

# Hydrologische Modellierung



UNI  
GRAZ

Jakob Steiner  
GWB.01040UB

# Übersicht

- Einführung
- Modellkonzepte
- Kalibrierung und Validierung
  
- Konkrete Beispiele an drei Fallstudien im Hochgebirge

Was sollten Sie am Ende der Vorlesung mitnehmen:

- Verständnis, wann man in der Hydrologie auf Modelle zurückgreift.
- Erkennen des **Potentials** aber auch der **Grenzen**.
- Klarheit über die **grundlegenden Modelltypen**.
- Verständnis des typischen **Modellaufbaus**.
- Begeisterung für Hydrologie (*optional*).

# Was ist ein Modell?

- Das Simulieren der natürlichen oder konstruierten Umwelt (Dingman, 2002)
- Eine Vereinfachung der Wirklichkeit
- *All models are wrong, but some are useful.* (George Box)
- *Models without data are fantasy. Data without models are chaos.* (Patrick Crill)
- *Bullshit in – bullshit out.* (Everyone)

# Warum brauchen wir hydrologische Modelle?



# Warum brauchen wir hydrologische Modelle?



## Generell

- Prozessverständnis (historische Daten; Einzugsgebiete ohne Messungen)
- Vorhersagen (*forecast*) – Voraussagen (*prediction*)
  - Vorhersage: genaue Quantifizierung des Abflusses als Reaktion auf ein Regenereignis/Schmelze
  - Voraussage: Quantifizierung einer Variable zur Dimensionierung/Planung

# Warum brauchen wir hydrologische Modelle?

## Sektoren

- Wasserkraft/Atomkraft
  - Quantität/Timing/Temperatur
- Landwirtschaft
  - Quantität/Qualität
- Trinkwasserversorgung
- Ökologie
- Wissenschaft



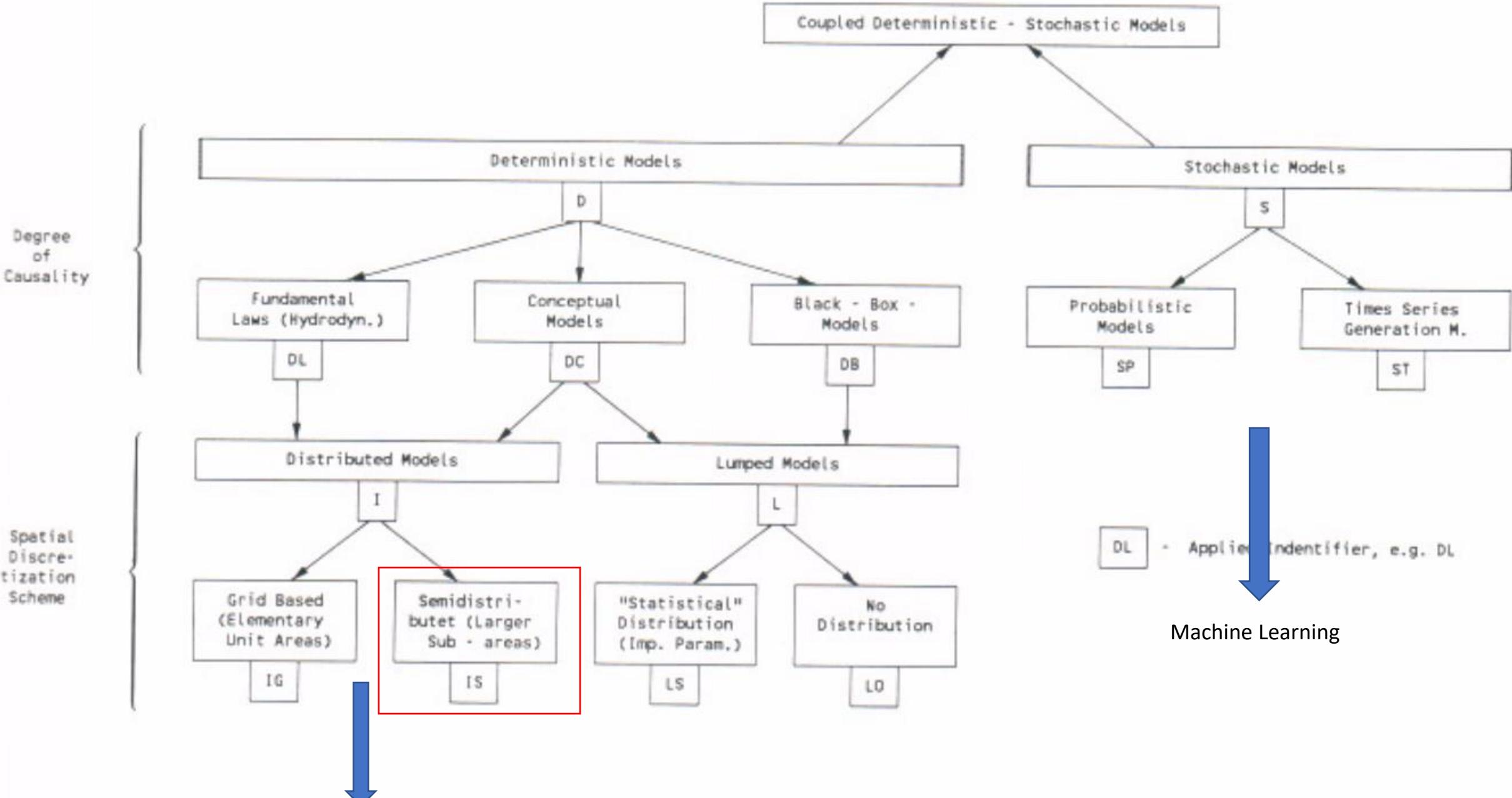
Wasserkraftwerksbau im Zentralhimalaya, November 2022

# Modelldefinitionen

- stationäres (*steady state*) vs dynamisches System (*transient*)
  - spielt  $dt$  eine Rolle (*transient*) oder nicht (*steady*)?
- lineare vs nicht-lineare Modelle
  - Modelle sind oft ersteres, die Natur meist letzteres
- diskrete vs kontinuierliche Modelle
  - Auflösung der Zeitschritte (was diskret/kontinuierlich ist, hängt von der Variable ab – Hochwasser: Minuten bis Tage; Grundwasser: Tage bis Jahrzehnte)

# Modelldefinitionen

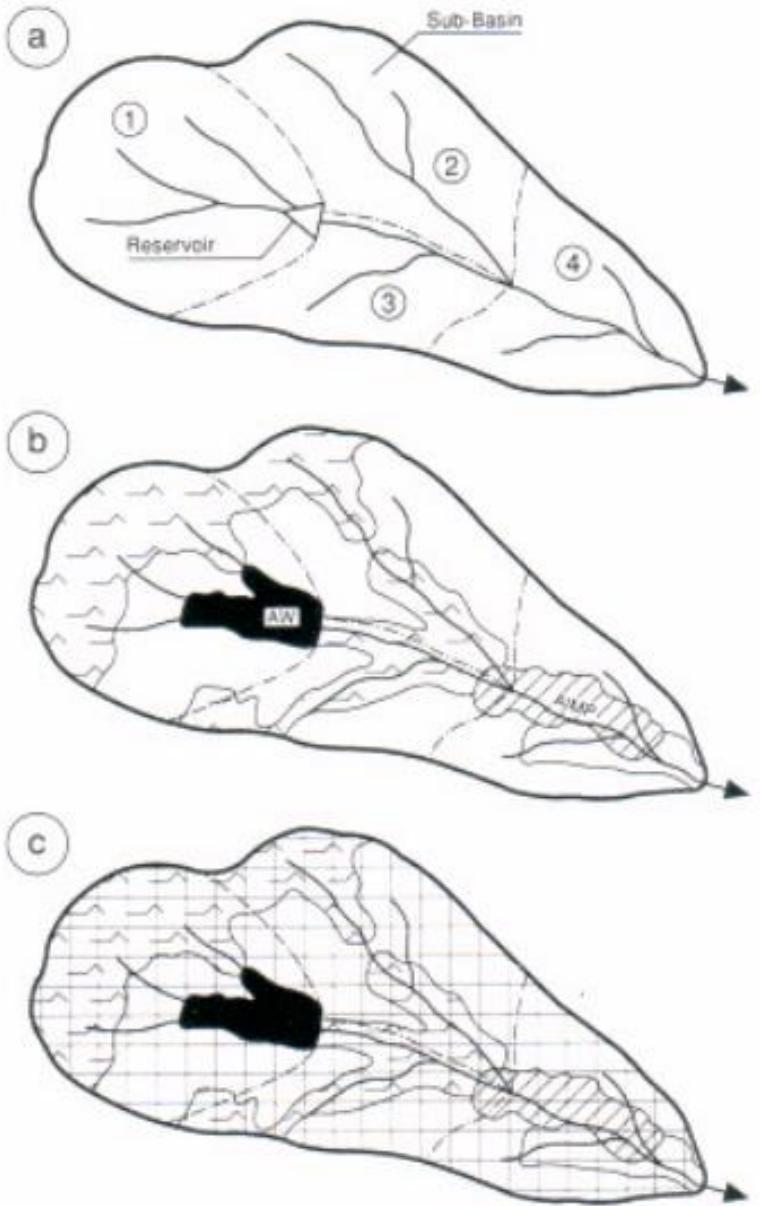
- deterministische vs stochastische Modelle
  - Prozesse ausformuliert (determ.) oder das Modell basiert allein auf Statistik/Wiederkehrperioden etc. (stoch.)
- physikalische vs Box-Modelle
  - Prozesse nachgestellt oder nur in einem inflow-outflow Prinzip verwirklicht (*black box*)
- globale (*lumped*) vs diskretisierte (*distributed*) Modelle
  - Ähnliche Topographie gruppiert (*lumped*) oder jede Zelle separat gelöst (*distributed*)



Entwicklungen in Richtung verschiedener Grid-Strukturen (FD, FE, FV, flexible mesh, TIN etc)

Nemec (1993)

# Räumliche Diskretisierung

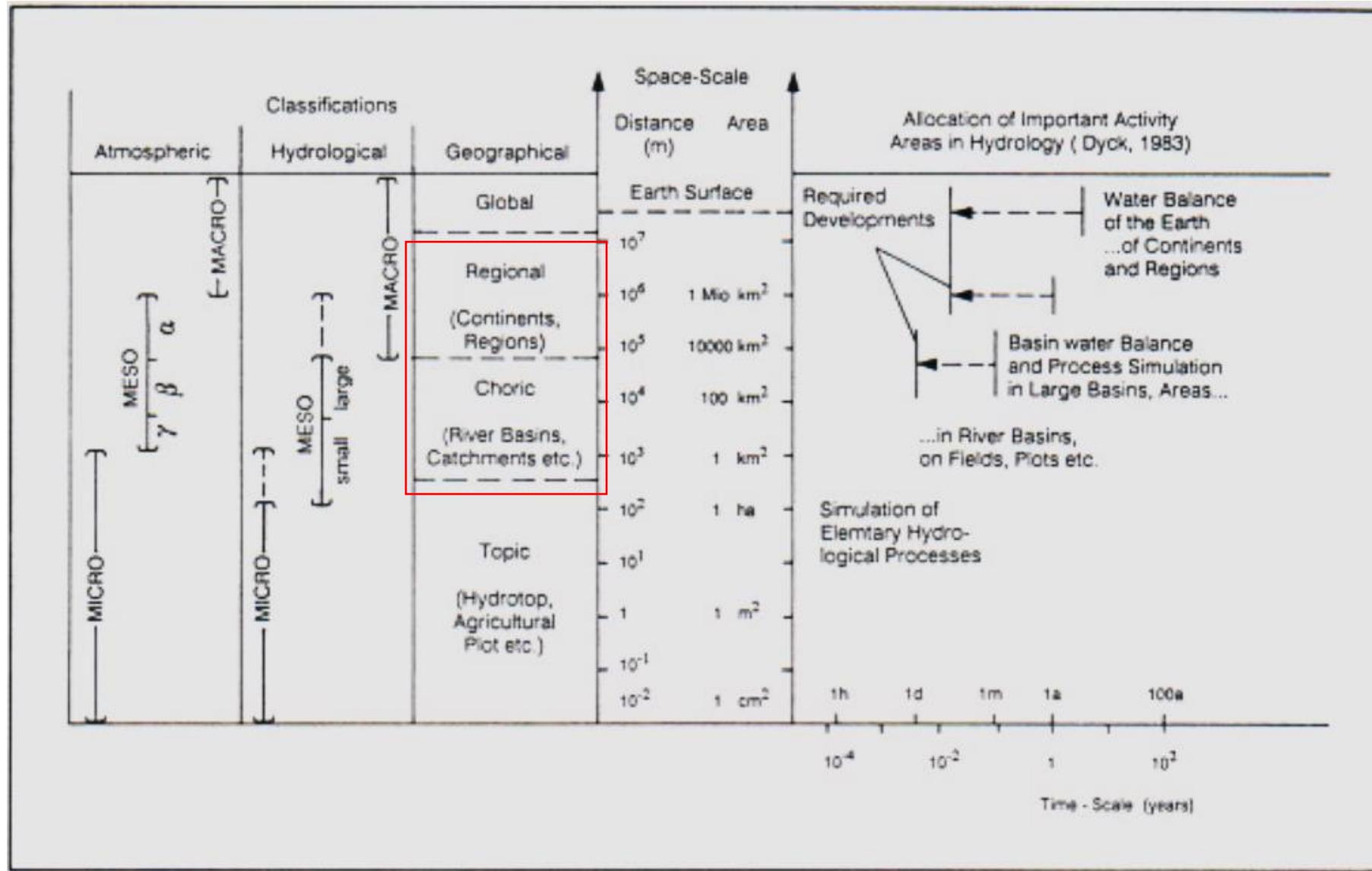


- (a) **global (*lumped*)**
- Einfacher Aufbau
  - Geringere Rechnerleistung notwendig
  - Vereinfachung des Problems
- (b) **semi-diskretisiert (*semi-distributed*)**
- HRUs (hydrological response units)
- (c) **diskretisiert (*fully distributed*)**
- Fixe oder variable Gitterstruktur (*meshing*)

Fig. 4 Representation of different space discretization schemes in a river basin modelling:  
(a) lumped (4 sub-systems)  
(b) semi-distributed  
(c) distributed (grid-based)

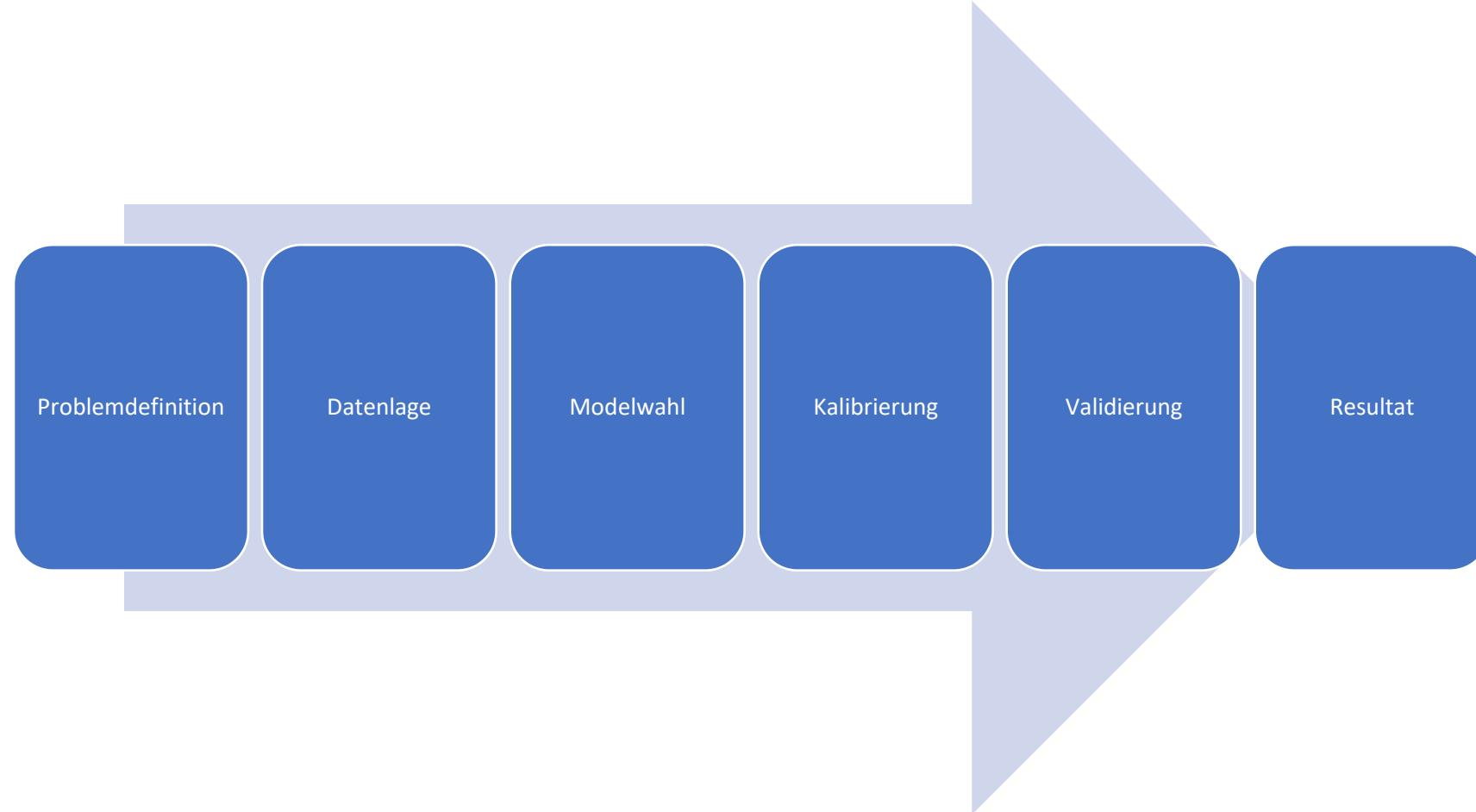
Nemec (1993)

# Raum- und Zeitskalen



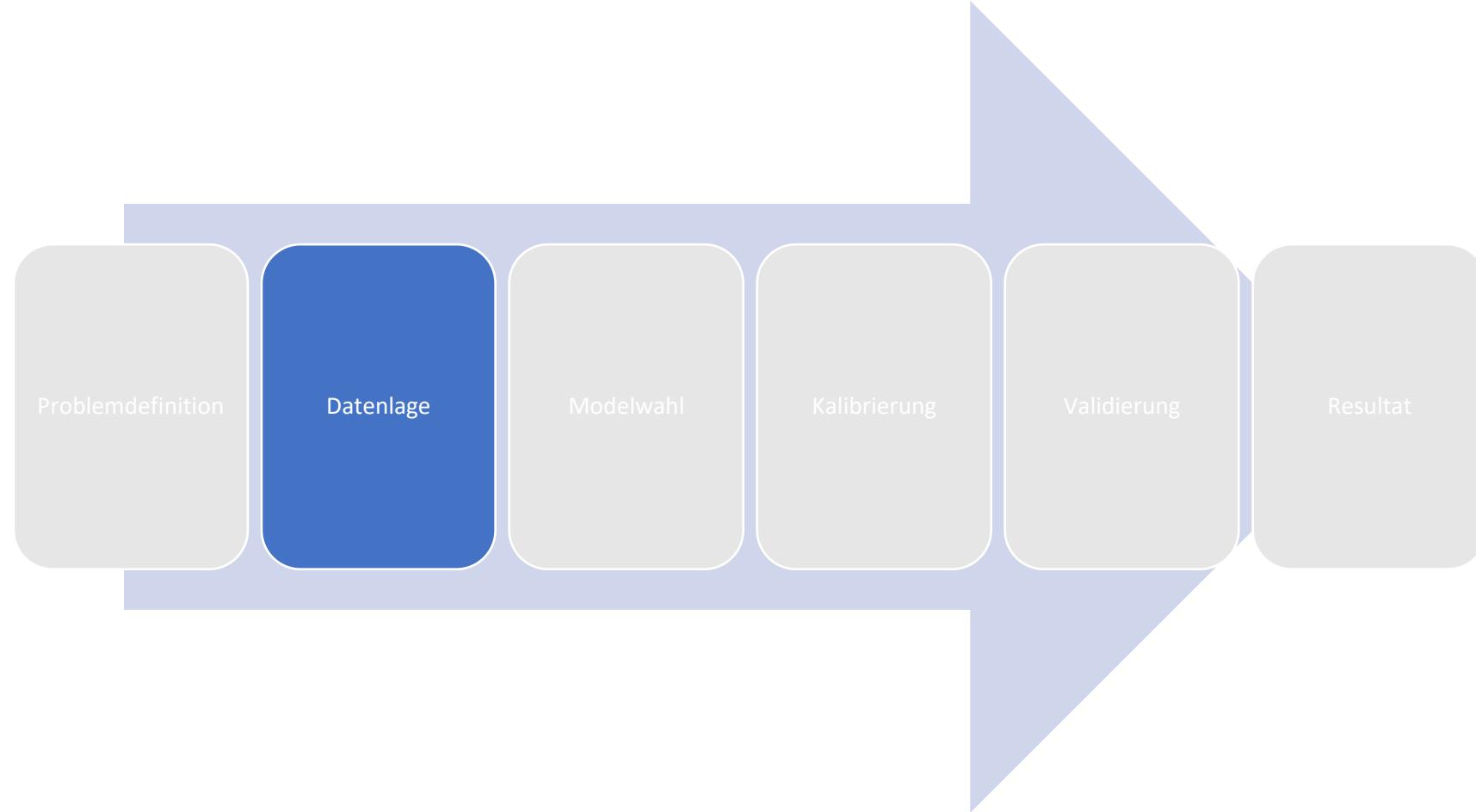
Nemec (1993)

# Modellierungsprozess



Adaptiert von Abermann (2022), basierend auf Lundin et al. (2012)

# Modellierungsprozess



Adaptiert von Abermann (2022), basierend auf Lundin et al. (2012)



# Daten in der hydrologischen Modellierung

- Input
  - Höhenmodell
  - Geologie/Bodenbeschaffenheit (Transmissivität, *k values*)
  - Bodennutzung (*land use maps*)
- Input (*forcing*)
  - Niederschlag
  - Temperatur + Feuchte – Verdampfung, Schmelze
  - Komplexere Modelle: Wind, Strahlung ...
- Parameter
  - Stark modellabhängig – Parametrisierung von Input (z.B. Schneeschmelze) bis zum Output (z.B. Rezessionskoeffizienten oder Routing)

Niederschlagsmessung Zentralhimalaya, 2021

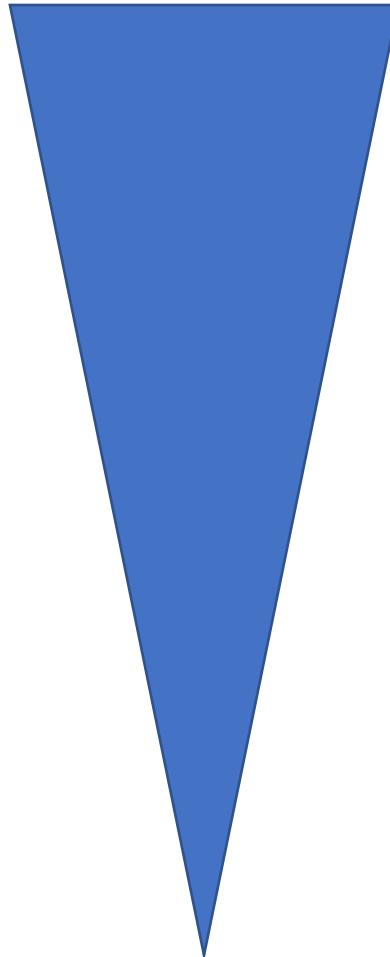
# Daten in der hydrologischen Modellierung

- Kalibrierung + Validierung
  - Abflussmessungen
  - Daten zum Grundwasser/Bodenfeuchte
  - Schneemessungen
  - Gletscher: Massenbilanz
  - Messungen der Verdunstung
  - ...
  - Produktivität (ökologische oder industrielle)

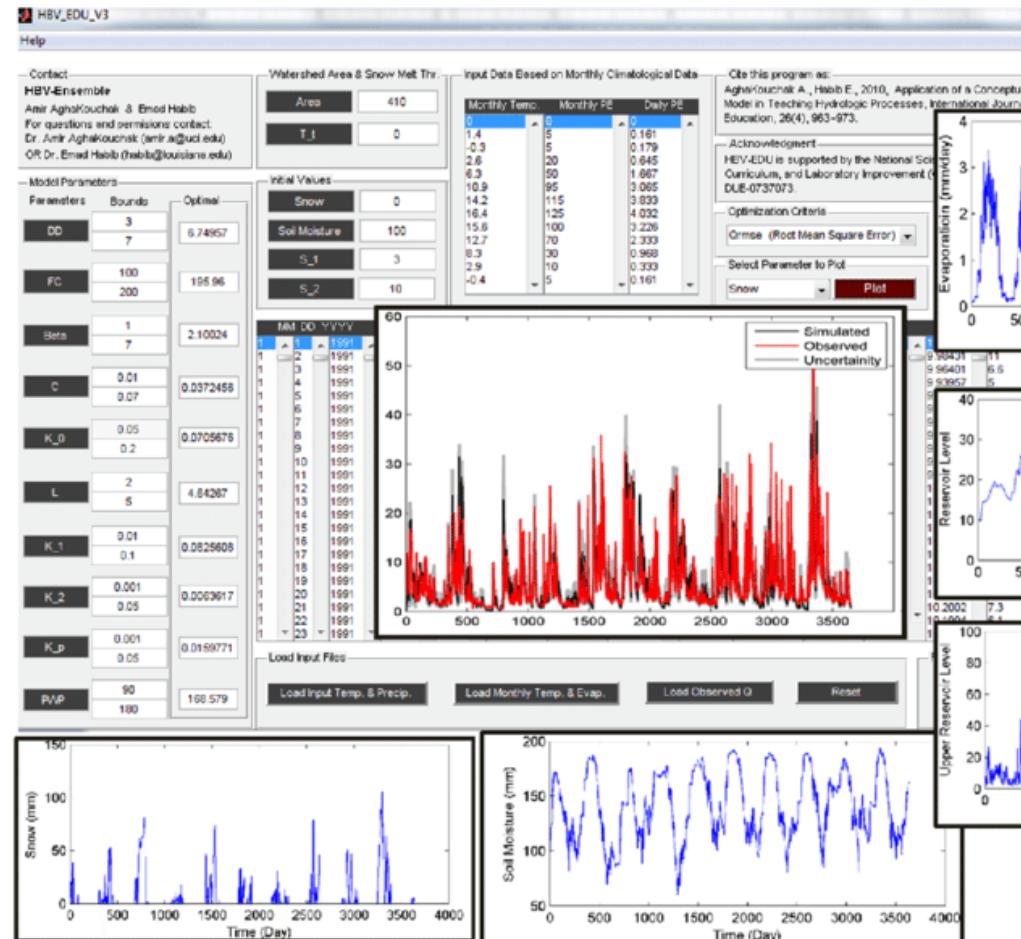


Messung der Bodenfeuchte Zentralhimalaya, 2021

# Beispiele von hydrologischen Modellen



- Makroskala (global; GHMs)
  - PCR-GLOBWB (**Utrecht Uni, NL**)
  - WGHM (Frankfurt Uni, DE)
  - Verschiedene LSMs (land surface models)
- Mesoskala (Einzugsgebiet)
  - HBV (Uppsala, Schweden)
  - MIKE SHE (UK, Denmark)
  - HEC-HMS (USA)
  - TOPKAPI (Neapel, Italien)
  - SWAT (ArcGIS, USA)
  - CRHM (Canada)
  - **JAMS2000 (Jena, DE)**
  - **SPHY (Wageningen, NL)**
  - ...
- Mikroskala (Feldstudie, einzelner Bach, spezifischer Prozess ...)
  - HYDRUS
  - BASEMENT (hydrodynamisch, Oberflächenabfluss)
  - MODFLOW (hydrodynamisch, Grundwasser)
  - ...



HBV Interface

https://github.com/FutureWater/SPHY\_interface/blob/Interface\_v1.0/SPHYPlugin/resources\_rc.py

**FutureWater / SPHY\_interface** Public

[Code](#) [Issues](#) [Pull requests](#) [Actions](#) [Projects](#) [Wiki](#) [Security](#) [Insights](#)

[Interface\\_v1.0](#) [SPHY\\_interface / SphyPlugin / resources\\_rc.py](#)

**jhunink** Update resources\_rc.py

Latest commit 75e4547 on Feb 23, 2024

1 contributor

2308 lines (2299 sloc) | 149 KB

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 # The SPHY model interface plugin for QGIS:
3 # A QGIS plugin that allows the user to setup the SPHY model, run the model
4 # and visualize results.
5 #
6 # Copyright (C) 2014 FutureWater
7 #
8 # This program is free software: you can redistribute it and/or modify
9 # it under the terms of the GNU General Public License as published by
10 # the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
11 # (at your option) any later version.
12 #
13 # This program is distributed in the hope that it will be useful,
14 # but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
15 # MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
16 # GNU General Public License for more details.
17 #
18 # You should have received a copy of the GNU General Public License
19 # along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
20 #
21 # Email: info@futurewater.nl
22 #
23 # Authorship information-#####
24 __authors__ = "W. Terink, A. Lutz, G. Simons, W. Immerzeel and P. Droogers"
25 __copyright__ = "FutureWater"
26 __license__ = "GPL"

```

SPHY git

# Einfachstes ‘Modell’ – *peak runoff*

$$Q_p = C * I * A$$

$Q_p$  – Spitzenabfluss [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]

$I$  – Niederschlag [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$A$  – Fläche [ $\text{m}^2$ ]

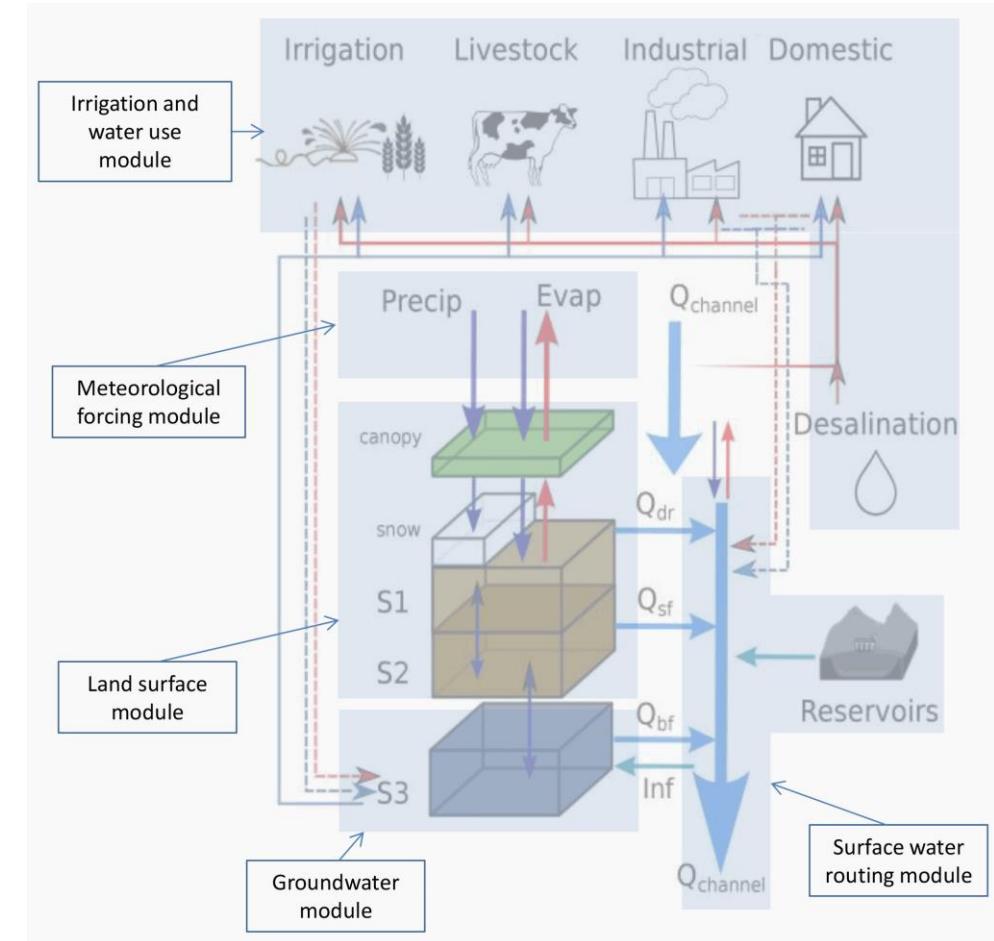
$C$  – Abflusskoeffizient [0 – 1; Funktion der Oberfläche]

Ist  $C$  für eine asphaltierte Fläche grösser oder kleiner als im Falle einer bewachsenen Oberfläche?

Was ist  $C$  in einem komplexeren Modell?

# Hydrologische Modellierung auf globaler Skala

- Beispiel PCR-GLOBWB
  - holländisches Modell (Uni Utrecht)
  - open source
  - eingebettet in hauseigener Sprache (PCRaster Python)
- Lässt sich mit anderen Modellen kombinieren
- Fokus vor allem auf den Grundwasserspeicher/flux



Sutanudjaja et al. (2018)

# Hydrologische Modellierung auf globaler Skala



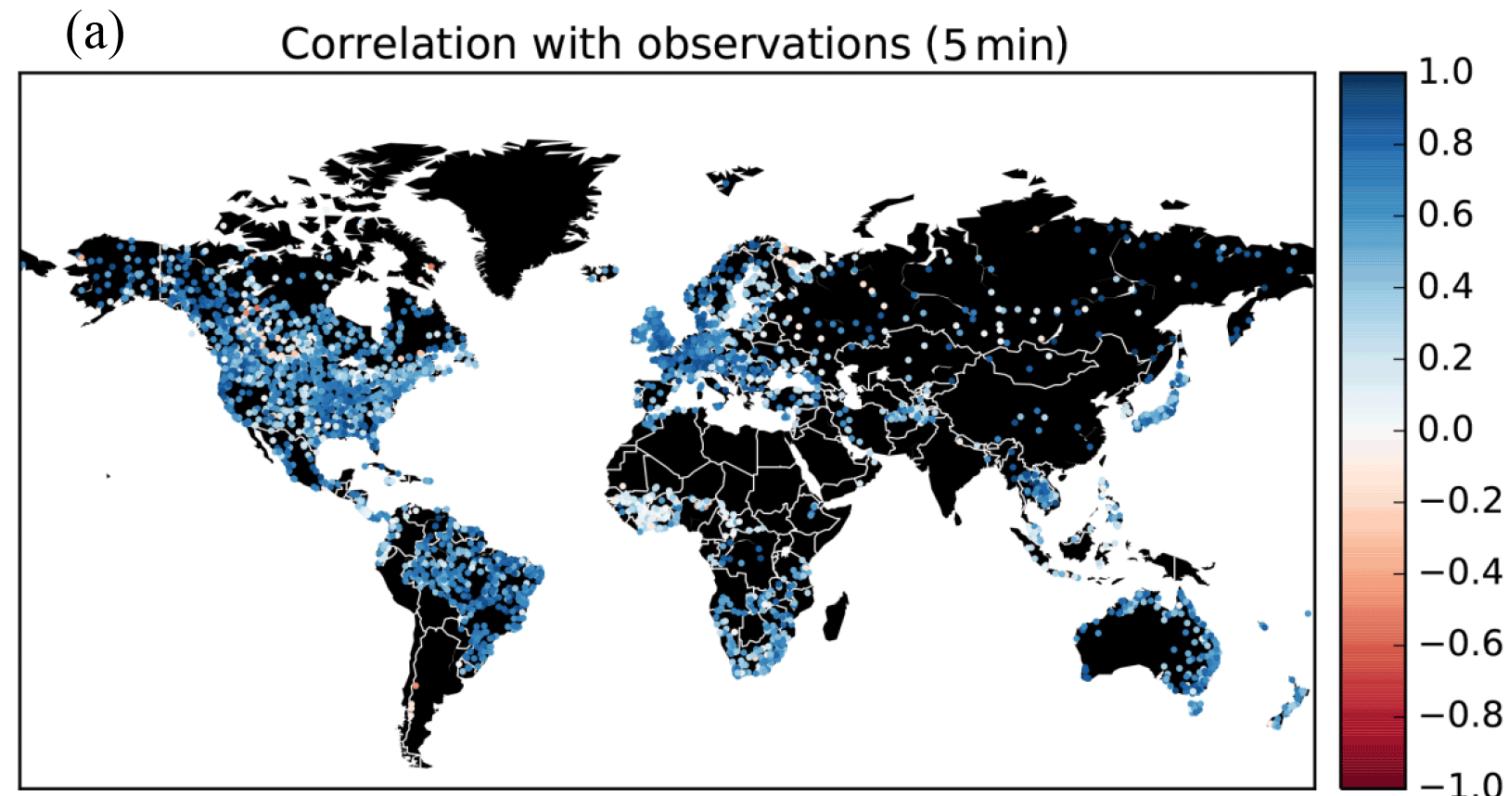
- + globale Abschätzungen von Wasserverbrauch möglich
- + Untersuchungen mit globalen oder nationalen Daten zum Klimawandel oder sozioökologischen Veränderungen möglich
- grobe Auflösung (10 km)
- Kann bestimmte Topographien/Prozesse nicht auflösen (z.B. Berge, Polarregionen etc.)

		30 arcmin		5 arcmin	
		km <sup>3</sup> year <sup>-1</sup>	mm year <sup>-1</sup>	km <sup>3</sup> year <sup>-1</sup>	mm year <sup>-1</sup>
Global water balance	Precipitation	107 452	808	107 495	811
	Desalinated water use	3	0.02	2	0.01
	Run-off	42 393	319	43 978	332
	Evaporation*	65 754	494	63 974	483
	Change in total water storage	-693	-5	-455	-3
Groundwater budget	Groundwater recharge	27 756	209	25 521	193
	Groundwater withdrawal	737	6	632	5
	Non-renewable groundwater withdrawal (groundwater depletion)	173	1	171	1
	Renewable groundwater withdrawal	564	4	460	3
Withdrawal by sector	Agricultural water withdrawal (irrigation + livestock)	2735	21	2309	17
	Domestic water withdrawal	380	3	314	2
	Industrial water withdrawal	798	6	707	5
Withdrawal by source	Total water withdrawal	3912	29	3330	25
	Surface water withdrawal	3172	24	2697	20
	Desalinated water use	3	0.02	2	0.01
	Groundwater withdrawal	737	6	632	5

Sutanudjaja et al. (2018)

# Hydrologische Modellierung auf globaler Skala

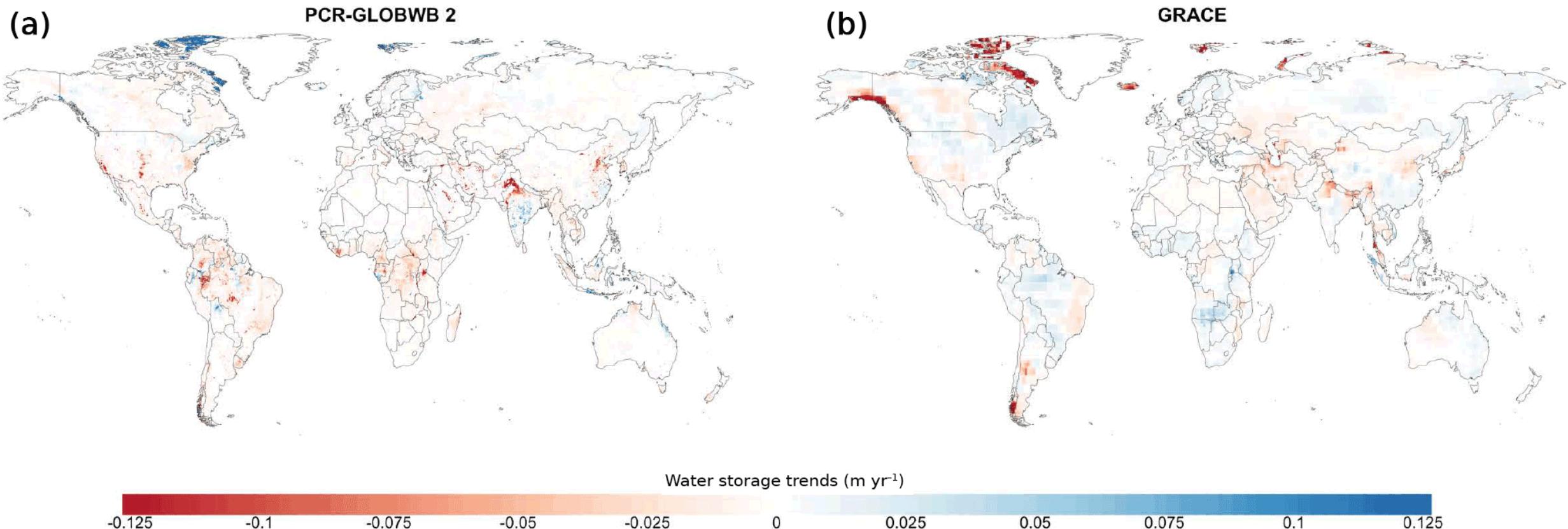
- Wie gut funktioniert das?



Sutanudjaja et al. (2018)

# Hydrologische Modellierung auf globaler Skala

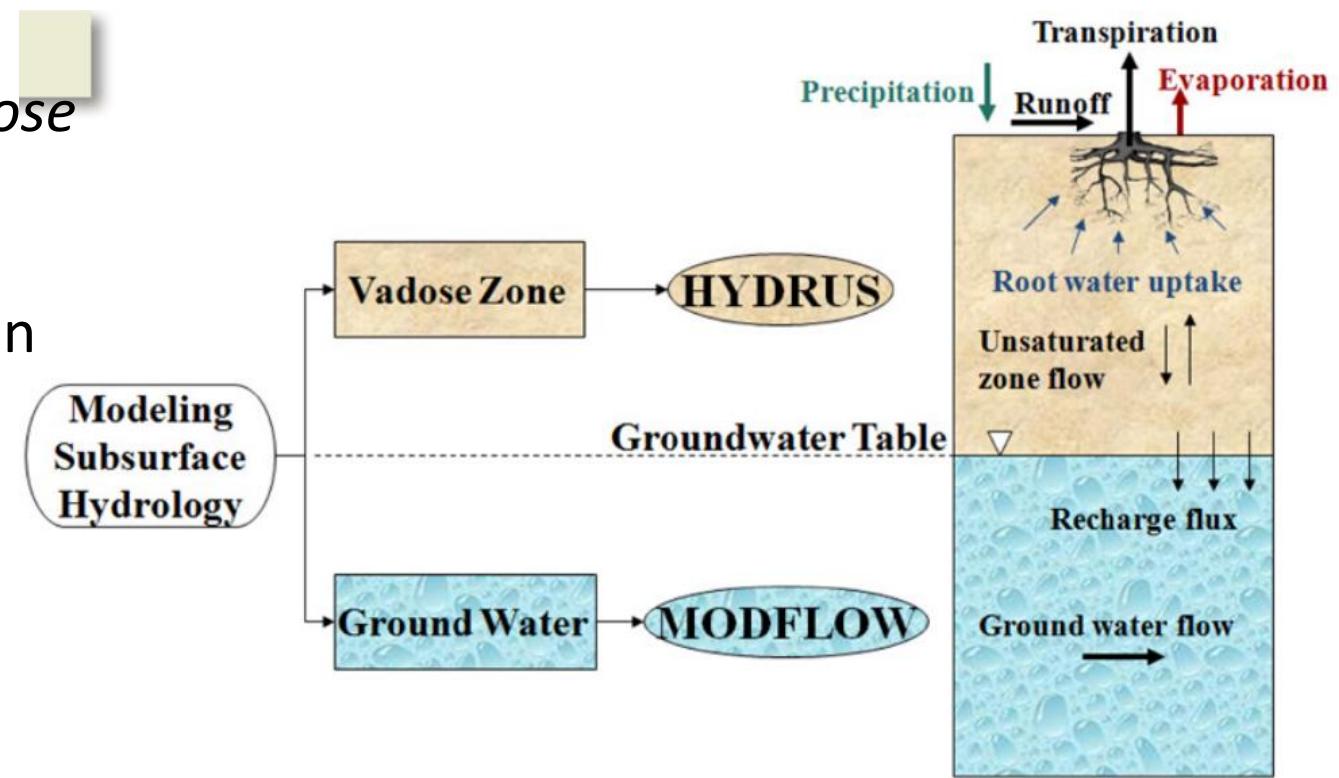
- Wie gut funktioniert das?



Sutanudjaja et al. (2018)

# Hydrologische Modellierung auf Mikroskala

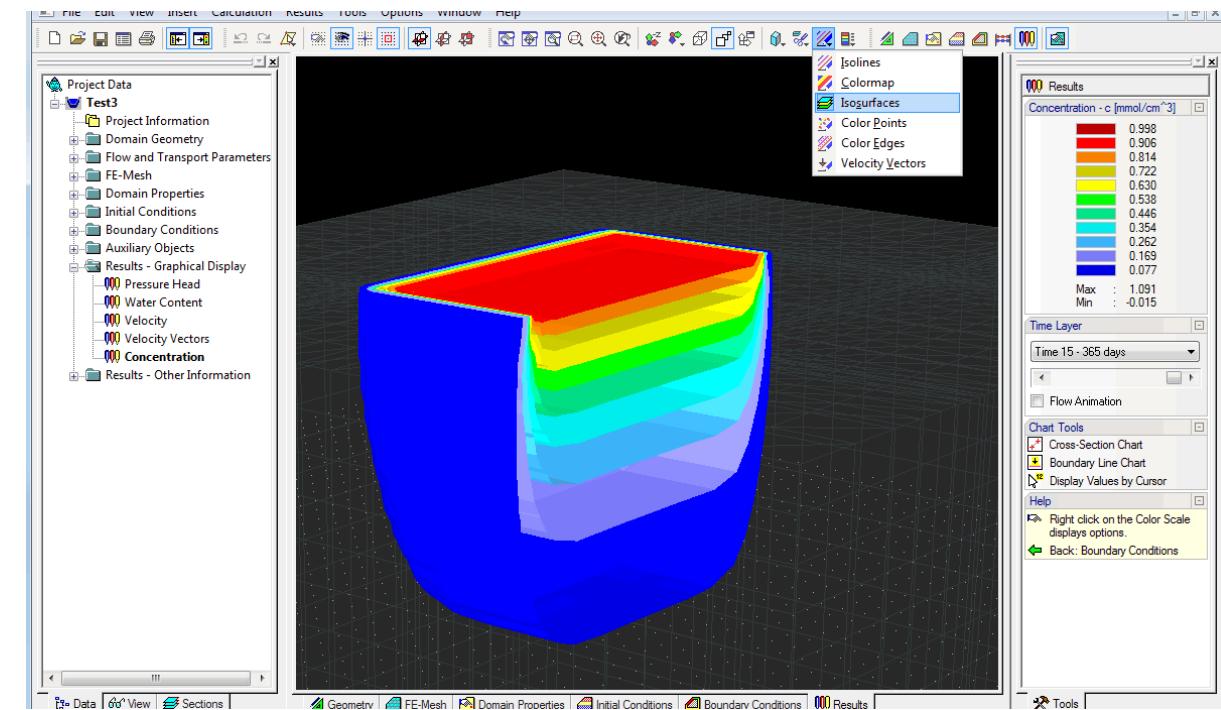
- HYDRUS (2D/3D)
  - Lösung von Problemen in der ungesättigten Bodenzone (*vadose zone* oder *unsaturated soil*)
  - Anwendungen z.B. um Partikeltransport zu modellieren
- MODFLOW
  - Lösungen im Grundwasser/gesättigten Zone



Šimůnek et al. (2016)

# Hydrologische Modellierung auf Mikroskala

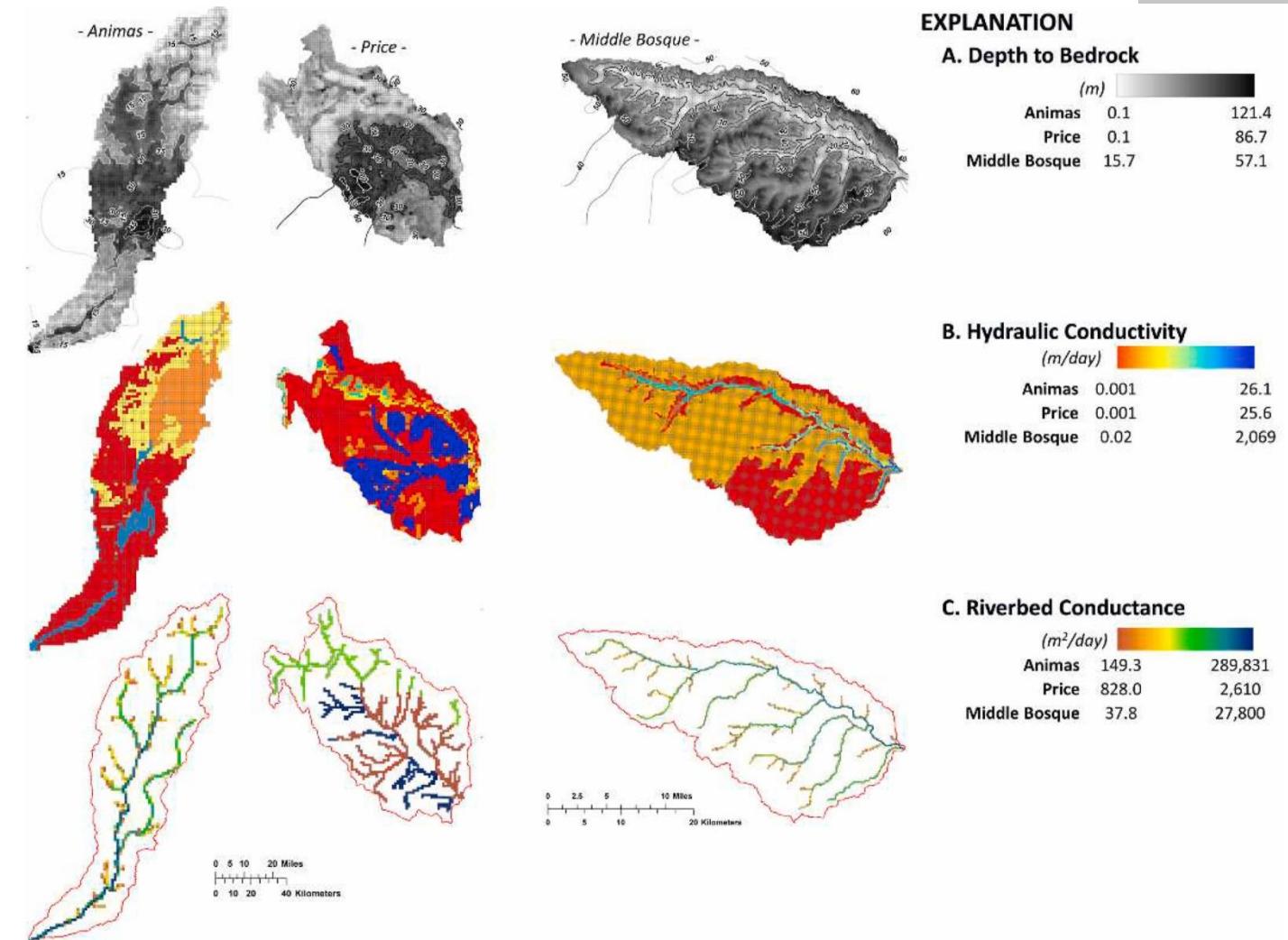
- Datenanforderungen
  - lokal, hohe Auflösung in Raum und Zeit
  - sowohl Qualität als auch Quantität
- Direkte Anwendungen in Industrie und für regionale/lokale Planung



Šimůnek et al. (2016)

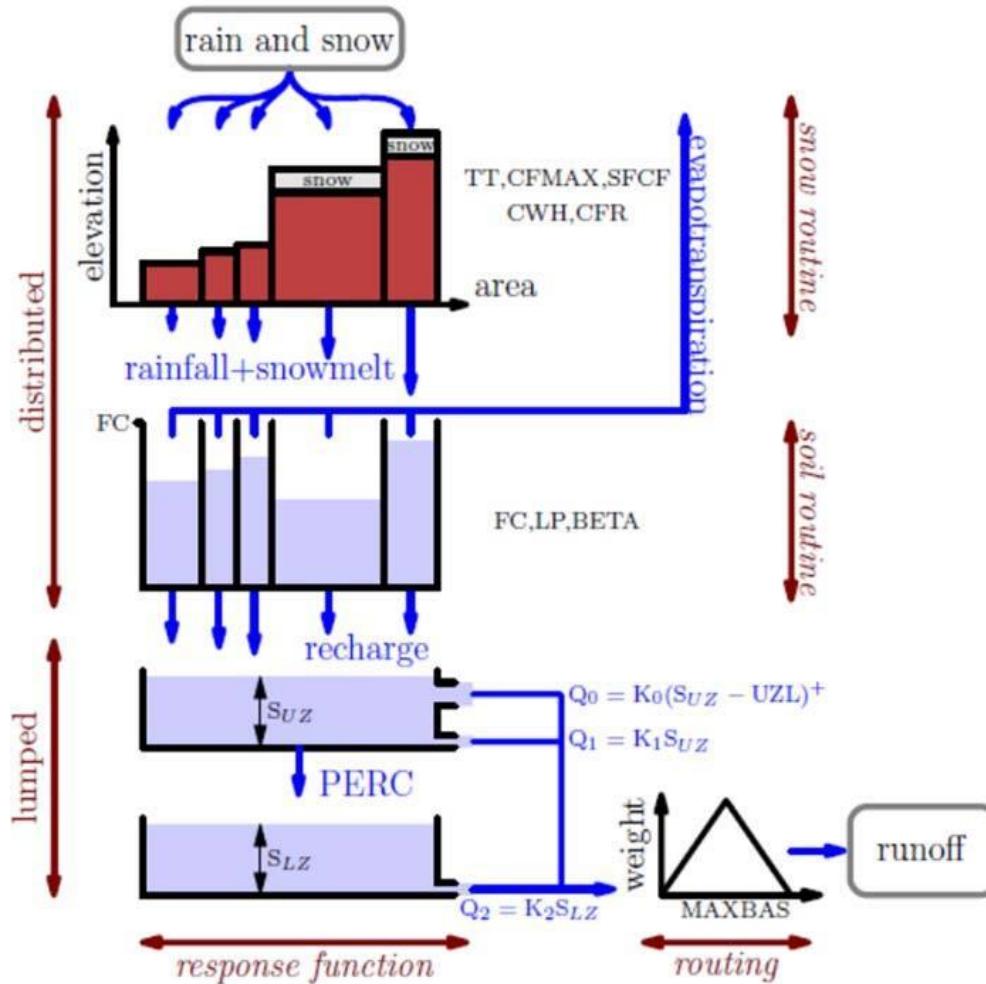
# Hydrologische Modellierung auf Mikroskala

- MODFLOW im Übergangsbereich zwischen Mikro- und Mesoskala
- Grösste Herausforderung: Die begrenzte Datenlage unter Grund

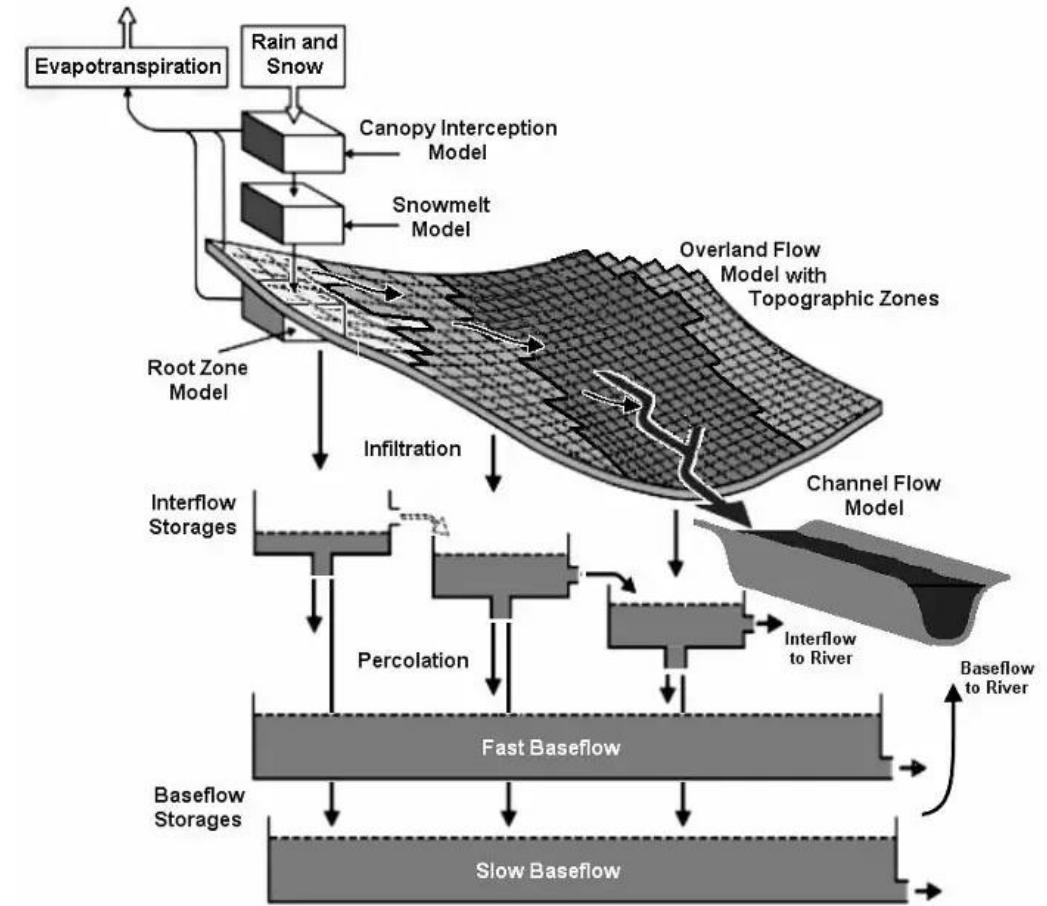


Bailey et al. (2021)

# Hydrologische Modellierung auf Mesoskala



HBV, aus Alsafi and Sarukkalige (2017)



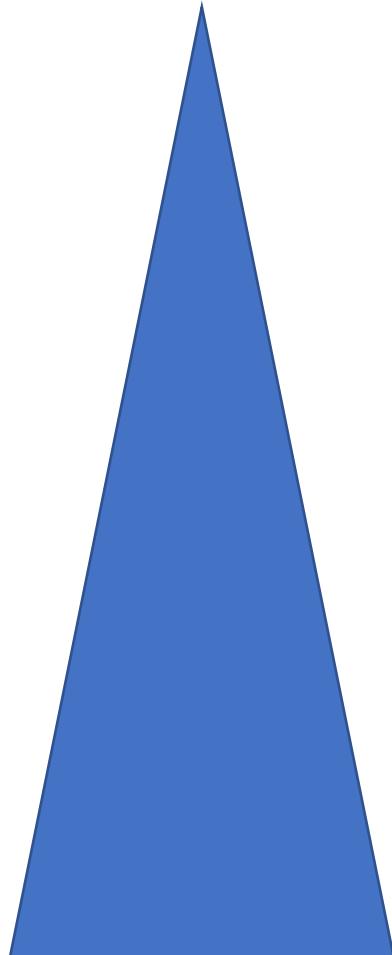
Mike-SHE

# Herausforderungen im Hochgebirge

- Limitierte Daten (in Raum und Zeit)
- Limitiertes Prozessverständnis in extremer Umwelt
- Starke Gradienten (Topographie, Temperatur, Feuchte, Niederschlag etc.)
- Schwierige Datenübertragung (*protocol*) und Kontrolle (*QA QC*)

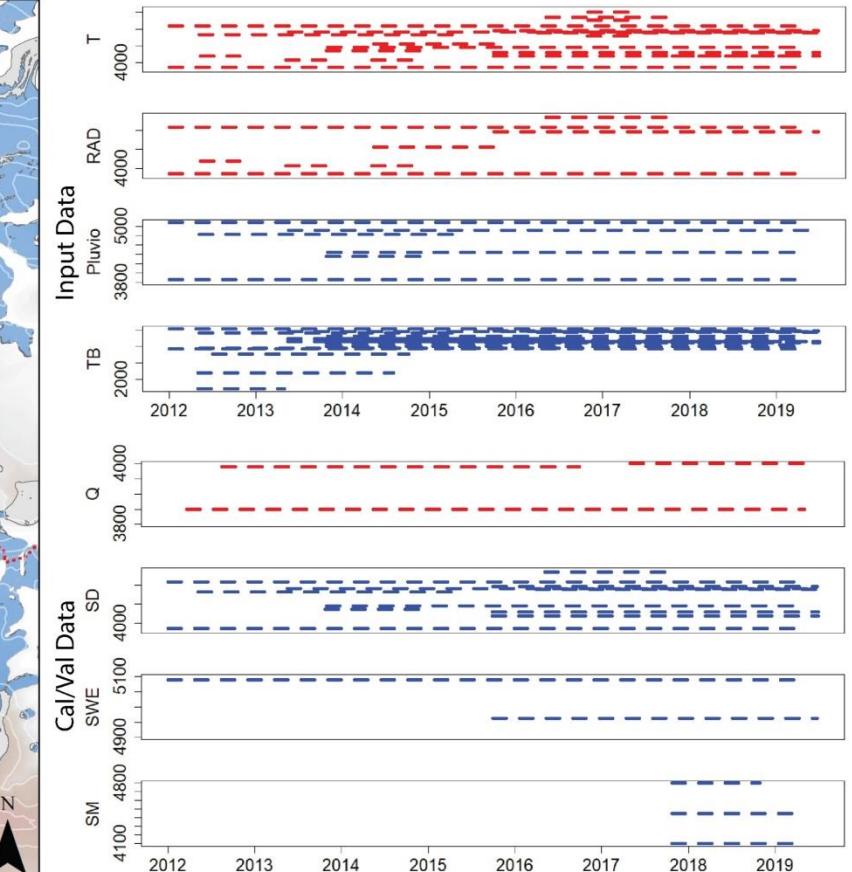
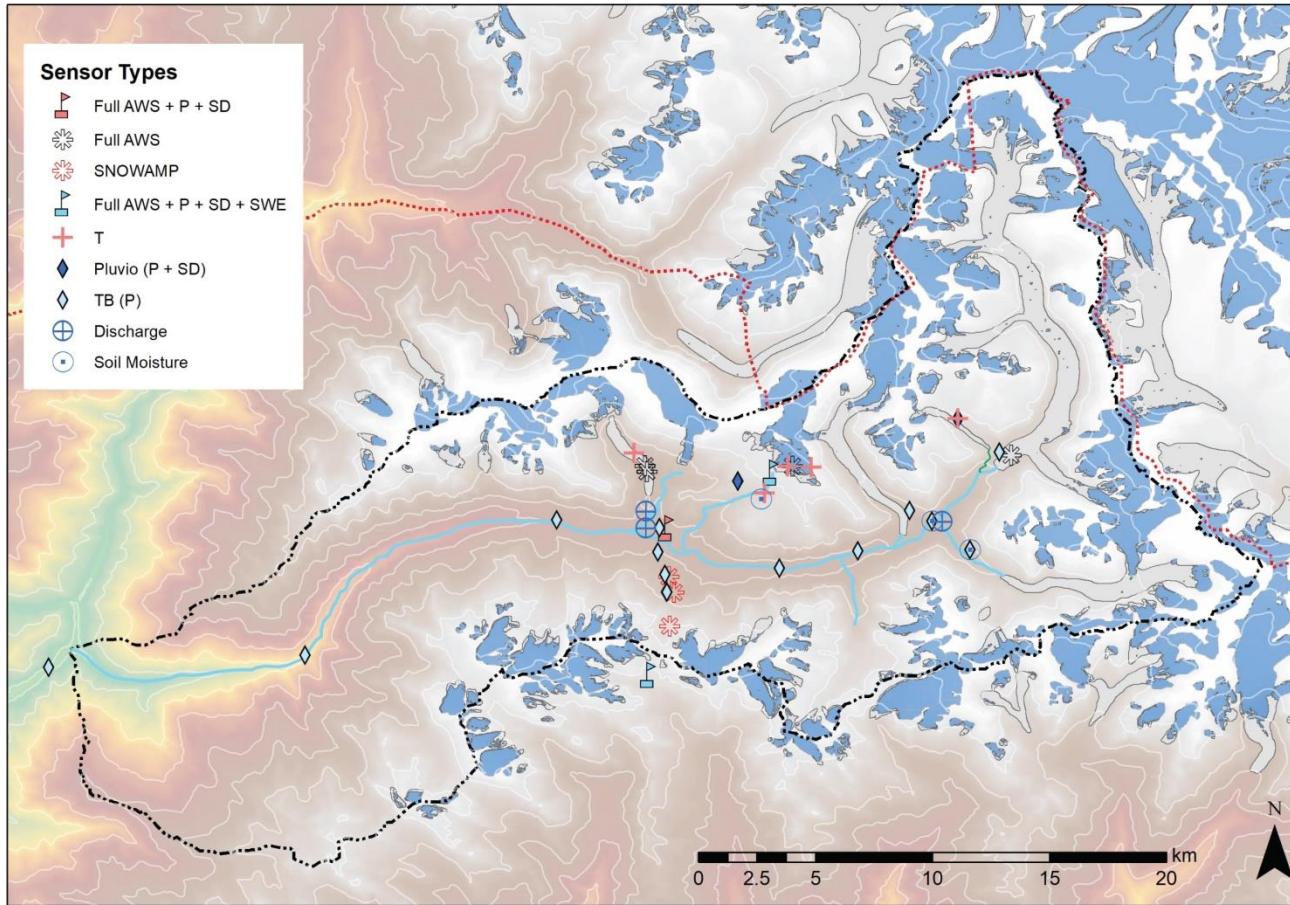
# Herausforderungen in Polarregionen

- Höchster Abfluss gekoppelt mit Schmelze (*flashiness*)
- Permafrost (*active layer depth*)
- Schneeschmelze und Verteilung (*wind drift*)



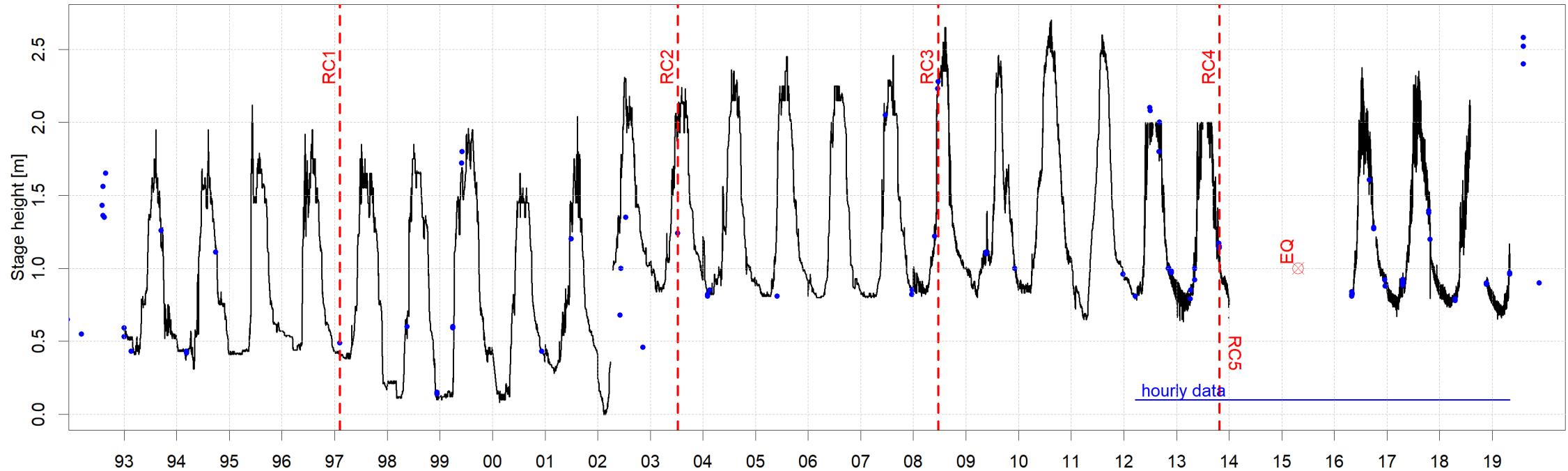
- Datenlage und Modellierung in einem einzelnen Tal bzw. an einem einzelnen Gletscher ( $\sim 1 - 100$  km)
- Modellierung in einem regionalen Einzugsgebiet ( $\sim 100 - 500$  km)
- Modellierung über einen ganzen Gebirgszug ( $>500$  km)

# Case Study 1 – Langtang Tal



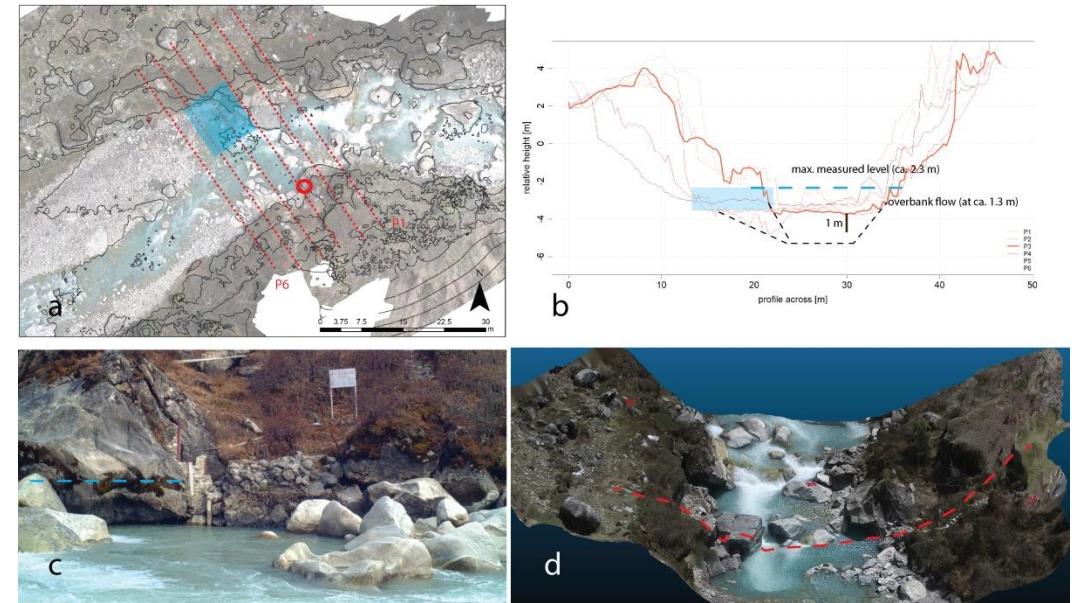
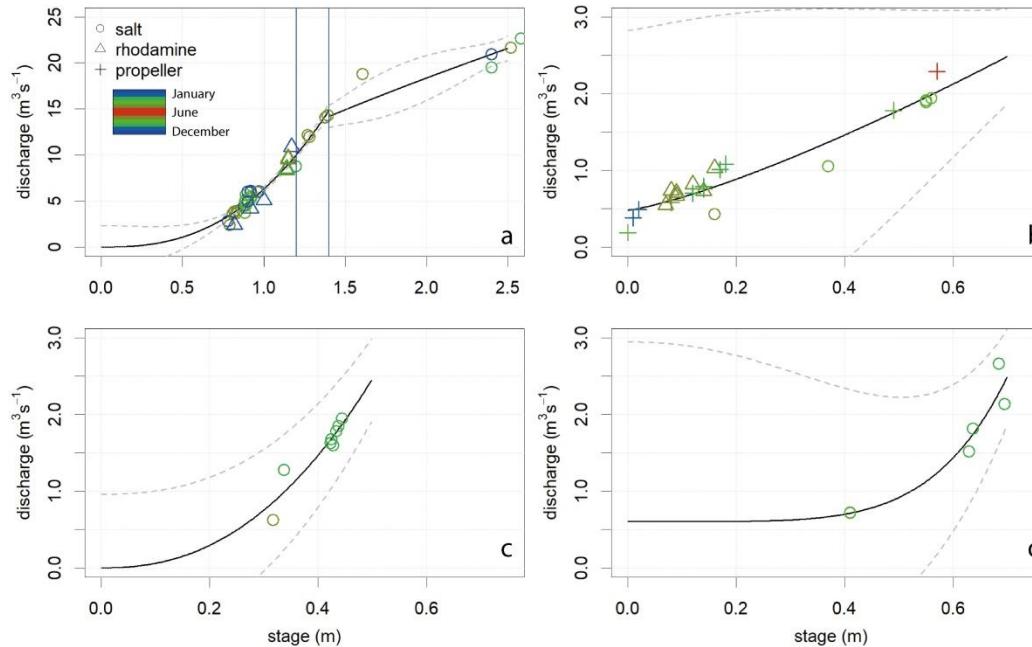
Steiner et al. (in prep.)

# Case Study 1 – Langtang Tal



- Viele Daten – aber wie vertrauenswürdig sind diese?

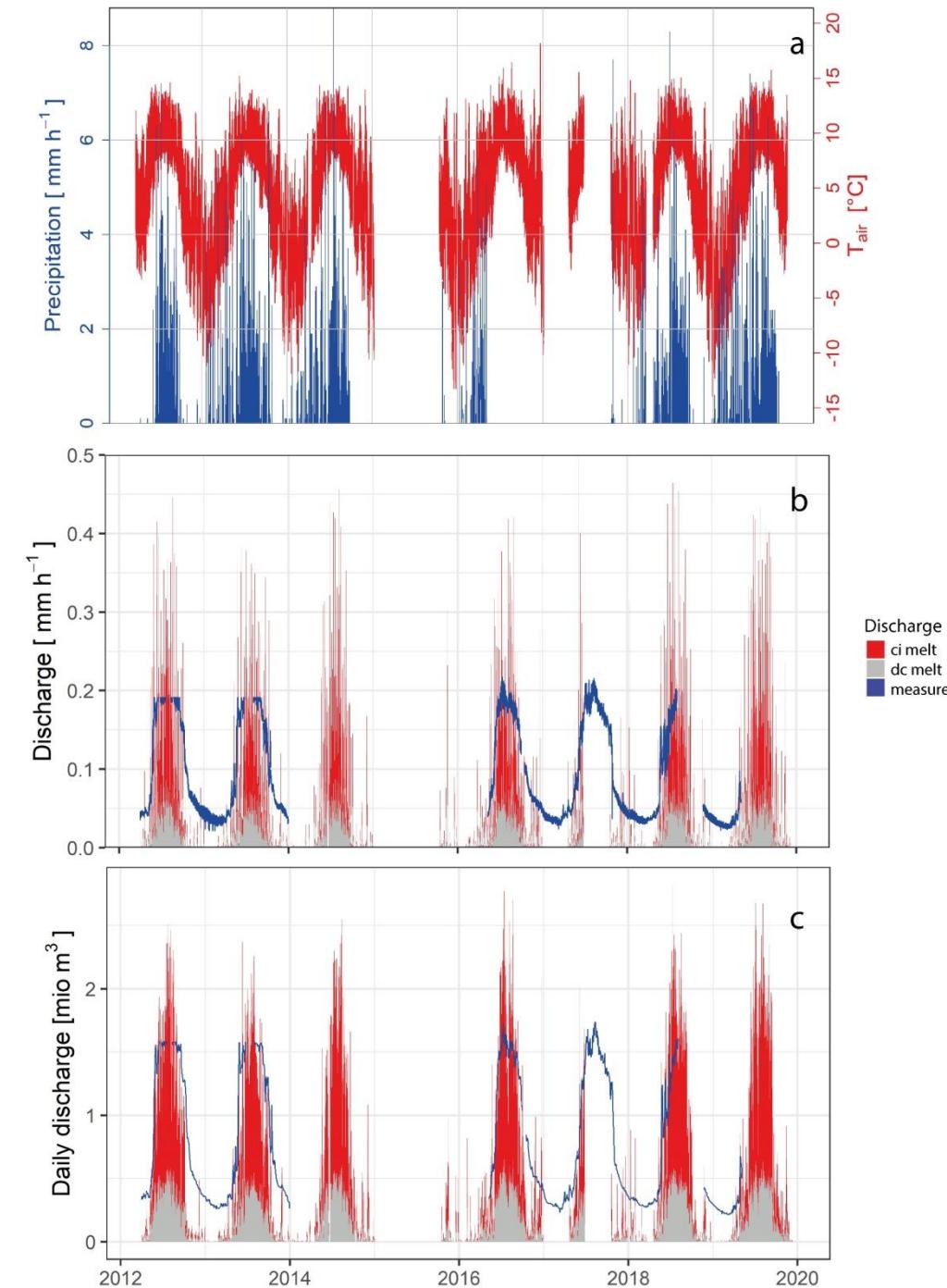
# Case Study 1 – Langtang Tal



Präzise Abflussdaten zu bekommen ist auf dieser Skala gar nicht so einfach ...

Steiner et al. (in prep.)

## Case Study 1 – Langtang Tal

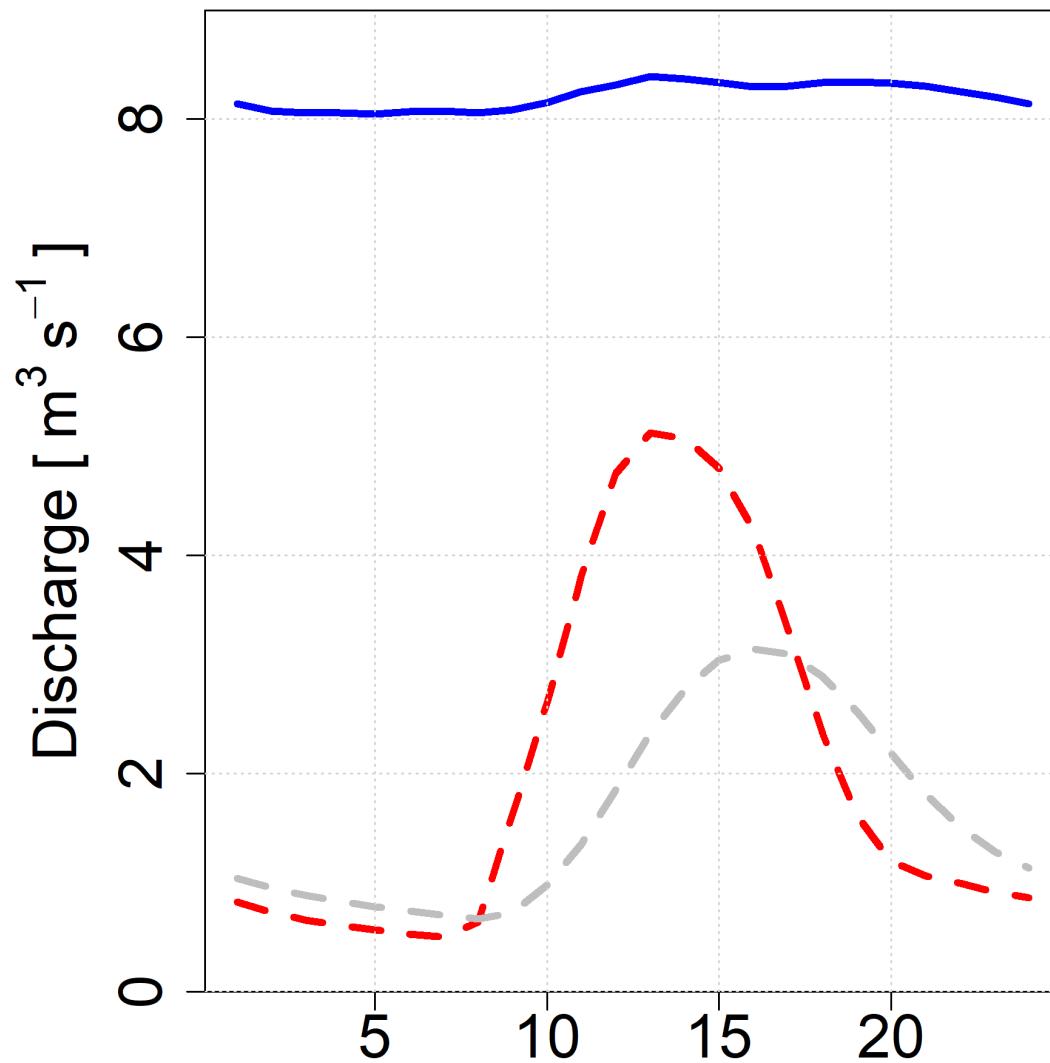


- Modellierung allein der Gletscherschmelze
- Unterscheidung verschiedener Gletschertypen: schuttfreie / clean ice (ci), schuttbedeckte / debris-covered (dc)
- *Wie ist es möglich, dass die Schmelze den Abfluss übersteigt?*

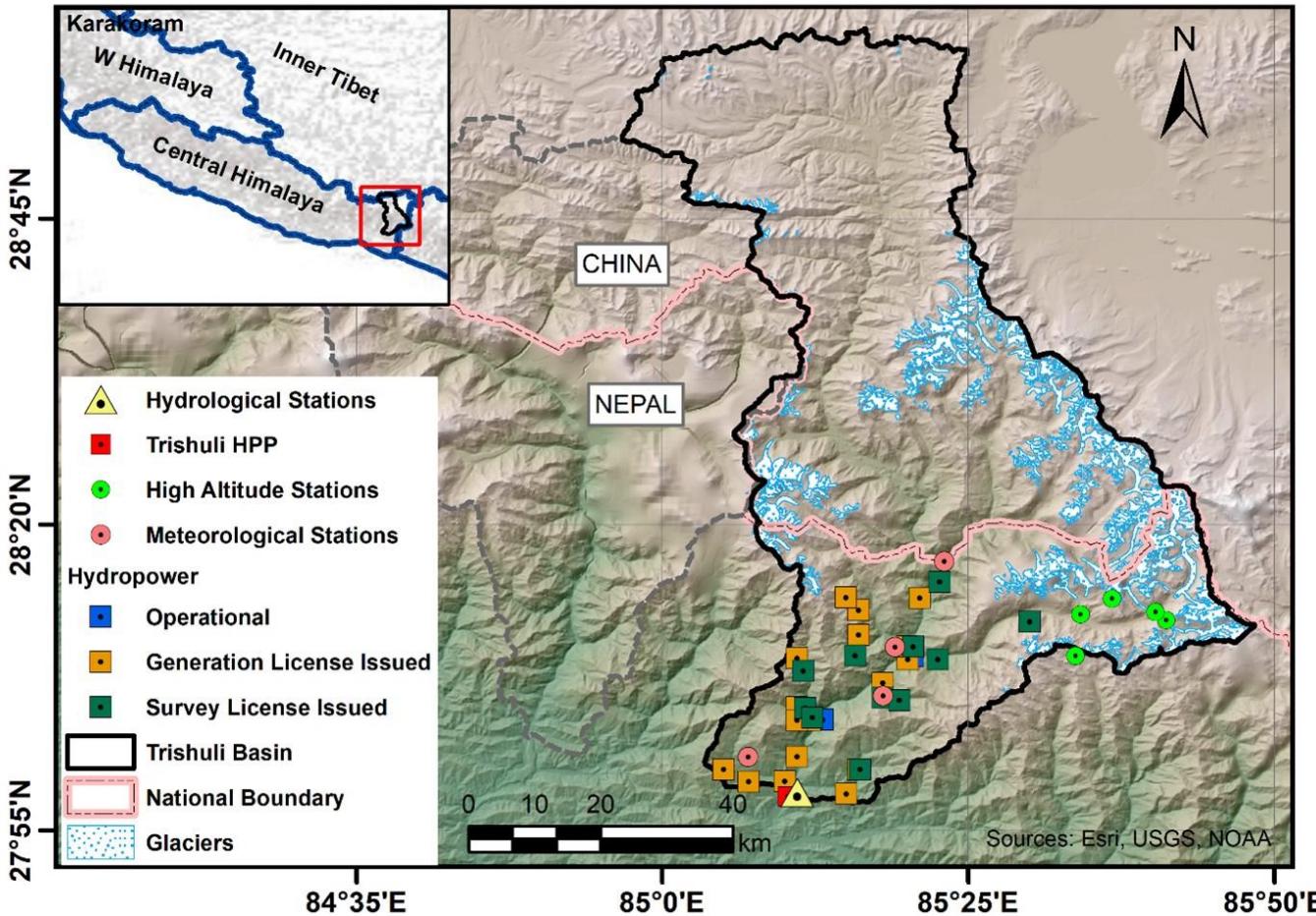
Steiner et al. (in prep.)

## Case Study 1 – Langtang Tal

- Modellierung erlaubt uns, bestimmte Prozesse besser zu verstehen
- ... oder noch mehr Fragen aufzuwerfen.

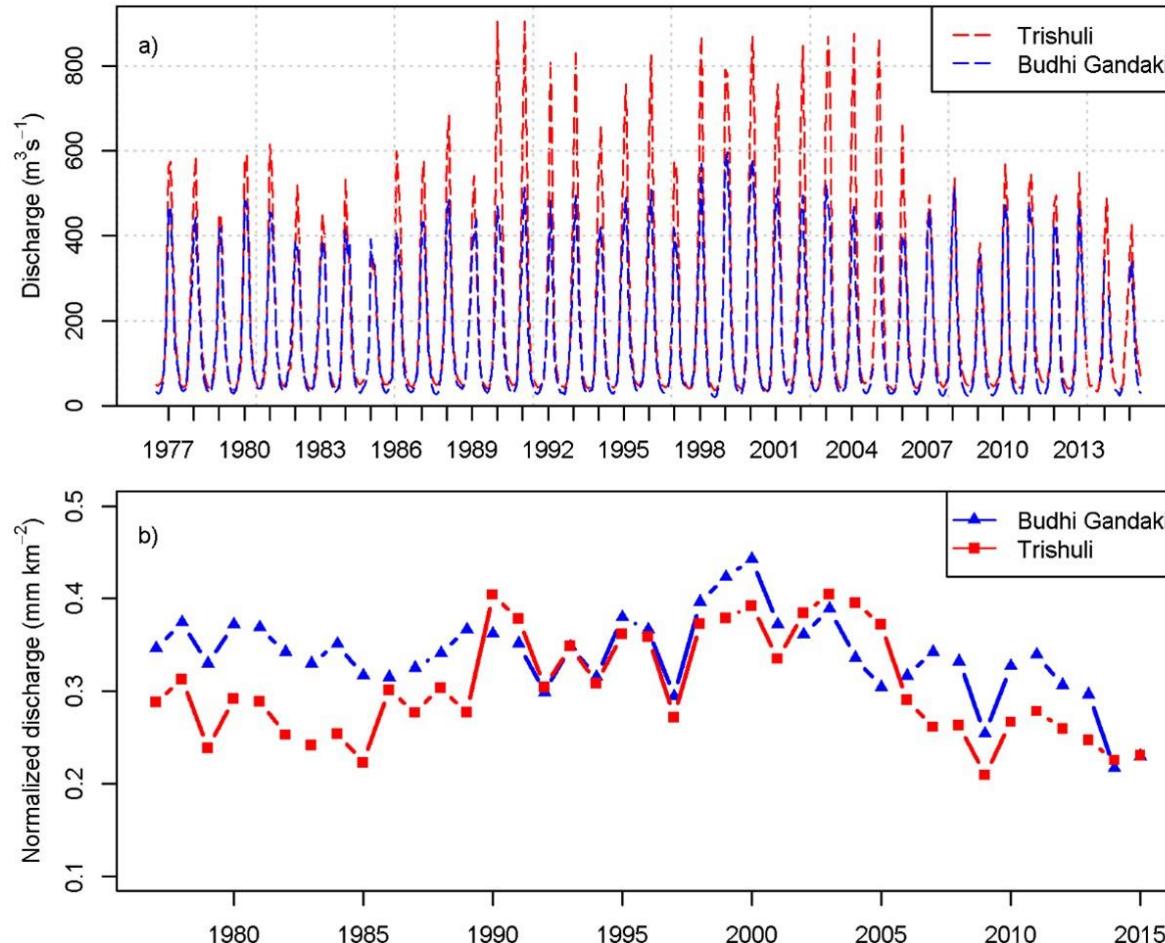


# Case Study 2 – Trishuli Watershed



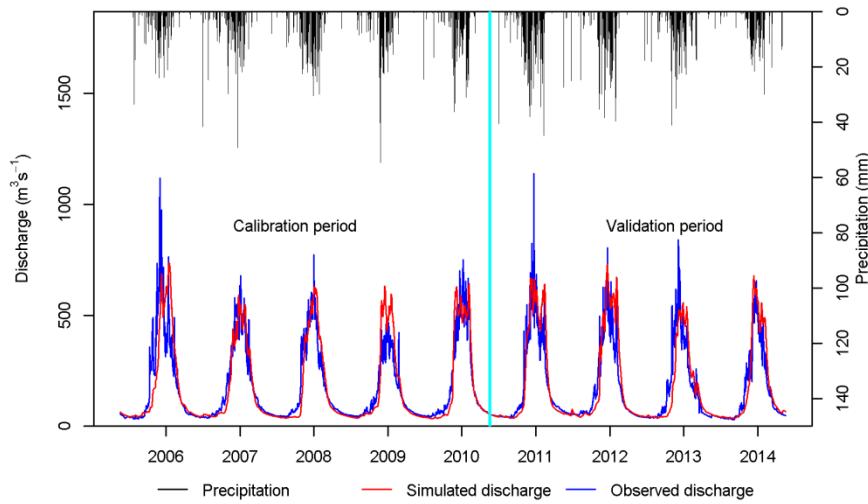
- Modellierung gemessenen Abflusses um zu erkennen, wo es Messungenauigkeiten geben könnte
- Wichtige Daten zur Dimensionierung von Wasserkraftwerken

# Case Study 2 – Trishuli Watershed



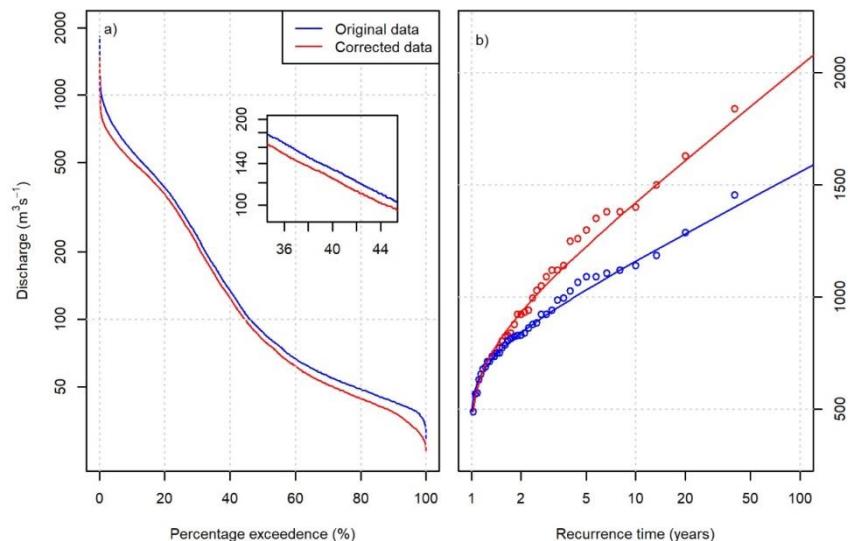
- Datenanalyse essentiell bevor Modellierung begonnen wird
- In diesem Fall waren  $\sim 16$  Jahre an Abflussmessungen fragwürdig (Überschätzung des eigentlichen Abflusses im Trishuli Einzugsgebiet)

# Case Study 2 – Trishuli Watershed



- Modellierung über den Zeitraum mit einwandfreier Datenlage erlaubt die Kalibrierung von Parametern, um auch den Zeitraum abzudecken, in denen Messungen unbrauchbar sind

- -> *Kalibrierung und Validierung*



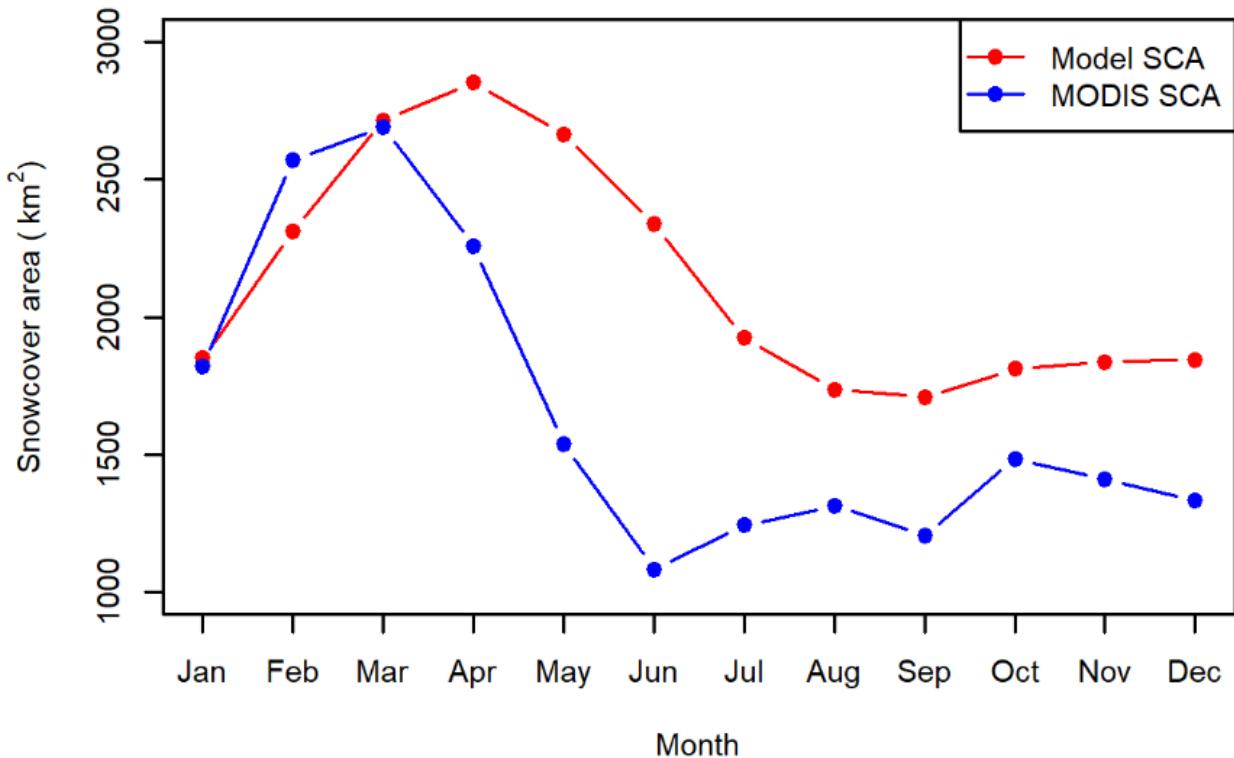
- Konsequenzen falscher Datengrundlagen können zu Überdimensionierung von Anlagen führen (d.h. sinnlose Ausgaben) oder unzureichender Dimensionierung (d.h. grössere Risiken bei z.B. Hochwasser)

Vaidya et al. (in review)

# Modellkalibrierung (*cal*) und -validierung (*val*)

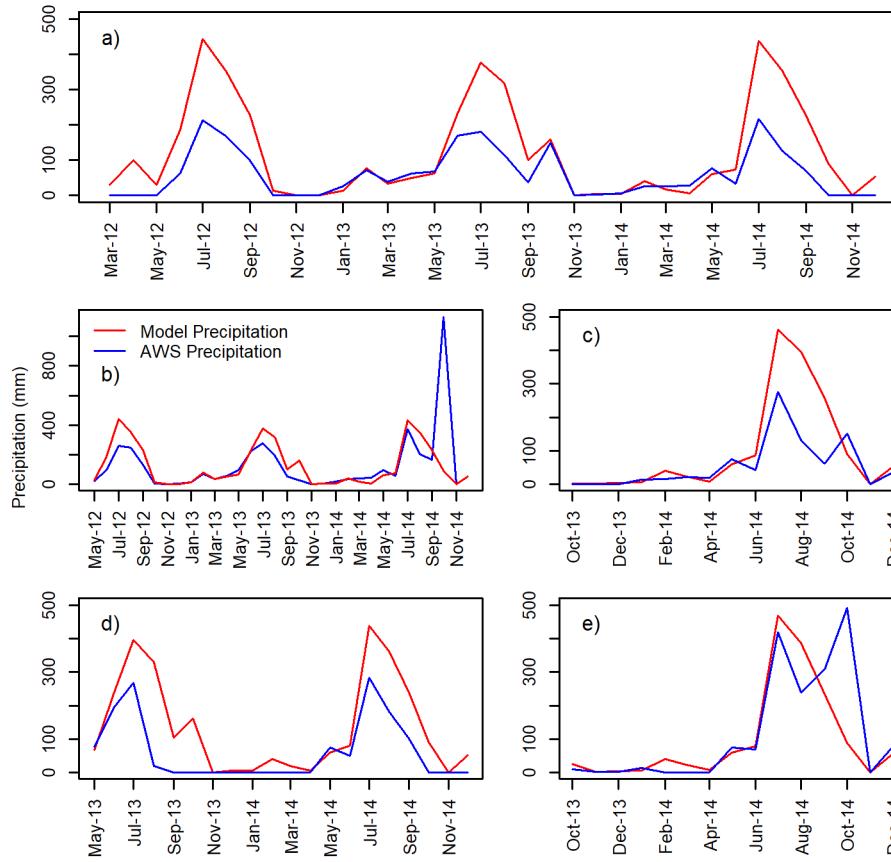
- *cal/val* jeweils über einen anderen Zeitraum
  - Kalibrierung über einen Zeitraum, Validierung über einen anderen Zeitraum
  - Problematisch in nicht-stationären Systemen -> z.B. wenn sich mit dem Klimawandel ein Prozess zwischen *cal* und *val* Periode ändert, ist das eigentlich nicht mehr zulässig
- *cal/val* jeweils über einem anderen Gebiet
  - Kalibrieren in einem Einzugsgebiet, Validierung in einem anderen Einzugsgebiet
  - Topographische und mikro-klimatische Prozesse sollten für beide EZG ähnlich sein
- Validierung mit unabhängigen Daten
  - z.B. ein Modell hat als eine Ausgabe Schneebedeckung, hier können respektive Satellitendaten zur Validierung herangezogen werden (*multi variable validation*)
- Herausforderungen beim Kalibrieren:
  - Nicht-Singularität eines Modells (Kalibrierung gegen Abfluss kann zu anderen optimalen Parametern führen als Kalibrierung gegen Schneehöhen) -> multi variable calibration/Monte Carlo Simulierung

# Kalibrierung mit unabhängigem Datentyp



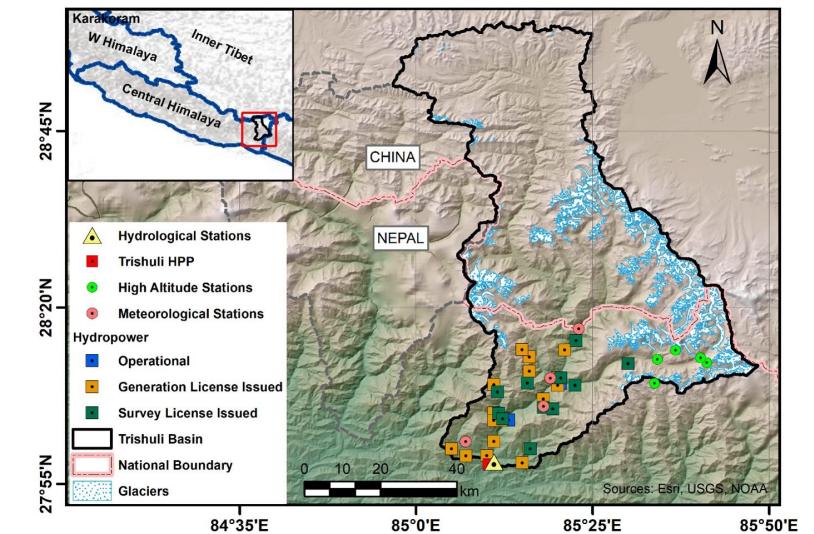
- Schneedaten werden nicht zur Kalibrierung des Models herangezogen, daher ist eine unabhängige Validierung möglich
- *Das Modell ist offensichtlich nicht fähig die Schneedecke akkurat wiederzugeben – was könnte hierfür ein Grund sein? Welchen Teil der Schneehydrologie erfasst das Modell, welchen weniger?*

# Kalibrierung mit unabhängigen Messreihen

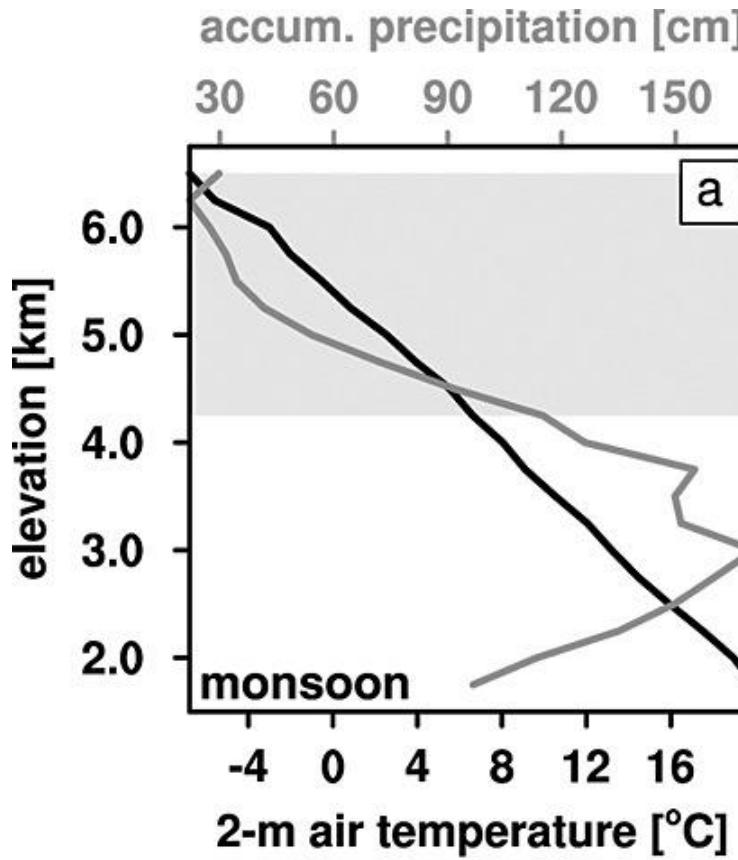


Vaidya et al. (in review)

- Niederschlagsdaten die nicht als Modell Input verwendet wurden
- *Angesichts der Lage der Kalibrierungsstationen, wieso kommt es hier zu einer Überschätzung des Niederschlags?*



# Exkurs: *Interpolating*, *downscaling* und *lapse rates*



- *Interpolating*: Verteilen von Daten aus punktuellen Messungen in den Raum
- *Downscaling*: Tief aufgelöste diskretisierte Daten werden auf höhere Auflösung verteilt
- *Lapse rate*: Veränderung einer Variable mit z.B. Höhe oder Distanz zur Küste

Collier and Immerzeel (2014)

# cal/val Statistik

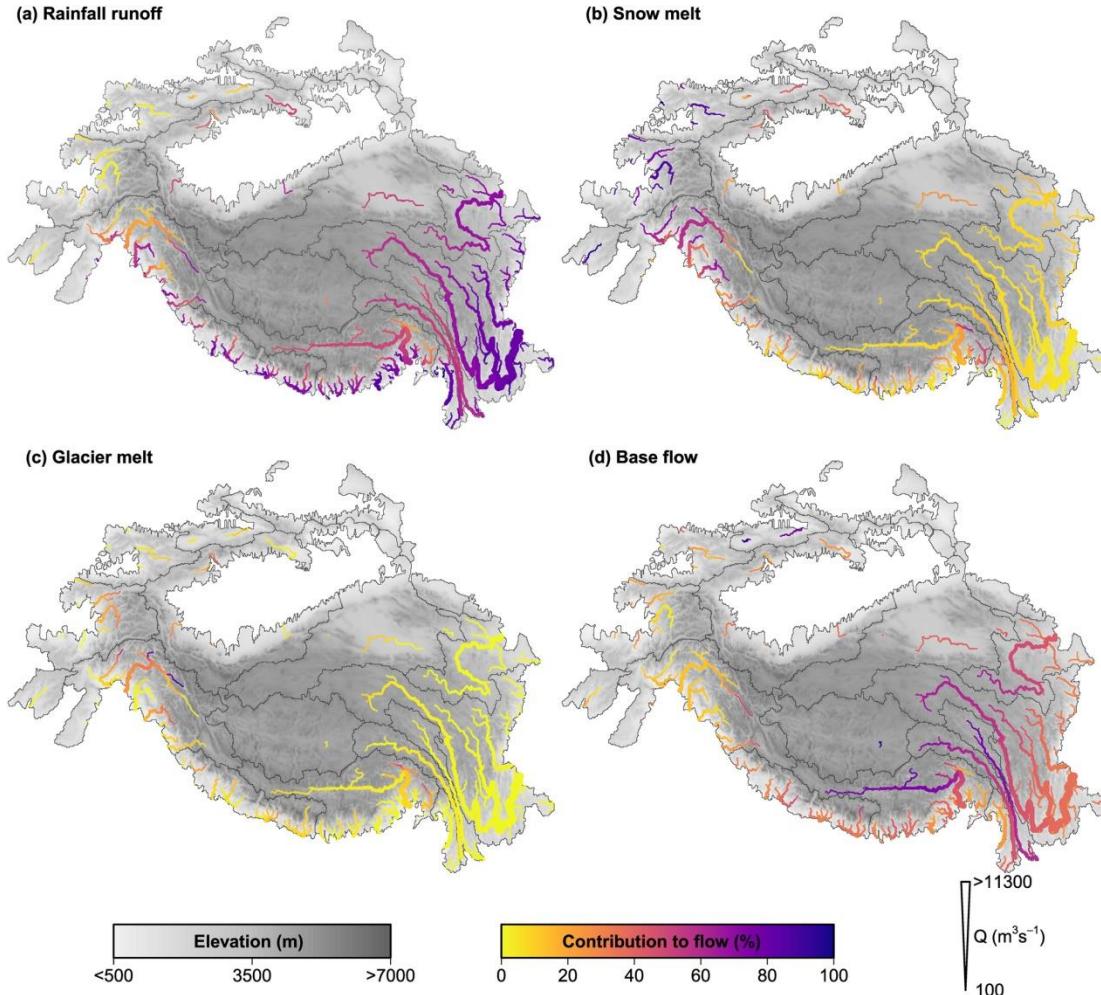
- Direkter Vergleich von gemessener (*observed*) und modellierter (*modelled*) Variable
- Ursprünglicher Standard war die Korrelation ( $r^2$ )
  - ... sagt nichts aus über die Fähigkeit eines Modells, die Quantität zu reproduzieren
- Heutiger Standard: *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)
  - Vergleich der *residual variance* mit der *data variance*
  - $NSE = 1 - \text{perfekte Übereinstimmung}$
  - $NSE = 0 - \text{Mittelwert der Daten gleichwertig wie Modelloutput}$
  - $NSE < 0 - \text{nicht zu modellieren hätte mehr gebracht ...}$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

# cal/val Statistik

- Es ist meist sinnvoll mehrere Statistiken zu verwenden
  - *NSE: genereller Indikator, vor allem für Abflussdaten*
  - *KGE: weiterentwickelter NSE*
  - *Bias: Indikator für systematische Fehler*
  - *MAE: mean absolute error – Indikator für generelle Über-/Unterschätzung*
  - ...
- Auch hier ist es möglich Kalibrierung auf mehrere Statistiken auszurichten (*Optimierungsfunktionen*)

# Case Study 3 – Regionale Modellierung



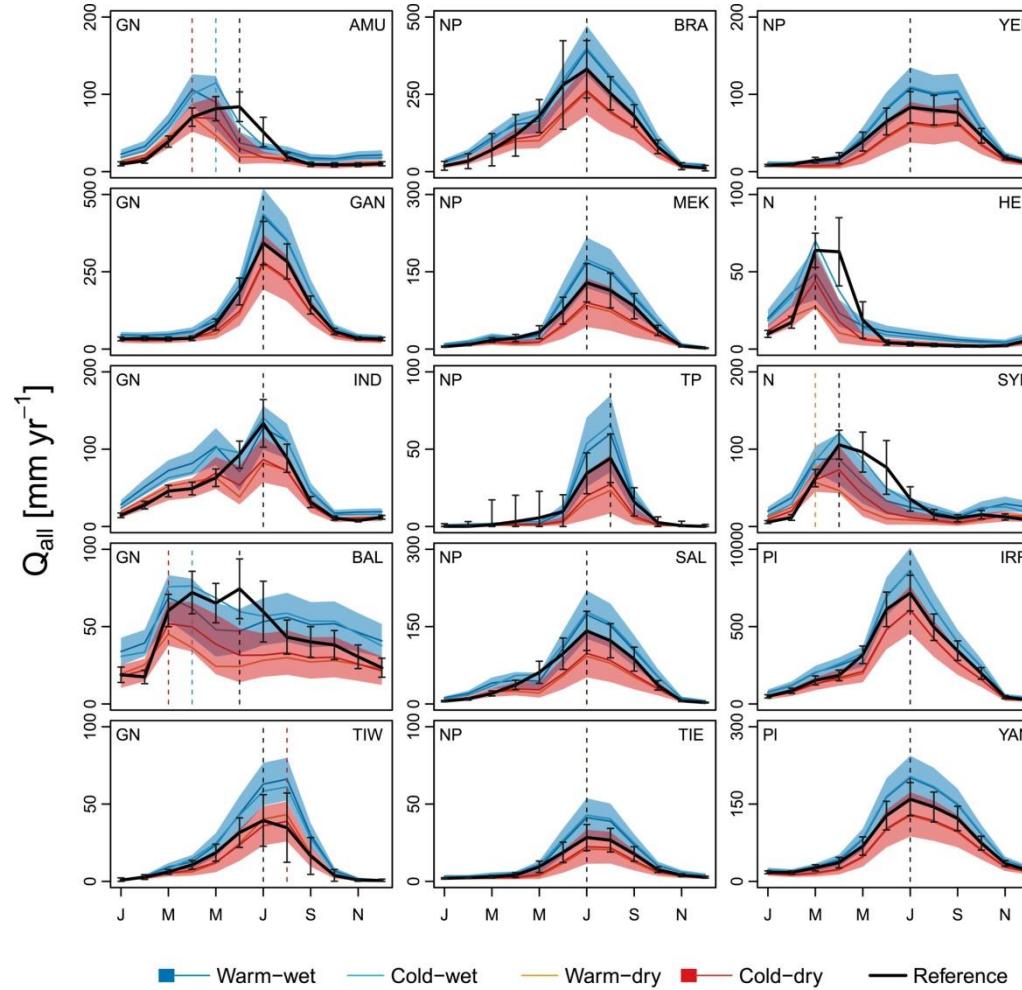
- Modellierung der verschiedenen Abflussbeiträge (Regen, Schnee, Eis, Grundwasser)

**Table 3: Station locations used for calibration and validation of the SPHY model in HICAP (Lutz et al., 2014a). Three stations were used for calibration for 1998–2007. Five stations were used for an independent validation for the same period. The Nash–Sutcliffe efficiency (NS) and bias metrics were calculated at a monthly time step.**

Location	NS (-)	Bias (%)	Validation/calibration
Dainyor bridge	0.39	58.2	Validation
Besham Qila	0.66	24.7	Validation
Tarbelia inflow	0.63	34.6	Calibration
Marala inflow	0.65	12.0	Validation
Pachuwarghat	0.90	-1.6	Validation
Rabuwa Bazar	0.65	-22.5	Validation
Turkeghat	0.87	-5.4	Calibration
Chatara	0.87	7.9	Calibration

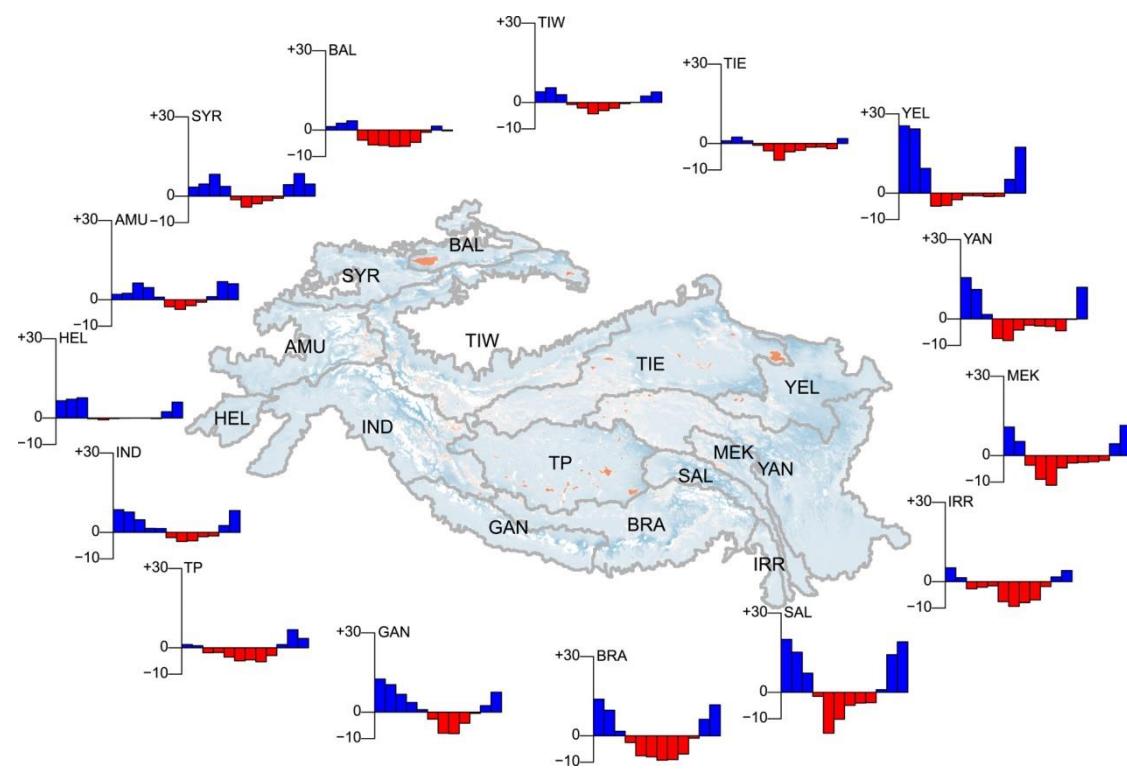
Lutz et al. (2014)  
Khanal et al. (2021)

# Case Study 3 – Regionale Modellierung



- Sie erlaubt, diese Modelle mit Daten des erwarteten Klimas zu speisen und Konsequenzen für den Abfluss abzuschätzen
- *Saisonalität*
- *Peak flow*
- *Unsicherheiten*

# Case Study 3 – Regionale Modellierung



- Relative Über-/Unterschätzung des Modells gegenüber einer unabhängigen Datenquelle
- Validierung – in diesem Fall Persistenz der Schneedecke – vom MODIS-Satelliten
- *Was ist aus dieser Abbildung bereits ersichtlich hinsichtlich der Fähigkeit des Modells, Prozesse zu reproduzieren (Stichwort bias)?*

# Referenzen

Nemec, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. CHR/KHR Report No. II-7, Lelystad, 74 S. [https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport\\_ii\\_-\\_7\\_0.pdf](https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport_ii_-_7_0.pdf)

Sutanudjaja et al. (2018): PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model, GMD, <https://gmd.copernicus.org/articles/11/2429/2018/gmd-11-2429-2018.html>

Alsafi, Hashim & Sarukkalige, P.. (2017). Potential Climate Change Impacts on the Hydrological System of the Harvey River Catchment.. International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 11. 296-306.

Šimůnek, J., van Genuchten, M.T. and Šejna, M. (2016), Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. Vadose Zone Journal, 15: 1-25 [vzj2016.04.0033](https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033)

Ryan T. Bailey, Ali Tasdighi, Seonggyu Park, Saman Tavakoli-Kivi, Tadesse Abitew, Jaehak Jeong, Colleen H.M. Green, Abeyou W. Worqlul, APEX-MODFLOW: A New integrated model to simulate hydrological processes in watershed systems, Environmental Modelling & Software, Volume 143, 2021, 105093, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105093>.

Khanal, S., Lutz, A. F., Kraaijenbrink, P. D. A., van den Hurk, B., Yao, T., & Immerzeel, W. W. (2021). Variable 21st century climate change response for rivers in High Mountain Asia at seasonal to decadal time scales. Water Resources Research, 57, e2020WR029266. <https://doi.org/10.1029/2020WR029266>

Lutz, A., Immerzeel, W., Shrestha, A. et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. Nature Clim Change 4, 587–592 (2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2237>