

„ Regionale Grundwassersysteme“ Veranstaltung im Modul Hydrosystemanalyse

- Teil 2: Regionale Grundwassermodellierung

Prof. Dr. Olaf Kolditz

Dr. Erik Nixdorf

24.06.2022

Regionale Grundwassersysteme -Aufbau

- 3 Teile, 2mal Vorlesung und 1mal Übung, Ende gegen 18:10

 - a. V1: Grundwasserströmungsgleichung
 - I. Herleitung der Grundwassergleichung in der Potentialform
 - II. Diskussion der Parameter des Grundwasserleiters
 - III. Analytische Lösungen

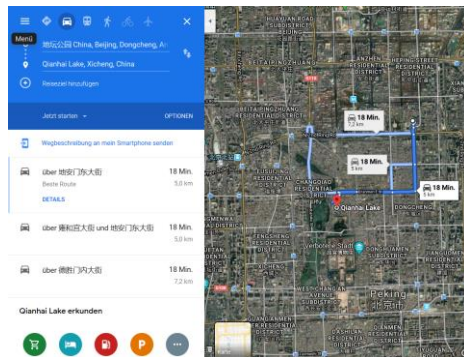
 - b. V2: Grundwassermodellierung auf der Einzugsgebietsskala
 - I. GIS in der Grundwassermodellierung
 - II. Initial und Randbedingungen
 - III. Das Grundwasserströmungsmodell Selke

 - c. Übung mit OpenGeoSys und ParaView
 - I. Analytische Lösungen vs. OpenGeoSys
 - II. Grundwasserströmungsmodell Selke: Bewertung der Modellergebnisse und der Randbedingungen

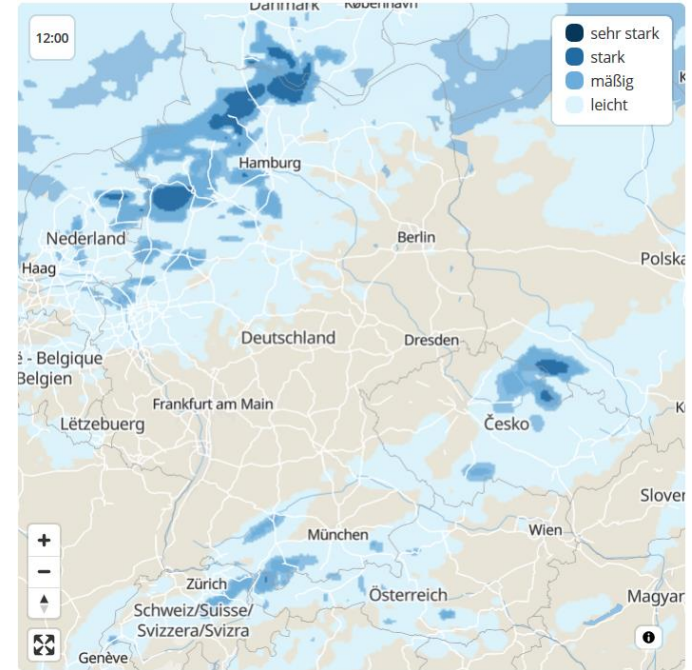
 - d. Klausurfragen...
-

Was ist GIS

- GIS steht für „Geographic Information System“ oder auf deutsch „Geoinformationssysteme“
- Computerprogramme, die **geographische Daten** sammeln, verarbeiten, organisieren, analysieren und präsentieren
- Die meisten von Ihnen haben mit GIS interagiert oder es benutzt →siehe **Modul UW-BHW-106**



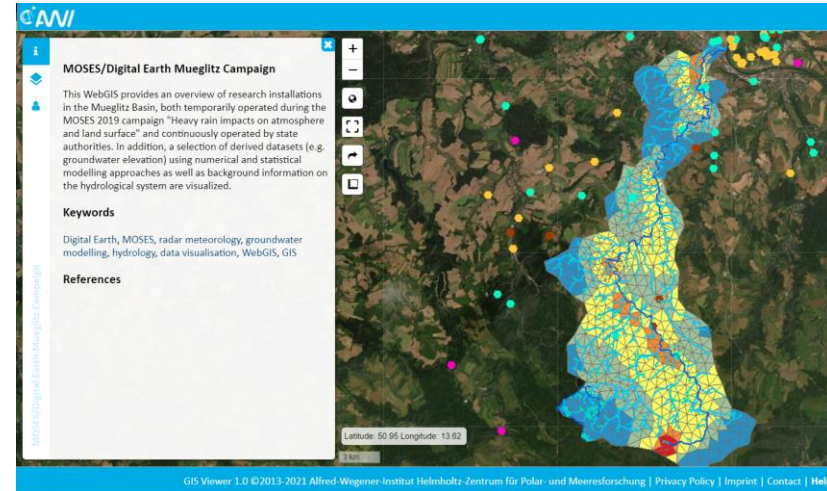
Google Maps route, 2020



Rainfall Forecast (07.07.2020) von:
<https://www.wetter.de/deutschland/regenradar-karte-deutschland-c49.html#5/51.47/10.37>

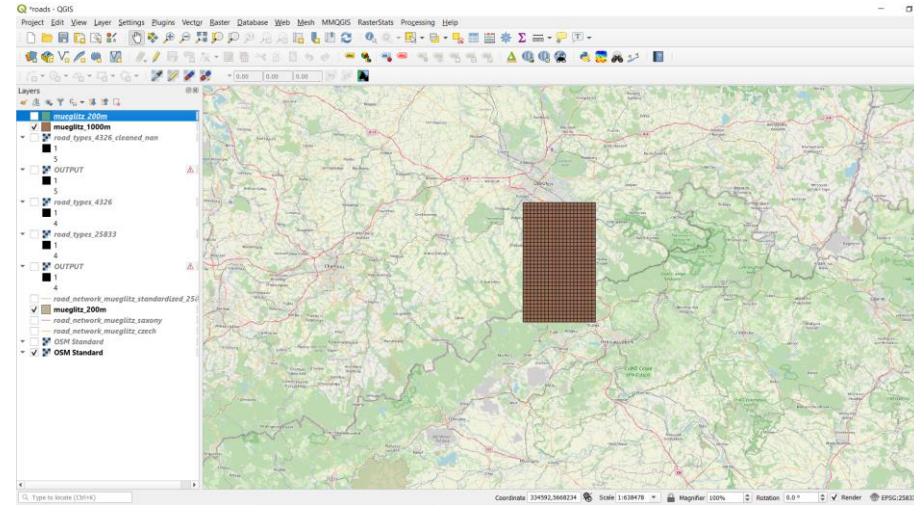
Arten von GIS :Online/Web GIS

- Geodaten und -Sachverhalte liegen auf einem Server mit installiertem GIS-System (MapServer, ArcGIS Server)
- Anwender benötigt nur WebBrowser zum Zugang
- Funktionalität fokussiert auf Darstellung von Geoinformationen aus öffentlichen Datenbanken
- Datenprozessierung und Integration meist eingeschränkt
 - Bsp: [IDA-Umweltportal Sachsen](#)
 - [maps.awi.de](#)



Arten von GIS: Desktop GIS

- GIS-Software und (teilweise) Geodaten liegen auf „lokalen“ Rechnerressourcen
- Geodaten können vollumfänglich erzeugt und prozessiert werden
- (oftmals) Möglichkeit zur Automatisierung über Skripte und „Graphical Modeller“
- Schnittstelle zu MapServern über OGC (OpenGeoSpatialFoundation) Interface Standards möglich (z.B. WMS/WFS/WCS)
- Bsp: **QGIS**, ArcGIS, SAGA GIS, Smallworld GIS



- QGIS (einst Quantum GIS) ist ein **plattformübergreifendes, freies geografisches Informationssystem (GIS)**
- **Freie Software (GNU Lizenz) geschrieben in C++**
- Einbindung von Funktionalität aus anderen freier Programme und Bibliotheken einbindet (GRASS, SAGA, GvSIG, GDAL, ...).
- QGIS wird seit 2002 kontinuierlich weiter entwickelt. Seit Version 2.0 (September 2013) wird QGIS immer in jeweils **3 laufenden Versionen** angeboten:

Bezeichnung	Zielgruppe	Turnus	Aktuell
Long Time Release (LTR)	Unternehmen, Behörden und Einrichtungen	jährlich im Oktober	3.16.x „Hannover“
Latest Release (LR)	Anwender mit Bedürfnis nach den neusten Funktionen	Quartalsweise	3.18.x „Zürich“
Master oder Development Version	Entwickler, Tester und extrem ungeduldige Anwender	Nächtlich	3.19



GIS und Grundwassermodellierung

- Regionale numerische Grundwasserströmungs- und Transportmodelle haben einen großen Geodatenbedarf (**Daten+ Raumbezug + Metadaten**) beim Modellaufbau und bei der Kalibrierung, z.B.
 - Geländehöhen, Geologie, Basis und Oberfläche der relevanten Schichten (Grundwasserleiter, Grundwassernichtleiter)
 - Vorflutpotenziale an Oberflächengewässern
 - Flächendifferenzierte hydraulische Parameter wie **Durchlässigkeitsbeiwerte, Speicherkoeffizienten, Porosität**
 - Grundwassergleichen und repräsentative Grundwasserstandsganglinien von Grundwassermessstellen
 - Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser (Wasserstände und **Leakagekoeffizienten**)
 - Standorte und Mengen für Entnahmen und Versickerungen
 - Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung
 - Niederschlag und Verdunstung auf offenen Wasserflächen
- Die Datensätze sind oft nicht konsistent sowie heterogen in Raumbezug und Format und können seltenst direkt von der Quelle in einen Modellierungsprogramm überführt werden
- Lösung: Einsatz von GIS Systemen zur für die Präprozessierung und Datenhaltung

GIS Aufgaben in der Grundwassermodellierung

- Fortschreibungsfähige Dokumentation von georeferenzierten Grundlagen- und Ergebnisdaten
- Maßstabsfreie Verwaltung und Integration von Geodaten unterschiedlichster Herkunft
- Konvertierung von Vektor-, Raster- und Bilddaten
- Transformation von Grundlagen- und Modelldaten in unterschiedliche Koordinaten- und Zeitsysteme sowie Maßeinheiten
- Verknüpfung von Eingangs-, Modell- und Ergebnisdaten mit topographischen Grunddaten
- Kartographische Ausgestaltung aller georeferenzierter Daten.

- **Achtung:** Nicht jede Modellierungssoftware unterstützt typische GIS Dateitypen (z.B GeoPackage, GeoTiff), GIS hat zudem eindeutige Limitationen im Bereich 3D und zeit-variable Datensätze

GIS als integriertes GWM Präprozessierungstool

- Beispiele für integrierte GIS-Modell Datenflüsse

http://www.freewat.eu/sites/default/files/FREEWAT_vol0.pdf

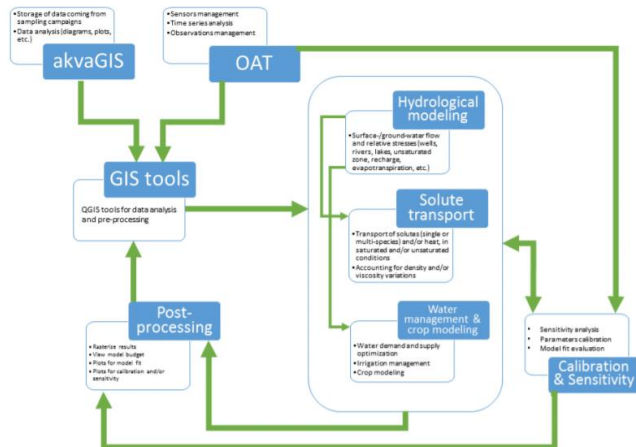


Figure 1.3 - Interconnection among FREEWAT tools and modules.

FREEWAT ~ QGIS +MODFLOW

https://www.researchgate.net/publication/237502497_ARC_HYDRO_GROUNDWATER_DATA_MODEL

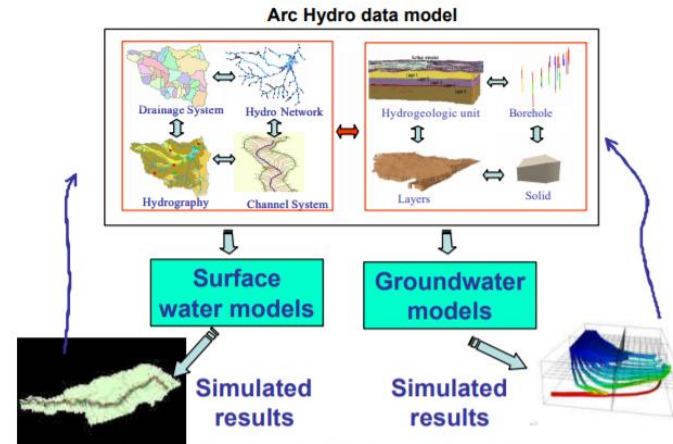
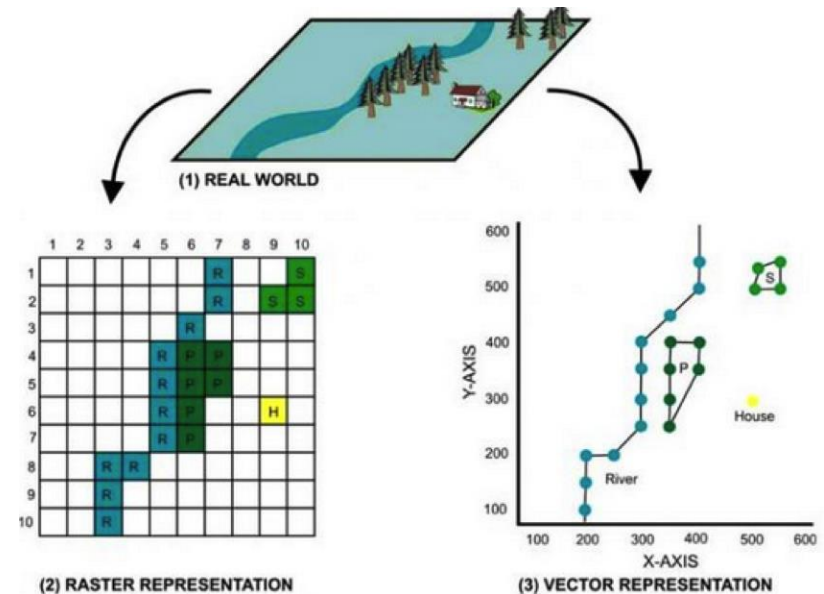


Figure 6. Integration of models using the data model structure

AHGW ~ ArcGIS +MODFLOW

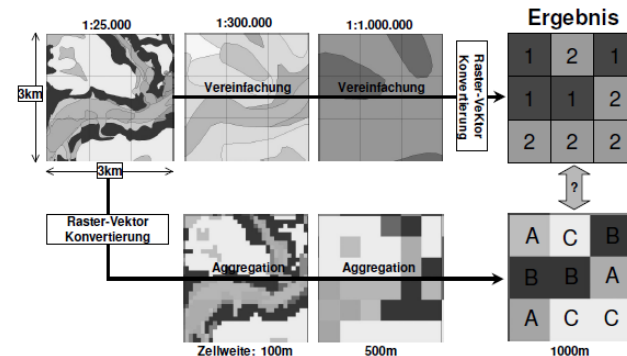
Raster vs. Vector

- GIS bietet zwei verschiedene Datentypen zur Darstellung räumlicher Daten = Beobachtungen konzentrieren sich auf Standorte.
- **Rasterdaten** bestehen aus Pixeln (auch als Gitterzellen bezeichnet). Sie sind normalerweise in regelmäßigen Abständen angeordnet.
- **Vektordaten** bestehen nicht aus einem Raster von Pixeln. Stattdessen bestehen Vektorgrafiken aus Punkten und Pfaden.



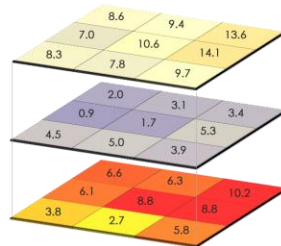
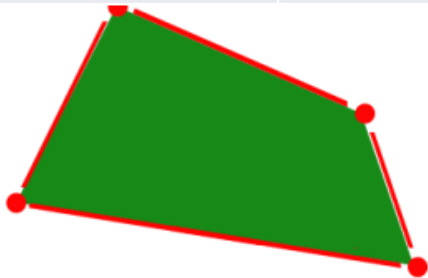
Raster vs Vektor: Konzepte

- Rasterdaten repräsentieren das **Feldkonzept**:
 - Eine physikalische Größe (z.B. die Durchlässigkeit eines Gesteins) im Raum ist eine Funktion der Ortskoordinaten $A = f(x, y, z, t)$
 - Rasterdaten teilen den Raum gleichmäßig auf und weisen jedem Element einen Wert von A zu
 - Voraussetzung ist, dass die Funktion zur Beschreibung der Größe stetig ist
 - Bei nichtstetigen Funktionen (z.B. Landnutzungsklassen) oder starken Gradienten (DEM im Gebirge) führen Rasteroperationen zu Fehlern
- Vektordaten repräsentieren das **Objektkonzept**:
 - Beim objektbasierten Ansatz wird die zu beschreibende Informationsmenge in homogene Objekte eingeteilt
 - Diesen Objekten werden gewisse Attribute und Eigenschaften zugeordnet



Raster vs Vector

Type	Vorteile	Nachteile
Vektordaten	<ul style="list-style-type: none">• ästhetisch ansprechender• höhere geografische Genauigkeit• Ermöglicht Netzwerkanalyse und Näherungsoperationen	<ul style="list-style-type: none">• Algorithmen zur Vektormanipulation sind komplex• Daten sind schlecht gespeichert• Topologische Probleme
Rasterdaten	<ul style="list-style-type: none">• Einfache Datenstruktur – Eine Matrix aus Zellen mit Werten• Leistungsfähiges Format für erweiterte räumliche und statistische Analysen• Möglichkeit, kontinuierliche Oberflächen darzustellen und Oberflächenanalysen durchzuführen	<ul style="list-style-type: none">• Lineare Features und Pfade sind schwer darstellbar• Datensatzwerte für jede Zelle• Eingeschränkte Flexibilität bei Rasterdaten-Attribut-Tabellen• Skalierung ist nichtlinear



“raster is faster,
but vector is
corrector”

Raster vs Vektor

https://docs.qgis.org/3.4/de/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html



- Digitalisieren sie die Landschaft, welche Charakteristika lassen sich besser mit Vektor und welche mit Rasterdaten beschreiben?

Beispiele GIS Datentypen für Komponenten eines Grundwasserströmungsmodells

GIS Datentyp	Komponente GWM	Beispiel
Punkt-Geometrien	Randbedingung	Entnahmebrunnen
Linien-Geometrien	Randbedingungen Isolinien von Parameterverteilungen	Druckhöhen im Fluss Leakage-Koeffizienten des Gewässers Hydroisohypsenplan
Flächen-Geometrien	Modellgeometrien Randbedingungen	Modellgebiet im Grundriss kf-Wertverteilung
Tabellen	Geometrieattribute Zeitreihen	Brunnenentnahmeraten Neubildungsrate pro Teilfläche
Raster	georeferenzierte Bilder Parameterverteilungen Räumlich-zeitlich heterogene Datensätze	Grundwasserneubildung Luftbild Höhenmodell Geologisches Schichtenmodell

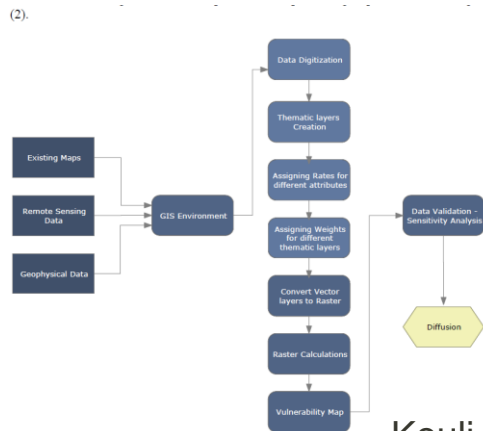
Ein paar Beispiele für GIS aus der Grundwassermodellierung : Groundwater Vulnerability Mapping

- Ziel: Erstellung von Karten zur Beschreibung der räumlichen (oder auch zeitlichen) Verteilung der Aquifervulnerabilität
- Simpelster Ansatz: Indexmethoden wie DRASTIC

$$DRASTIC = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

Table 1. Description of the DRASTIC model parameters (Babiker et al. 2005).

FACTOR	DESCRIPTION	RELATIVE WEIGHT	DATA SOURCES	DATA TYPE
Depth to water	Depth to the water table. Deeper water table levels imply lesser chance for contamination occurrences.	5	Borehole Data	Point Data
Recharge	Water which penetrates the ground surface and reaches the water table. Recharge represents also the vehicle for transporting pollutants.	4	Mean Annual Rainfall	Point Data
Aquifer media	Properties of the saturated zone material which controls the pollutant attenuation processes.	3	Geological Maps	Polygon Data
Soil media	The upper weathered portion of the unsaturated zone which controls the amount of recharge that can infiltrate.	2	Soil Maps	Polygon Data
Topography	The slope of the land surface. Dictate whether the runoff will remain on the surface to allow contaminant percolation.	1	Topographic Maps	Polyline Data (Contours) -> Digital Elevation Model
Impact of vadose zone	Unsaturated zone material. Control the passage and attenuation of the contaminants.	5	Geological/Soil Maps	Polygon Data
Hydraulic Conductivity	The ability of the aquifer to transmit water and contaminants material within the aquifer.	3	Hydraulic Conductivity	Point Data



Kouli et al, 2008

Figure 2. Flow chart of the main processing steps of GVM.

Groundwater Vulnerability Mapping

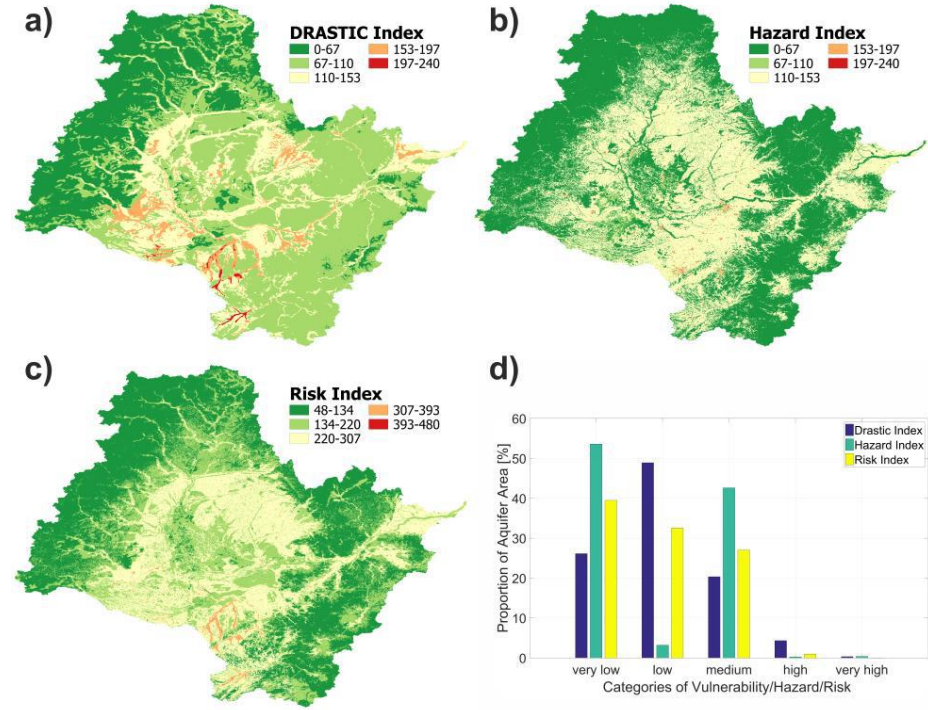
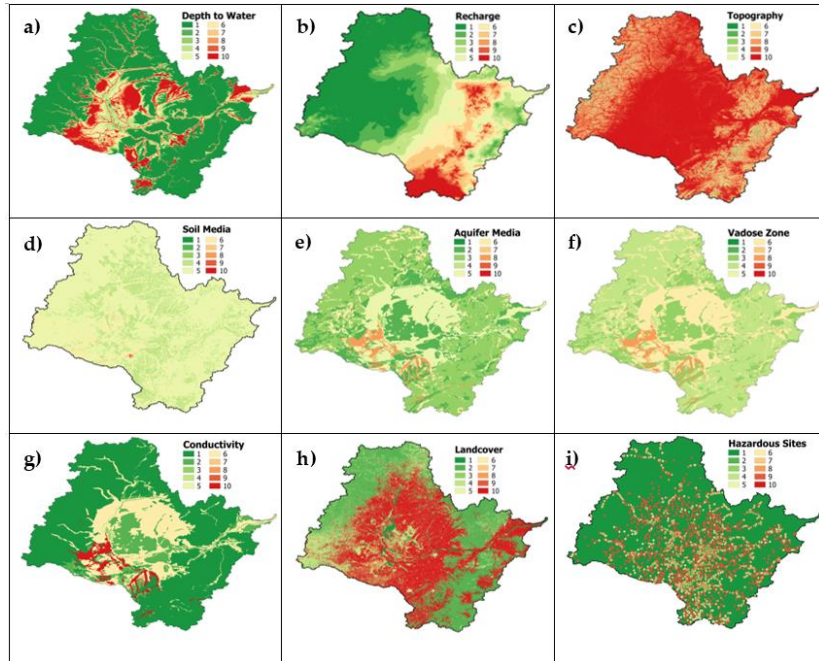
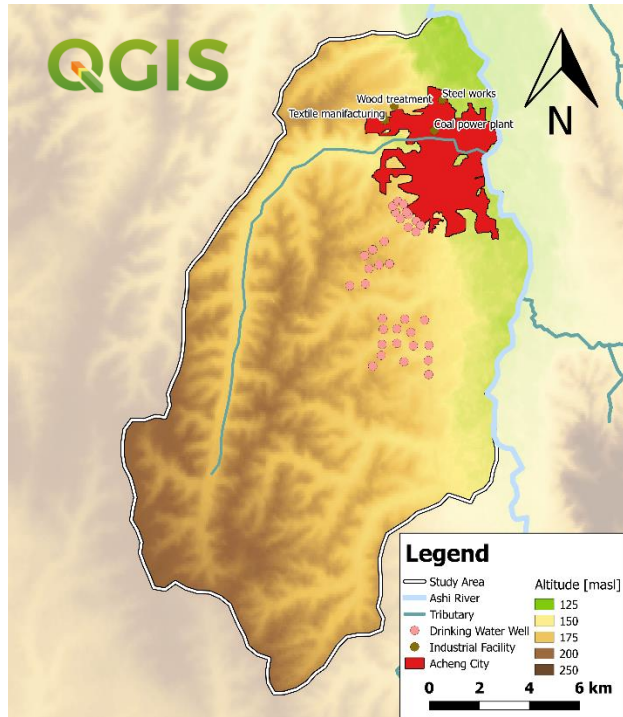


Figure 5: Selected rating maps used for DRASTIC (Fig.3 a-g) and Hazard index (Fig. 3 h-i) computation in Songhua River Basin. High and low ratings are visualized by red and green color, respectively. The ratings of the point hazardous sites are shown as vector points.

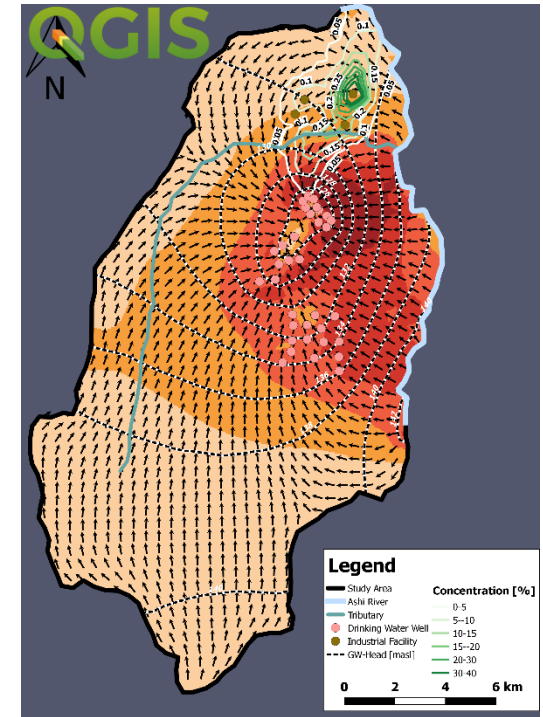
GIS für OpenGeoSys Prä und Postprozessierung



Präprozessierung

```
5 * Copyright
6 * Copyright (c) 2013, OpenGeoSys Community (http://www.opengeosys.org)
7 * Distributed under a Modified BSD License.
8 * See accompanying file LICENSE.txt or
9 * http://www.opengeosys.org/project/license
10 *
11 *
12 *
13 #ifndef SHAPEQUAD4_H_
14 #define SHAPEQUAD4_H_
15
16 namespace NumLib
17 {
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28 * Shape function for a quadrilateral element of four nodes in natural coordinates
29 *
30 *
31 *
32 *
33 *
34 *
35 *
36 *
37 *
38 *
39 *
40 *
41 *
42 *
43 *
44 *
45 *
46 *
47 *
48 *
49 *
50 *
51 *
52 *
53 *
54 *
55 *
56 *
57 *
58 *
59 *
60 *
61 *
62 *
63 *
64 *
65 *
66 *
67 *
68 *
69 *
70 *
71 *
72 *
73 *
74 *
75 *
76 *
77 *
78 *
79 *
80 *
81 *
82 *
83 *
84 *
85 *
86 *
87 *
88 *
89 *
90 *
91 *
92 *
93 *
94 *
95 *
96 *
97 *
98 *
99 *
100 *
101 *
102 *
103 *
104 *
105 *
106 *
107 *
108 *
109 *
110 *
111 *
112 *
113 *
114 *
115 *
116 *
117 *
118 *
119 *
120 *
121 *
122 *
123 *
124 *
125 *
126 *
127 *
128 *
129 *
130 *
131 *
132 *
133 *
134 *
135 *
136 *
137 *
138 *
139 *
140 *
141 *
142 *
143 *
144 *
145 *
146 *
147 *
148 *
149 *
150 *
151 *
152 *
153 *
154 *
155 *
156 *
157 *
158 *
159 *
160 *
161 *
162 *
163 *
164 *
165 *
166 *
167 *
168 *
169 *
170 *
171 *
172 *
173 *
174 *
175 *
176 *
177 *
178 *
179 *
180 *
181 *
182 *
183 *
184 *
185 *
186 *
187 *
188 *
189 *
190 *
191 *
192 *
193 *
194 *
195 *
196 *
197 *
198 *
199 *
200 *
201 *
202 *
203 *
204 *
205 *
206 *
207 *
208 *
209 *
210 *
211 *
212 *
213 *
214 *
215 *
216 *
217 *
218 *
219 *
220 *
221 *
222 *
223 *
224 *
225 *
226 *
227 *
228 *
229 *
230 *
231 *
232 *
233 *
234 *
235 *
236 *
237 *
238 *
239 *
240 *
241 *
242 *
243 *
244 *
245 *
246 *
247 *
248 *
249 *
250 *
251 *
252 *
253 *
254 *
255 *
256 *
257 *
258 *
259 *
260 *
261 *
262 *
263 *
264 *
265 *
266 *
267 *
268 *
269 *
270 *
271 *
272 *
273 *
274 *
275 *
276 *
277 *
278 *
279 *
280 *
281 *
282 *
283 *
284 *
285 *
286 *
287 *
288 *
289 *
290 *
291 *
292 *
293 *
294 *
295 *
296 *
297 *
298 *
299 *
300 *
301 *
302 *
303 *
304 *
305 *
306 *
307 *
308 *
309 *
310 *
311 *
312 *
313 *
314 *
315 *
316 *
317 *
318 *
319 *
320 *
321 *
322 *
323 *
324 *
325 *
326 *
327 *
328 *
329 *
330 *
331 *
332 *
333 *
334 *
335 *
336 *
337 *
338 *
339 *
340 *
341 *
342 *
343 *
344 *
345 *
346 *
347 *
348 *
349 *
350 *
351 *
352 *
353 *
354 *
355 *
356 *
357 *
358 *
359 *
360 *
361 *
362 *
363 *
364 *
365 *
366 *
367 *
368 *
369 *
370 *
371 *
372 *
373 *
374 *
375 *
376 *
377 *
378 *
379 *
380 *
381 *
382 *
383 *
384 *
385 *
386 *
387 *
388 *
389 *
390 *
391 *
392 *
393 *
394 *
395 *
396 *
397 *
398 *
399 *
400 *
401 *
402 *
403 *
404 *
405 *
406 *
407 *
408 *
409 *
410 *
411 *
412 *
413 *
414 *
415 *
416 *
417 *
418 *
419 *
420 *
421 *
422 *
423 *
424 *
425 *
426 *
427 *
428 *
429 *
430 *
431 *
432 *
433 *
434 *
435 *
436 *
437 *
438 *
439 *
440 *
441 *
442 *
443 *
444 *
445 *
446 *
447 *
448 *
449 *
450 *
451 *
452 *
453 *
454 *
455 *
456 *
457 *
458 *
459 *
460 *
461 *
462 *
463 *
464 *
465 *
466 *
467 *
468 *
469 *
470 *
471 *
472 *
473 *
474 *
475 *
476 *
477 *
478 *
479 *
480 *
481 *
482 *
483 *
484 *
485 *
486 *
487 *
488 *
489 *
490 *
491 *
492 *
493 *
494 *
495 *
496 *
497 *
498 *
499 *
500 *
```

OpenGeoSys
OPEN-SOURCE MULTI-PHYSICS



Visualisierung

Randbedingungen

- Die Numerische Lösung partieller Differentialgleichung über einen Raum Ω benötigt Informationen über die Statusvariablen (abhängigen Variablen) für bestimmte Teilgebiete: **Rand und Initialbedingungen**
- Randbedingung: Geometrie der Randbedingung + Art der Randbedingung + Werte der abhängigen Variable oder ihrer Ableitungen**

Name	Mathematischer Name	Mathematischer Ausdruck
Constant Head	Dirichlet	$h(x) = f(x), x \in \partial\Omega_D$
Specific Flux	Neumann	$\frac{\partial h(x)}{\partial n} = \frac{\partial h(x)}{\partial n} \Big _0 = g(x), x \in \partial\Omega_N$
Head-dependent Flux	Robin/Cauchy	$\alpha h(x) + \beta \frac{\partial h(x)}{\partial n} = C(x), x \in \partial\Omega_R$

Randbedingungen: Geometry

- Für jedes Teilsegment des Randes **muss** eine Randbedingung definiert sein

$$\partial\Omega = \partial\Omega_D + \partial\Omega_N + \partial\Omega_R$$

- Ränder für die keine Teilrandbedingung explizit definiert wurden ist eine „No-Flow“ Boundary

$$\frac{\partial h(x)}{\partial n} = 0$$

- Mehrere Randbedingungen auf einer Geometrie sind grundsätzlich möglich
- Randgeometrien $\partial\Omega_n$ sind eine Dimension niedriger als das Modellgebiet
- Dirichletrandbedingungen (u.U. auch Neumann/Robin) können zusätzlich auch für „innere Ränder“ definiert werden

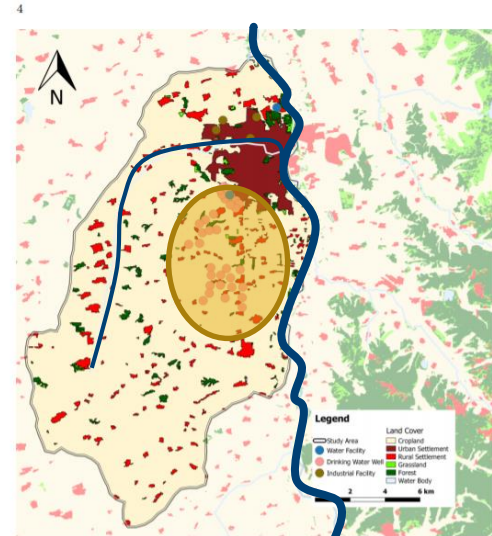
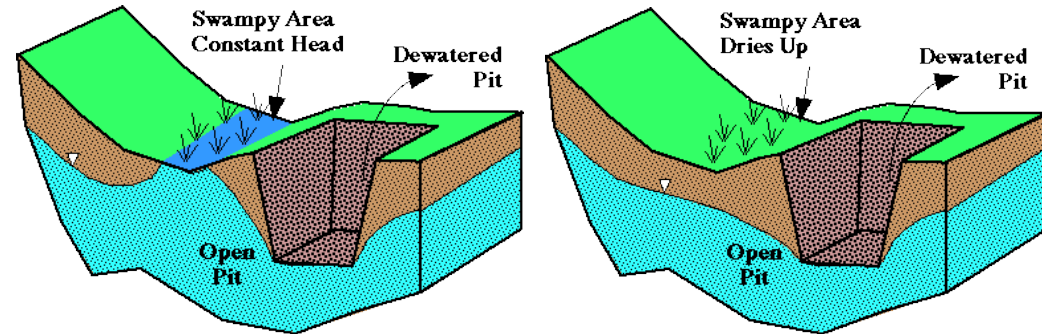
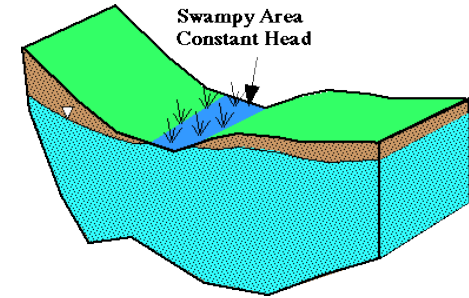


Fig. 1.2: Land use at the study site

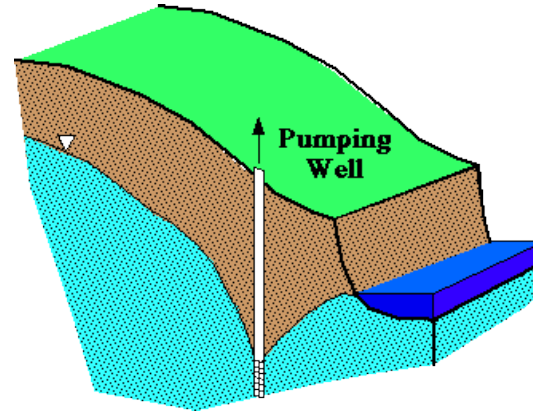
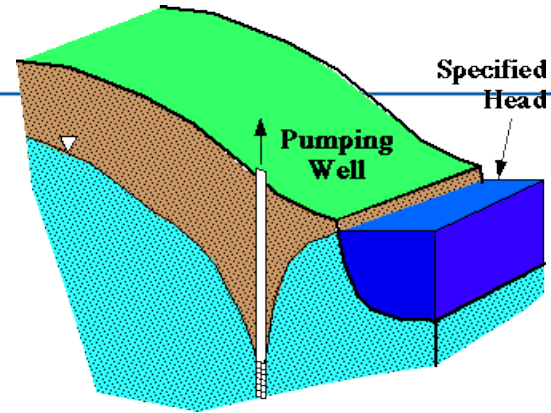
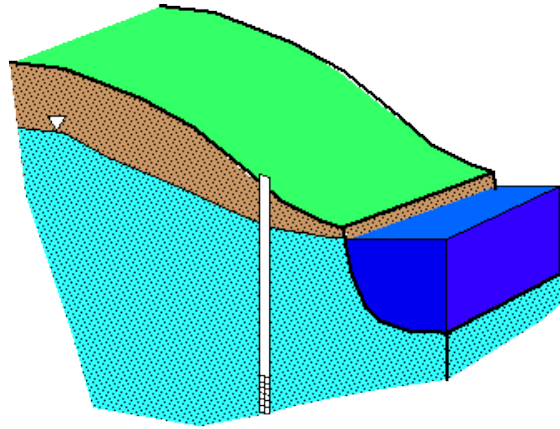
Randbedingungen: Dirichlet

- Dirichlet: $h(x) = f(x), x \in \partial\Omega_D$
- Die Randbedingung kann auch zeitlich dynamisch sein: $h(x, t) = f(x, t), x \in \partial\Omega_D$
- Physische Entitäten die über Dirichlet Randbedingungen beschrieben werden könnten
 1. See (Wasserstandshaltung?)
 2. Meer (Gezeiten?)
 3. Quelle?
 4. Fluss?
 5. ...
- Zeitliche Gültigkeit der Randbedingung?



<https://tinyurl.com/aca263dd>

Randbedingungen Dirichlet

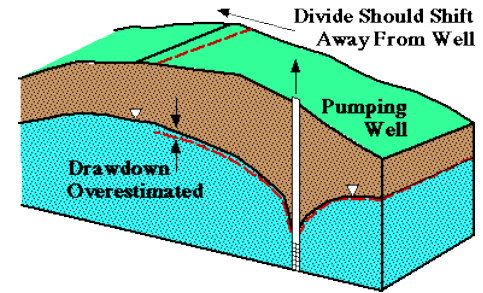
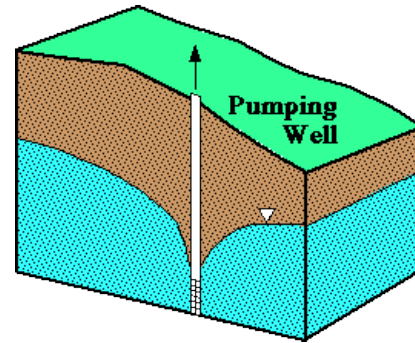
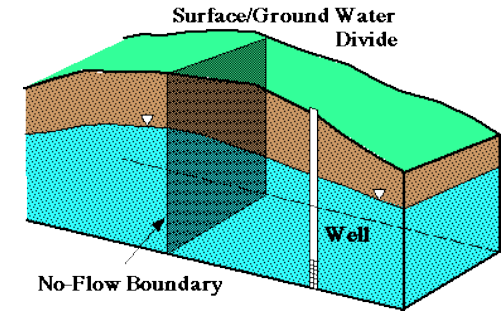


Randbedingung: Neumann

- Neumann: $\frac{\partial h(x)}{\partial n} = \frac{\partial h(x)}{\partial n} \Big|_0 = g(x), x \in \partial\Omega_N$
- Die Randbedingung kann zeitlich dynamisch sein:
 - $\frac{\partial h(x,t)}{\partial n} = \frac{\partial h(x,t)}{\partial n} \Big|_0 = g(x,t), x \in \partial\Omega_n$
- Physische Entitäten die über NEUMANN Randbedingungen beschrieben werden könnten:

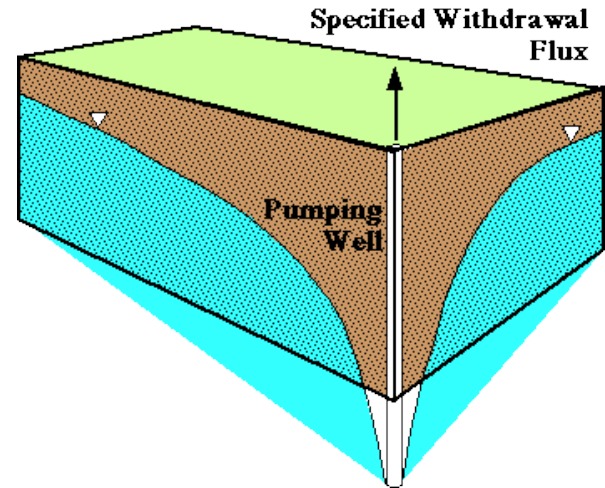
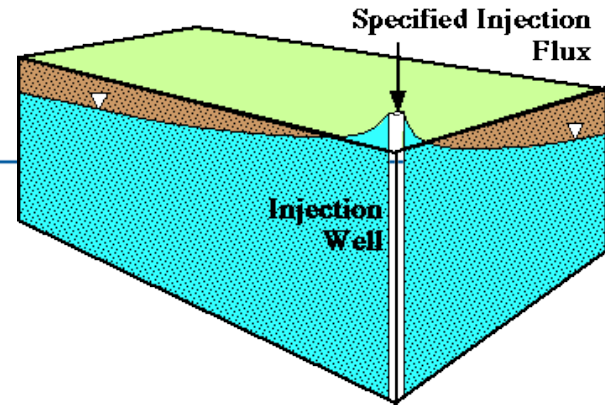
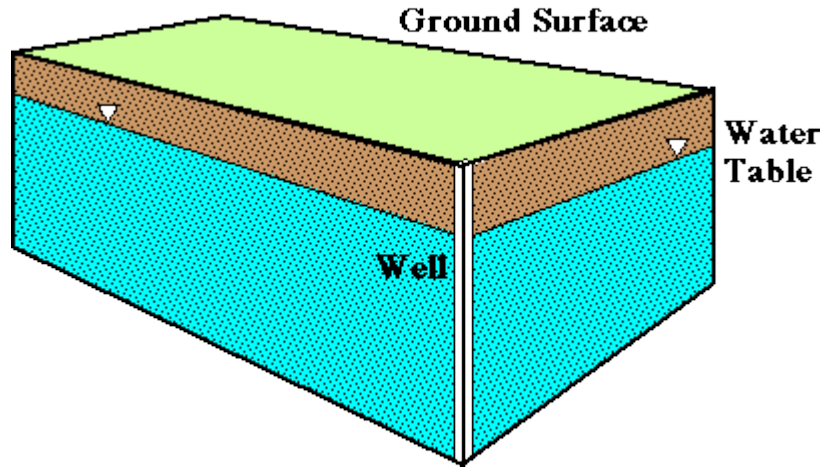
1. Quellen?
2. Salz/Grundwasser Interface
3. Grundwasserscheiden
4. Grundwasserneubildung
5. Geringleiter (Leakage Faktor)
6. Flüsse?

- Zeitliche Gültigkeit?



<https://tinyurl.com/68a5fer4>

Randbedingung Neumann



<https://tinyurl.com/u4mm2dxs>

Randbedingungen: Grund- Flusswasserinteraktion

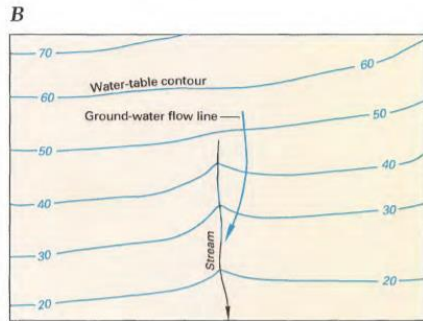
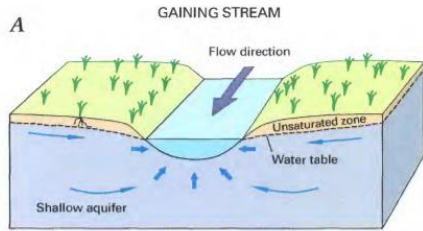


Figure 8. Gaining streams receive water from the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the upstream direction where they cross the stream (B).

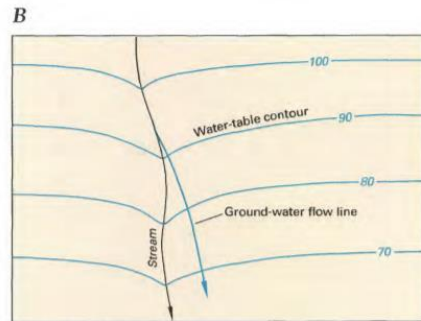


Figure 9. Losing streams lose water to the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the downstream direction where they cross the stream (B).

<i>Hydrogeomorphic Types</i>			
Geomorphologic typing	Type 1: upper catchment	Type 2: middle course	Type 3: lower catchment
Interaction scenarios	Interflow dominant in upper catchment	Intermittent in middle course	Groundwater discharge zone
Hydraulic connection			
Baseflow separation concept			

Abhängigkeit des Austauschs von der Hydrogeomorphologie [4]

Randbedingungen: Grund- Flusswasserinteraktion

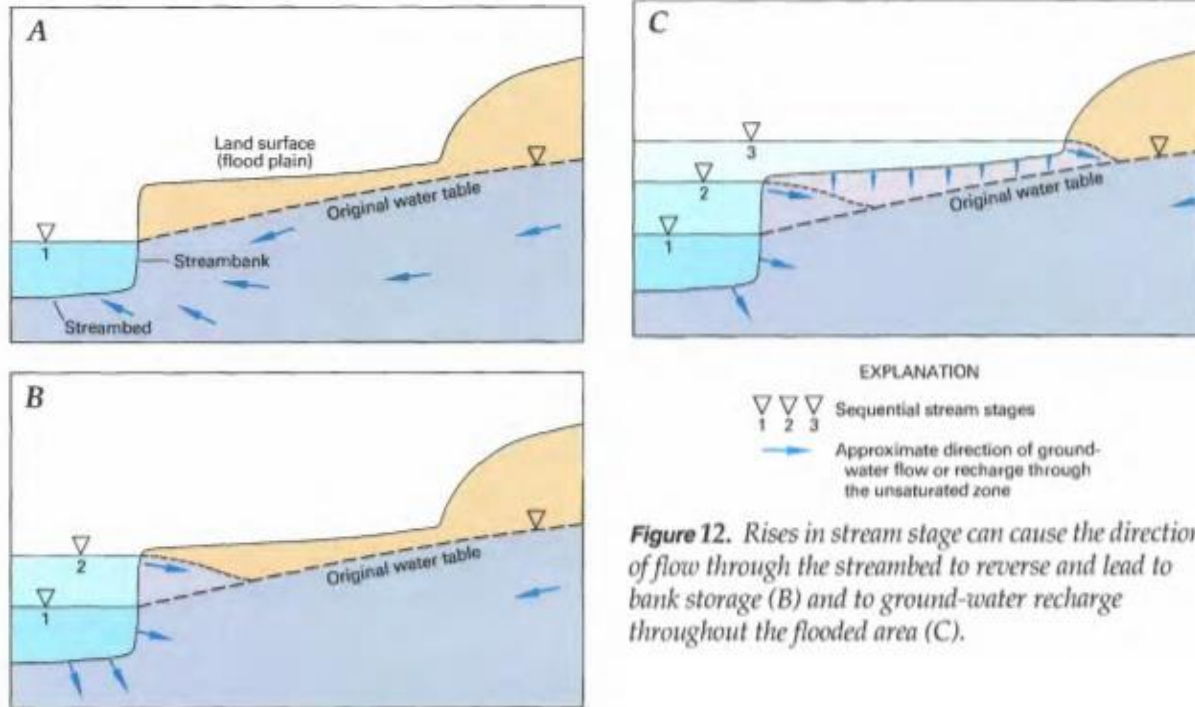


Figure 12. Rises in stream stage can cause the direction of flow through the streambed to reverse and lead to bank storage (B) and to ground-water recharge throughout the flooded area (C).

Randbedingungen: Grund- Flusswasserinteraktion

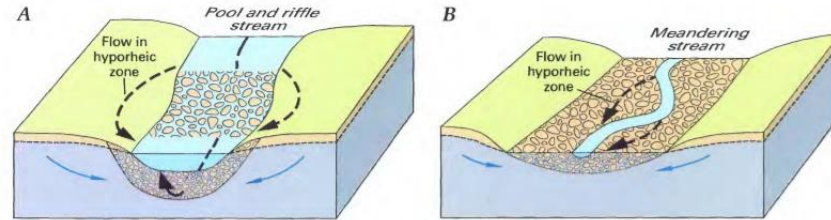


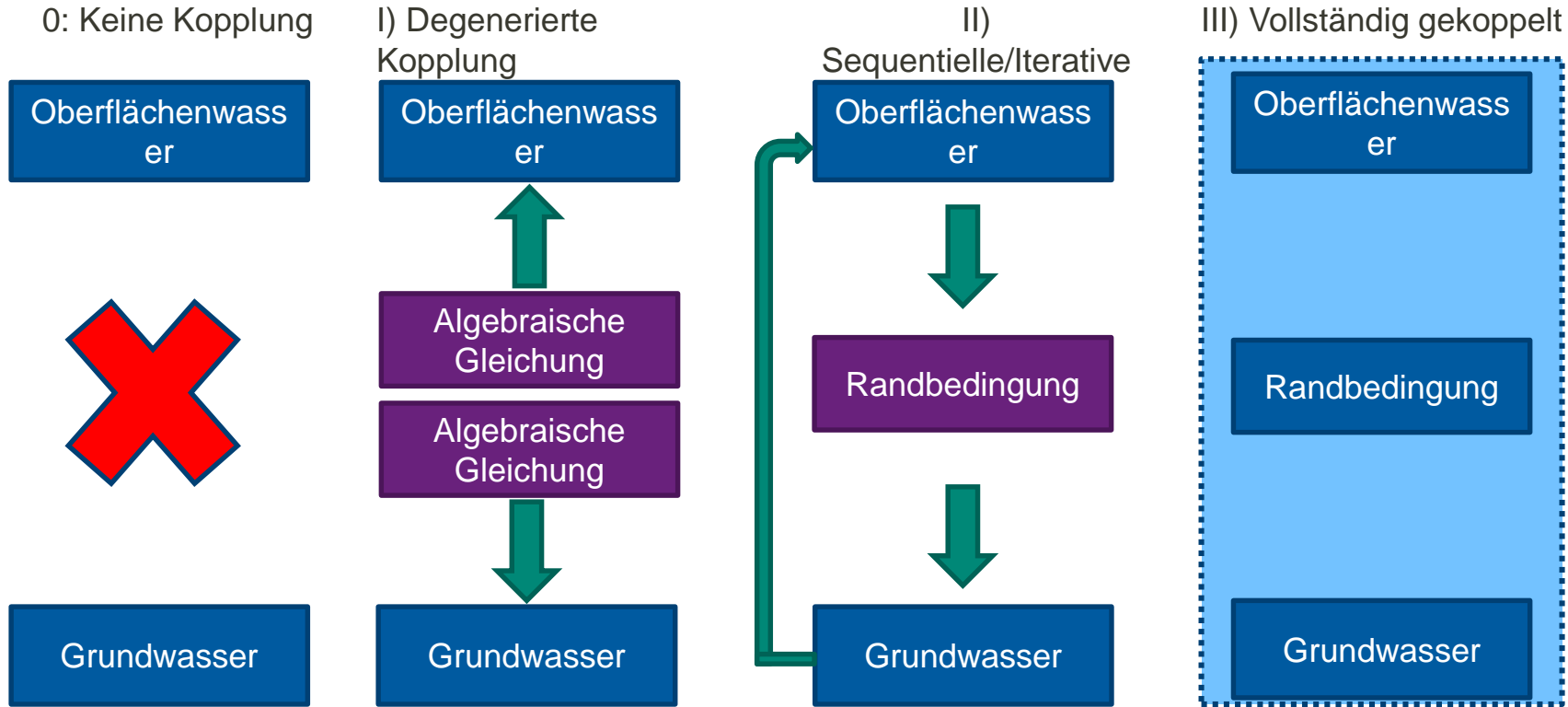
Figure 14. Surface-water exchange with groundwater in the hyporheic zone is associated with abrupt changes in streambed slope (A) and with stream meanders (B).



Pool and riffle stream in Colorado. (Photograph by Robert Broshears.)

<https://tinyurl.com/y25cutv8>

GW-OW: Modellkopplungsmöglichkeiten (nach Furman 2008)



GW-OW Keine Kopplung

- Oberflächenwasser- und Grundwassermodell besitzen keine Möglichkeit Interaktionen mit dem jeweils andere Kompartiment abzubilden
- Beispiele aus der „Natur“ für diesen Ansatz:



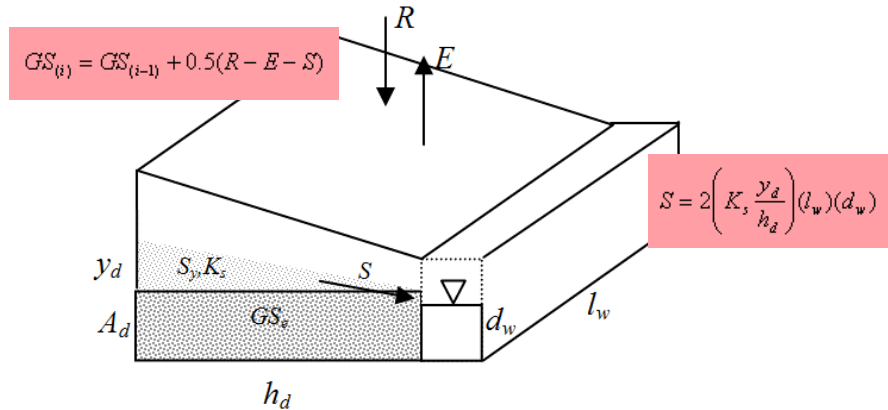
Mittellandkanaluntertunnelung Elbeu [1]



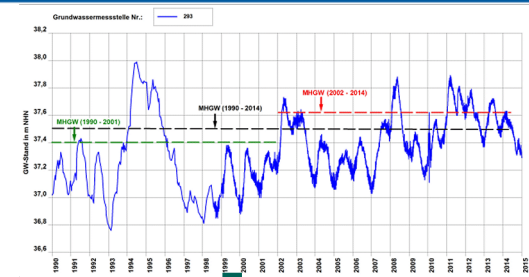
„Bachlauf“ in Los Angeles [2]

I) degenerierte Kopplung

- Simulation des jeweils anderen hydrologischen Kompartiments über vereinfachte analytische Gleichungen, Transferfunktionen etc.
- Keine Informationen über **Prozessvariablen des jeweiligen anderen Kompartimentenmodells** notwendig



Grundwasserkeil in WEAP[1]



Transferfunktion
 $q_{lat}=f(h(t))$

```

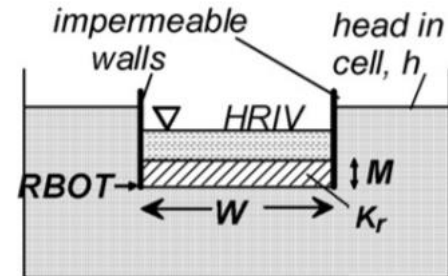
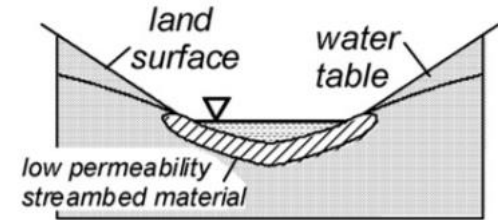
SOURCE {
  EXTERNAL_SOURCE {
    name      = Hauptgraben
    cross_section = CS267
    type      = qlateral
    side      = right
    file      = Hauptgraben.dat
  }
}
    
```

Lateraler Grundwasserstrom als Zeitreihe

Grund- Flusswasserinteraktion; Sequentielle/Iterative Kopplung

- „Leakage Condition“:
- $K \frac{\partial h(x,t)}{\partial n} = q_n(x) = c(h_0(x) - h(x))$
- h_0 könnte das Hydraulische Potential in einem Fluss oder einem See sein
- c ist ein Proportionalitätsfaktor („hydraulic conductance“), wovon hängt er ab?
- $C_{RIV} = cW = K_G LW / M$
 - K_G =hydraulische Leitfähigkeit der Kolmationsschicht zwischen Wasserkörper und Aquifer
 - L = Länge des Gewässerabschnitts
 - W = Breite des Flusses
 - M = Dicke der Kolmationsschicht

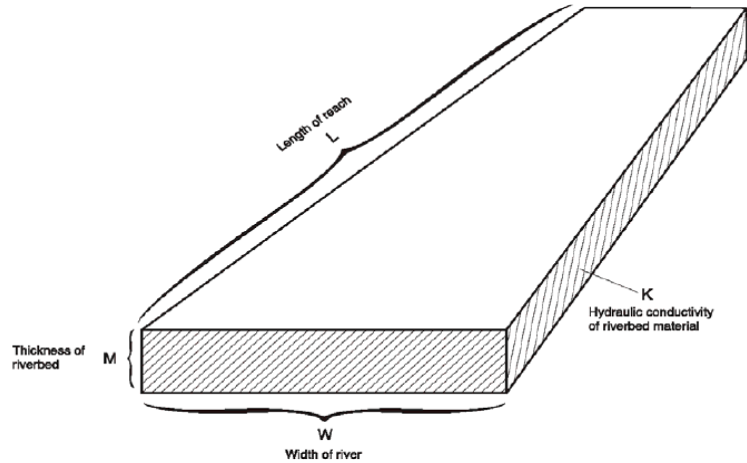
MODFLOW Implementation



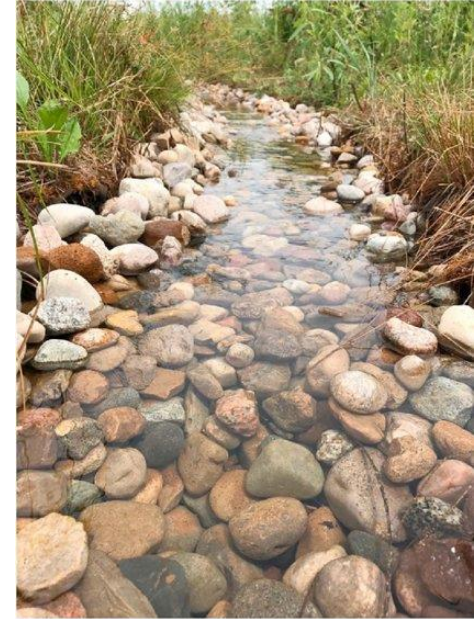
Rushton 2007

Randbedingungen: Grund- Flusswasserinteraktion

- Bitte beachten: $C = C(x, t)$



Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 6-A16.



•DOI: [10.1029/2018JG004684](https://doi.org/10.1029/2018JG004684)

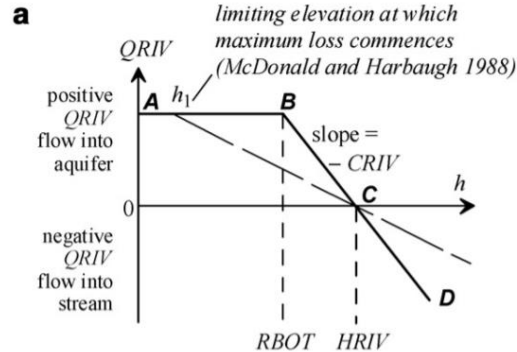
<https://tinyurl.com/4r5andta>

84

www.ufz.de

Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion

- $$Q_{RIV}(x) = C_{RIV}(h_{RIV}(x) - h(x))$$



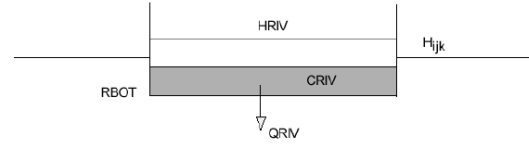
$$CRIV = KrLW/M$$

$$Q_{RIV} = CRIV (HRIV - RBOT), h \leq RBOT$$

$$Q_{RIV} = CRIV (HRIV - h), h > RBOT$$

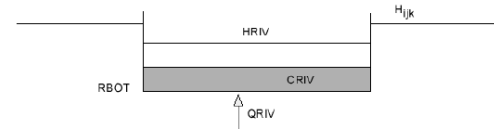
Rushton 2007

Hydraulisches Potential unter Flusswasserstand



$$Q_{RIV} = CRIV * (HRIV - H_{ijk})$$

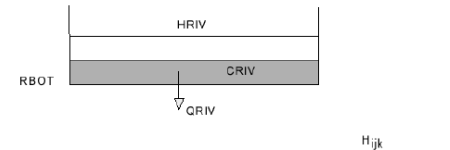
Hydraulisches Potential über Flusswasserstand



$$Q_{RIV} = CRIV * (HRIV - H_{ijk})$$

(-Q signifies flow out of cell)

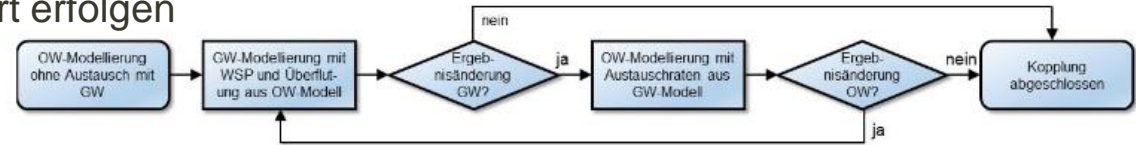
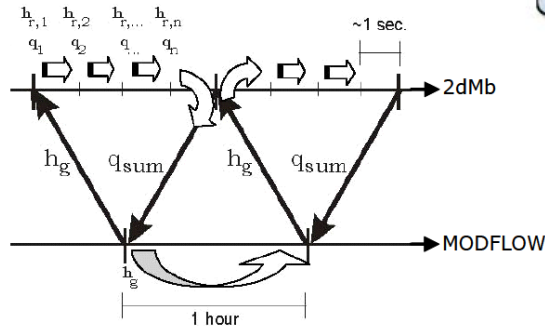
Hydraulisches Potential unter Flussbett (entkoppelt)
 → konstanter Grundwassermengenstrom über den Rand



Beachte: q [m/s]; Q [m³/s]

II) Sequentielle/Iterative Kopplung

- Bei einer iterativen Kopplung werden je nach Zeitschritt/Iterationsschema die Prozessvariablen Neuberechnet
- Kopplungsstrategien sind der Situation anzupassen und können entweder speicher- (z.B. über OpenMI) oder dateibasiert erfolgen



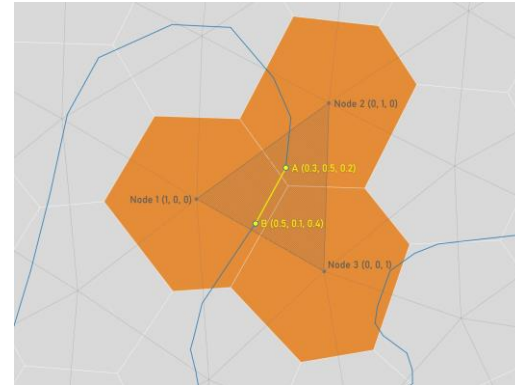
Iterative Stationäre Kopplung [2]

- Step 1: (a) Set $k = 0$, and fix $H^{(k)}$ on Γ ,
 : (b) Solve for $\Phi^{(k+1)} = \Phi(X, H^{(k)})$ on Ω ,
 : (c) Compute $D^{(k+1)} = D(S; \Phi^{(k+1)}, H^{(k)})$ on Γ ,
- Step 2: (a) Fix $D^{(k+1)} = D(S; \Phi^{(k+1)}, H^{(k)})$ on Γ ,
 : (b) Compute $H^{(k+1)} = H^{(k+1)}(S; D^{(k+1)})$ on Γ ,
- Step 3: (a) If $(\|H^{(k+1)} - H^{(k)}\| / \|H^{(k+1)}\|) < tol \rightarrow \text{end}$,
 : (b) Otherwise set $k = k + 1$, and return to (1b)

Kopplung mit unterschiedlichen Zeitschrittweiten [1]

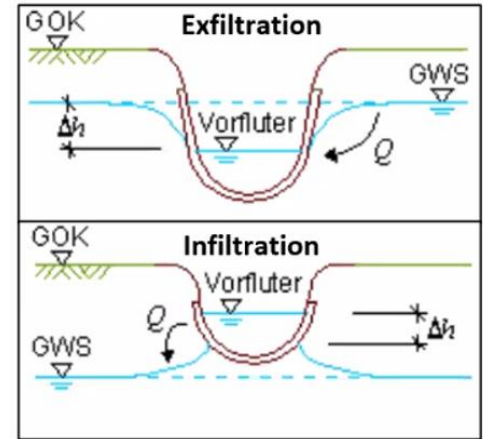
II) Sequentielle/iterative Kopplung

- Grundregel: Wenn die Oberflächengewässer „groß“ sind und die betrachteten Flussabschnitte „klein“ reicht eine einseitige Kopplung
- Für Kopplung werden vom Oberflächenwassermodell mindestens benötigt (bedenke $q_{\text{austausch}} = C \cdot \Delta H$):
 - Exportierbare Informationen über die Wasserstände im Flussnetzwerk in **m.ü.N!**, also $h=f(X,t)$
 - Informationen über die Durchlässigkeit der Gewässersohle
 - Informationen zu Gewässerbreiten
 - Transferfunktion zum Massenausgleich über unterschiedliche Gitter
- Für die Wasserstandsberechnung könnte ggf. ein 1D hydrodynamisches Modell (z.B. HECRAS, BASEMENT) zwischen WBaIMo und dem GW-Modell geschaltet werden?!



II) Sequentielle/iterative Kopplung

- Durch Modellkopplung kann die Wasserbilanzierung verbessert werden
- Flussabschnitte mit Infiltration und Exfiltration können identifiziert und Wasserqualitätsaspekte damit analysiert werden
- Es sind nur **eingeschränkt** Aussagen über hyporheische Fließpfade und Alter/Zusammensetzung des vorfluternahen Grundwassers möglich → Dies kann jedoch vollständige Kopplung leisten
- Es ist **keine** Bilanzierung des Zwischenabflusses und des Oberflächenabflusses möglich → Einbindung hydrologischer Modelle (z.B. ArcEGMO) oder Modellen zur Vadosen Zone

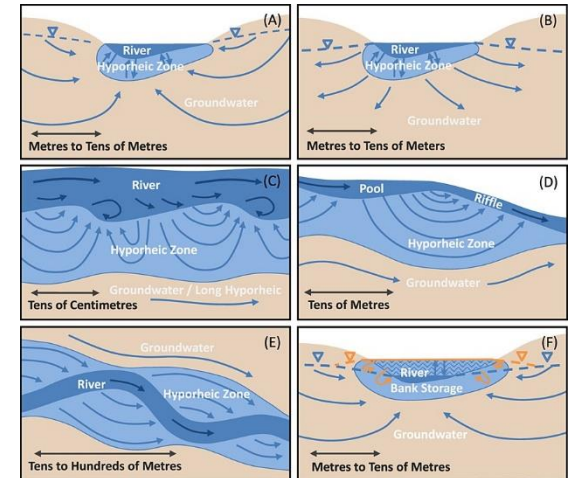


III) Vollständige Kopplung

- Die Gleichungen für Strömung in Fließgewässern (Flachwassergleichung) und im Grundwasser (Darcy Gleichung/Richards Gleichung) können direkt in einer Matrix gelöst werden
- Dabei werden Annahmen am Kompartimentenübergang getroffen, zum Beispiel ein Kontinuum der Geschwindigkeiten, Gradienten, etc.
- Die gemeinsame Lösung der Gleichungen ist sehr rechenintensiv, ist aber auch in 3D möglich
- Die korrekte Abbildung des hydrologischen Kontinuums ermöglicht die Beschreibung von Prozessen wie hyporheischen Fließpfaden, lokaler Speicherung/ Durchmischung in der Flussaue, etc.

$$u_{PM} = u_{FF}$$

$$\left(\frac{du}{dn}\right)_{PM} = \left(\frac{du}{dn}\right)_{FF}$$



Auswahl aus Softwarepaketen zur OW-GW Kopplung

Software Name	Reference Paper(s)	Licensing	Coupling	GW scheme	SW scheme	UZ-Scheme
HydroGeoSphere	(Brunner & Simmons, 2012; Harter & Morel-Seytoux, 2013; Park et al., 2009)	Commercial	Full	3D CVFE	2D	3D Richards'
ParFlow	(Ashby & Falgout, 1996; Kollet & Maxwell, 2006)	Open Source	Full	3D FV	2D	3D Richards'
PIHM	(Qu & Duffy, 2007)	Open Source	Full	2D FV	1D	1D Richards'
FIHM	(Kumar et al., 2009)	Unknown	Full	3D CVFE	2D	3D Richards'
SHUD	(Shu et al., 2020)	Open Source	Full	2D FV	1D	1D Richards'
InHM	(VanderKwaak, 1999)	Unknown	Full	3D CVFE	2D	3D Richards'
MODHMS	(Panday & Huyakorn, 2004)	Commercial	Full/Iterative Loose*	MODFLOW ¹	1D	3D Richards'
MIKE SHE	(Hughes & Liu, 2008; Refsgaard & Storm, 1995)	Commercial	Loose	3D FD/ Lumped	2D	1D/2-layer water balance
GSFLOW	(Markstrom et al., 2008)	Open Source	Iterative Loose	MODFLOW ¹	PRMS (1D)	1D Kinetic Wave
IWFM	(Dogrul et al., 2018; Harter & Morel-Seytoux, 2013)	Open Source	Iterative Loose	3D FE/FD ⁴	1D Kinetic Wave	1D
SWR-MODFLOW	(Hughes et al., 2015)	Open Source	Iterative Loose	MODFLOW ¹	SWR (1D, 2D)	1D Kinetic Wave ²
SWAT-MODFLOW**	(Bailey et al., 2016)	Open Source	Loose	MODFLOW ¹	SWAT	SWAT/1D Kinetic Wave ³
VIC-MODFLOW	(Sridhar et al., 2018)	Unknown	Loose	MODFLOW ¹	VIC	None
MODBRANCH	(Swain & Wexler, 1996)	Open Source	Iterative Loose	MODFLOW ¹	1D Saint-Venant	None

* MODHMS supports multiple coupling types.

** Several different authors have coupled SWAT to MODFLOW (Kim et al., 2008; Sophocleous & Perkins, 2000). Included here is a recent, open-source development.

¹ MODFLOW uses a 3D FV scheme.

² Via MODFLOW UZF package (Niswonger et al., 2001).

³ Recharge is calculated by SWAT, MODFLOW

Zusammenfassung von Scantlebury (2021) [1]

Randbedingungen Fluss-Grundwasserinteraktion: Exkurs Messung

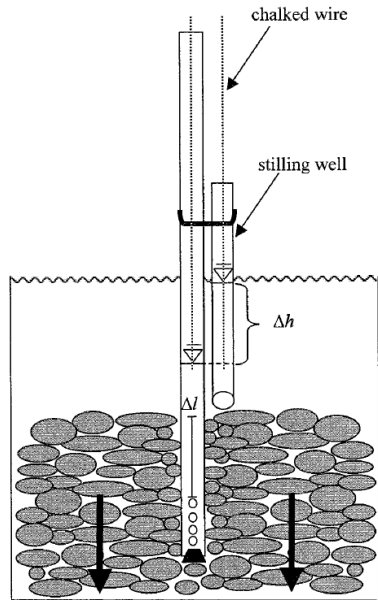
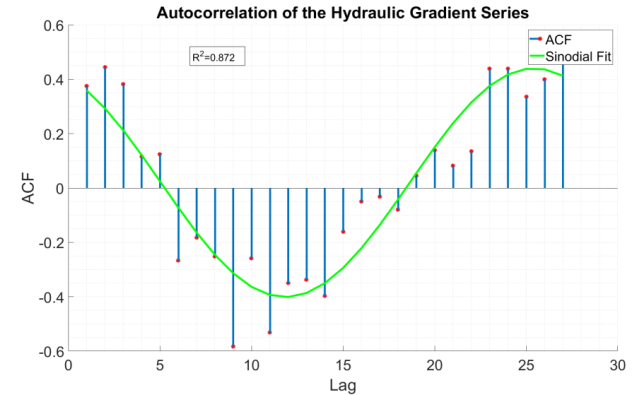
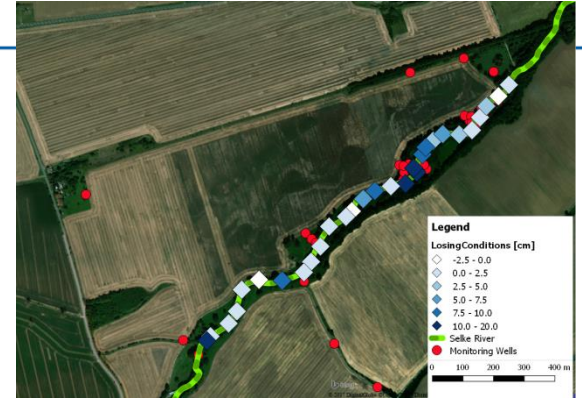
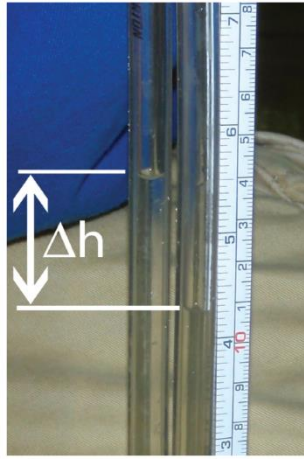
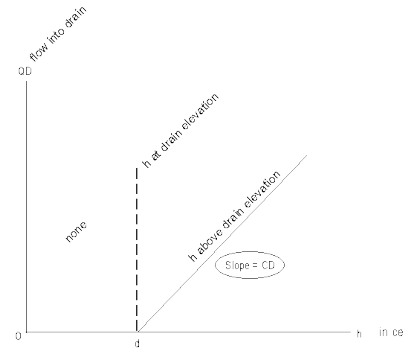


FIGURE 3.—Diagram of the stilling well and chalked wire setup used to measure the water level inside a minipiezometer and the stream water surface level at a site where downwelling occurs (see Figure 1 for definitions and additional explanation).



Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion: Drainagen, Quellen

- Es kann sinnvoll sein, nur Strömung aus dem GW System heraus zu erlauben
- $q(x) = 0$ wenn $h(x) < d$ oder
- $q(x) = c(h(x) - d)$ wenn $h(x) > d$
- „d“ ist das hydraulische Potential (=Höhe über Datum) des Entwässerungsgrabens
- Auch geeignet für periodische Flüsse und Quellen (dann aber als $Q(x)$ und als Quellterm



<https://tinyurl.com/2v8ej377>



<https://tinyurl.com/m494jees>



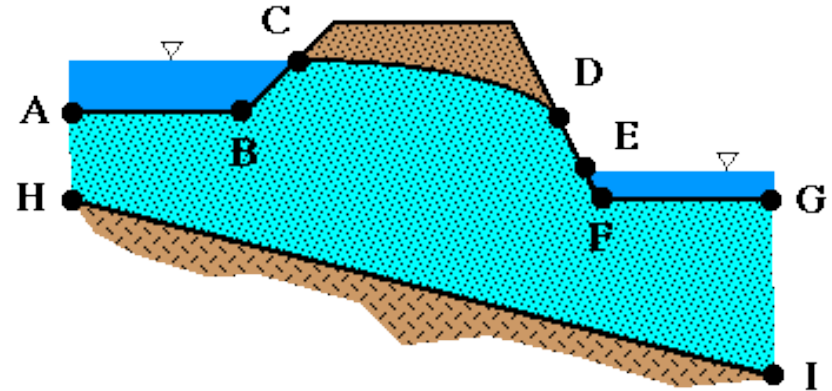
<https://tinyurl.com/7y4u74jr>



<https://tinyurl.com/dcwjwsdb>

Randbedingungen

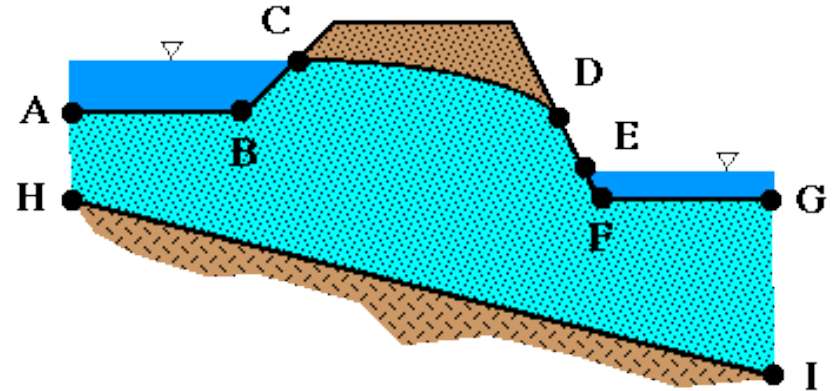
- Welche Randbedingungen für welche Randsegmente?
- AH
- ABC:
- CD:
- DE:
- EFG:
- GI:
- IH:



<https://tinyurl.com/u4mm2dxs>

Randbedingungen

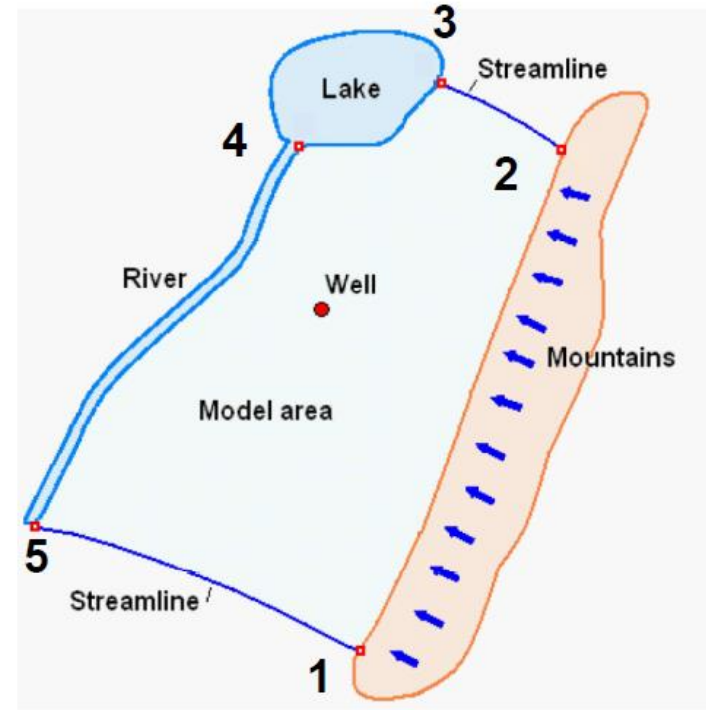
- Welche Randbedingungen für welche Randsegmente?
- AH Dirichlet
- ABC: Dirichlet/Robin
- CD: Neumann (GW Neubildung?)
- DE: Dirichlet (Wasserdruck=Luftdruck)
- EFG: Dirichlet/Robin
- GI: Dirichlet
- IH: Neumann (No-Flow)



<https://tinyurl.com/u4mm2dxs>

Randbedingungen

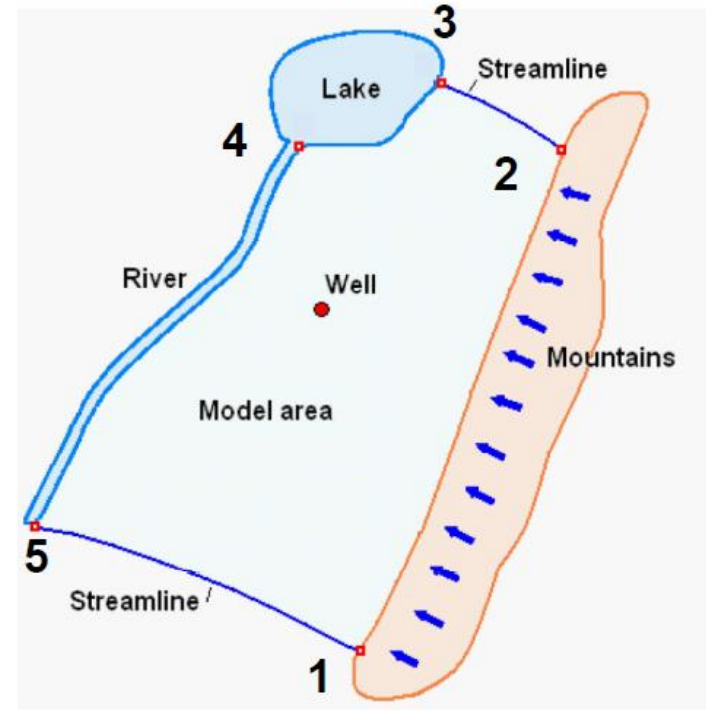
- 1-2:
- 2-3:
- 5:1:
- 3:4:
- 4:5:



Engelhardt, TU Berlin

Randbedingungen

- 1-2: Neumann
- 2-3: Neumann (Zero-Flux)
- 5:1: Neumann (Zero-Flux)
- 3:4 Dirichlet
- 4:5 Robin



Engelhardt, TU Berlin

Initialbedingungen

- Erinnern wir uns an **die Vorlesung von Professor Kolditz**
- Es ist notwendig dem Modell Informationen über den Initialzustand zu übergeben : $h(x, t = t_0) = h_0(x)$
- Die Lösung passt sich normalerweise nach einer Einschwingzeit an das, durch die Randbedingungen und die Mathematik beschriebene Problem an, unabhängig der gewählten Initialbedingungen.
- Für Transiente Probleme kann u.U. die stationäre Lösung als Initialbedingung genutzt werden
- Initialbedingungen können genutzt werden um ein Problem in zeitlich verschobene Teilprobleme zu zerlegen (z.B. Tracer Injektions und Verteilungsphase, Pumpregimeänderungen)

FDM - explizites Schema

$$S_{i,j} \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} - K_{i,j}^x \frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} - K_{i,j}^y \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} = Q_{i,j} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} &= u_{i,j}^n \\ &+ \frac{K_{i,j}^x \Delta t}{S_{i,j} \Delta x^2} u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n \\ &+ \frac{K_{i,j}^y \Delta t}{S_{i,j} \Delta y^2} u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n \\ &+ \frac{Q_{i,j} \Delta t}{S_{i,j}} \end{aligned} \quad (9)$$

V09: Finite-Differenzen-Methode // 19.06.2020

Modellsenken und Modellquellen

$$S \frac{\partial H}{\partial t} - \text{div}[K \text{grad } H] - Q_V = 0$$

- Q_V =Senken/Quellenterm
- Physische Entitäten für Senken/Quellen sind vor allem:
 - Klimatische Grundwasserneubildung (und Teilkomponenten wie Niederschlag/Verdunstung)
 - Extraktions/Infiltrationsbrunnen
 - Versickerungsanlagen (Teiche etc)

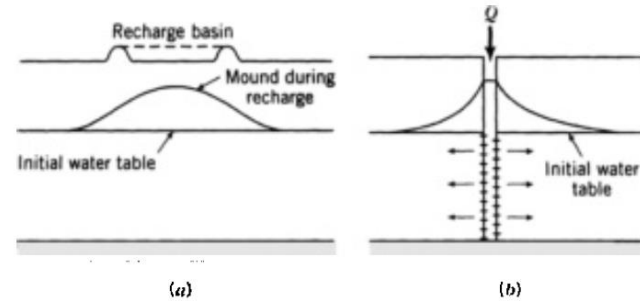


Figure 7.3 Schematic illustration of recharge through ba-

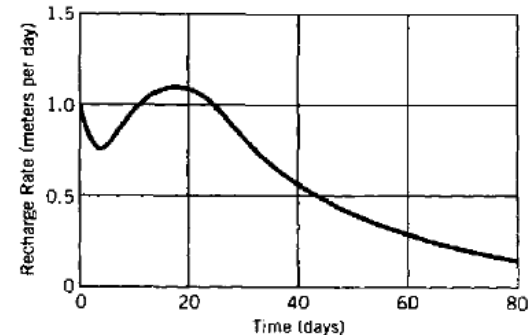
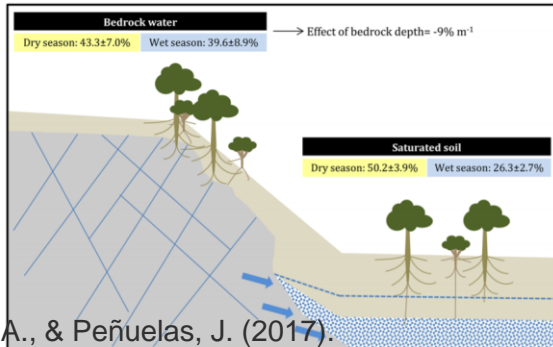


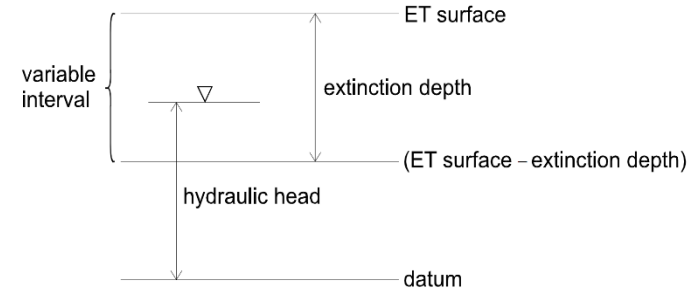
Figure 7.5 Time variation of recharge rate for water spreading on undisturbed soil (from Muckel, 1959).

Senkterm: Evapotranspiration

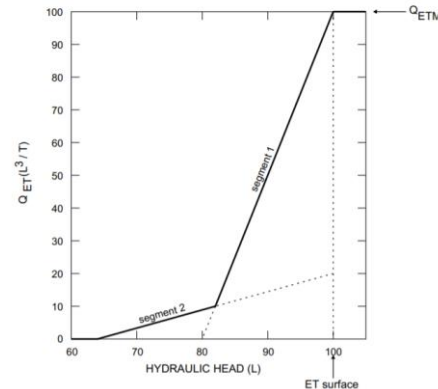
- Evapotranspiration aus dem GWL findet bis zu einer bestimmten Tiefe statt
- Hydraulisches Potential erreicht Geländehöhe bedeutet maximale EVT
- Max. Bodenverdunstungstiefe (ET) ~ 50cm (Maddrell, S., Neal, I., 2012)
- Anders bei Bepflanzung, max Tiefe ~ Wurzeltiefe + x cm



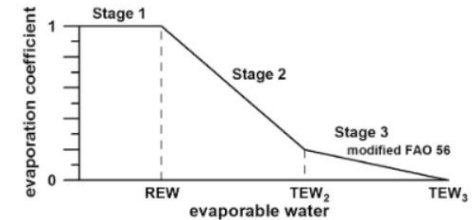
Barbeta, A., & Peñuelas, J. (2017).



$$Q_{ET} = Q_{ET}(x, z, t)$$



(b) three stages of evaporation coefficient

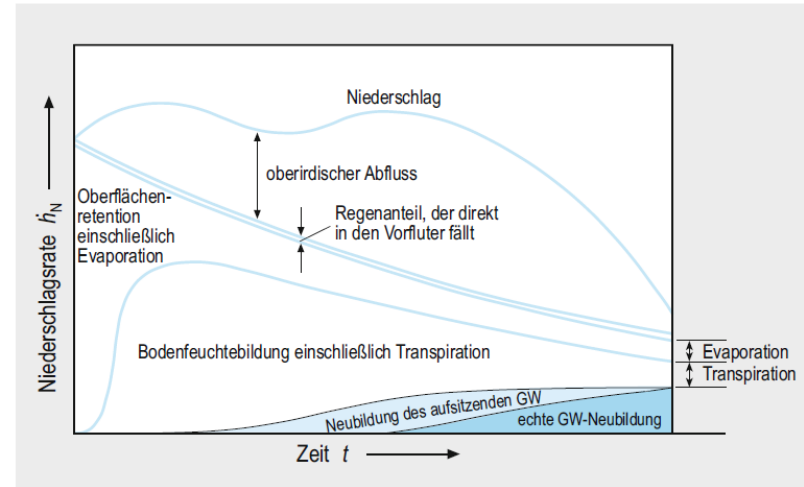
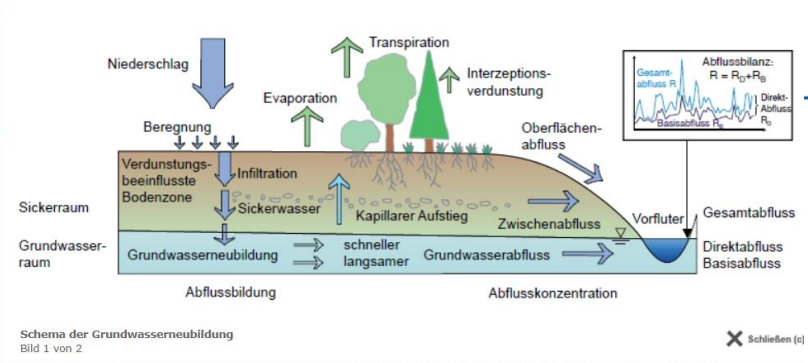


Mutziger, 2005

Quellterm Grundwasserneubildung

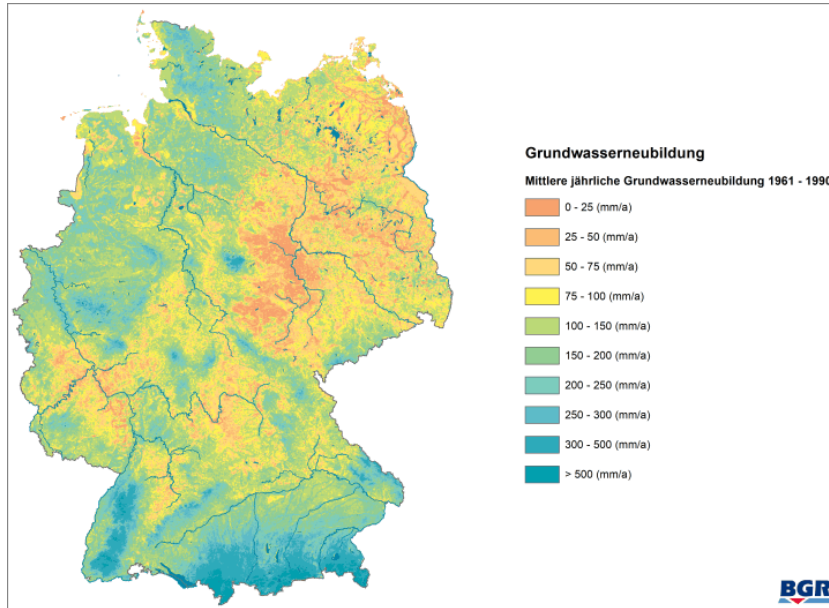
- **Infiltration** :Zugang von Wasser durch enge Hohlräume im Erdboden.
- **Perkolation**: Durchgang des Wassers durch den grundwasserfreien Sickerraum in den Grundwasserleiter
- **Grundwasserneubildung**: Gemäß DIN 4049-3 (1994) als "Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser" definiert und ist ein wichtiges Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen
- **Grundwasserneubildung** ist eine dynamische heterogene Größe, die komplexe bodenhydraulische Prozesse widerspiegelt

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$



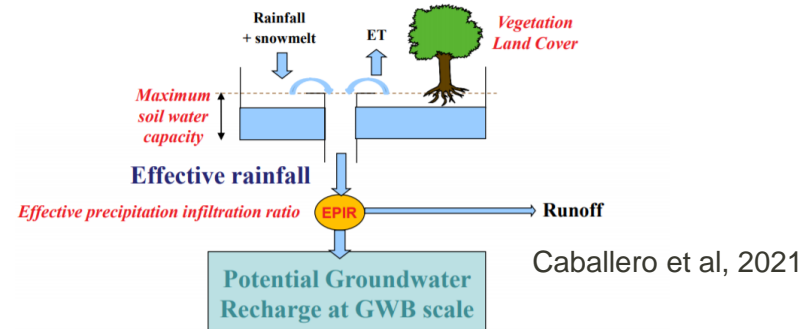
Quellterm Grundwasserneubildung : Bestimmung (Beispiele)

- Statische Karten nutzen

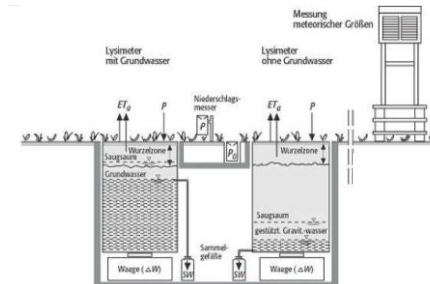


<https://tinyurl.com/ycm3yya8>

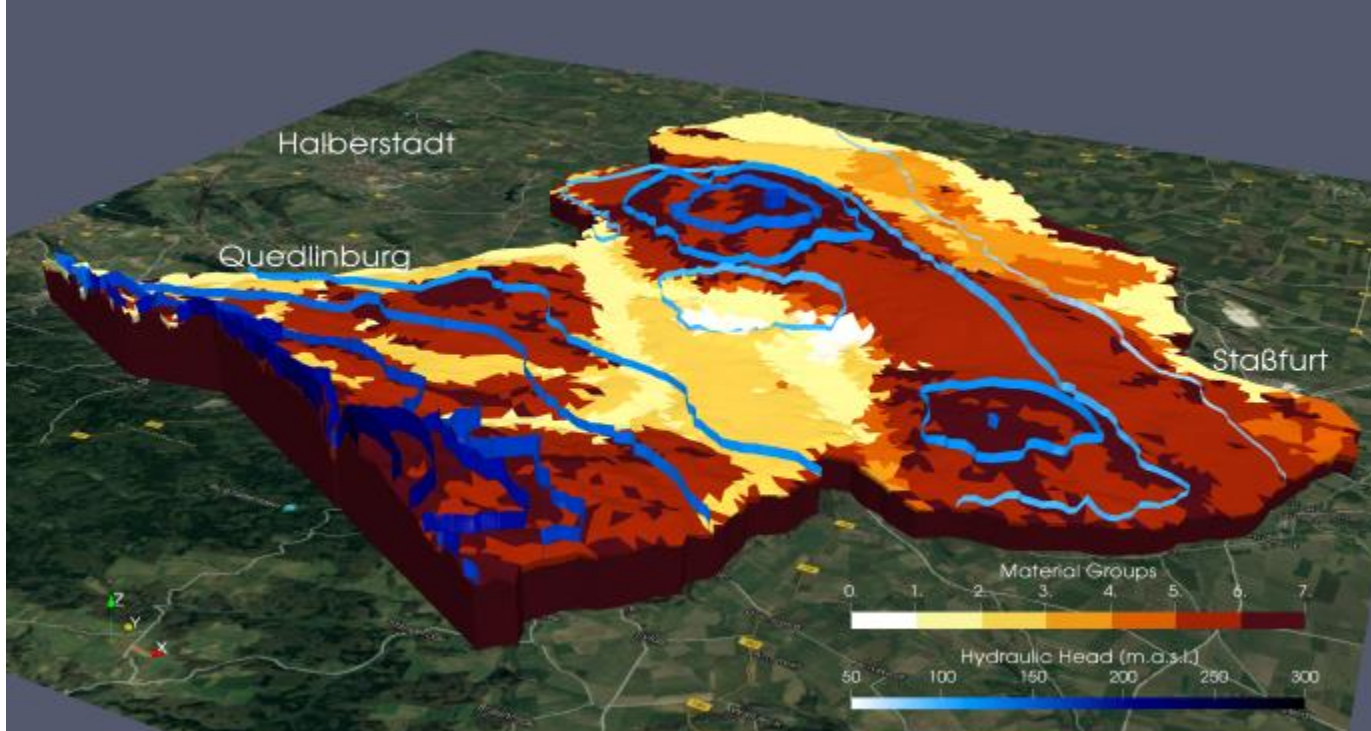
- Hydrologische Modellierung



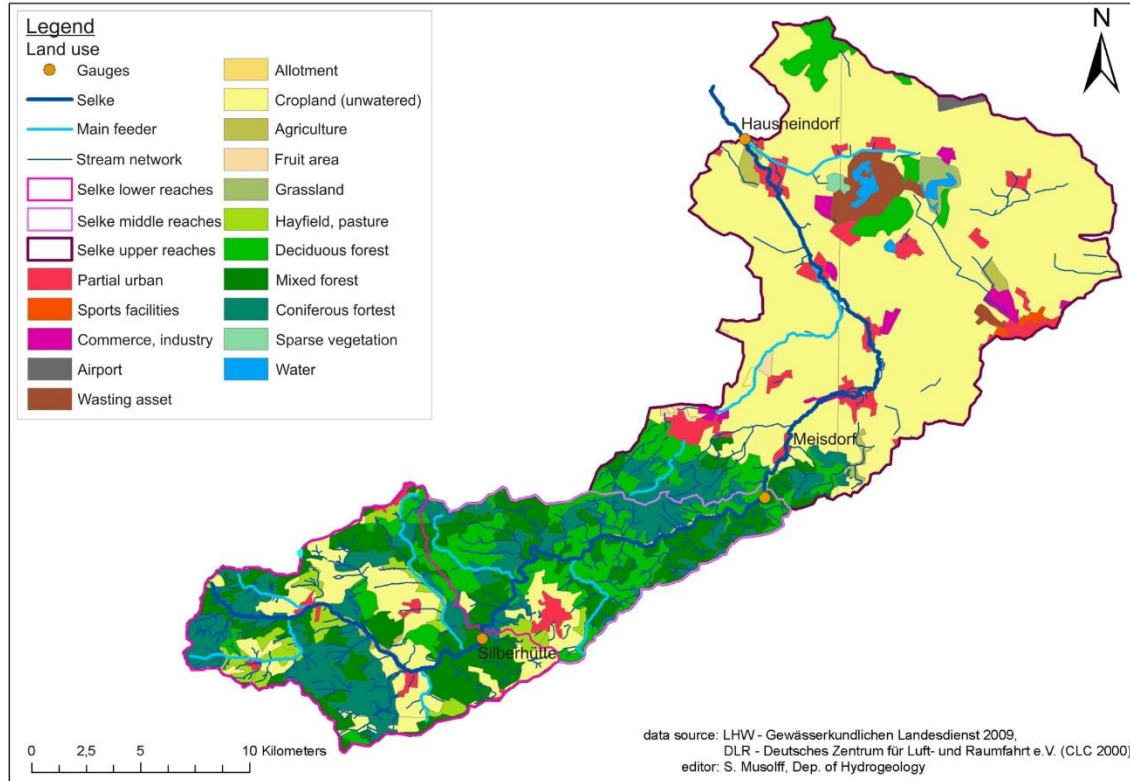
- Messung über Lysimeter



Grundwassermodellierung Selke

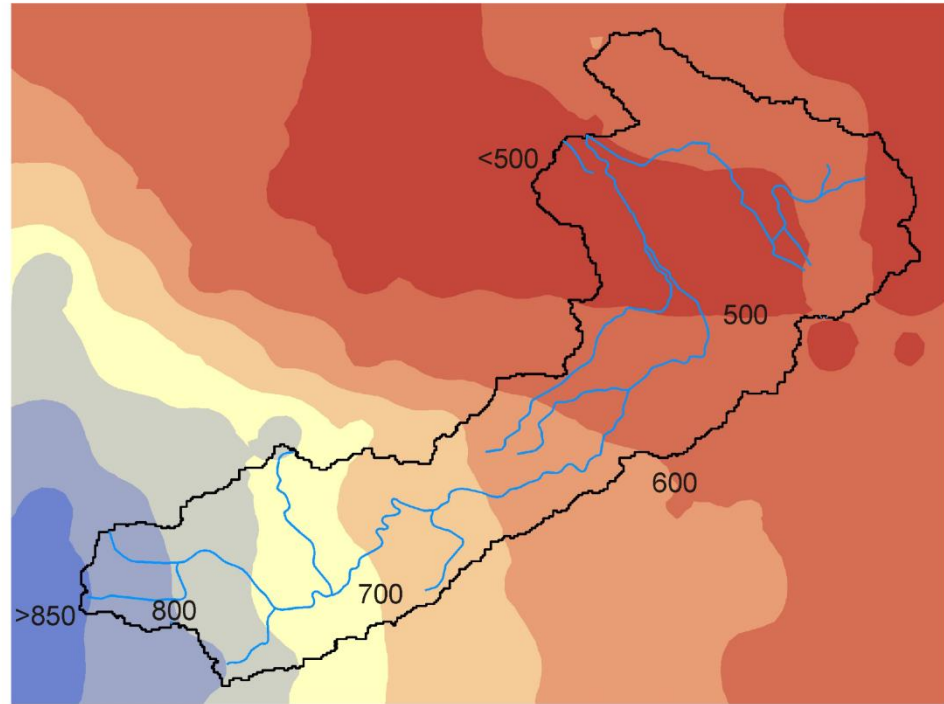


Selke Einzugsgebiet



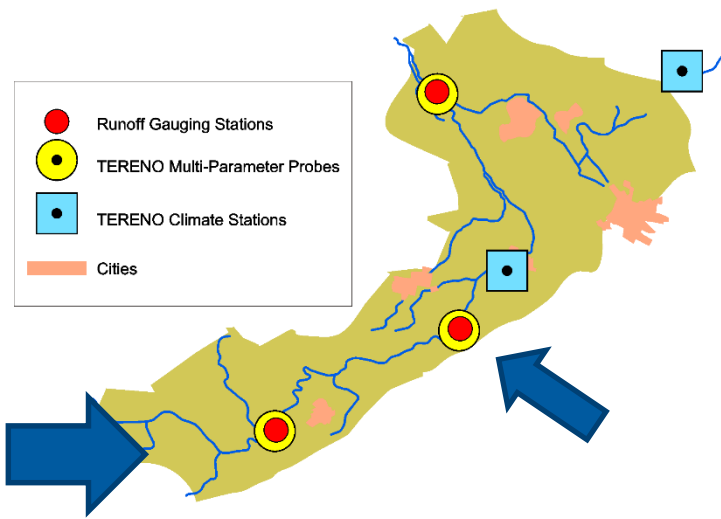
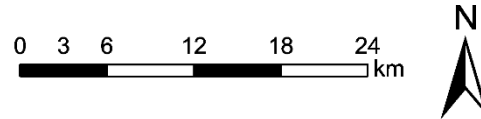
Selke Einzugsgebiet

- Jährliche Niederschlagsverteilung
- Harzschatten



N Trauth

Selke Einzugsgebiet Intensivmessgebiete

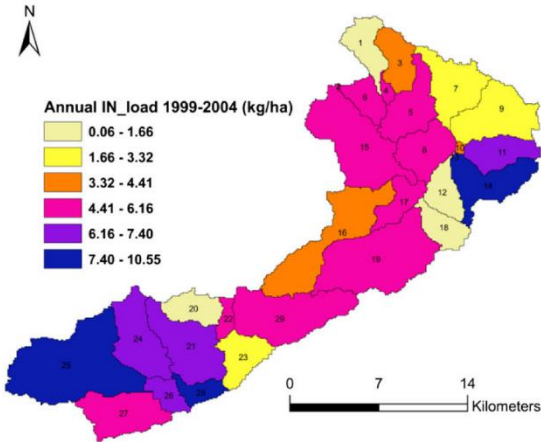


Catchment boundaries: Darstellung auf der Grundlage digitaler Daten des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, Gen.-Nr. LHW/5.1.3/14/2009

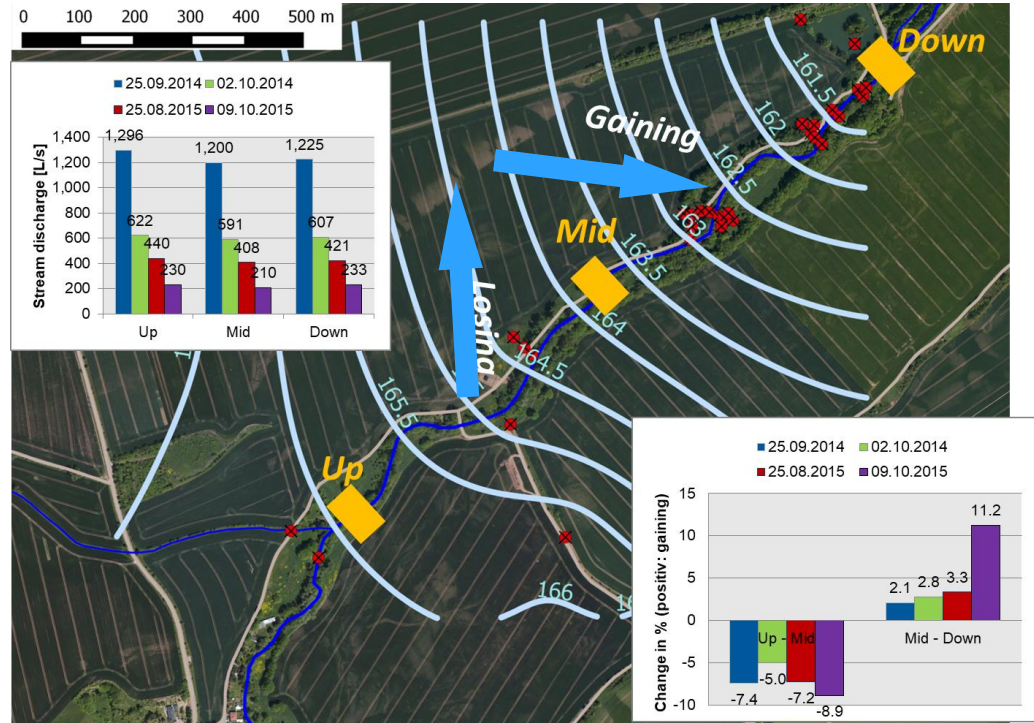
Topographic data: Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Selke Einzugsgebiet: GW: Flusswasseraustausch

- Im Flussnahbereich existieren alternierende Austauschbedingungen
- Einfluss auf Hydrochemie



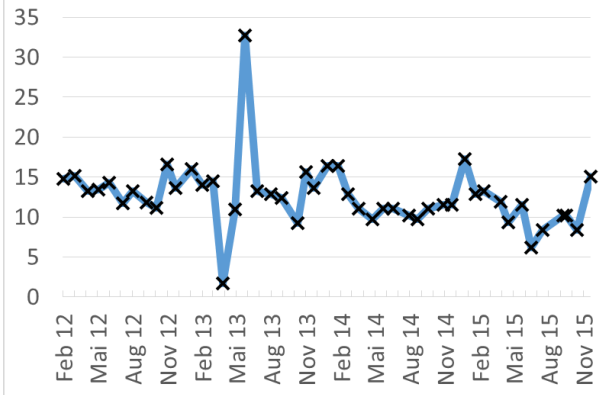
Jiang et al, 2014



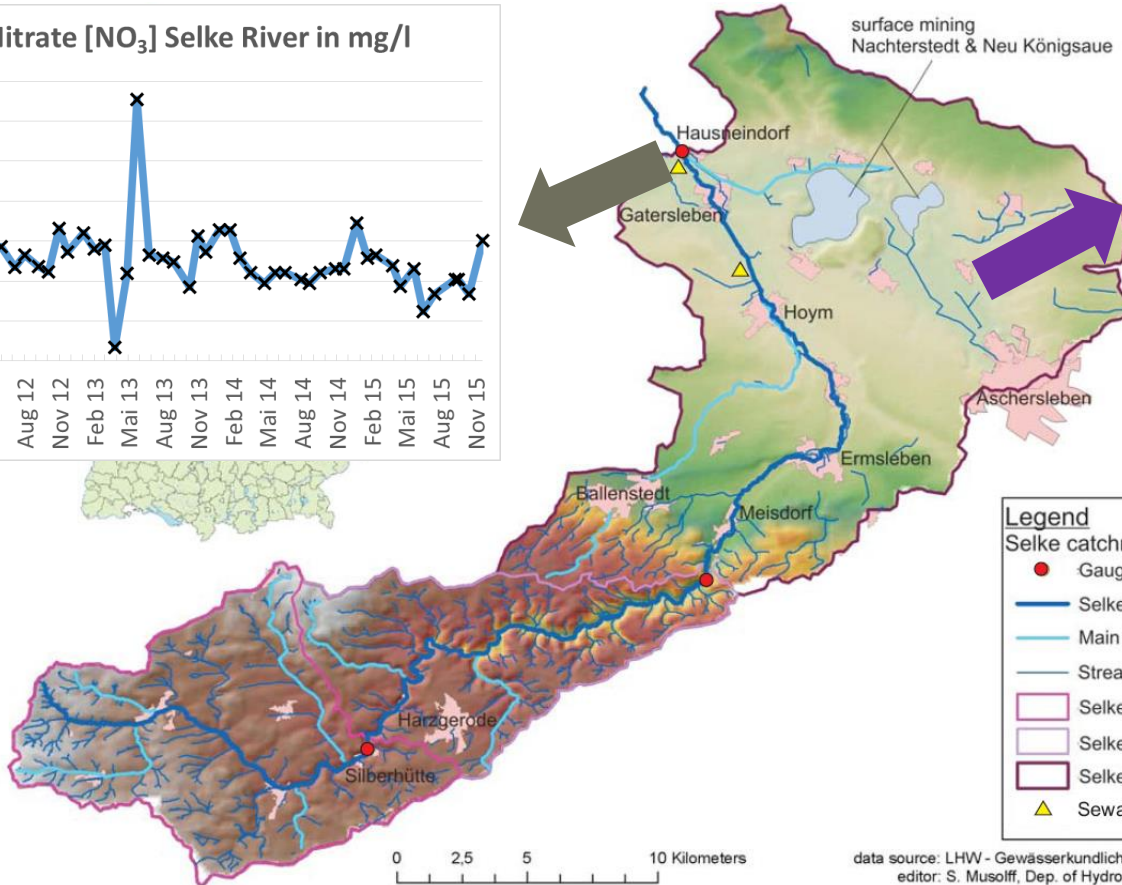
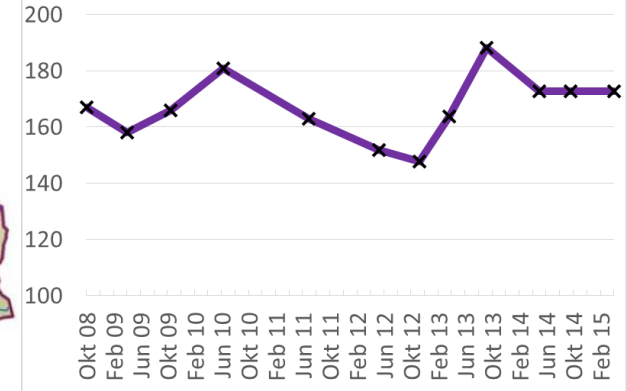
N Truth

Selkeinzugsgebiet: Nitratbelastung

Nitrate [NO₃] Selke River in mg/l



Nitrate [NO₃] Groundwater in mg/l



Legend

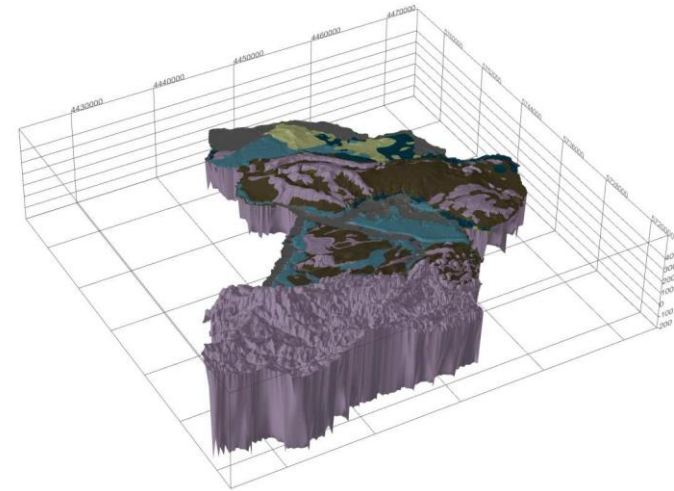
Selke catchment

- Gauges
- Selke
- Main feeder
- Stream network
- Selke lower reaches
- Selke middle reaches
- Selke upper reaches
- ▲ Sewage plant

data source: LHW - Gewässerkundlichen Landesdienst 2009
editor: S. Musloff, Dep. of Hydrogeology

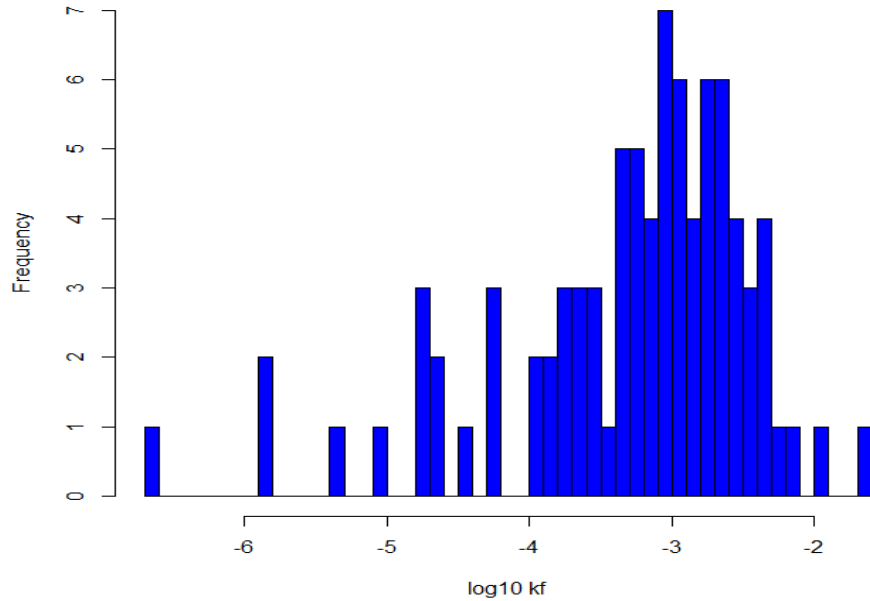
Selke Einzugsgebiet: Geologie

Geologische Einheiten	Kürzel
Mining (Tagebauareale Nachterstedt)	Mi
Niederterrasse (Saale) GWL1	NTGWL1
Mittelterrasse/ Hauptterrasse (Saale) GWL3	MTGWL3
Elsterzeitliche Grundmoräne	EGM
Hochterrasse (Elster) GWL5	HTGWL5
Quartär (ungegliedert)	Q
Tertiär (ungegliedert)	T
Prätertiär	PT

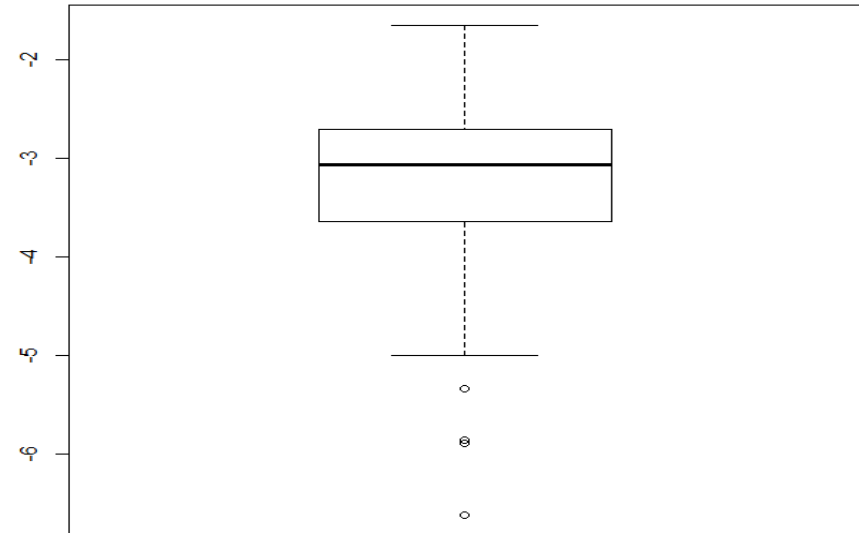


Hydraulische Leitfähigkeit (n=162)

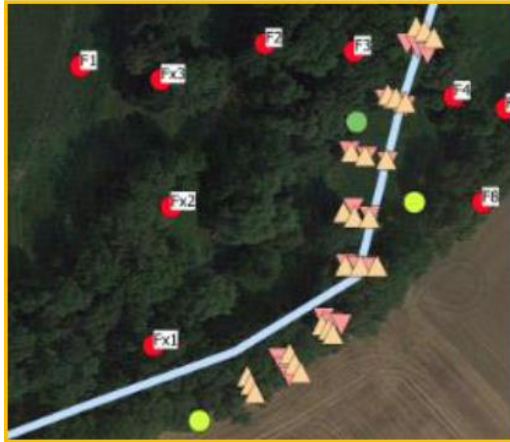
Distribution of kf values



Distribution of kf values

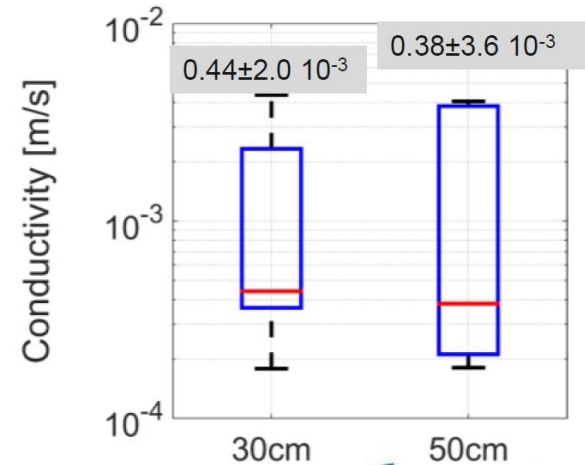
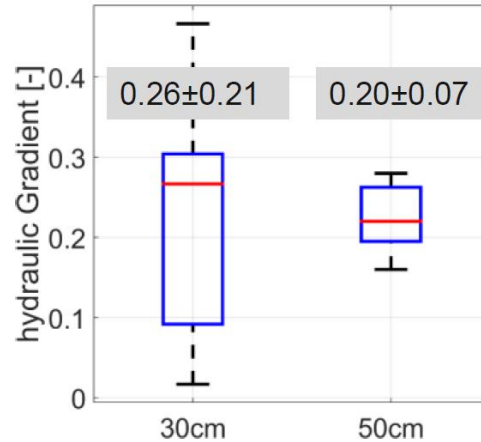


Selkemoell: Grenzschiht Hydraulische Leitfahigkeit



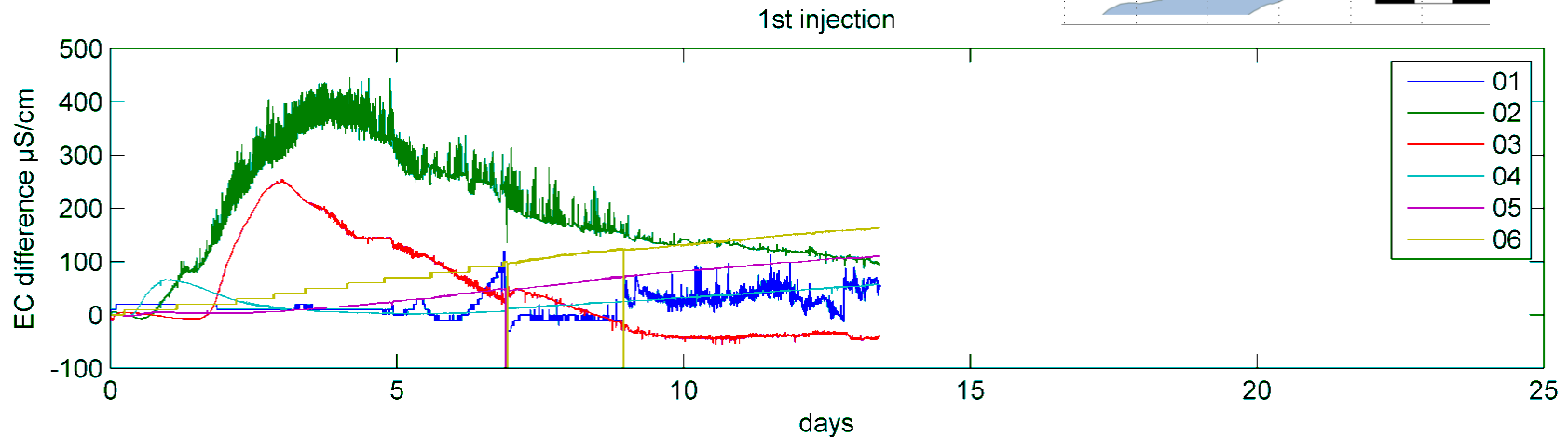
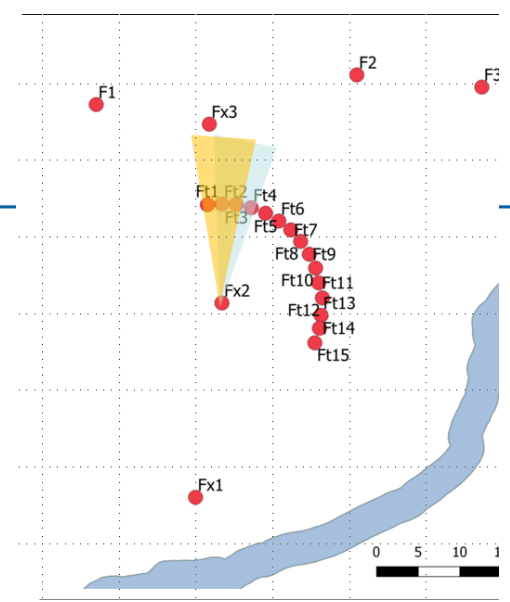
Messungen nur in einem Manderbogen!

Drilling Depth Impact



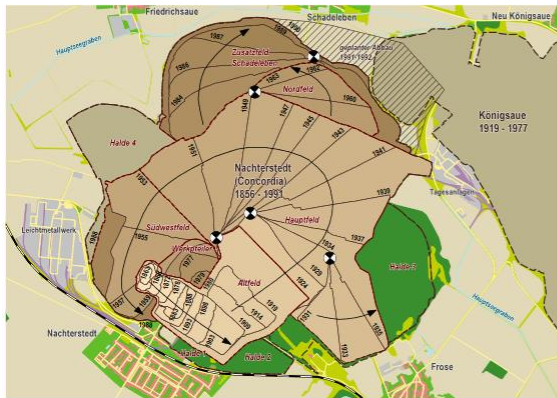
Porosität

- In der Meisdorfer Flussaue Porosität=0.3
(Gassen 2016, Petermann 2011)



Selke Modell Bergbaufolgen

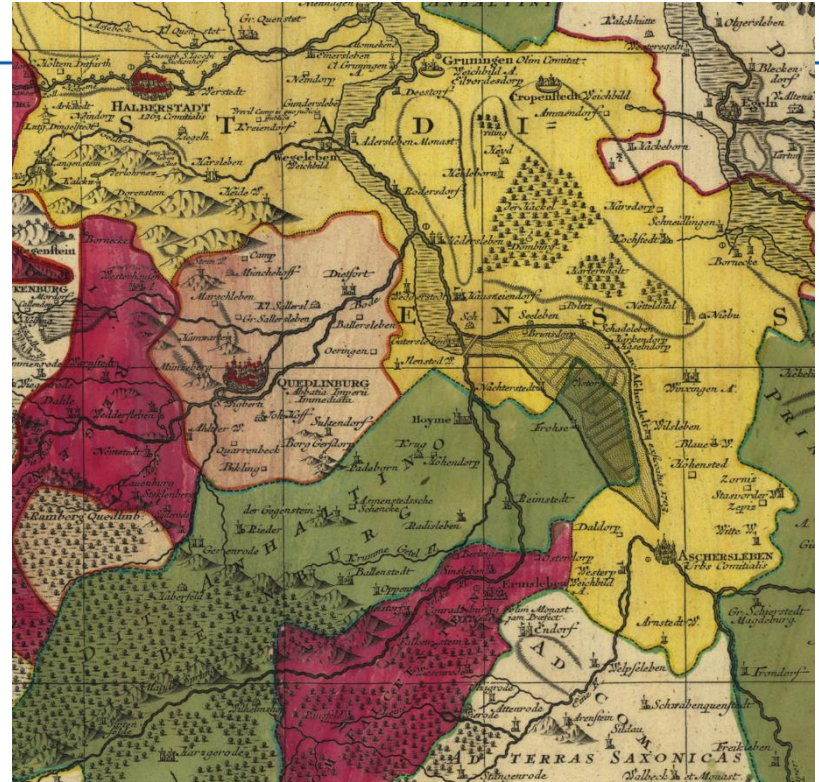
- Das Gebiet zwischen Harz und Hackel war historisch ein See und Sumpfgebiet (→Hohe Grundwasserstände)
- Braunkohlengewinnung im Tagebau von 1856 bis 1991
- Mächtigkeit der Flöze 30-50m



Tagebau Nachterstedt (1856-1991)

Landinanspruchnahme: 1.077 ha
 Flothkohleförderung: 174 Mio. t
 Abraumbewegung: 285 Mio. m³

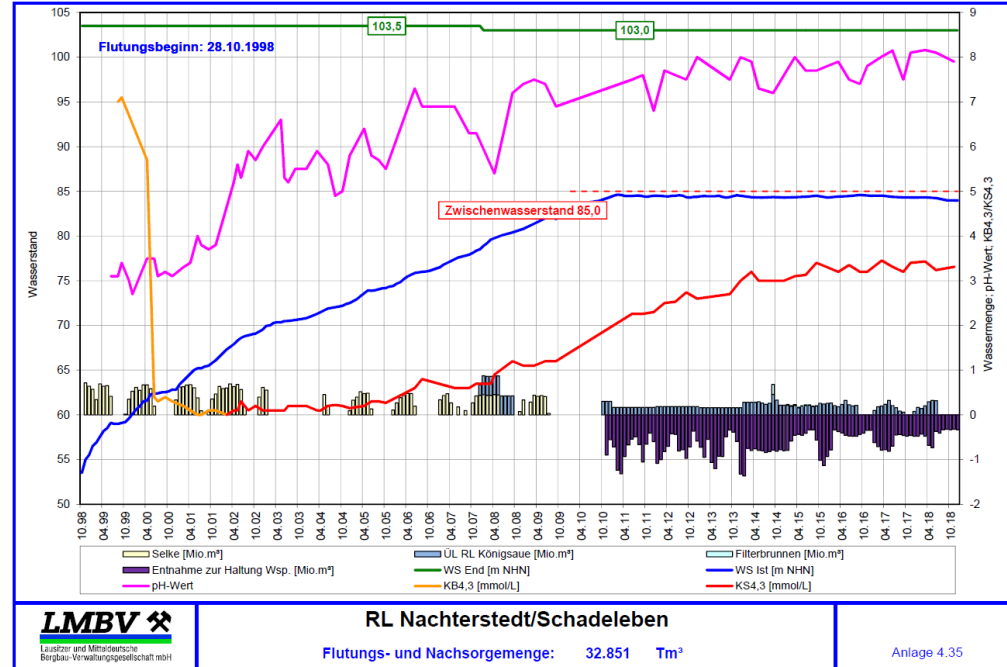
- Abbauschritte
- Drehpunkt
- ▨ Ursprünglich geplante Abbaufläche
- Sonstige Braunkohlenabbaufläche
- Waldfläche
- Sukzessionsfläche
- Grünfläche
- Landwirtschaftsfläche
- Verkehrsfläche
- Wasserfläche
- Siedlungsfläche
- Gewerbefläche
- Eisenbahnfläche
- Eisenbahn



Wikipedia

<https://tinyurl.com/4rbktav4>

Selke Modell Bergbau



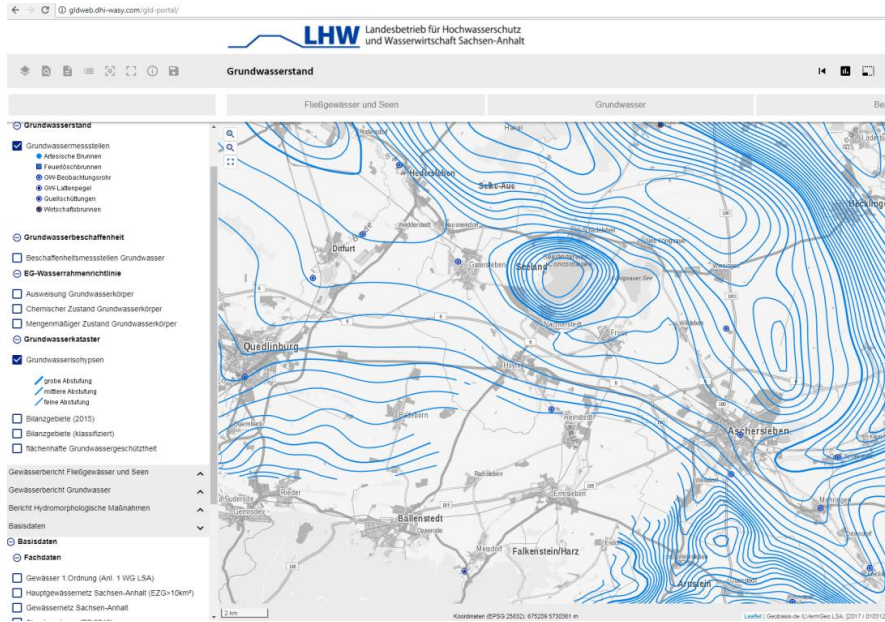
LMBV
 Lauritz und Mitteldorische
 Bergbau-Vereinigungsgesellschaft mbH

RL Nachterstedt/Schadeleben

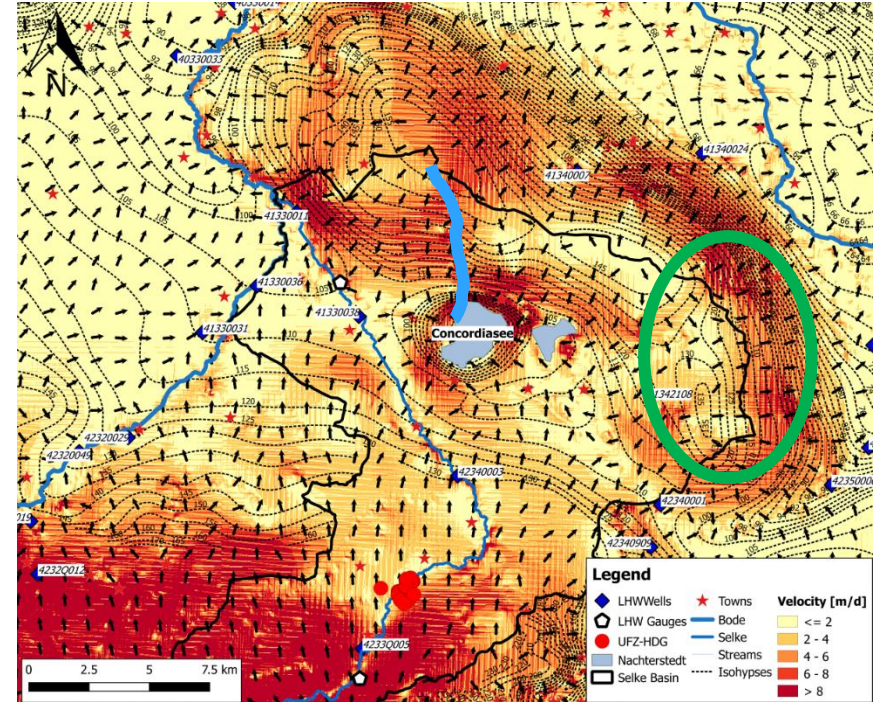
Flutungs- und Nachsorgemenge: 32.851 Tm³

Anlage 4.35

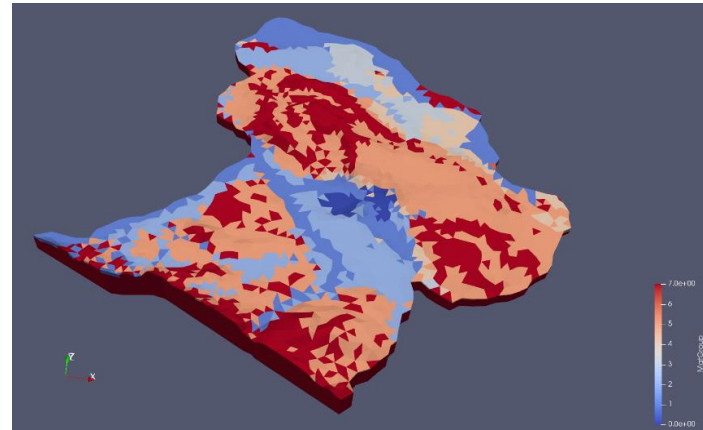
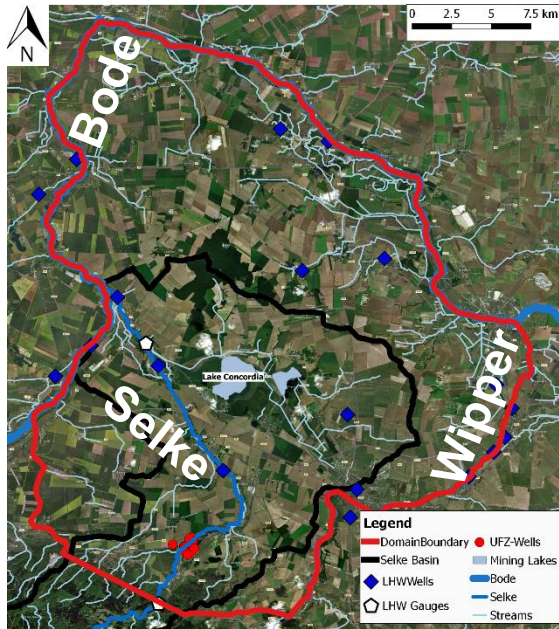
Selkemodel: Einfluss des Bergbaus



LHW Datenportal Sachsen-Anhalt

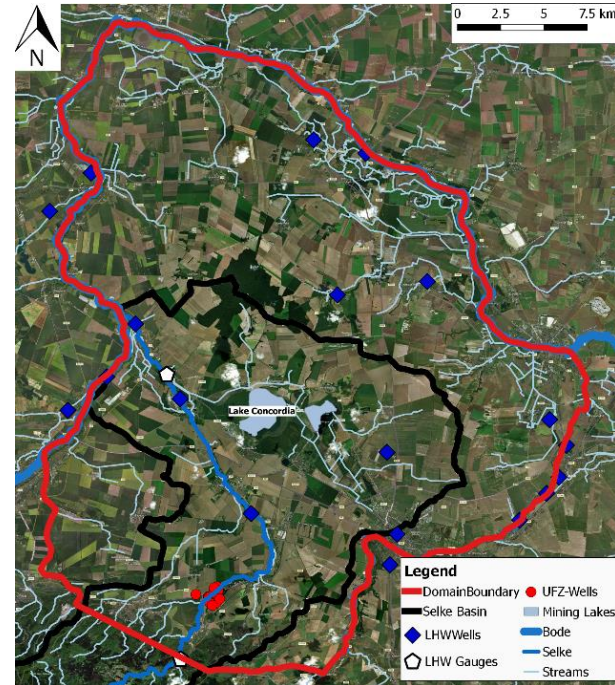


Selke Modell Abgrenzung



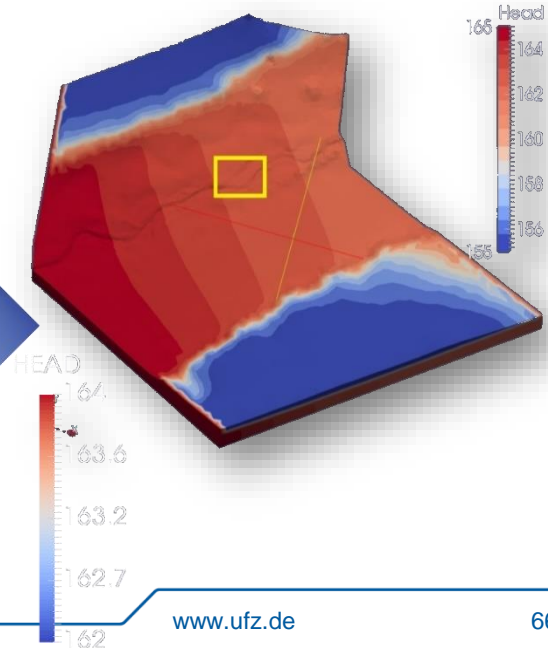
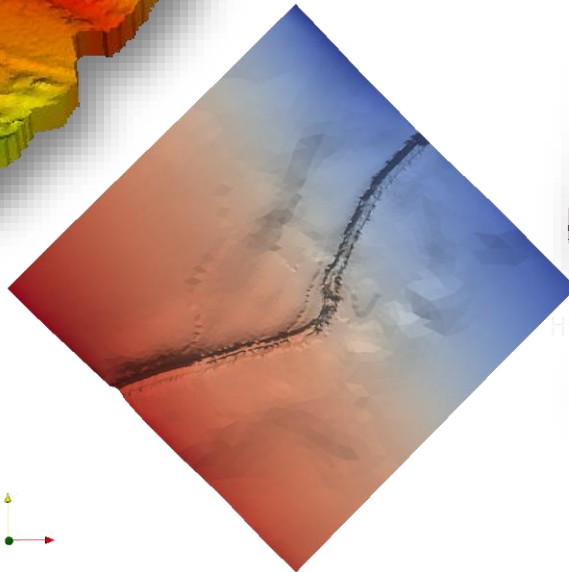
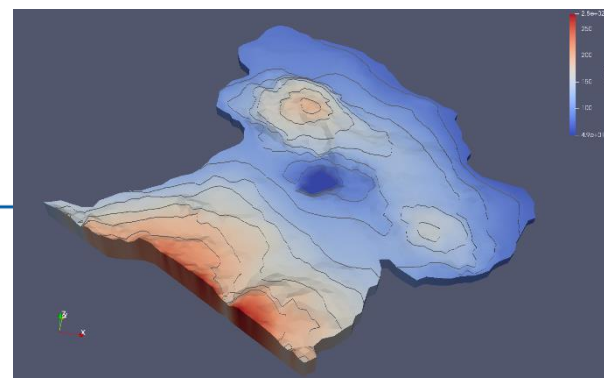
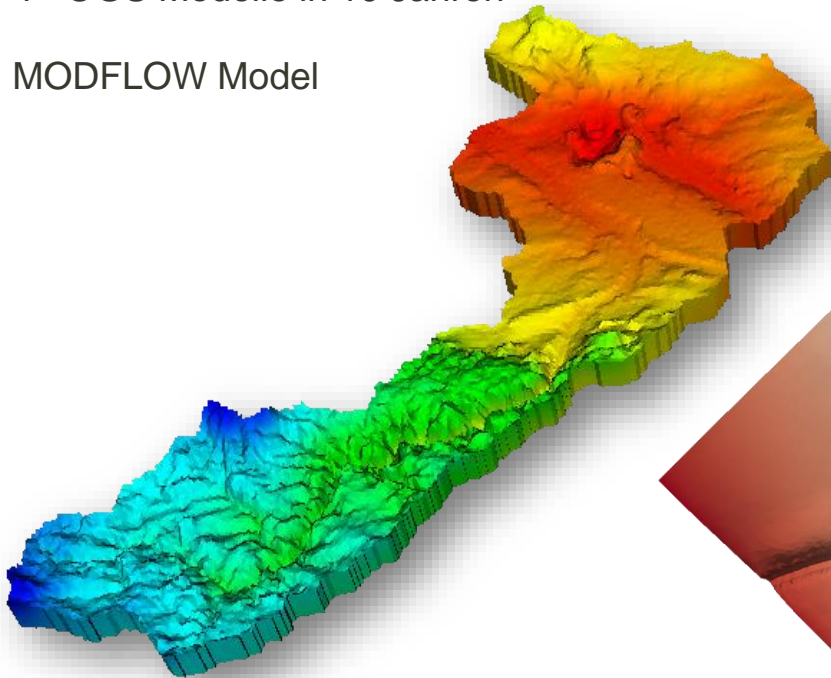
Selke Modell: Hydrometeorologische Messstellen

- 4 GWMS im Selke Einzugsgebiet (+21 in der Umgebung)
- Zeitreihendaten von 1.1.1996-31.12.2016 (theoretisch bis heute)
- Monatliche Beprobung
- 2 Selkepegel und 2 Bodepegel (15 minütliche Auflösung)
- DWD meteorologische Station Dittfurt (30 min)



Selke: Andere Grundwassermodelle

- 4+ OGS Modelle in 10 Jahren
- MODFLOW Model



Systematische Zusammenfassung

- Selkeinzugsgebiet bietet aus Hydro(geo)logischer Sicht spannende Herausforderungen:
 1. Einfluss von Tagebaurestlöchern auf die regionale Grundwasserbilanz sowie die Ausdehnung der Grundwasserkörper
 2. Verteilung, Transport und Reaktion von Nährstoffen wie Nitrat im Gewässersystem

- Ein numerisches Grundwasserströmungsmodell kann hilfreich für die Systemanalyse sein, um:
 1. Die Auswirkung der Tagebauflutung auf das Grundwasserfließverhalten zu bewerten
 2. Verweilzeiten und Fließrichtungen des Grundwassers zu bestimmen
 3. Grundwasserbewirtschaftungs- und Bilanzgrenzen zu identifizieren
 4. Den Einfluss des Grundwassers auf die Oberflächenwasserkörper (hier vor allem die Selke) zu quantifizieren und die Effizienz von Sanierungsmaßnahmen (z.B. erforderlich aus WRRL) einzuschätzen

Systematische Zusammenfassung

- Für den Aufbau eines Grundwassermodells stehen uns folgende Daten zur Verfügung (Hölting & Coldewey):

- Geländehöhen, Geologie, Basis und Oberfläche der relevanten Schichten (Grundwasserleiter) 

- Vorflutpotenziale an Oberflächengewässern 

- Flächendifferenzierte hydraulische Parameter wie **Durchlässigkeitsbeiwerte, Speicherkoeffizienten, Porosität** 

- Grundwassergleichen und repräsentative Grundwasserstandsganglinien von Grundwassermessstellen 

- Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser (Wasserstände und **Leakagekoeffizienten**) 

- Standorte und Mengen für Entnahmen und Versickerungen 

- Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung 

- Niederschlag und Verdunstung auf offenen Wasserflächen 

**Testen des Modells und
des Einflusses
unbekannter Größen in
der Übung!**