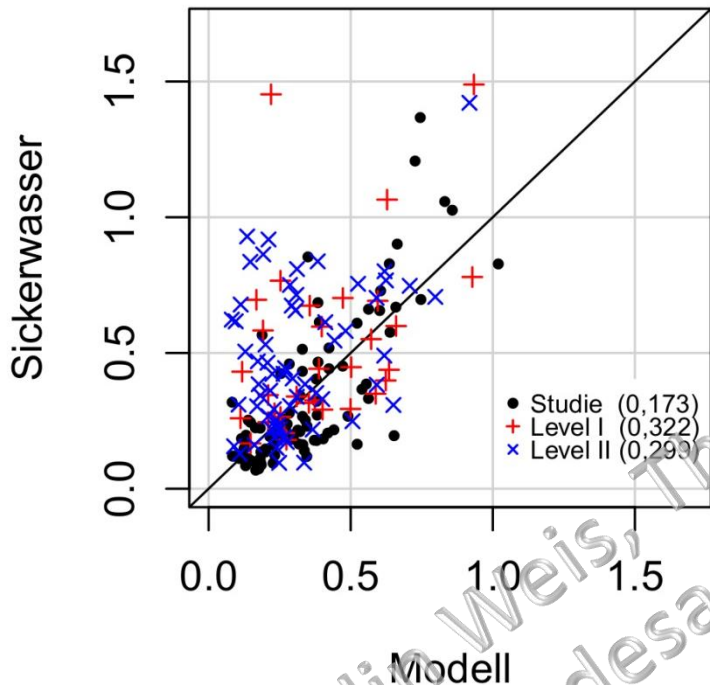
# Ergebnisse der statistischen Modelle: Anionensumme (Cl + NO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>)

Korrektur	Modell	Variablen	Schätzer	R <sup>2</sup>	n
-	linear	AS_WE	1.301E+00	<b>0.596</b>	90
Feldkapazität	linear	AS_WEfk	7.233E-02 1.505E-01	<b>0.467</b>	89
Wassergehalt	linear	AS_WEwg	7.416E-02 9.096E-02	<b>0.449</b>	84
-	Polynome 2.Grades	AS_WE <sup>2</sup> Schluff <sup>2</sup> Ton <sup>2</sup>	1.239E-01 1.771E+00 8.198E-05 -5.558E-05	<b>0.574</b>	82
Feldkapazität	Polynome 2.Grades	AS_WEfk <sup>2</sup> TRD_FE Sand <sup>2</sup> Sand Schluff <sup>2</sup>	2.122E-02 -2.433E-01 -1.133E-04 1.328E-02 1.511E-04	<b>0.618</b>	81
Wassergehalt	Polynome 2.Grades	AS_WEwg <sup>2</sup> AS_WEwg Schluff <sup>2</sup>	-1.211E-01 -1.138E-02 1.718E-01 9.044E-05	<b>0.598</b>	81

# Validierung: Anionensumme $AS = Cl + NO_3 + SO_4$

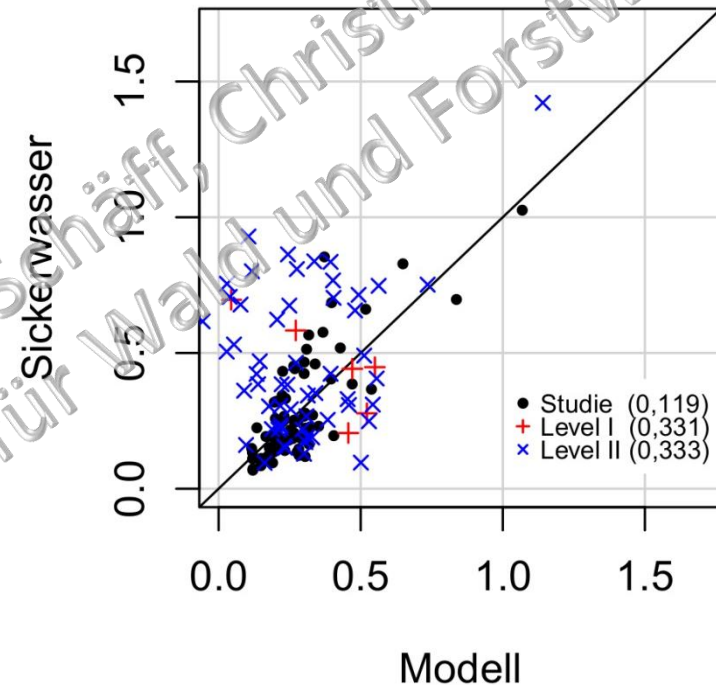
## Lineares Modell ohne Korrektur (LM0o)

$$AS_{SW} = a \cdot AS_{WE}$$



## Polynomisches Modell, Korrektur über FK (POL1o)

$$AS_{SW} = a_1 \cdot AS_{WE}k^2 + a_2 \cdot TRD + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot S + a_5 \cdot U^2$$



**Komplexere Modelle können bei der Validierung zu schlechteren Ergebnissen führen!**

RMSE (Studie): LM0o = 0,173

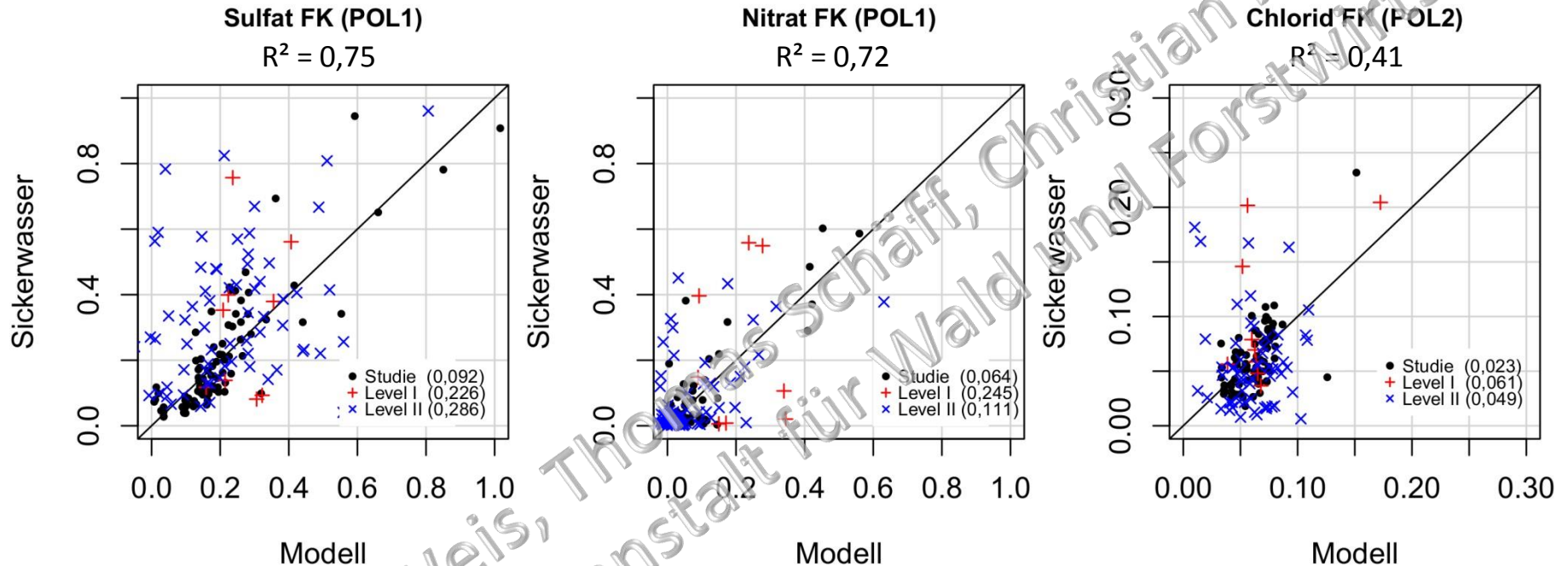
POL1o = 0,119

RMSE (Level II): LM0o = 0,299

POL1o = 0,333

Für weitere Berechnungen wurde das einfache lineare Modell verwendet (LM0o).

# Validierung: Sulfat, Nitrat, Chlorid



## Bewertung der Validierung

Sulfat: -  
 Nitrat: -  
 Chlorid: -

## Vergleich RMSE

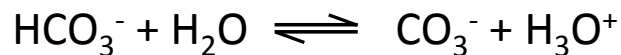
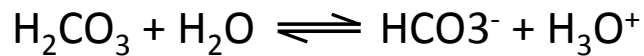
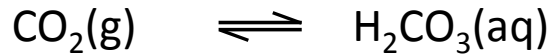
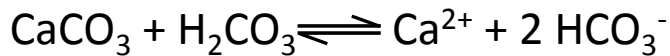
Studie	Level II
0,092	0,286
0,064	0,111
0,023	0,049

## Anmerkung

oft dominierendes Anion  
 Werteverteilung sehr ungünstig  
 Wertebereich niedrig

# Hydrogencarbonat

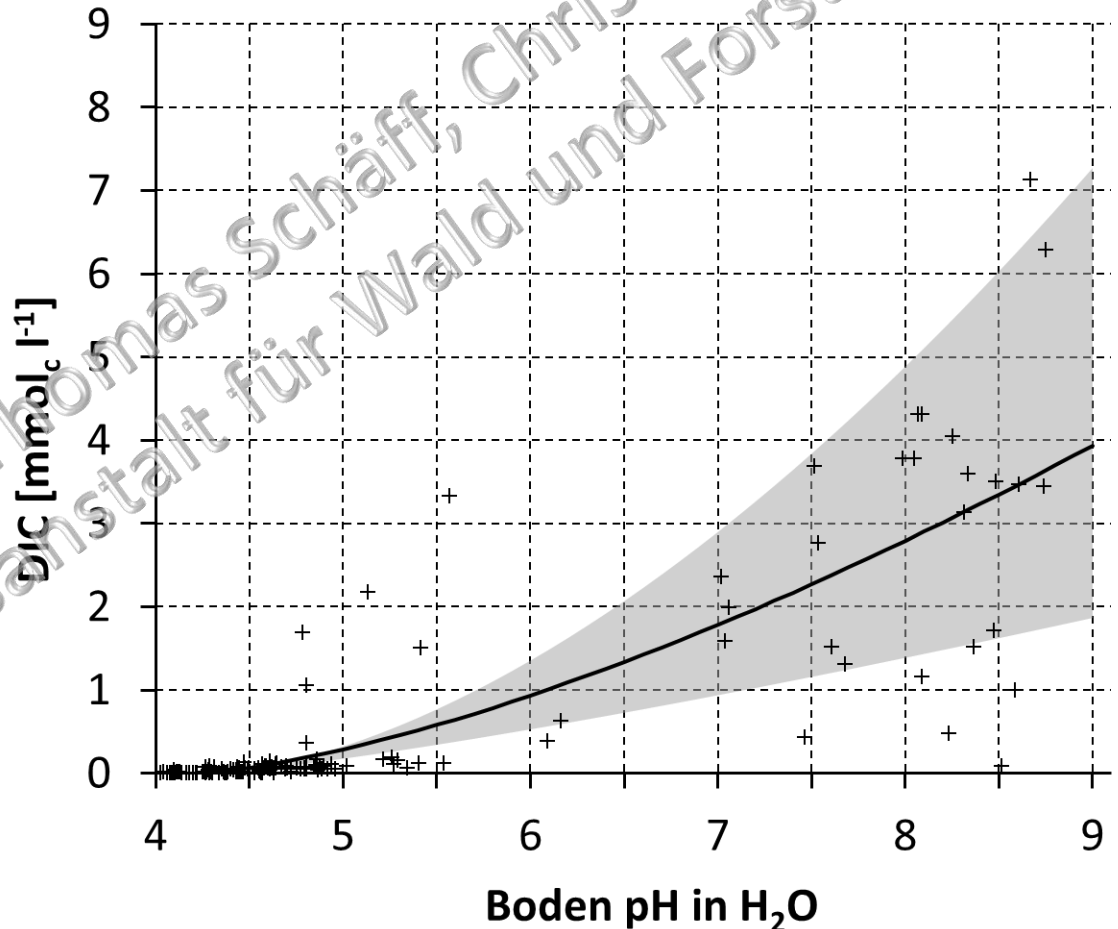
Die Carbonatlösung im Boden ist ein komplexes System chemischer Gleichgewichtsreaktionen. Vereinfachend wurde deshalb die Konzentration von  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  aus dem Boden pH geschätzt.



$$\text{DIC} [\text{mmol}_c \text{l}^{-1}] = a \cdot (\text{pH} - 4.2)^b$$

für pH > 4.2 sonst 0

	Schätzer	SE	R <sup>2</sup>	RMSE
a	0.395	0.122	0.65	0.797
b	1.466	0.225		

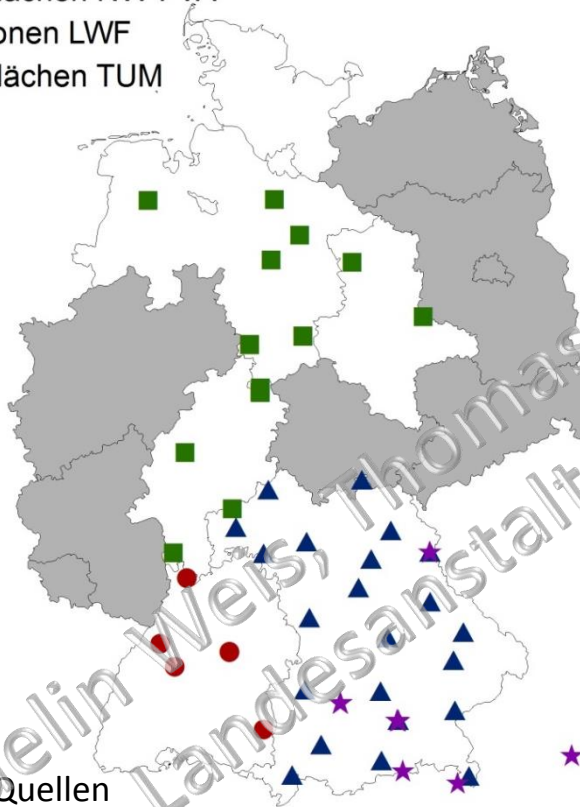




# verwendete Flächen zur Modellierung der Kationenkonzentrationen im Sickerwasser

## Kationen Modellierung

- Level II FVA-BW
- Stoffhaushaltsflächen NW-FVA
- ▲ Waldklimastationen LWF
- ★ Stoffhaushaltsflächen TUM

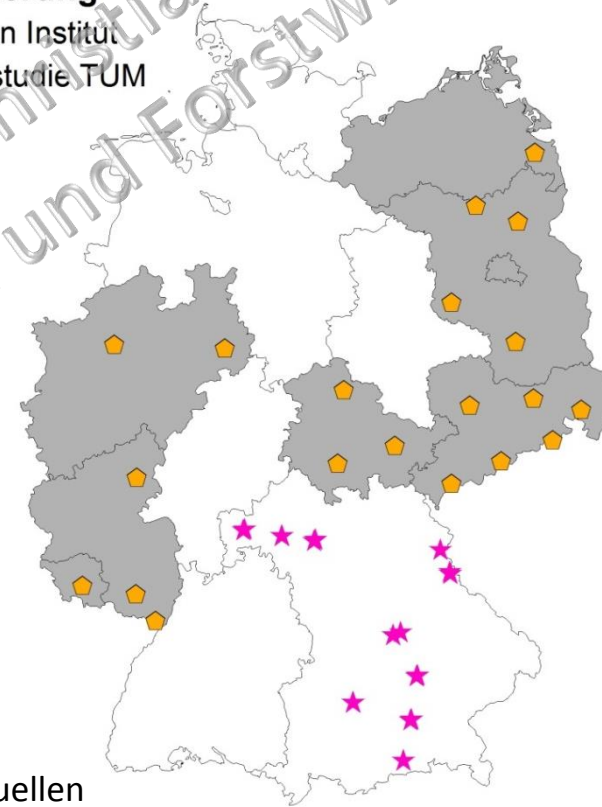


Quellen

FVA-BW	7 Flächen, 22 Horizonte
NW-FVA	28 Flächen, 59 Horizonte
LWF	23 Flächen, 108 Horizonte
TUM	26 Flächen, 46 Horizonte

## Kationen Validierung

- ◆ Level II Thünen Institut
- ★ Sickerwasserstudie TUM



Quellen

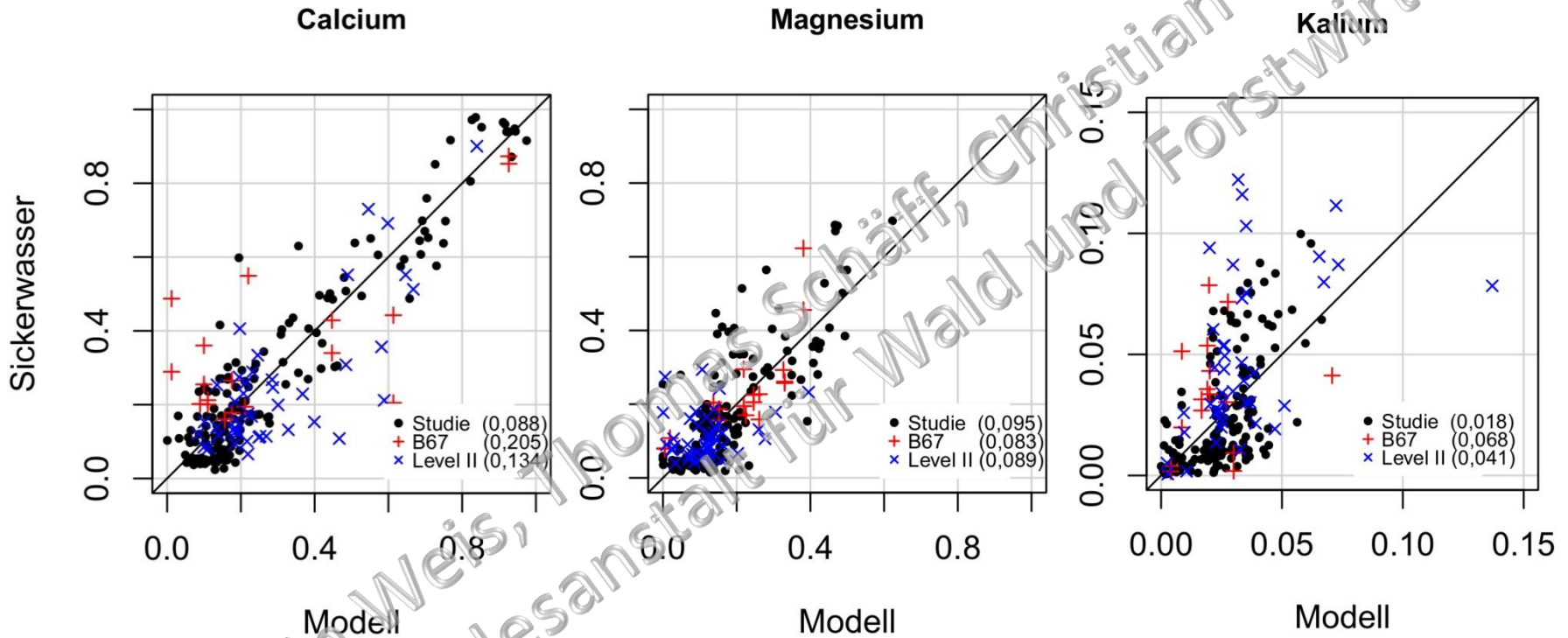
TI (Level II)	20 Flächen, 43 Horizonte
TUM (F&E)	18 Flächen

# Ergebnisse der statistischen Modelle: Kationenanteile (GAM)

Element im Sickerwasser	Einflussgröße (Element am Kationenaustauscher)	R <sup>2</sup>	RMSE	n
Ca	Al, Ca, Mg, K	0.883	0.0896	170
H	H, Fe, SB*	0.731	0.0362	170
Al	Al, Fe, SB*	0.722	0.1270	170
Mg	Fe, Ca, Mg, K	0.638	0.0940	170
Mn	Mn, Fe, SB*	0.549	0.0148	170
Fe	H, Fe	0.403	0.0127	152
K	H, Al, Mn, K	0.380	0.0181	170
Na	Mn, Ca	0.313	0.0681	170

\*SB: Summe basischer Kationen (Ca + Mg + K + Na)

# Nährstoff-Kationen Modellvalidierung



## Bewertung der Validierung

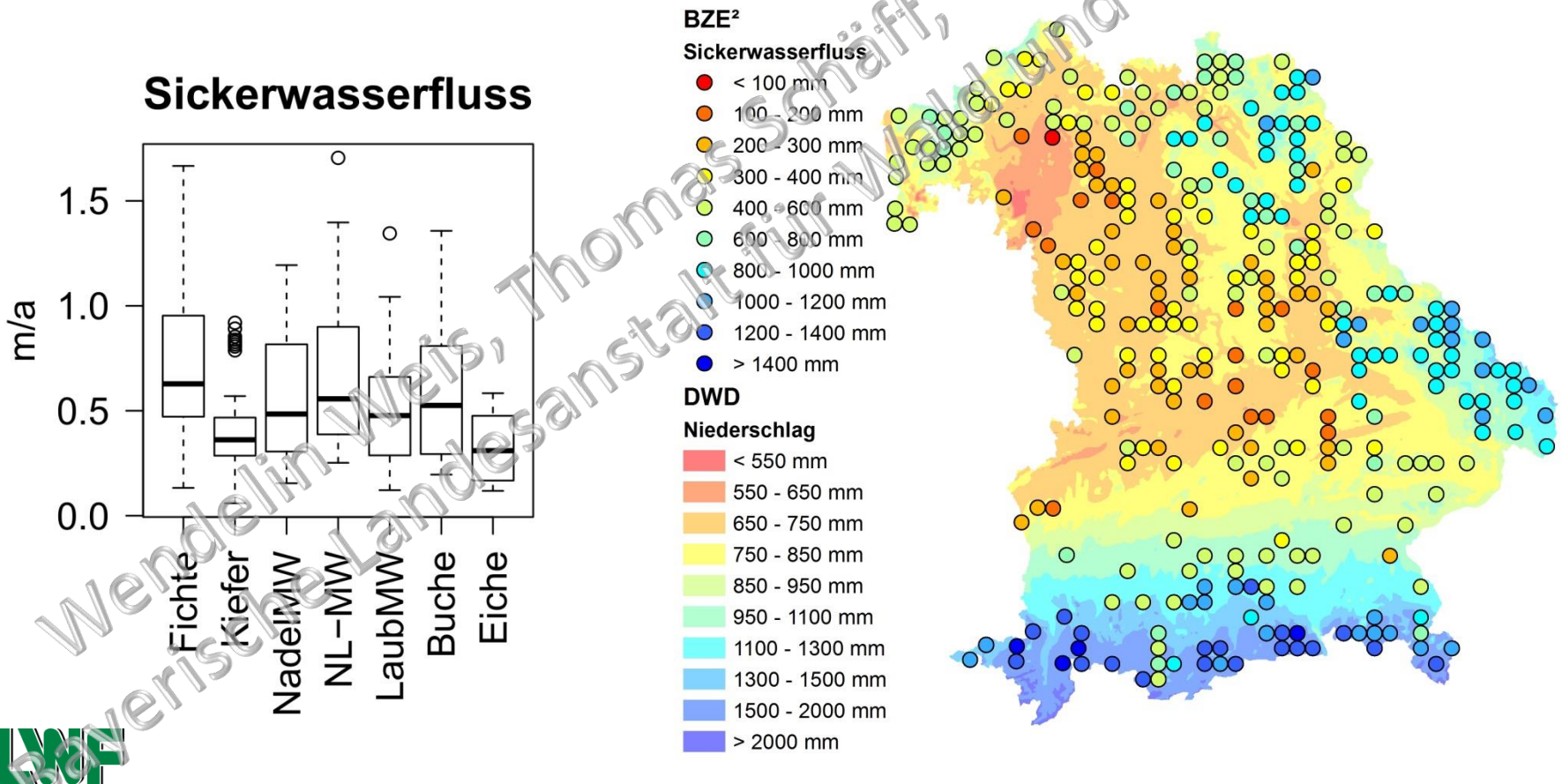
Calcium: gut  
 Magnesium: sehr gut  
 Kalium: befriedigend

## Vergleich RMSE

Studie	Level II
0,088	0,134
0,095	0,089
0,018	0,041

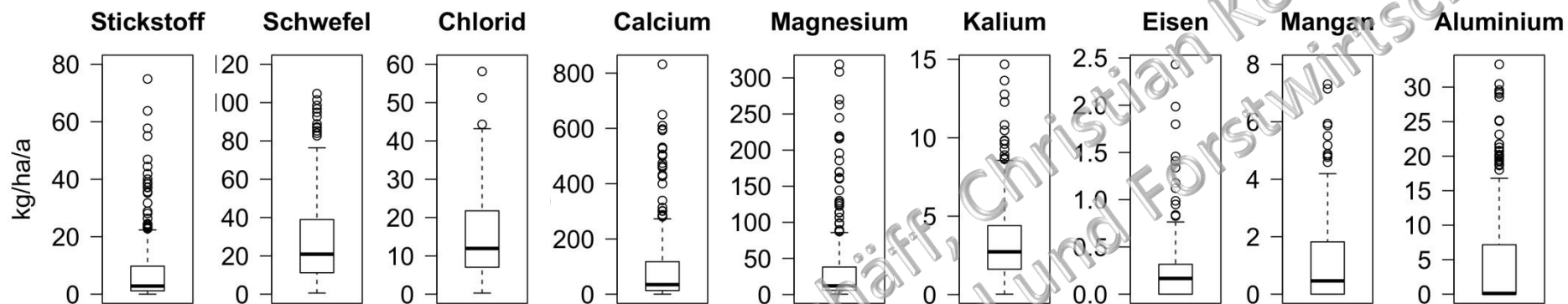
# Sickerwasserfluss Bayern (BZE<sup>2</sup> Punkte)

- Wasserhaushaltsmodellierung mit LWF-Brook90 (Federer & Lash 1978, Hammel & Kenkel 2001).
- regionalisierte Klimadaten (1998-2010 aus Messungen an den Waldklimastationen, Rötzer 2000)
- pF und Wasserleitfähigkeit aus Korngrößenanalysen der BZE<sup>2</sup> (PTF HYPRES, Wösten et al. 1999)
- Blattflächenindex und Oberflächenindex aus Bestandsdaten der BWI<sup>2</sup> (Baumart, Stammzahl, BHD)
- Modellvalidierung an fünf Level II-Monitoring-Flächen (Interzeptionsverdunstung, Bodenfeuchte)





# Elementausträge in Bayern (BZE<sup>2</sup> Punkte)



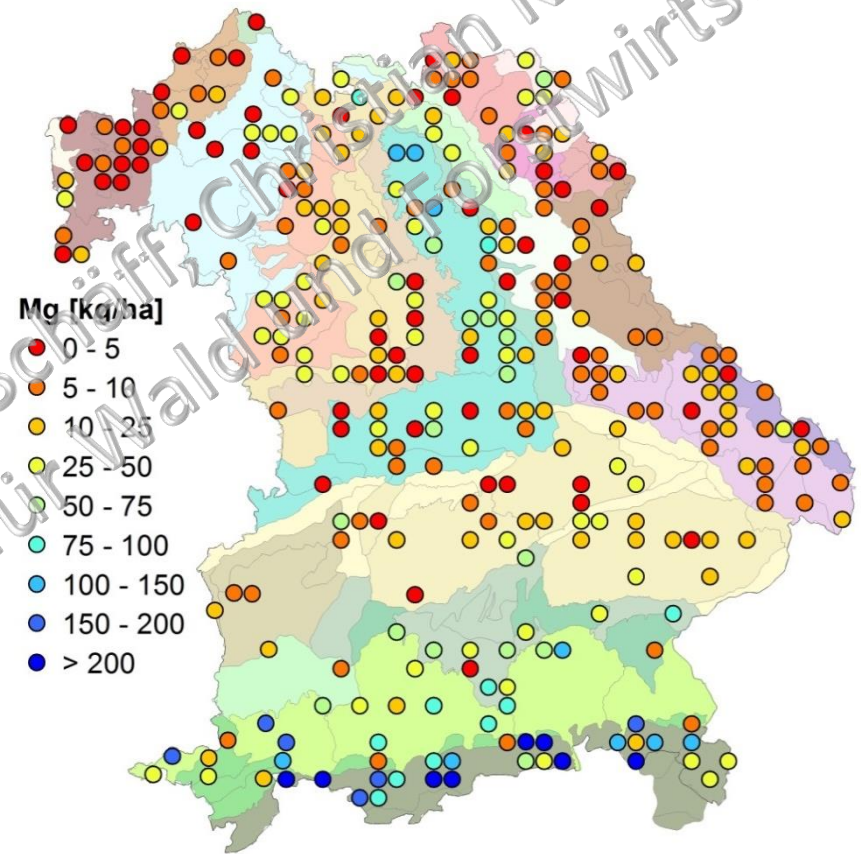
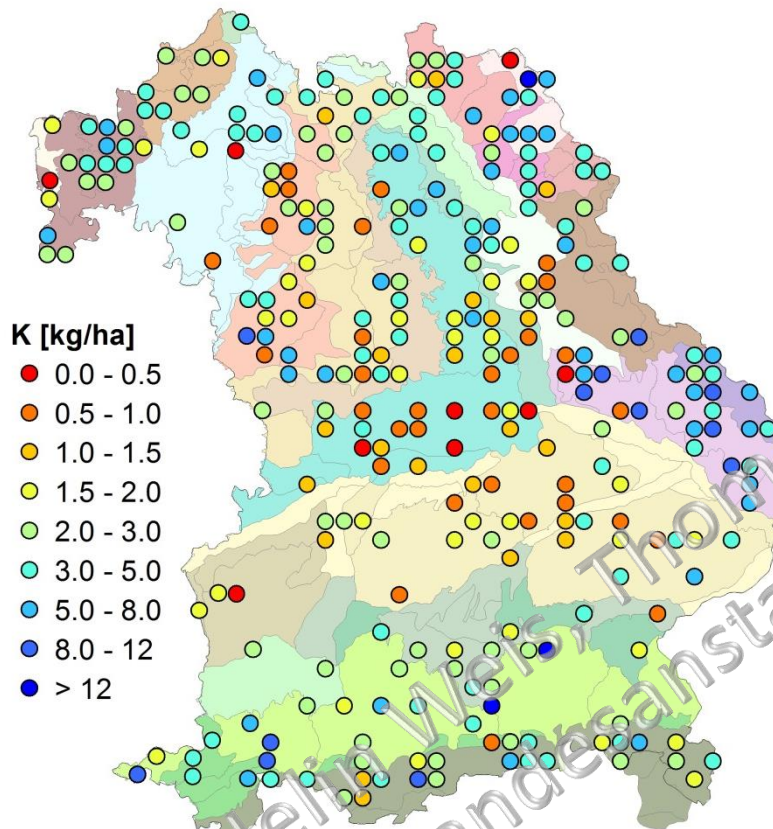
	Fluss [mm a <sup>-1</sup> ]	DIC	N	S	Cl	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	Al
						[kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]						
<b>Mittelwert</b>	<b>604</b>	<b>72.3</b>	<b>8.09</b>	<b>29.1</b>	<b>15.0</b>	<b>92.5</b>	<b>32.1</b>	<b>3.34</b>	<b>18.7</b>	<b>1.11</b>	<b>0.23</b>	<b>4.64</b>
Standardabw.	342	116.5	13.19	27.6	11.1	133.7	50.7	2.46	19.1	1.69	0.31	7.24
<b>Median</b>	<b>507</b>	<b>16.3</b>	<b>2.83</b>	<b>20.9</b>	<b>11.9</b>	<b>34.7</b>	<b>12.1</b>	<b>2.73</b>	<b>13.1</b>	<b>0.46</b>	<b>0.17</b>	<b>0.11</b>

**Zum Vergleich: Werte bayerischer Stoffhaushaltsuntersuchungen in Wäldern**

<b>Mittelwert</b>	<b>552</b>	<b>149</b>	<b>6.80</b>	<b>33.1</b>	<b>18.5</b>	<b>133.7</b>	<b>42.1</b>	<b>2.80</b>	<b>14.5</b>	<b>0.48</b>	<b>0.20</b>	<b>3.14</b>
<b>Median</b>	<b>478</b>	<b>9</b>	<b>4.12</b>	<b>18.5</b>	<b>6.6</b>	<b>12.8</b>	<b>5.5</b>	<b>2.27</b>	<b>6.1</b>	<b>0.27</b>	<b>0.14</b>	<b>0.44</b>



# Sickerwasseraustrag Bayern (BZE<sup>2</sup> Punkte: K + Mg)



**zum Vergleich:**

mittlere Deposition WKS:

Nährstoffaufnahme Fichte:

**Kalium**

3,1 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

6,2 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

**Magnesium**

0,8 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

1,6 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

# Zusammenfassung

- Die Konzentration starker Anionen in ihrer Summe kann gut aus den Anionenkonzentrationen im wässrigen Bodenextrakt geschätzt werden.
- Für die einzelnen Anionen, vor allem für Nitrat und Chlorid ist eine Abschätzung aus dem Bodenextrakt mit größeren Unsicherheiten behaftet (vor allem Chlorid).
- Für Hydrogencarbonat ist nur eine sehr grobe Abschätzung aus dem Boden pH möglich.
- Die Kationenanteile im Sickerwasser lassen sich mit ausreichender Qualität aus den Anteilen am Kationenaustauscher vorhersagen (Ca  $+++$ ; Al/H  $++$ ; Mg/Mn  $+$ ; K/Fe/Na  $\pm$ ). Die Schätzung der Kationenkonzentrationen ist damit über die Anionenkonzentrationen möglich.
- Die mit modellierten Wasserflüssen berechneten Elementausträge der bayerischen BZE<sup>2</sup> Punkte passen in Größenordnung und Verteilung zu den Stoffhaushaltsuntersuchungen an den Waldklimastationen und spiegeln regionale Unterschiede gut wieder.

# Danksagung

- FNR / BMEL (Projektfinanzierung)
- Thünen Institut (Datenbereitstellung Level II und BZE)
- Projektpartner (Datenweitergabe, Diskussion)  
FVA-BW: Klaus von Wilpert, Carina Sucker u. a.  
NW-FVA: Bernd Ahrends, Uwe Klinck u. a.
- und den Kollegen der LWF:  
Stephan Raspe, Alfons Schubert, Lothar Zimmermann ...