



Bundesministerium  
für Verkehr, Bau  
und Stadtentwicklung



Von der Europäischen Union kofinanziert  
Transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-V)

Donauausbau Straubing-Vilshofen

Variantenunabhängige Untersuchungen zum Ausbau der Donau  
zwischen Straubing und Vilshofen – 2007-DE-18050-S

Abschlussberichte – B.I. Bericht zum Ist-Zustand

**Anlage I.8      Untersuchung zum Bodenwasserhaushalt  
(Friedrich-Schiller-Universität Jena  
und Firma emc)**

---

Hinweise:

1. Die Durchführung der Untersuchungen und die Erstellung der Berichte wurden von der EU finanziell unterstützt.
2. Die Ausführungen in den Berichten und deren Anlagen binden nur die jeweiligen Verfasser, nicht aber die Europäische Kommission, die auch nicht für die weitere Nutzung der darin enthaltenen Informationen haftet.



**Institut für Geowissenschaften  
Friedrich Schiller Universität Jena**



**Gesellschaft zur Erfassung und  
Bewertung von Umweltdaten mbH**

Projekt:

**Donauausbau - EU-Studie**

Bericht:

**Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt im Rahmen  
der EU-Studie:  
Zusammenfassung Ist-Zustand**

**Autoren:**

Prof. Dr. K. U. Totsche, Institut für Geowissenschaften, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Ph. Jaesche, emc Gesellschaft zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt.

**Stand:** 05.11.2012



## Inhalt

---

<b>1</b>	<b>VORBEMERKUNGEN .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>FELDERHEBUNGEN .....</b>	<b>4</b>
2.1	BOHRSTOCKSONDIERUNGEN 1995 .....	4
2.2	BOHRUNGEN 2006 .....	5
2.3	SONDIERUNGEN 2007-2009 .....	5
2.4	SONDIERUNGEN 2011-2012 .....	5
2.5	ZUSAMMENFASSUNG BOHRUNGEN/SONDIERUNGEN .....	6
<b>3</b>	<b>LABORUNTERSUCHUNGEN UND DATENANALYSE .....</b>	<b>6</b>
3.1	PROBENGEWINNUNG.....	6
3.2	BODENCHEMISCHE PARAMETER .....	7
3.3	BODENHYDRAULISCHE PARAMETER.....	7
3.3.1	<i>Gesättigte Wasserleitfähigkeit .....</i>	<i>7</i>
3.3.2	<i>Ungesättigte Bodenwassercharakteristik.....</i>	<i>9</i>
<b>4</b>	<b>ÄQUIVALENTLEITFÄHIGKEIT .....</b>	<b>9</b>
4.1	HINTERGRUND.....	9
4.2	ERSTELLUNG EINES DECKSCHICHTMODELLS .....	10
4.3	VORHERSAGE DER HORIZONTLEITFÄHIGKEITEN EINES BODENPROFIL.....	10
4.4	ERMITTLUNG DER ÄQUIVALENTLEITFÄHIGKEIT EINES BODENPROFIL .....	11
4.5	FLÄCHENHAFTE ERMITTLUNG DER ÄQUIVALENTLEITFÄHIGKEIT IM GESAMTGEBIET.....	12
4.6	FLÄCHENHAFTE ERMITTLUNG DER ÄQUIVALENTLEITFÄHIGKEIT IM BEREICH ISARMÜNDUNG..	12
<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG DES BODENWASSERHAUSHALTS.....</b>	<b>13</b>
5.1	METHODIK.....	13
5.2	ERGEBNISSE.....	18
5.2.1	<i>Beispiel: Standort B414 .....</i>	<i>18</i>
5.2.2	<i>Standortübergreifend .....</i>	<i>20</i>
5.3	INTERPRETATION .....	21
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DER BODENWASSERDYNAMIK IM IST-ZUSTAND .....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>QUELLEN.....</b>	<b>24</b>



## **Tabellen**

---

Tabelle 3-1:	Mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit Ks in Leithorizonten (in m/s) mit Einstufung nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5. ....	8
--------------	--	---

## **Abbildungen**

---

Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung von Modellaufbau und Randbedingungen in der 1D-Modellierung. ....	16
Abbildung 5-2:	Modellstandort B414 (Var. 1): Sättigung, Potential und Vertikalflüsse in den Abflussjahren 2002 (links) bzw. 2003 (rechts) im Ist-Zustand. ....	19

## **Anlagen (nur digital)**

---

Anlage 1:	Fachgutachterliche Stellungnahme: Dichtigkeit von Böden unter besonderer Berücksichtigung der Bodentypen im Vorlandbereich der Donau zwischen Straubing und Vilshofen im Rahmen des Projekts „Donauausbau Straubing – Vilshofen“. Prof. Dr. K U. Totsche, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Friedrich-Schiller Universität Jena, 01.11.2012 (Totsche 2012).
Anlage 2:	Bericht: Modellierung des Bodenwasserhaushaltes an charakteristischen Querschnitten: 1D- und 2D-Modellierungen, Modelldokumentation und Ergebnisse ergänzender 1D-Modellierungen an ausgewählten Standorten. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. Version 2.1, 31.10.2012 (emc 2012c).
Anlage 3:	Bericht: Rammkernsondierungen und bodenkundliche Aufbereitung: Grafische Aufbereitung der Sondierungsergebnisse. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. Version 2.0, 12.07.2012 (emc 2012a).



# 1 Vorbemerkungen

Im Rahmen der EU-Studie zum Donauausbau Straubing – Vilshofen wurde die Bedeutung der Auensedimente (Auenablagerungen) für den Wasserhaushalt des Bodens als Pflanzenstandort untersucht und beurteilt. Insbesondere wurde das Zusammenwirken von Bodenwasserdynamik und Grundwasserdynamik als Funktion des periodisch wechselnden Flusswasserstandes instationär betrachtet. Eine besondere Rolle kommt hierbei den Lagen mit fein texturierten Auensedimenten zu, da sie aufgrund ihrer hydraulischen Eigenschaften eine pflanzeneffektive vertikale Wasserbewegung herabsetzen, und je nach Lage im Profil auch zur Ausbildung von gespannten Grundwasserverhältnissen führen können. Als „Boden“ wird in diesem Zusammenhang der Boden im engeren Sinne zuzüglich der wasserungesättigten Zone betrachtet. Eine grundlegende Darstellung der bodenkundlichen Sachverhalte ist in Anlage 1 zu diesem Bericht (Totsche 2012) gegeben.

Es wurden umfangreiche Felderhebungen, Laborarbeiten und Auswertungen durchgeführt, um zu einer Beschreibung des Bodenwasserhaushalts und insbesondere der vertikalen Wasserbewegung in den Auensedimenten im Untersuchungsgebiet Straubing – Vilshofen zu gelangen. Diese Arbeiten werden nachfolgend zusammengefasst, wobei für Einzelheiten jeweils auf die entsprechenden weiterführenden Berichte verwiesen wird. Drei dieser Berichte sind der vorliegenden Zusammenfassung digital beigelegt (**Anlage 1**: Totsche 2012; **Anlage 2**: emc 2012c; **Anlage 3**: emc 2012a).

## 2 Felderhebungen

### 2.1 Bohrstocksondierungen 1995

Im Rahmen der vertiefenden ökologischen Grundlagenerhebung wurden im Jahr 1995 umfangreiche bodenkundliche Felderhebungen durchgeführt (Schaller 1997). Hierbei wurden im Gebiet Straubing – Vilshofen rd. 25.500 Bohrpunkte mittels Pürckhauer-Bohrer erfasst, in einer räumlichen Auflösung von einem bis vier Einschlügen pro Hektar. Die Tiefe der Bohrstocksondierungen erreichte entsprechend dem eingesetzten Gerät im allgemeinen einen, in Ausnahmefällen zwei Meter. Die Bezeichnung der angetroffenen Bodentypen und die weitere Ansprache der Böden erfolgte nach Bodenkundlicher Kartieranleitung, 3. Auflage (KA3; AG Bodenkunde, 1982). Die Standorteigenschaften (Bodentyp, Kartiereinheit, Nutzung, Relief, Grundwasserflurabstand und Tiefenlage von Vergleichungsmerkmalen im Profil) bzw. die horizontweise erfassten Bodeneigenschaften (Tiefenlage der Horizontgrenze, Feinerde, Bodenskelett, Humusgehalt, Carbonatgehalt, Hydromorphiemerkmale) wurden nach vorab festgelegten Schlüssellisten codiert und in einer Datenbank dokumentiert (Schaller 1997). Nicht erfasst wurden beispielsweise die Horizontbezeichnung, Durchwurzelung oder Lagerungsdichte. Weitere rd. 730 Bohrstocksondierungen wurden in 1998 entlang von Vegetationstransekten durchgeführt. Der Bodentyp wurde aus Konsistenzgründen nach KA3 bezeichnet, die Horizontbeschreibung (erfasst wurden Horizontbezeichnung und Bodenart) erfolgte nach Bodenkundlicher Kartieranleitung, 4. Auflage (KA4; Ad-hoc AG Boden, 1994). Die Lage der Bohrstocksondierungen ist in der Anlage I.11.13 dargestellt.



## 2.2 Bohrungen 2006

Im Herbst 2006 wurden durch die Bohrfirma Eder Brunnenbau mit LKW-gestütztem Bohrgerät rd. 100 Rammkernbohrungen im Donauvorland im Abschnitt Straubing - Vilshofen durchgeführt. Die Bohrungen erschlossen die feinkörnigen Auensedimente und die Donaukiese, und endeten mit Erbohren des anstehenden Festgesteins oder tertiärer Sedimente. Die Bohrungen wurden durch die Geolab Gesellschaft für geotechnische Laboruntersuchungen mbH geotechnisch begleitet, aufgenommen und die angetroffenen Schichten beprobt. Durch emc GmbH, Erfurt, erfolgte eine bodenkundliche Ansprache des erbohrten Materials in den ausgelegten Kernkisten nach Bodenkundlicher Kartieranleitung, 5. Auflage (KA5; Ad-hoc AG Boden, 2005). Die bodenkundliche Profilbeschreibung erfolgte im Allgemeinen bis zur Tiefe des (ersten) Gr-Horizontes oder bis zum Antreffen von kiesigem Substrat, durchschnittlich bis in eine Tiefe von rd. 4,5 m. Die Profilansprache umfasste u. a. die Bodenart, Humusgehalt, Feuchte, Redoxmerkmale, Durchwurzelung, Lagerungsdichte sowie evtl. auftretende Substratinhomogenitäten (Totsche 2008a).

An 46 der genannten Bohrpunkte erfolgte zusätzlich eine Entnahme ungestörter Proben (Liner) aus feinkörnigen Sedimenten, die der späteren Bestimmung bodenhydraulischer Parameter im Labor dienten (gesättigte Wasserleitfähigkeit  $K_s$  bzw. ungesättigte pF-WG-Beziehung; Totsche 2008a).

## 2.3 Sondierungen 2007-2009

Im Frühjahr 2007 wurden mittels tragbarem Bohrgerät weitere 41 Sondierungen durchgeführt, die in 2006 nicht mit schwerem Gerät erreicht werden konnte (emc 2007). Weitere 104 Sondierungen mit demselben leichten Gerät folgten in 2009, mit einem räumlichen Schwerpunkt im Bereich nördlich bzw. südlich der Isarmündung sowie im Bereich Staatshaufen (emc 2009). Die Sondierungen wurden im Allgemeinen bis in die Tiefe des ersten Gr-Horizontes oder bis zum Erreichen der quartären Kiese niedergebracht, durchschnittlich bis in rd. 2,7 m Tiefe. Die Bodenansprache erfolgte in gleicher Weise und durch denselben Bearbeiter wie in 2006.

## 2.4 Sondierungen 2011-2012

Im Zuge der Bearbeitung vegetationskundlicher Fragestellungen durch Dritte wurden in 2011 und 2012 weitere 85 Sondierungen mit tragbarem Gerät durchgeführt (emc 2012a, Anlage 3 zu diesem Bericht). Die Sondierungen wurden möglichst bis zum Erreichen der quartären Kiese niedergebracht, durchschnittlich bis in rd. 3,1 m Tiefe. Die Bodenansprache erfolgte in gleicher Weise und durch denselben Bearbeiter wie in 2006. Die in 2012 untersuchten Standorte flossen nicht mehr in die weiterführenden Auswertungen zum Bodenwasserhaushalt ein, insbesondere nicht in die Auswertungen zur Äquivalentleitfähigkeit (vgl. Kap. 4).



## 2.5 Zusammenfassung Bohrungen/Sondierungen

Insgesamt wurde im Zeitraum 2006 - 2012 der Bodenaufbau an 324 Standorten nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 angesprochen und einheitlich dokumentiert. Im Plan Anlage I.11.13 ist die Lage aller Bohrungen und Sondierungen angegeben. In der Anlage 3 zu diesem Bericht (emc 2012a) ist der Bodenaufbau an den Bohrungen und Sondierungen dargestellt. Weiterhin sind in der Anlage 3 die lagemäßigen Koordinaten angegeben.

Es treten überwiegend stark geschichtete Profile aus fluviatil um- bzw. abgelagerten Substraten mit meist zahlreichen Substratwechselln auf. Sie bestehen teils durchgängig aus unterschiedlich stark differenzierten Sanden, Schluffen oder Lehmen, teils wechseln grobkörnige mit feinkörnigen Substraten in feinen Bändern ab, teils liegen mächtige Sande über feiner texturiertem Material und umgekehrt. Je nach Grundwassereinfluss wurden als semiterrestrische Böden die Auenböden (insbesondere Vegen), Gleye (Auengleye) bzw. Übergangstypen daraus ausgewiesen. Zur Bodenentwicklung unter Grundwassereinfluss und Charakterisierung einzelner Bodentypen vgl. Totsche (2012, Anlage 1 zu diesem Bericht).

Für weitergehende Auswertungen wurden ähnliche Horizonte entsprechend ihrer Horizontbezeichnung, der angetroffenen Bodenart und ihrer Lagerungsdichte zusammengefasst. Hierfür wurden die einzelnen in den Profilen angesprochenen Horizonte sogenannten „Leithorizonten“ zugeordnet, die durch die Merkmalskombination gleicher Horizontgruppe, Bodenartgruppe und Lagerungsdichtegruppe charakterisiert sind:

- Horizontgruppe: 3 Klassen Ah/M-, Go-, Gr-Horizonte, Zuordnung der im Feld ausgewiesenen Horizonte entsprechend Klassifizierung in KA5 (S. 88ff)
- Bodenartgruppe: 11 Klassen (ss, ls, us, sl, ll, tl, su, lu, tu, ut, lt), Klassifizierung der im Feld angesprochenen Bodenarten entsprechend KA5 (S. 142ff)
- Lagerungsdichtegruppe: 3 Klassen (Ld1/2, Ld3, Ld4/5), Zuordnung der im Feld angesprochenen Lagerungsdichten Ld1 bis Ld5 wie in KA5 (S. 351)

Somit wird beispielweise ein aM-Go-Übergangshorizont mit Bodenart Lu und Lagerungsdichte 3 einem Leithorizont „Go-tu-3“ zugeordnet.

Die Profilbeschreibungen wurden u.a. zur Ableitung der Äquivalentleitfähigkeit der Böden im Untersuchungsgebiet (vgl. Kap. 4.4) herangezogen.

## 3 Laboruntersuchungen und Datenanalyse

### 3.1 Probengewinnung

Aus den Linern der Bohrungen 2006 (Kap. 2.2) wurden aus den Tiefenbereichen des zu untersuchenden Horizontes unmittelbar einzelne Segmente als Proben für die Bestimmung der hydraulischen Parameter herausgeschnitten. Gestörte Proben des Materials waren bereits während den Bohrarbeiten aus den Kernkisten der jeweils ersten Sondierung entnommen worden.

Zur Erweiterung der Datenbasis für die Beschreibung der bodenhydraulischen Eigenschaften bislang nicht untersuchter Bodenmaterialien im Untersuchungsgebiet wurden in 2009 und



nochmals in 2011 zusätzliche ungestörte Bodenproben aus Baggerschurfen entnommen. Hierfür wurden Lokalitäten ausgewählt, deren Bodenaufbau aus vorangegangenen Bohrungen bzw. Sondierungen bekannt war, und wo besonders viele bis dahin nicht untersuchte „Leithorizonte“ vorlagen. In 2009 wurden 10 Horizonte an 6 Standorten beprobt (emc 2009), in 2011 weitere 30 Horizonte bzw. Schichten an 9 Standorten (emc 2012b). Die Probenahme erfolgte mittels Stechzylindern in jeweils 6 Parallelen, wovon jeweils max. 4 Proben in die weiteren Untersuchungen gingen. Für alle beprobten Horizonte erfolgte die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit  $K_s$ , für eine Untermenge der in 2011 beprobten Horizonte auch die Bestimmung der ungesättigten pF-WG-Beziehung (emc 2009, emc 2012b).

## 3.2 Bodenchemische Parameter

An denjenigen Horizonten, die in 2006 durch Linerbohrungen beprobt und zur Untersuchung auf  $K_s$  ausgewählt wurden, erfolgte eine Bestimmung bodenchemischer Parameter zur weiteren Kennzeichnung von Bodenmerkmalen, insbesondere der Hydromorphie (Dithionit-lösliche Eisen und Manganoxide) und des Wasserspeichervermögens (organischer Kohlenstoff). Die Untersuchungsmethoden und Ergebnisse werden in Totsche (2008a) vorgestellt, eine zusätzliche Übersicht der Ergebnisse (Boxplots) in Totsche (2008b). Generell decken sich die bodenchemischen Analysen sehr gut mit den Befunden aus der Feldansprache. Bei den grundwasserbeeinflussten Bodenhorizonten unterscheidet sich die Gruppe der Gr-Horizonte wie erwartet durch niedrigere Werte für dithionit- und oxalatlösliches Eisen und Mangan von der Gruppe der Go Horizonte (Totsche 2008a).

## 3.3 Bodenhydraulische Parameter

### 3.3.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ( $K_s$ ) im Jahr 2006 aus Linern gewonnenen 80 Proben aus 20 Horizonten (Totsche 2008a), an 4 weiteren Linerprobe (1 Horizont) in 2009 (emc 2009) sowie an im Jahr 2009 mittels Stechzylindern entnommenen 40 Proben erfolgte mittels der *falling-head* Methode. Die Bestimmung an zusätzlichen, im Jahr 2011 entnommenen 120 Stechzylindern aus 30 Horizonten bzw. Schichten erfolgte mittels der *constant-head* Methode (emc 2012b). Dabei wurde jede Einzelprobe in der Regel mehrmals bemessen und der Mittelwert der Einzelmessungen als  $K_s$ -Wert der Probe berichtet. Zur Untersuchungsmethodik vgl. Totsche (2012; Anlage 1 zu diesem Bericht).

Insgesamt wurden somit 244 Einzelproben aus 51 Horizonten bzw. Schichten untersucht.

Die Messdaten wurden nach Abschluss aller Messungen gemeinsam auf Plausibilität und Konsistenz überprüft. Hierbei kam es zum Ausschluss von Ergebnissen einzelner Proben bei folgenden Beobachtungen:

- hohe Streuung in Messwiederholungen derselben Einzelprobe
- Ausreißer innerhalb Parallelproben eines Horizontes
- begründeter Verdacht auf Makroporen (extrem hohe Messwerte)
- Verdacht auf falsche Zuordnung zum Zielmaterial (Tiefenlage von Linerproben)
- Plausibilität im Vergleich zu Literaturdaten



Die verbleibenden Proben verteilen sich wie folgt:

- 90 Proben aus 33 Go-Horizonten (15 Leithorizonten)
- 59 Proben aus 21 M-Horizonten (12 Leithorizonten)
- 9 Proben aus 7 Gr-Horizonten (4 Leithorizonte)

Die aufbereiteten Messdaten gingen wie folgt in die weiteren Arbeiten ein:

- Ks-Mittelwerte einzelner untersuchter Horizonte bildeten die Grundlage für die Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit von Bodenprofilen, durch die Anwendung von eigens auf Grundlage von Messungen und korrespondierenden Felddaten ermittelter statistischer Zusammenhänge (Vorhersagemodelle für die Horizontleitfähigkeit, vgl. Kap. 4.3).
- Ks-Mittelwerte der Leithorizonte wurden in der Modellierung des Bodenwasserhaushalts angesetzt, sofern für einen Standort nicht unmittelbar Messungen vorlagen (Parametrisierung der Standorte, vgl. Kap.5.1).

Die mittleren gesättigten Leitfähigkeiten in M- bzw. Go-Leithorizonten sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

**Tabelle 3-1: Mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit Ks in Leithorizonten (in m/s) mit Einstufung nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5.**

Horizont-Gruppe	Bodenart-Gruppe	LD-Gruppe		
		1/2	3	4/5
Go	ll	4,9E-06	3,7E-06	
	ls	4,5E-06	3,7E-06	
	lt		6,6E-07	
	lu	2,5E-06	1,2E-06	
	sl		3,0E-06	
	ss			
	su	5,5E-07	4,0E-07	
	tl			
	tu	2,1E-06	2,0E-06	
	us	8,9E-07	1,0E-06	
	ut		1,9E-06	
M	ll		2,0E-06	
	ls	2,2E-05	1,5E-06	
	lt			
	lu	7,4E-06	4,1E-07	
	sl	1,7E-05	2,3E-06	
	ss			
	su		1,4E-06	
	tl			
	tu	1,3E-05	1,8E-06	1,3E-06
	us		8,7E-07	
ut				

Stufe (KA5)	Ks [m/s]
Sehr gering	< 1,2 10 <sup>-7</sup>
Gering	1,2 10 <sup>-7</sup> bis < 1,2 10 <sup>-6</sup>
Mittel	1,2 10 <sup>-6</sup> bis < 4,6 10 <sup>-6</sup>
Hoch	4,6 10 <sup>-6</sup> bis < 1,2 10 <sup>-5</sup>
Sehr hoch	1,2 10 <sup>-5</sup> bis < 3,5 10 <sup>-5</sup>
extrem hoch	≥ 3,5 10 <sup>-5</sup>

### 3.3.2 Ungesättigte Bodenwassercharakteristik

Die ungesättigte Bodenwassercharakteristik, auch als Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung oder pF-WG-Beziehung bezeichnet, wird ebenfalls an ungestörten Bodenproben (Liner, Stechzylinder) bestimmt. Die Bestimmung erfolgte im Jahr 2006 an 34 Linerproben aus 19 Horizonten (Totsche 2008a) und im Jahr 2011 an 30 Stechzylindern aus 10 Horizonten (emc 2012b). Die Messung erfolgte statisch an einer Saugplattenanlage, in der Regel an denselben Proben, an denen zuvor die gesättigte Wasserleitfähigkeit bestimmt wurde. Ermittelt wurde der Wassergehalt bei 7 Druckstufen: Der Sättigungswassergehalt, der Wassergehalt bei 5 Unterdruckstufen auf Saugplatten (pF1,0 -10 cm; pF 1,4 – 25 cm; pF 1,8 – 63 cm; pF 2,2 – 158 cm; pF 2,5 – 316 cm) sowie der sog. Totwassergehalt (pF 4,2) im Drucktopf. Zur Messmethode vgl. Totsche (2012; Anlage 1 zu diesem Bericht).

Zur Angabe der ungesättigten Bodenwassercharakteristik in der Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte die Parametrisierung der Messdaten im van-Genuchten-Modell unter Verwendung des Modells RETC Version 6 (van Genuchten et al. 1991):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|\psi|)^n)^{1-1/n}}$$

Als Eingabeparameter wurden der gemessene volumetrische Wassergehalt bei Sättigung  $\theta_s$  sowie die Wassergehalte bei den 6 untersuchten Druckstufen ( $\psi$ ) verwendet. Als Ergebnis ermittelt RETC die Parameter  $\theta_r$ ,  $\alpha$  und  $n$  des van-Genuchten-Modells sowie Güteparameter der Schätzung (emc 2012b). Die ermittelten Parameter ermöglichen unter Annahme des Mualem-Modells zugleich die Beschreibung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit  $k_u(\theta)$  in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden.

Die Ergebnisse der Parametrisierung für alle vorliegenden Messungen der pF-WG-Beziehung sind in emc (2012b) zusammengefasst.

## 4 Äquivalentleitfähigkeit

### 4.1 Hintergrund

Als Maß für die Charakterisierung der Wasserdurchlässigkeit eines Bodens wird seine hydraulische (gesättigte) Äquivalentleitfähigkeit ermittelt. Diese kann aus den (gesättigten) hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen Schichten oder Horizonte, die das gesamte Profil aufbauen, errechnet werden (vgl. Kap. 4.4). Die gesättigte Äquivalentleitfähigkeit stellt die Obergrenze der Durchlässigkeit eines Bodenprofils dar. Unter ungesättigten Bedingungen ist die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens nicht mehr als konstant zu betrachten, sondern stellt eine hysteretische Funktion der Wassersättigung und der Porenraumgeometrie dar und ist bei beliebigen (ungesättigten) Wassergehaltswerten stets kleiner als die gesättigte Wasserleitfähigkeit (vgl. Totsche 2012, Anlage 1 zu diesem Bericht).



Die Bestimmung der Äquivalentleitfähigkeit setzt voraus, dass für die erforderlichen Horizontleitfähigkeiten Messungen oder geeignete Abschätzungen vorliegen. Entsprechende Arbeiten werden in Kap. 4.3 beschrieben.

Die Äquivalentleitfähigkeiten wurden punktuell für zwei unterschiedliche Datenkollektive ermittelt, für die räumlich das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckenden Bohrstocksondierungen aus 1995 (vgl. Kap. 2.1) sowie für die Bohrungen/Sondierungen der Jahre 2006-2011 (Kap. 2.2 - 2.4). Daraus wurden flächige Interpolationen einerseits für das Gesamtgebiet, andererseits für drei Teilbereiche im Bereich der Isarmündung abgeleitet (Kap. 4.5 und 4.6).

Als zusätzliche Datengrundlage für die Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit insbesondere an den Bohrstocksondierungen wurde vorab ein Modell der Deckschichtmächtigkeit (Mächtigkeit der feinkörnigen, weitgehend skelettfreien Auesedimente) erstellt (Kap. 4.2).

## 4.2 Erstellung eines Deckschichtmodells

Zur Erstellung eines Geländemodells der Deckschichtunterkante (DUK) wurden folgende punktuelle Informationen berücksichtigt: Die erbohrte DUK aus Bohrungen/Sondierungen und Bohrstockaufschlüssen (vgl. Kap. 2), sofern die Deckschicht durchteuft wurde, die tatsächliche DUK an weiteren Aufschlusspunkten der RMD, sowie die DUK an Berechnungsknoten des geologischen Modells der RMD. Die Interpolation erfolgte über eine Dreiecksvermaschung linear ohne Bruchkanten und wurde ausgegeben in einem 1m-Raster (Natural neighbours). Die Festlegung für diese Vorgehensweise (Vorgabe der Stützpunkte, Form der räumlichen Interpolation) erfolgte durch Arge danubia in Abstimmung mit RMD. Durch Differenzbildung zur Geländeoberkante (Höhenmodell) wurde hieraus die Deckschichtmächtigkeit DMK abgeleitet. Karten der DUK und DMK finden sich in emc (2012b) sowie in Anlage I.11.11 bzw. I.11.12.

## 4.3 Vorhersage der Horizontleitfähigkeiten eines Bodenprofil

Zur Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit eines Bodenprofils liegen nur an ausgewählten Standorten Messergebnisse der Horizontleitfähigkeit vor. Um zu einer Abschätzung der Horizontleitfähigkeit aller erbohrter Horizonte bzw. Schichten zu gelangen, wurden auf Grundlage statistischer Auswertungen der Zusammenhänge zwischen Ks-Werten einzelner untersuchter Horizonte und den zugehörigen Parametern der Horizontbeschreibung nach KA5 lineare bzw. nichtlineare Vorhersagemodelle (Pedotransferfunktionen) erstellt (emc 2012b, für weitere Grundlagen vgl. Totsche 2008b). Diese Modelle erlauben es, aus Felddaten der Horizontbeschreibung die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Horizontes vorherzusagen.

Entsprechend dem Parameterumfang, der für die Vorhersage an Bohrpunkten verschiedener Datenkollektive zur Verfügung steht (Profilaufnahme der Bohrungen/Sondierungen, reduzierte Profilaufnahme der Bohrstocksondierungen), wurden für die beiden Kollektive jeweils eigene Modelle aufgestellt. Unterschieden wurden zudem jeweils Modelle für Horizonte der beiden Horizontgruppen M- bzw. Go-Horizonte. Die beste Vorhersagegüte wurde für die Horizontleitfähigkeit von M-Horizonten im Datenkollektiv der Bohrungen/Sondierungen auf Basis der Prädiktoren Horizontobergrenze, Bodenartgruppe, Lagerungsdichtegruppe und Fein- sowie Grobwurzelanteilen erreicht, die Varianz der



Messungen wird hier zu 80 % erklärt (emc 2012b). Für Gr-Horizonte konnte aufgrund des geringen Datenumfanges (nur 7 Horizonte mit plausiblen  $K_s$ -Daten) kein statistisches Vorhersagemodell erstellt werden. Für Gr-Horizonte wird zur Abschätzung der Äquivalentleitfähigkeit daher eine mittlere Horizontleitfähigkeit angenommen entsprechend dem Mittelwert aller Messungen in Horizonten, die unterhalb 0,6 m unter GOK liegen.

Zur Anwendung der Vorhersagemodelle wurden für das Kollektiv der Bohrstocksondierungen nachfolgende Datenaufbereitungen durchgeführt: Da keine Horizontbezeichnung vorlagen, erfolgte auf Grundlage ausgewählter dokumentierter Bodeneigenschaften an einem Standort (Standortmerkmale: Bodentyp, Obergrenze Vergleyung; Horizontmerkmale: Skelettgehalt, Humusgehalt, Hydromorphiemerkmale) unter Plausibilitätsbetrachtungen eine Zuweisung jedes ausdifferenzierten Horizontes zu einer der folgenden Horizontgruppen: Ah-, H-, M-, Go-, Gr-Horizonte, Horizonte mit einem Skelettanteil von mind. 30% sowie Horizonte, die nicht eindeutig einer der vorangehenden Gruppen zugeordnet werden konnten. Zudem war eine Übersetzung der nach KA3 erfassten und dokumentierten Bodenarten in die Klassifizierung nach KA5 erforderlich, um die Anwendung der Vorhersagemodelle zu ermöglichen (vgl. emc 2012b).

#### 4.4 Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit eines Bodenprofil

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit eines Bodenprofils ergibt sich als gewichtetes inverses Mittel aus den hydraulischen Leitfähigkeiten der Schichten bzw. Horizonte, aus welchen dieser Boden aufgebaut ist, und deren Mächtigkeit:

$$K_{Seq} = \frac{\sum n_i}{\sum (n_i / HorK_{s_i})}$$

mit  $n_i$ : Mächtigkeit eines Horizontes  $i$   
 $HorK_{s_i}$ : gesättigte (Horizont-)Leitfähigkeit eines Horizontes  $i$

Als Auswertetiefe, bis zu der die Äquivalentleitfähigkeit eines Bodenprofils ermittelt wird, wurde der jeweilige Grundwasser-Flurabstand (als Grundwasser-Druckhöhe) bei Niedrigwasser im Ist-Zustand festgelegt.

Bei der Zuweisung von Horizontleitfähigkeit für die einzelnen Horizonte eines auszuwertenden Bodenprofils wurden folgende Fälle unterschieden (emc 2012b):

- skelettreiche Horizonte (> 25 Vol.% Kies):  $3,9E^{-4}$  m/s  
(nach KA5 S. 351: gS bei höchster Lagerungsdichte)
- Torfhorizonte:  $3,47 \cdot 10^{-5}$  m/s  
(nach KA5 S. 352: Torfe nHr, nHw bei z1+z2)
- Muddehorizonte:  $4,20 \cdot 10^{-6}$  m/s  
(nach KA5 S. 351: Mittelwert der Bodenartenhauptgruppen U und T bei Ld 1/2. Für Muddehorizonte wird bei Aufnahme nach KA5 keine Bodenart angesprochen.)
- Go-/M-Horizonte: Anwendung der Vorhersagemodelle (vgl. Kap. 4.3)



- Gr-Horizonte:  $9,4 \cdot 10^{-7}$  m/s (vgl. Kap. 4.3)
- sonstige skelettarme Horizonte:  
Anwendung von Mittelwerten für die entsprechende Bodenart-/Lagerungs-  
dichtegruppe nach KA5 (S. 351)

Horizonte, die über den unteren Rand der Auswertetiefe hinausgingen, werden ggf. nur anteilig zur Berechnung herangezogen. Lagen keine Profildaten bis zur erforderlichen Auswertetiefe vor, wie das insbesondere für die nur 1 m mächtigen Bohrstocksondierungen häufig auftrat, so wurde zur Ergänzung der Horizontleitfähigkeit(en) der fehlenden Schicht(en) zwei mögliche Substrate unterschieden: Bis zur Unterkante der (modellierten) Deckschicht wurde mit dem Mittelwert für Feinboden wie bei Gr-Horizonten ergänzt, darunter mit der Leitfähigkeit für Kieshorizonte (für Details vgl. emc 2012b).

Die Ergebnisse zur punktuellen Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit finden sich in emc (2012b). Durch die sukzessive Erweiterung der Datenbasis an Ks-Messungen sind den Auswertungen in emc (2012b) vorangehende frühere Arbeiten zur Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit als Zwischenstände zu betrachten, insbesondere die Ermittlung in emc (2007) auf Basis von Abschätzungen nach KA5, außerdem die Ermittlung auf Basis von Vorhersagemodellen in emc (2008a, b) sowie in emc (2009).

#### **4.5 Flächenhafte Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit im Gesamtgebiet**

Für die flächige Darstellung der Wasserleitfähigkeit der Böden wurden die punktuell bestimmten Äquivalentleitfähigkeiten räumlich interpoliert. Für das Gesamtgebiet wurde hierfür, in Analogie zur Ermittlung der DUK im Gesamtgebiet aufbauend auf einer Dreiecksvermaschung eine lineare Interpolation der Äquivalentleitfähigkeiten aller in diesem Gebiet liegenden Bohrstockaufschlüsse zuzüglich aller Bohrungen/Sondierungen durchgeführt. Bei der vorliegenden Datenstruktur entspricht diese flächenhafte Ermittlung dem Stand der Technik.

Zur Darstellung und weiteren Verwendung wurde das Ergebnis gerastert (Zellgröße 1 m x 1 m, Methode „natural neighbours“). Eine kartographische Darstellung findet sich emc (2012b) sowie in Anlage I.11.13.

#### **4.6 Flächenhafte Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit im Bereich Isarmündung**

Für drei Teilgebiete im Bereich der Isarmündung wurde zur räumlichen Interpolation das geostatistische Verfahren „Ordinary Kriging“ eingesetzt. Dies war möglich, da in diesen Gebieten zum einen Sondierungen in einem speziellen Design angelegt worden waren, um evtl. vorhandene räumliche Zusammenhänge zwischen dem Profilaufbau (und damit der Äquivalentleitfähigkeit) benachbarter Bohrpunkte geostatistisch zu untersuchen, zum anderen insgesamt mehr Sondierungen in höherer räumlicher Auflösung speziell als Grundlage hierfür



durchgeführt worden waren (emc 2009). Für die Interpolation wird zunächst ein (Semi-) Variogramm für die Äquivalentleitfähigkeit erstellt, das die Semivarianz  $\gamma$  („Ähnlichkeit“) zwischen den Werten benachbarter Sondierungen in Relation zu ihrem räumlichen Abstand voneinander analysiert. Der räumliche Zusammenhang wird durch eine mathematische Funktion beschrieben und zur Vorhersage des Wertes an einer beliebigen Stelle verwendet, wofür die innerhalb der maximalen Reichweite des statistischen Zusammenhangs liegenden, benachbarten Messpunkte verwendet werden. Als Stützstellen werden die Äquivalentleitfähigkeiten der Bohrungen/Sondierungen sowie der in diesen Gebieten gelegenen Bohrstocksondierungen verwendet. Zur weiteren Verwendung wurde das Ergebnis wiederum gerastert (Zellgröße 2 m x 2 m), wodurch es ggf. zu gewissen Abweichungen zwischen Rasterzellwert und Wert einer innerhalb der Zelle gelegenen Stützstelle kommt, und mit der Wasseranslagslinie „Untergrenze Weichholzaue“ maskiert. Eine kartographische Darstellung findet sich in emc (2012b) sowie in Anlage I.11.14.

Wie bei der punktuellen Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit, so sind auch die, den Auswertungen in emc (2012b) vorangehenden, früheren Arbeiten zur flächigen Ermittlung der Äquivalentleitfähigkeit als Zwischenstände zu betrachten (emc 2008a, b, emc 2009).

## 5 Modellierung des Bodenwasserhaushalts

### 5.1 Methodik

Mithilfe eines mathematischen Simulationsmodelles wurde der Bodenwasserhaushalt an ausgewählten Standorten im Untersuchungsgebiet eindimensional und instationär modelliert (emc 2012c; Anlage 2 zu diesem Bericht). Ziel dieser Arbeiten war:

- eine quantitative Rekonstruktion und Projektion der Wasserbewegung und Wasserdurchlässigkeit im System Boden - ungesättigte Zone - Grundwasser an Auenstandorten.
- die numerische Projektion der Auswirkungen flussbaulicher Maßnahmen auf Dynamik und Haushalt des Boden- und Grundwassers an Auenstandorten (Berechnung von Modellszenarien)
- die Schaffung hydropedologischer und standortkundlicher Grundlagen und Kenndaten für die Vegetationsmodellierungen mit INFORM

Hierfür wurde ein prozess- und standortorientierter Modellansatz gewählt, der auf physikalisch begründeten mathematischen Gleichungen aufbaut. Im Kern ist die numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen zur mathematischen Beschreibung der instationären Wasserbewegung innerhalb eines Bodenprofils erforderlich. Für die Durchführung der Modellierungen wurde das anerkannte, nicht-kommerzielle Simulationsmodell Hydrus 1D, Vers. 4.14 eingesetzt (Šimůnek et al. 2009).

Bei der Modellierung des Bodenwasserhaushalts wird, ausgehend von einem vorgegebenen Anfangszustand, die Wasserbewegung innerhalb eines definierten und begrenzten Ausschnitts



des Bodens („Profilausschnitt“) berechnet. Als unmittelbar antreibende Größen wirken an dessen oberen Rand atmosphärische Einflüsse (Niederschlag NS, potentielle Evapotranspiration ETP in Abhängigkeit vom Blattflächenindex LAI), innerhalb des Profils Pflanzenentzug von Bodenwasser (Transpiration) entsprechend einer vorgegebenen Wurzelverteilung, am unteren Rand die variable Druckhöhe des Grundwassers. Der resultierende gesättigte oder ungesättigte Wasserfluss im Boden wird durch die hydraulischen Eigenschaften (gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit sowie Wasserspannung-Wassergehaltscharakteristik) der einzelnen Bodenhorizonte bzw. –schichten kontrolliert. Einzelne Komponenten des Modells sind in Abbildung 5-1 exemplarisch für ein 2,45 m mächtiges Bodenprofil dargestellt, das aus 4 Bodenhorizonten (aAh, aM, IIaM-Go, IIIaGo) bzw. 3 unterschiedlichen Bodenmaterialien aufgebaut ist. Die bodenhydraulischen Eigenschaften der Horizonte sind als van-Genuchten-Parametrisierung in den 3 Teilabbildungen rechts der Profildarstellung wiedergegeben.

Die in der 1D-Modellierung berücksichtigten Prozesse umfassen somit:

- die Infiltration in den Boden
- den Überstau über der Bodenoberfläche
- die Evaporation von der Bodenoberfläche
- die Transpiration über die Vegetation aus dem Wurzelraum
- den instationären, (teil)gesättigten Wasserfluss im Boden
- die Grundwasserneubildung (Exfiltration aus der Auenablagerung in das Grundwasser)
- den kapillaren Wasseraufstieg aus dem Grundwasser
- die Schwankung der Grundwasserdruckhöhe entsprechend der Wasserstände der Donau

Die Modellierung erfolgte für den Zeitraum 1992 – 2010, wovon das erste Modelljahr ausschließlich der Elimination von Starteffekten dient (Unabhängigkeit von den gewählten Anfangsbedingungen) und nicht in die Auswertungen einging. Als Anfangsbedingung wurde ein Gleichgewichtszustand des Bodenprofils im Gesamtpotential vorgegeben.

Die obere Randbedingung (Zeitreihen von Infiltration und Evapotranspiration) wurde aus Messdaten der DWD-Station Straubing unter Berücksichtigung der jeweiligen Vegetation abgeleitet.

Als untere Randbedingung dienten Zeitreihen der aktuellen Grundwasserdruckhöhe, die von RMD für den jeweiligen Standort ermittelt wurden.

Der Ermittlung von Zeitreihen instationärer Grundwasserdruckhöhen wurde eine ausreichende Korrelation zwischen den Ganglinien von Donau und Grundwasserdruckhöhe zugrunde gelegt. Eine Überprüfung dieses Zusammenhangs an allen untersuchten Modellierungsstandorten zeigte, dass die Korrelation zwischen Donauwasserspiegel und Grundwasserdruckhöhe im Ist-Zustand sehr deutlich ausgeprägt ist ( $\gg 0,9$ ). Zur Ermittlung wurde wie folgt vorgegangen:

- Aus den Ganglinien der beiden nächstgelegenen Donauegel wurde unter Verwendung des Dreisatzes und der Ergebnisse der stationären BAW-Simulationen für ausgewählte Abflusssituationen die Donauganglinie auf Höhe des Modellierungsstandortes ermittelt (3-Stunden-Werte, Datenreihe 1992-2011).



- Anhand eines Vergleichs dieser Donauganglinie mit den Messwerten des zum Modellierungsstandort nächstgelegenen Grundwasserpegels (3-Stunden-Werte, Datenreihe 2004-2011) wurden für ausgewählte Abflusssituationen (RNW, MW, Öko5 und Öko3) die dazugehörigen, mittleren Grundwasserstände ermittelt. Diese Werte dienen der Qualitätsprüfung der stationären Grundwassermodellierung am Standort des Grundwasserpegels für den Ist-Zustand.
- Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse der stationären Grundwassermodellierungen bei den ausgewählten Abflusssituationen im Ist-Zustand am Modellierungsstandort verwendet, um mit Hilfe des Dreisatzes aus der Donauganglinie für den Ist-Zustand auf Höhe des Standortes eine Grundwasserganglinie am Modellierungsstandort zu generieren.
- Zusätzlich wurden für grafische Darstellungen anhand eines Vergleichs von Donauganglinie mit ermittelter Grundwasserdruckhöhenganglinie am Modellierungsstandort für insgesamt 8 Abflusszustände (Öko4, RNW, Öko2, MW, Öko5, Öko3, MHQ So. und HNN; zur Definition der Abflüsse vgl. Kap. 2.4.4 in emc 2012c, Anlage 2 zu diesem Bericht) die zugehörigen, mittleren Grundwasserdruckhöhen ermittelt.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgehensweise ist in RMD (2012) enthalten.

Insgesamt wurde der Bodenwasserhaushalt für 24 Standorte modelliert, davon 4 im Raum Straubing, 5 oberhalb und 11 unterhalb der Isarmündung bis zur Mühlhamer Schleife gelegen, sowie weitere 4 Standorte unterhalb der Mühlhamer Schleife. Die Bezeichnung der Standorte mit Angabe der lagemäßigen Koordinaten und Bezug auf die Donaukilometrierung ist in der Anlage 2 zu diesem Bericht (emc 2012c) enthalten. Die Standorte der Modellierungen sind der Anlage I.11.13 dargestellt.

Für die Charakterisierung der einzelnen Standorte wurden Realdaten verwendet. Der Bodenaufbau jedes Standortes war aus den Bohrungen bzw. Sondierungen bekannt (vgl. Kap. 0) und wurde unmittelbar im Modell umgesetzt. Als Modellraum-Untergrenze wurde der Übergang von Feinboden zum Grundwasserleiter angesetzt (als potentielle Grundwasserleiter wurden Kies- oder direkt über dem Kies liegende Reinsand-Horizonte angenommen). Die hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Bodenhorizonte konnten in Einzelfällen direkt aus Messungen übernommen werden, die an Proben des Standortes durchgeführt wurden (vgl. Kap. 3.3). In der Regel wurde auf Messungen an vergleichbaren „Leithorizonten“, in Ausnahmefällen auf Messdaten von Horizonten mit möglichst ähnlichen Eigenschaften zurückgegriffen. Die Wurzelverteilung wurde auf der Basis von Literaturdaten erstellt, unter Berücksichtigung der Felddaten aus der bodenkundlichen Profilaufnahme. Wurden Standorte in zwei Modellvarianten modelliert (vgl. emc 2012c, Anlage 2 zu diesem Bericht), so wurde zur Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften der jeweils aktuelle Kenntnisstand berücksichtigt.

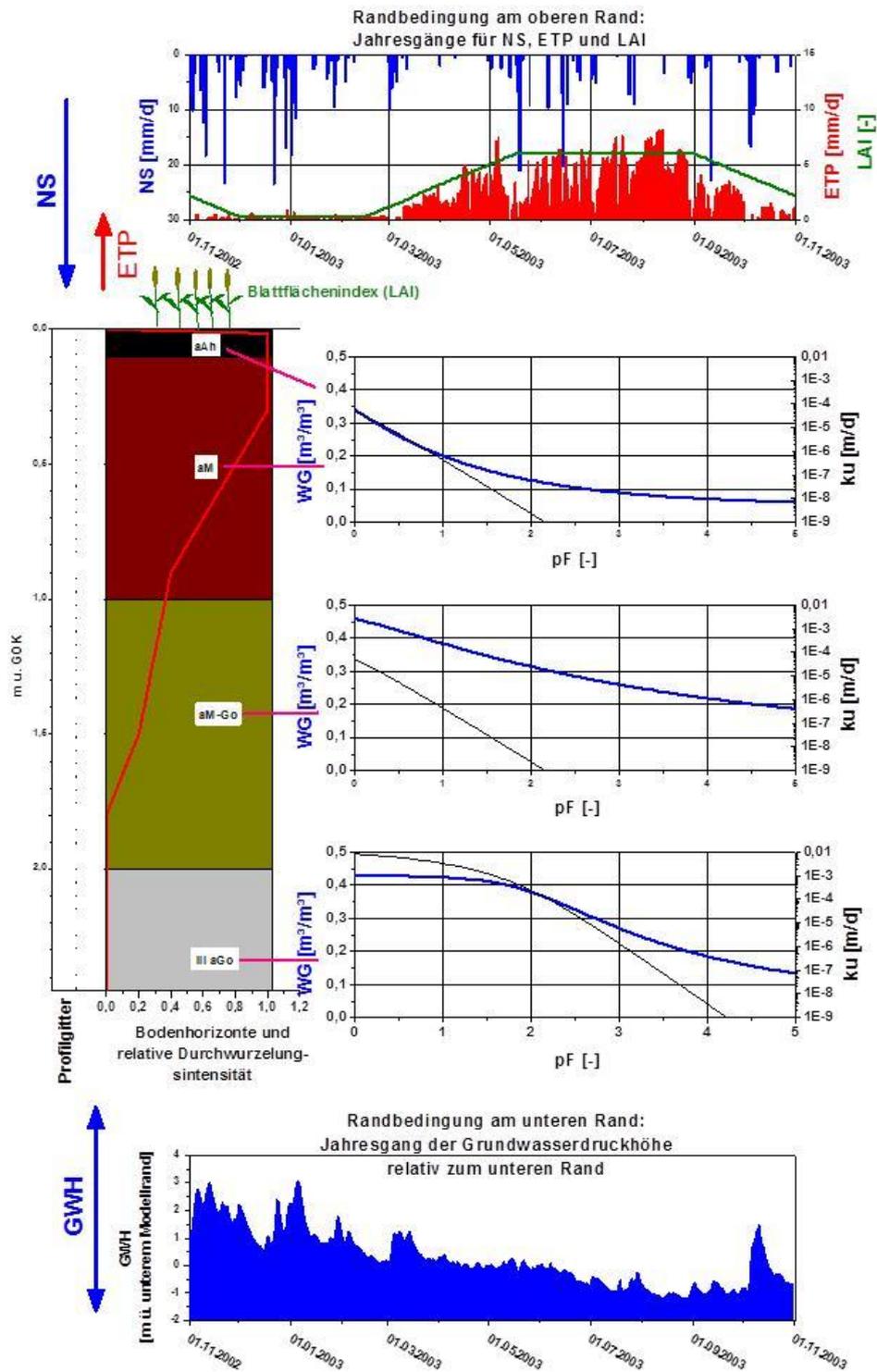


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung von Modellaufbau und Randbedingungen in der 1D-Modellierung.



Bei der Modellierung wird der zeitliche Verlauf von Potentialen, Wassergehalten und Vertikalgeschwindigkeiten (bzw. Vertikalflüssen) im Bodenprofil in 5cm-Tiefenstufen ermittelt und als Tageswerte angegeben. Als weitere Größen zur Beschreibung des Bodenwasserhaushalts wurden hieraus für jede Tiefe und für die unten genannten Auswertungsperioden abgeleitet:

- Wassersättigung
- Potentialdifferenzen
- 14-tägige gleitende Summenwerte der Vertikalflüsse (14d-Flüsse)
- Anzahl an Tagen mit vollständiger Sättigung

Für die Tiefenbereiche 0 – 30 cm, 30 – 80 cm, 80 – 130 cm und ggf. tiefer wurde für den gesamten Modellzeitraum ermittelt:

- Auftreten von Sättigungsperioden und Tagen mit Sättigung (je Kalenderjahr, je Vegetationsperiode)
- Auftreten von Nässe- bzw. Trockenperioden (Perioden mit Über- bzw. Unterschreitung gewisser pflanzenrelevanter Wasservorräte im Boden<sup>1</sup>, jahres- und monatsweise)

Zusätzlich wurde für das Gesamtprofil ermittelt:

- Anzahl an Tagen mit Grundwasseranschluss der Deckschicht (jahresweise)
- Tiefe, bis zu der an 300 Tagen im Jahr vollständige Wassersättigung auftritt (300d-Sättigungslinie; Auswertung je Kalenderjahr und für den Gesamtzeitraum)
- Äquivalentleitfähigkeit entsprechend der angesetzten gesättigten Wasserleitfähigkeiten je Horizont
- Nutzbare Feldkapazität in den oben genannten Tiefenbereiche

Grafische Darstellungen (für die Parameter Sättigung, Potential, Potentialdifferenz und Vertikalgeschwindigkeit) und tabellarische, statistische Aufbereitungen der Ergebnisse wurden für typische (trockene, durchschnittliche bzw. feuchte) Kalender- bzw. Abflussjahre erstellt. Hierfür wurden folgende Zeiträume ausgewählt:

A) Abflussjahre (jeweils November bis Oktober):

- 2002 (feucht)
- 2003 (trocken)

mit zusätzlicher Differenzierung nach

- hydrologischem Winterhalbjahr (November bis April)
- hydrologischem Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)

B) Kalenderjahre (Januar bis Dezember):

---

<sup>1</sup> Ermittlung von Nässe- bzw. Trockenperioden nach Arbeitskreis Standortkartierung (2003).

Nässeperiode: länger als 10d andauernde Überschreitung der Wasserspeicherkapazität im betrachteten Tiefenbereich mit Einschränkung des Lufthaushalts und Absterben von Feinwurzeln

Trockenperiode: länger als 20 Tage andauernde Unterschreitung des Wertes „50% der nutzbaren Wasserspeicherkapazität“ mit potentieller Einschränkung der Wasseraufnahme aus dem Boden im betrachteten Tiefenbereich



- 1997 (trocken)
  - 2002 (feucht)
  - 2008 (durchschnittlich)
- C) Vegetationsperioden (April bis September):
- 2002 (feucht)
  - 2003 (trocken)
  - 2008 (durchschnittlich)
- D) Periode 1.1.2002 bis 30.09.2003 (trockene Vegetationsperiode nach feuchtem Kalenderjahr)

Alle Auswertungen bzw. Darstellungen wurden für jedes modellierte Szenario (Ist-Zustand, Szenario C2.80, Szenario A) erstellt. Für die Auswertungszeiträume A) bis C) wurden für die Parameter Sättigung, Potential und Vertikalgeschwindigkeit zusätzlich Differenzabbildungen (Szenario minus Ist-Zustand) erstellt.

Die Vorgehensweise zur Parametrisierung, Durchführung und Auswertung der Modellierung sind ausführlich in emc (2011) und emc (2012c; Anlage 2 zu diesem Bericht) beschrieben, die Ergebnisse werden in emc (2012c; Anlage 2 zu diesem Bericht) dokumentiert und zusammengefasst. Der einheitlichen Modellierung über den Zeitraum von 18 Jahren gingen Arbeiten voraus, die nur die Jahre 2002 - 2003 berücksichtigten (emc 2011). Diese Modellierungen wurden in emc (2012c; Anlage 2 zu diesem Bericht) mit aktualisierter Datenbasis und für den erweiterten Zeitraum überarbeitet.

## 5.2 Ergebnisse

### 5.2.1 Beispiel: Standort B414

Der oberhalb der Isarmündung gelegene Standort B414, Bodentyp Vega-Gley, mit einer Feinbodenmächtigkeit von 1,9 m Tiefe, weist in der Modellvariante 1 eine als „mittel“ einzustufende (gesättigte) Äquivalentleitfähigkeit von  $2,7E-6$  m/s auf. Die Grundwasserdruckhöhe bei RNW liegt im Ist-Zustand bei 1,96 m unter GOK. Die Deckschicht hat an rd. 5 % aller Tage im Zeitraum 1993-2010 keinen unmittelbaren Grundwasseranschluss, an rd. 66 % aller Tage im Modellzeitraum liegt die Grundwasserdruckhöhe tiefer als 0,80m unter GOK, in rd. 16% liegt sie oberhalb von 0,30 m unter GOK.

Exemplarisch werden in Abbildung 5-2 der Verlauf der Parameter Sättigung, Potential und Vertikalgeschwindigkeit für die beiden Abflussjahre (AJ) 2002 („nass“) und 2003 („trocken“) dargestellt. Der Vergleich zwischen den Jahren zeigt deutlich den Effekt der unterschiedlichen hydro-meteorologischen Randbedingungen. Während im AJ 2002 die Sättigung stets größer 86 % ist, geht sie im AJ 2003 auf bis zu 56 % zurück. Gleiches gilt für die dargestellten Potentiale: Im AJ 2002 liegen sie im Ist-Zustand stets über -1,8 m ( $< pF_{2,3}$ ), im AJ 2003 werden Potentiale von bis zu -21 m ( $pF_{3,3}$ ) an der Bodenoberfläche bzw. -10 m ( $pF_{3,0}$ ) in 0,5 m Bodentiefe erreicht. Die Darstellung der Vertikalflüsse hebt in den intensiven violetten bzw. dunkelblauen Farben insbesondere den Einfluss sich rasch ändernder Grundwasser-Druckhöhen mit hohen Fließgeschwindigkeiten im nassen/gesättigten Zustand im gesamten Profil hervor. Auch einzelne Infiltrationsereignisse nach Niederschlägen (gelbrote Farben am oberen Rand, z.B. AJ 2002: Tag 220) sind deutlich zu erkennen. Die

statistische Auswertung zeigt, dass in den Sommerhalbjahren (zeitlich betrachtet) überwiegend aufwärts gerichtete Flüsse auftreten (Median der Flüsse in allen Tiefen > 0). Die mittleren Flüsse (arithmetischer Mittelwert, als Maß für die tatsächlich geflossene Wassermenge) sind auch in den Sommerhalbjahren an der Geländeoberkante und im obersten Profilabschnitt nach unten gerichtet (arithmetischer Mittelwert < 0).

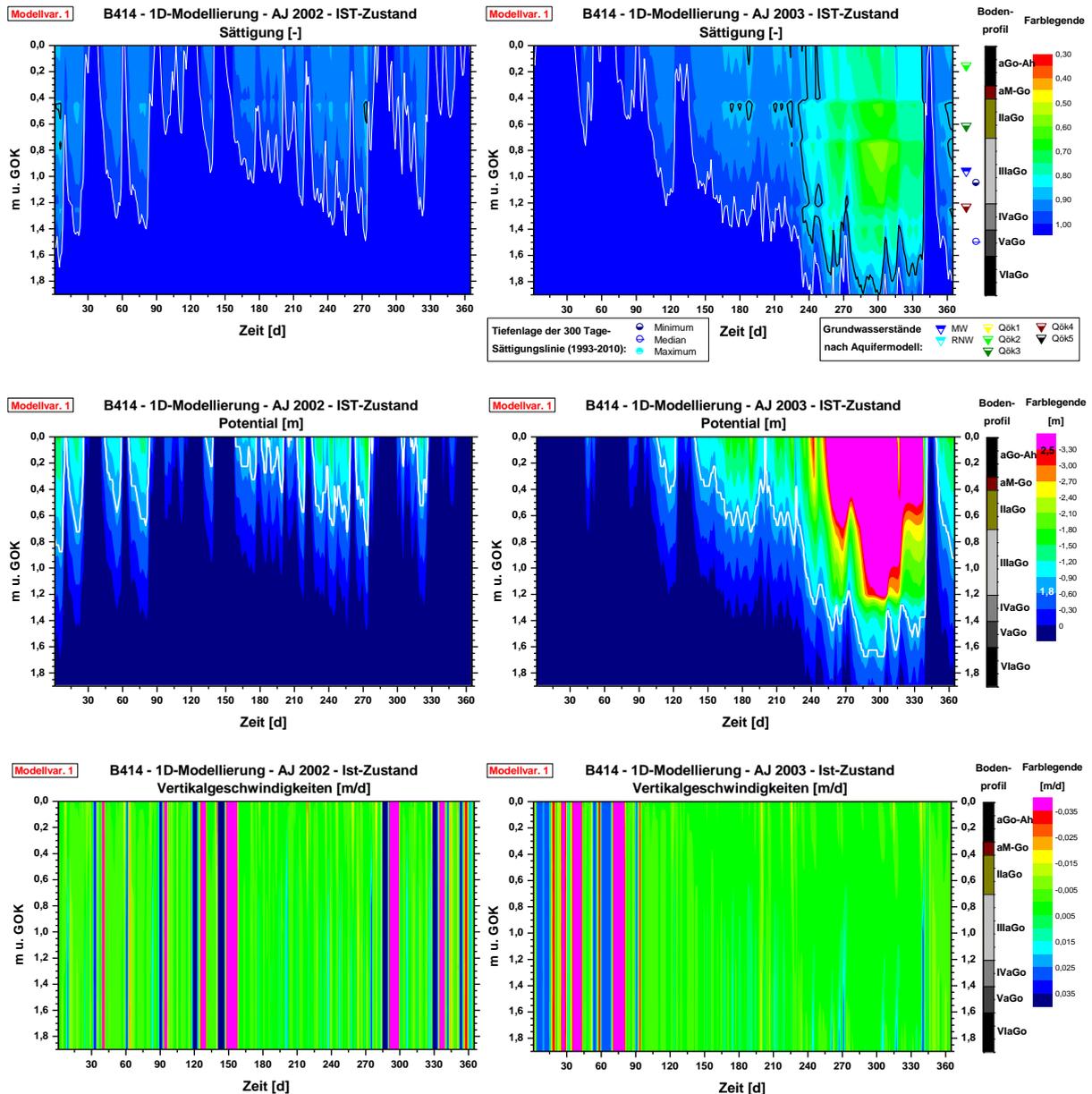


Abbildung 5-2: Modellstandort B414 (Var. 1): Sättigung, Potential und Vertikalflüsse in den Abflussjahren 2002 (links) bzw. 2003 (rechts) im Ist-Zustand.

Anmerkungen zu Abbildung 5-2:

- Darstellungen „Sättigung“: Die weiße Linie stellt den Verlauf der Druckhöhe des Grundwassers dar, die schwarze Linie eine Sättigung von 88 % als Indiz zur Bewertung der Luftversorgung des Standorts. Die angegebenen Grundwasserstände (genauer: Grundwasserdruckhöhen) bei RNW, MW und Qök1 bis Qök5 sind aus Donauabflüssen ermittelt, zur Definition vgl. Kap. 2.4.4 in emc 2012c (Anlage 2 zu diesem Bericht), zur Herleitung vgl. Kap. 5.1).
- Darstellungen „Potential“: Die weiße Linie hebt den Potentialverlauf von -0,63 m (pF 1,8) hervor.
- Darstellungen „Vertikalgeschwindigkeiten“: Positive Werte (blaue Farben) zeigen Flüsse in Richtung GOK, negative Werte (gelb-rote Farben) in die Tiefe gerichtete Flüsse. Für weitere Erläuterungen vgl. emc (2012c; Anlage 2 zu diesem Bericht).



## 5.2.2 Standortübergreifend

Für alle untersuchten Standorte konnte das Zusammenspiel von Witterung, Grundwasserdruckhöhe (entsprechend dem Verlauf der Flusswasserstände) und Bodenwasserhaushalt gezeigt werden.

An den Modellstandorten zeigten die Grundwasserdruckhöhen eine Differenz bei MW von durchschnittlich rd. einem Meter und bei einem mittleren Sommerhochwasser (mMHQ-So) von rd. drei Meter gegenüber dem Druck bei RNW. Bei den Sommerhochwassern reichten die Drücke in der Mehrzahl der Standorte über die GOK. An Standorten mit niedrigen, tief im Profil stehenden Grundwasserdruckhöhen (also Standorte mit im Allgemeinen großem Abstand zwischen Geländeoberkante und Flusswasserständen der Donau) treten erwartungsgemäß niedrigere Potentiale und geringere Sättigungswerte auf als an Standorten mit hoch anstehenden Wasserständen.

Ein Vergleich der mittleren Tiefenlage der 300d-Sättigungslinie aller Standorte für die gesamte Modellperiode (18 Jahre) zeigt einen engen Zusammenhang zur jeweiligen mittleren Grundwasserdruckhöhe bei RNW sowie zur Tiefe der Horizontgrenze von Gr- zu Go-Horizonten (vgl. Kap. 4.5.1 in emc 2012c, Anlage 2 zu diesem Bericht). Dieser generelle Zusammenhang ist relevant zur Bewertung einer ggf. zu erwartenden Bodenentwicklungen bei dauerhaft geänderten Flusswasserständen. (Randbemerkung: Die im Gelände ausgewiesene Obergrenze der Gr-Horizonte liegt zumeist tiefer als die 300d-Sättigungslinie, was darauf hindeutet, dass es bereits bei annähernder Sättigung zur Ausprägung eines Gr-Horizontes kommt. Dies korrespondiert mit der Beschreibung „*nass* an über 300 Tagen“ für Gr-Horizonte in der KA5, Ad-hoc AG Boden 2005). An allen Standorten treten „Nässeperioden“ auf, ihre Zahl und Dauer nimmt mit zunehmend tieferer mittlerer Grundwasserdruckhöhe bei MW (bzw. RNW) ab. Erst ab einer Tiefenlage bei MW unterhalb 1,40 m sind beispielsweise in 0 - 30 cm Bodentiefe weniger als durchschnittlich 100 Tage in Nässeperioden zu verzeichnen (vgl. Kap. 4.5.2 in emc 2012c, Anlage 2 zu diesem Bericht). „Trockenperioden“ mit potentieller Einschränkung der Wasseraufnahme aus dem Boden treten in nennenswertem Ausmaß erst ab einer mittleren Grundwasserdruckhöhe bei RNW tiefer als 1,50 m auf (vgl. Kap. 4.5.3 in emc 2012c, Anlage 2 zu diesem Bericht). Bodenwasserpotentiale geringer als pF 4,2, also eine Unterschreitung des permanenten Welkepunktes, traten in den Simulationen nur vereinzelt und nur bis in eine Bodentiefe von max. 10 cm auf.

Die in den Simulationen berechneten Bodenwasserflüsse decken ein weites Wertespektrum ab. Die innerhalb einer beliebigen 14-tägigen Periode summarisch auftretenden Flüsse (14d-Flüsse) erreichen an den Modellstandorten, betrachtet in 80 cm Bodentiefe, maximal nach oben gerichtete Flüsse von 24 – 1600 mm/14d. Nur an 2 Standorten liegen diese Maxima unter 100 mm/14d (B448 mit sehr geringer Äquivalentleitfähigkeit, KRB 535 mit sehr tief liegenden Grundwasserdruckhöhen). Die Maxima der Flüsse treten im Allgemeinen unter gesättigten Fließverhältnissen auf, die ermittelten 14d-Flüsse nehmen mit zunehmender Äquivalentleitfähigkeit (als Maß der mittleren gesättigten Wasserleitfähigkeit des Bodenprofils) zu. Einen zusätzlichen Einfluss übt der dabei vorherrschende Druckgradient aus, so werden auch bei höherer Äquivalentleitfähigkeit durch eine tiefere Lage des Grundwassers gleiche maximale Flüsse an diesen Standorten erreicht.



Gesättigte Fließverhältnisse sind die Ausnahme, so zeigt sich, dass 95 % aller auftretenden 14d-Flüsse in 80 cm Tiefe an den verschiedenen Standorten kleiner sind als 0,1 – 340 mm/14d (wobei „kleiner“ auch nach unten gerichtete, negative Flüsse einschließt), in 13 der insgesamt 30 Modellrealisationen sind diese Flüsse < 42 mm/14d, in 4 Fällen < 14 mm/14d. Letztere sind die bereits oben genannten Standorte, zusätzlich 2 Standorte mit zwar mittlerer Äquivalentleitfähigkeit, aber größeren Flurabständen der Grundwasserdrücke.

An Standorten mit geringer Äquivalentleitfähigkeit sind die Bodenwasserflüsse somit erheblich gegenüber Standorten mit höherer Durchlässigkeit herabgesetzt. Ansteigende Grundwasserdrücke wirken sich mit teils deutlicher zeitlicher Verzögerung in der Befeuchtung des Bodens aus, die Amplitude der Tiefenlinie vollständiger Sättigung ist dort gegenüber der Schwankung der Druckhöhen gedämpft, und auch in Perioden mit Grundwasserdrücken über Geländeneiveau tritt - keine zu lange Dauer dieser Perioden sowie kein schon bei RNW hoch anstehendes Grundwasser vorausgesetzt – meist keine vollständige Sättigung des Bodens auf. Dies ist besonders deutlich an den Modellergebnissen für Standort B448, aber auch an den Standorten B35, B208, B404 und B40, insbesondere in den trockenen Jahren zu beobachten.

### 5.3 Interpretation

Die Modellergebnisse zeigen die komplexen Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften (Bodenaufbau, bodenhydraulische Parameter) und Randbedingungen (Niederschlag/Verdunstung, Grundwasserdruck). Generell ist festzuhalten, dass, je höher die Wasserdurchlässigkeiten im Profil und je stärker die antreibenden hydraulischen Gradienten sind (also je näher die Grundwasserdruckhöhe an die Geländeoberkante reicht), umso feuchter der Boden und umso größer die auftretenden Flüsse im Profil werden. Höher reichende Grundwasserdrücke können niedrigere Durchlässigkeiten kompensieren und zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der im Profil auftretenden Flüsse führen. Die Zusammenhänge sind nichtlinear und wiederum abhängig vom Bodenaufbau bzw. der Abnahme der Wasserdurchlässigkeit des Materials mit abnehmender Bodenfeuchte (Abnahme des wassergefüllten bzw. durchströmten Porenraums).

Ein deutlicher Zusammenhang besteht zwischen Äquivalentleitfähigkeiten und den Maxima der im Profil auftretenden (in der Regel gesättigten) Flüsse, der beeinflusst wird durch die mittlere Tiefenlage des Grundwasserdruckes (z.B. charakterisiert als Flurabstand bei RNW oder MW). Die geringsten gesättigten Flüsse während des Modellzeitraums (18 Jahre) treten auf an Standorten mit „sehr geringer“ Äquivalentleitfähigkeit, und an einem Standort mit „geringer“ Äquivalentleitfähigkeit und einer Grundwasserdruckhöhe bei MW unterhalb (tiefer) 1,75 m unter GOK.

Das Auftreten von weiteren Bodenwasserflüssen lässt sich beschreiben anhand der statistische Verteilungsparameter der auftretenden 14d-Flüsse (z. B. 95%-Perzentil, Median). Diese, zumeist unter ungesättigten Bedingungen oder unter geringeren Druckgradienten auftretenden Flüsse werden zunehmend unabhängig von gesättigter Äquivalentleitfähigkeit und unterer Randbedingung, vielmehr nehmen die ungesättigten bodenhydraulischen Eigenschaften und die obere Randbedingung (Verdunstung, Niederschlag) an Bedeutung zu. Da die ungesättigte Wasserleitfähigkeit stets geringer ist als die gesättigte Wasserleitfähigkeit, kann letztere als Kardinalwert auch zur Charakterisierung der ungesättigten Durchlässigkeit herangezogen werden. An den modellierten Standorten mit geringer Äquivalentleitfähigkeit und



Grundwasserdruckhöhen bei RNW unterhalb rund 1,75 m konnte deutlich die Dämpfung bzw. Verzögerung in der Durchfeuchtung des Bodens (ebenso wie in seiner Abtrocknung) im Vergleich zur Schwankung der Grundwasserdrücke gezeigt werden, sowie die Ausprägung zeitweise gespannter Grundwasserverhältnisse.

## 6 Zusammenfassende Bewertung der Bodenwasser- dynamik im Ist-Zustand

Die Ergebnisse der Felderhebungen, Laborarbeiten und Auswertungen zeigen die hohe räumliche Variabilität der Böden, ihres Aufbaus und ihrer Eigenschaften im Untersuchungsgebiet, wie es für den Auebereich von Flüssen der Größe der Donau oder Isar zu erwarten ist. Die Böden weisen durchwegs einen geschichteten Profilaufbau auf, häufig mit wiederholten Wechsellagen innerhalb der feinkörnigen Auensedimente zwischen lehmigen, schluffigen und insbesondere auch sandigen Substraten. Die auf ihre hydraulischen Eigenschaften hin untersuchten Bodenmaterialien zeigen häufig mittlere bis hohe gesättigte Wasserdurchlässigkeiten ( $K_s$ -Werte), die im Vergleich zu Literaturwerten als plausibel einzustufen sind. Bei gleicher Textur sind grundsätzliche Unterschiede zwischen M- und G-Horizonten zu erkennen, insbesondere bei geringer Lagerungsdichte ist die Wasserdurchlässigkeit in M-Horizonten deutlich höher als in G-Horizonten, was auf zusätzliche Einflüsse von Gefüge und Wurzeln schließen lässt.

Als Kennwert für die maximale Wasserdurchlässigkeit eines Standortes wurde seine (gesättigte) Äquivalentleitfähigkeit berechnet. Die hierfür erforderlichen Vorhersagemodelle (Pedotransferfunktionen) zur Prognose der gesättigten Wasserleitfähigkeit aller auftretenden Bodenhorizonte aus Parametern der Profilaufnahme erreichen eine Vorhersagegüte (erklärte Variabilität) von bis zu 80 % (Gruppe der M-Horizonte). Aufgrund der hohen Variabilität im Profilaufbau der Böden zeigen die ermittelten Äquivalentleitfähigkeiten nur geringe räumliche Abhängigkeiten, geostatistische Ähnlichkeiten reichen auf kleiner Skala nur über wenige Meter, auf einer höheren Skala über max. rd. 150 m. Dies lässt sich mit der Sedimentationsgeschichte und dem Erosionsgeschehen zum Zeitpunkt der Ablagerung der Sedimente erklären. Räumlich interpolierte Darstellungen der für alle Bohrpunkte ermittelten Äquivalentleitfähigkeiten weisen große Bereiche mit mittleren, teilweise hohen oder auch geringen Äquivalentleitfähigkeiten aus. Insbesondere oberhalb der Isarmündung sind größere Bereiche mit geringen Äquivalentleitfähigkeiten vorhanden.

In 1D-Modellierungen des Bodenwasserhaushalts an ausgewählten Standorten konnte der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Äquivalentleitfähigkeit und maximal innerhalb des 18-jährigen Modellzeitraums auftretenden Bodenwasserflüssen (14d-Flüsse) plausibilisiert werden. Zusätzlich wurde die zentrale Bedeutung der unteren Randbedingung (Verlauf der Grundwasserdruckhöhe am betrachteten Standort) gezeigt. Mit Ausnahme von 2 Standorten zeigen alle Modellergebnisse maximale im Profil auftretende 14d-Flüsse von über 100 mm/14d. Die geringsten Maxima treten am Standort mit „sehr geringer“ Äquivalentleitfähigkeit bzw. an einem Standort mit „geringer“ Äquivalentleitfähigkeit und einer Tiefenlage der mittleren Grundwasserdruckhöhe bei MW größer (tiefer als) 1,75 m unter GOK auf. Die ungesättigten Wasserflüsse sind an Standorten mit „geringer“ Wasserdurchlässigkeit deutlich gegenüber Standorten mit höherer Durchlässigkeit herabgesetzt, und im Vergleich zur Schwankung der Grundwasserdruckhöhe tritt eine



zeitliche Verzögerung in der Durchfeuchtung bzw. eine Dämpfung in der Schwankung der Sättigungstiefe auf.

Insgesamt muss in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes jedoch mit einer engen Kopplung des Bodenwasserhaushalts zu Fluss- und Grundwasserregime gerechnet werden. Wesentliche Ursachen sind die gemessenen Wasserdurchlässigkeiten, bereichsweise hoch anstehendes Grundwasser bei RNW und hohe Schwankungsbereiche der Grundwasserdruckhöhen.



## 7 Quellen

- Ad-hoc AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (KA4). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover, 392 S.
- Ad-hoc AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (KA5). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover, 438 S.
- AG Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Auflage (KA3). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover, 331 S.
- Arbeitskreis Standortkartierung (2003): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Bearb. u. zugest. vom „Arbeitskreis Standortkartierung“ in der „Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung“. 6. Aufl., Eching, 352 S.
- emc (2007): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Datenergänzung Bodenkunde: Ergebnisse der Aufschlussbohrungen Frühjahr 2007. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt, 13.08.2007.
- emc (2008a): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Auswertung bodenkundlicher und sonstiger Informationen zur flächendeckenden Darstellung der ‚Dichtwirkung‘ des Bodens: Vorbereitende Arbeiten. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt, 05.03.2008.
- emc (2008b): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Auswertung bodenkundlicher und sonstiger Informationen zur flächendeckenden Darstellung der Dichtwirkung des Bodens: Erstellung einer Karte. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt, 13.06.2008.
- emc (2009): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Darstellung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in ausgewählten Bereichen. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt, 26.8.2009.
- emc (2011): Donauausbau Straubing-Vilshofen. Modellierung des Bodenwasserhaushaltes an charakteristischen Querschnitten: 1D- und 2D-Modellierungen, Modelldokumentation und Ergebnisse. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. 17.02.2011.
- emc (2012a): Donauausbau Straubing-Vilshofen - EU-Studie. Rammkernsondierungen und bodenkundliche Aufbereitung: Grafische Aufbereitung der Sondierungsergebnisse. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. Version 2.0, 12.07.2012 (digitale **Anlage 3** zu diesem Bericht).
- emc (2012b): Donauausbau Straubing-Vilshofen - EU-Studie. Rammkernsondierungen und bodenkundliche Aufbereitung: Entnahme von Bodenproben in Schürfruben, Laboruntersuchungen und Auswertungen. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. 31.10.2012.
- emc (2012c): Donauausbau Straubing-Vilshofen. Modellierung des Bodenwasserhaushaltes an charakteristischen Querschnitten: 1D- und 2D-Modellierungen, Modelldokumentation und Ergebnisse ergänzender 1D-Modellierungen an ausgewählten Standorten. emc Ges. zur Erfassung und Bewertung von Umweltdaten mbH, Erfurt. Version 2.1, 31.10.2012 (digitale **Anlage 2** zu diesem Bericht).



- RMD (2012): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Untersuchung Bodenwasserdynamik, Ganglinienermittlung für die Bodenwasser-Modellierungen. RMD Wasserstraßen GmbH, München, 31.10.2012
- Schaller (2001): Donauausbau Straubing – Vilshofen. Vertiefende ökologische Grundlagenenerhebungen, Bodenkunde, Dokumentation. Planungsbüro Dr. J. Schaller, Kranzberg, 27.11.1997.
- J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten (2009): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. University of California, Riverside.
- Totsche, K. U. (2008a): Donauausbau Straubing – Vilshofen, Bodenkundliche Untersuchungen der Auelehmdeckschichten, Dokumentation der Ergebnisse. Endbericht. Lehrstuhl für Hydrogeologie, Friedrich-Schiller Universität Jena, 19.03.2008.
- Totsche, K. U. (2008b): Statistische Analyse der bodenkundlichen Untersuchungen sowie Entwicklung multipler linearer Regressionsmodelle zur Vorhersage der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Rahmen des Projekts „Donauausbau Vilshofen-Straubing“. Endbericht. Lehrstuhl für Hydrogeologie, Friedrich-Schiller Universität Jena, 19.03.2008.
- Totsche, K. U. (2012): Dichtigkeit von Böden unter besonderer Berücksichtigung der Bodentypen im Vorlandbereich der Donau zwischen Straubing und Vilshofen im Rahmen des Projekts „Donauausbau Straubing – Vilshofen“. Fachgutachterliche Stellungnahme. Lehrstuhl für Hydrogeologie, Friedrich-Schiller Universität Jena, 01.11.2012 (digitale **Anlage 1** zu diesem Bericht).
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, V 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. RETC V 6: [http://www.pc-progress.cz/Fr\\_Services\\_Hydrus\\_Downloads.htm](http://www.pc-progress.cz/Fr_Services_Hydrus_Downloads.htm).



Jena, den 05.11.2012

gez. Prof. Dr. Totsche

---

Prof. Dr. K. U. Totsche  
Lehrstuhl für Hydrogeologie, FSU Jena

gez. Dr. Jaesche

---

Dr. Ph. Jaesche  
emc GmbH, Erfurt