



Diplomverteidigung

**Ermittlung prognostischer Strömungsverhältnisse
mittels des Simulationsprogramms PCSiWaPro® bei
dezentraler Versickerung von Regenwasser auf
versiegelten Flächen**

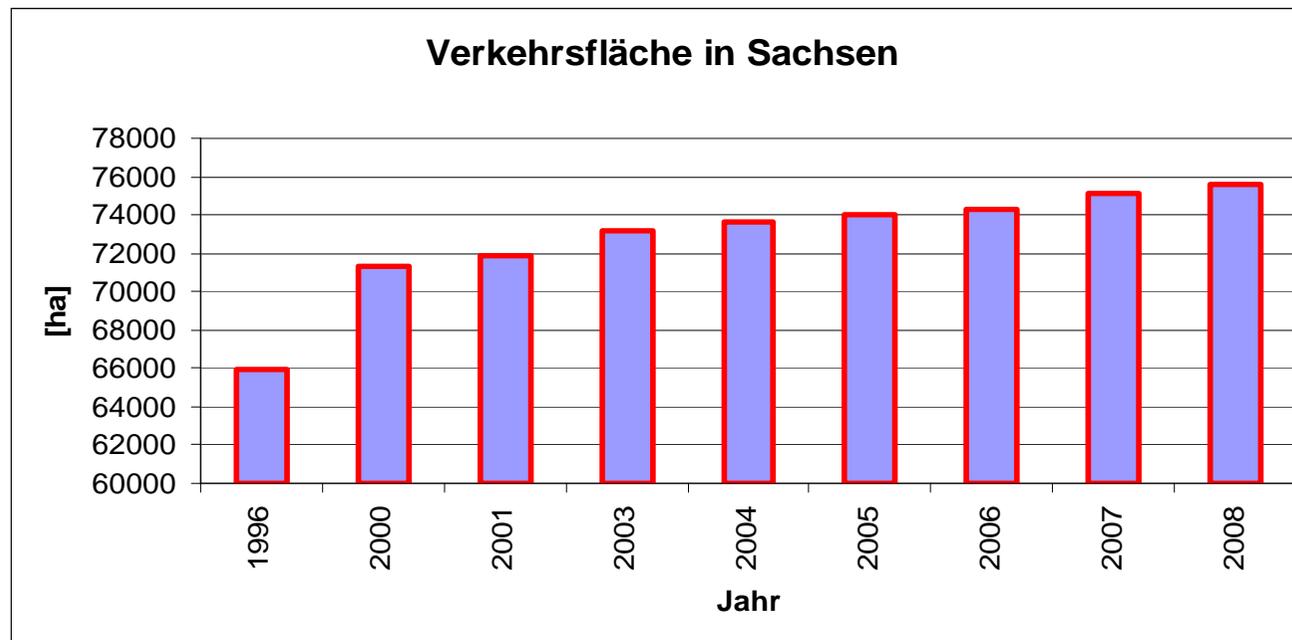
Bearbeitungszeitraum: 01.12.2011 – 31.05.2012

Pirna, 05.07.2012

Jens Heine

1. Einleitung
2. Zielstellung
3. Das Simulationsprogramm PCSiWaPro[®]
4. Modellgrundlagen
5. Modelle und Simulationsergebnisse
 - 5.1. Ausgangsmodell „Su2 – kumulativ“
 - 5.2. Modell „Su3 - Ganglinie“
 - 5.3. Ganglinienmodell „Su3 – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration“
 - 5.4. Ganglinienmodell „Su3 – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration mit Grobsandentwässerung“
6. Zusammenfassung und Ausblick

- Stetige Zunahme der Versiegelung von Bodenflächen
 - Allein in Sachsen anhaltendes Siedlungsflächenwachstum um ca. 8 ha/Tag
 - Im Straßenbau Tendenz deutlich erkennbar

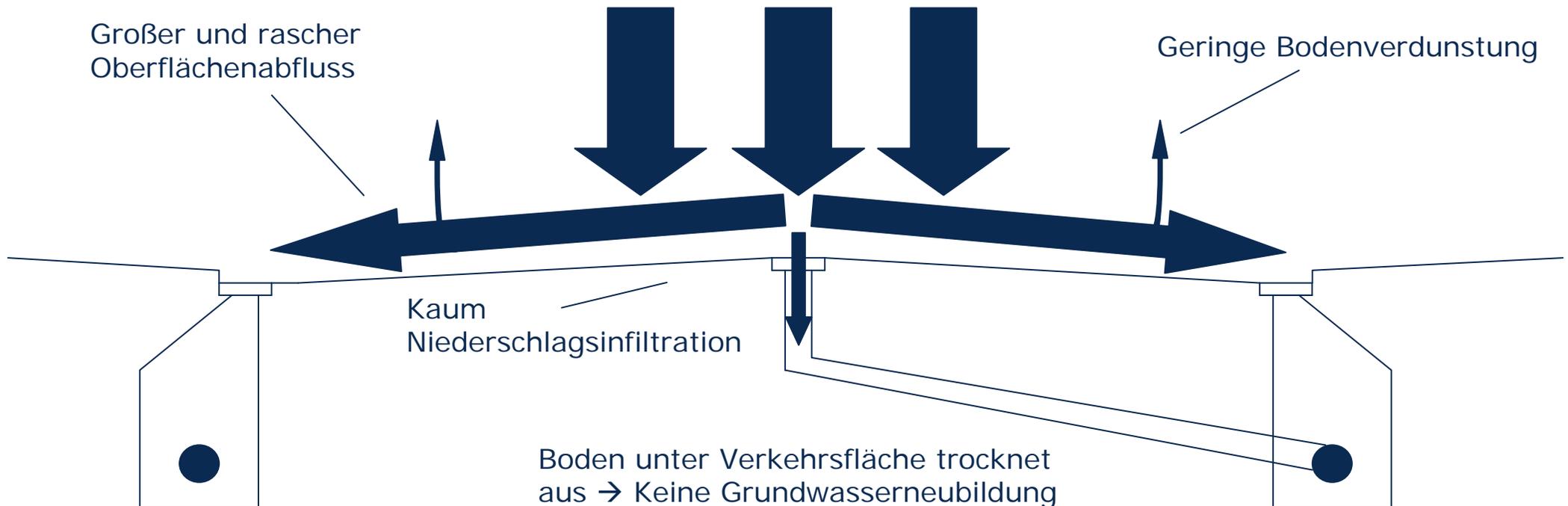


[Quelle: Siemer (2009)]

→ Konventionelle Verkehrsflächenentwässerung:

→ Zentrales Regenwasserkanalisationssystem

→ Wasser wird Kläranlagen oder Vorfluter zugeführt



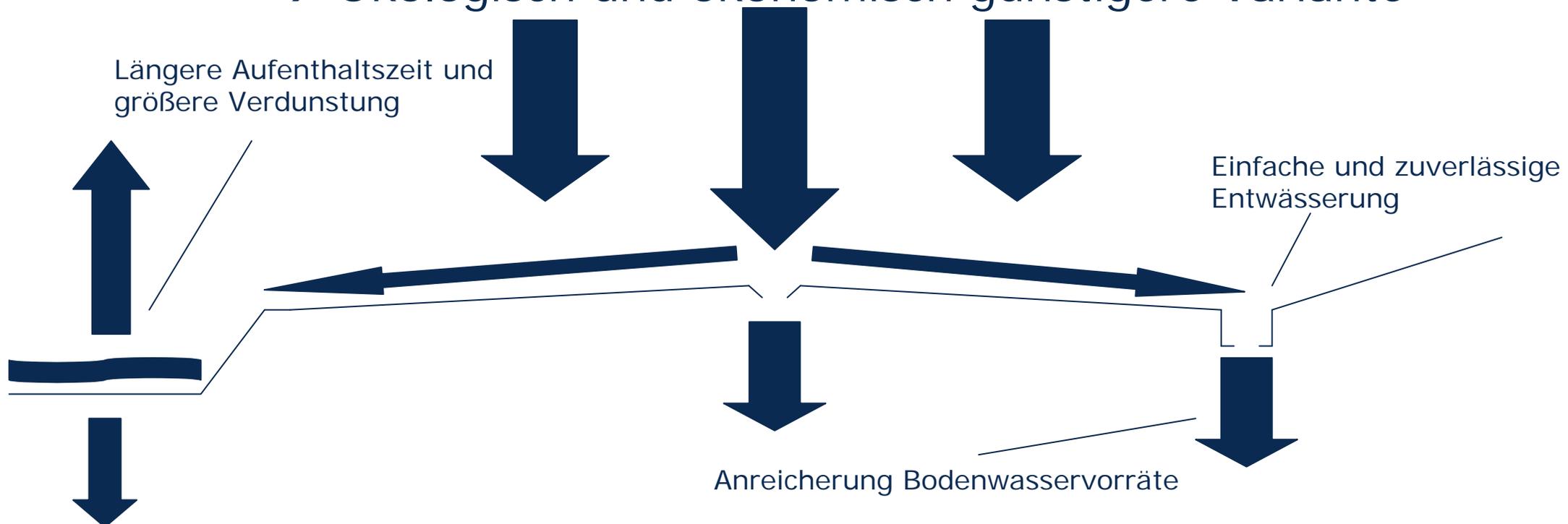
→ Lokale Wasserbilanz wird erheblich beeinflusst!

→ Zunehmendes Versagen der Systeme in Kombination mit vermehrt auftretenden Starkniederschlagsereignissen infolge des Klimawandels

- Überflutete Straßenflächen
- Sichtbehinderungen
- Aquaplaning
- Verkehrsunfälle



- Naturnahe und nachhaltig funktionierende Verdunstungs- und Versickerungsstrategie
 - Überschwemmungswahrscheinlichkeit vermindert
 - Lokal ausgeglichene Wasserbilanz
 - Ökologisch und ökonomisch günstigere Variante



„Ziel der Diplomarbeit ist es, die Strömungsverhältnisse bei einer dezentralen Versickerung von Regenabflusswasser versiegelter Flächen mit dem Programm PCSiWaPro[®] zu simulieren.

Es werden dazu verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen bei einer Straßenfläche erstellt und ausgewertet.“

- Bildet die Wasserströmungs- und Stofftransportprozesse in der ungesättigten Bodenzone nach
- Am Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden entwickelt
- Nutzt zur Simulation der 2D-vertikal-ebenen oder 2D-rotationssymmetrischen instationären, ungesättigten Strömungsprozesse
 - Richards-Gleichung
 - Van Genuchten-Luckner-Gleichung
 - Methode der finiten Elemente

Richards-Gleichung

- Partielle Differentialgleichung
- Beschreibt die Strömungsprozesse in der gesättigten und ungesättigten Bodenzone

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S$$

- θ ... Volumetrischer Wassergehalt
- t ... Zeit
- x_i ... Räumliche Koordinaten
- K ... Hydraulische Leitfähigkeit
- h ... Druckhöhe
- S ... Speicher- und Senkterm

Van-Genuchten-Luckner-Gleichung

- Parametrisierung der Bodeneigenschaften
- Wassergehalt abhängig von kapillarer Druckhöhe (Saugspannung-Sättigungskurve)

$$\theta = \theta_r + \frac{\phi - \theta_{r,w} - \theta_{r,l}}{\left[1 + (\alpha \cdot h_c)^n \right]^{\frac{1}{n}}}$$

- ϕ ... Porosität
- $\theta_{r,w}$... Restwassergehalt
- $\theta_{r,l}$... Restluftgehalt
- α ... Skalierungsfaktor (van Genuchten)
- h_c ... Kapillare Druckhöhe
- n ... Anstiegsparameter (van Genuchten)

→ Numerische Lösung der partiellen Differentialgleichung mit Hilfe der **Methode der finiten Elemente**

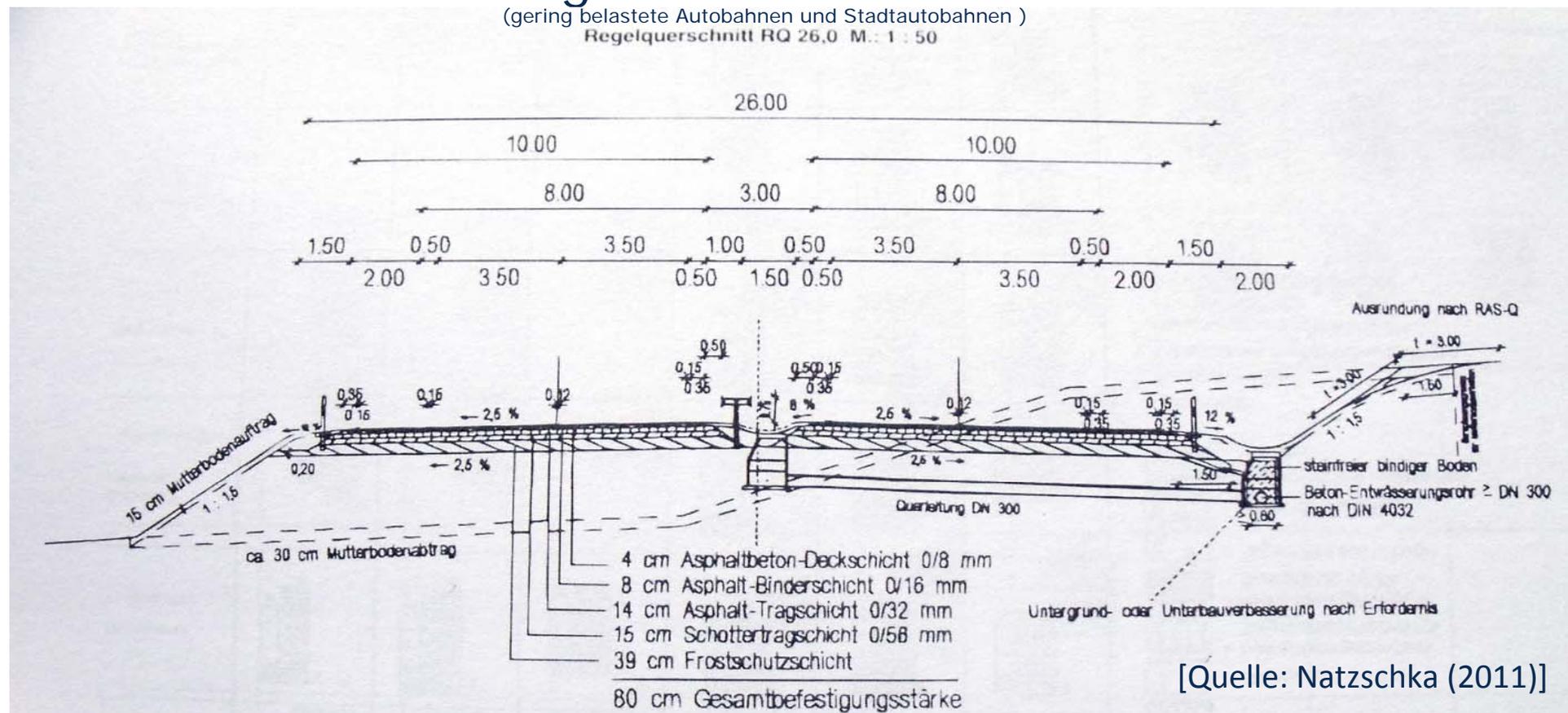
Vorab: Für die Diplomarbeit lagen keinerlei Messdaten oder vergleichbare Arbeiten vor

→ Fiktive Szenarien mit selbst recherchierten Parametern und Ausgangssituationen

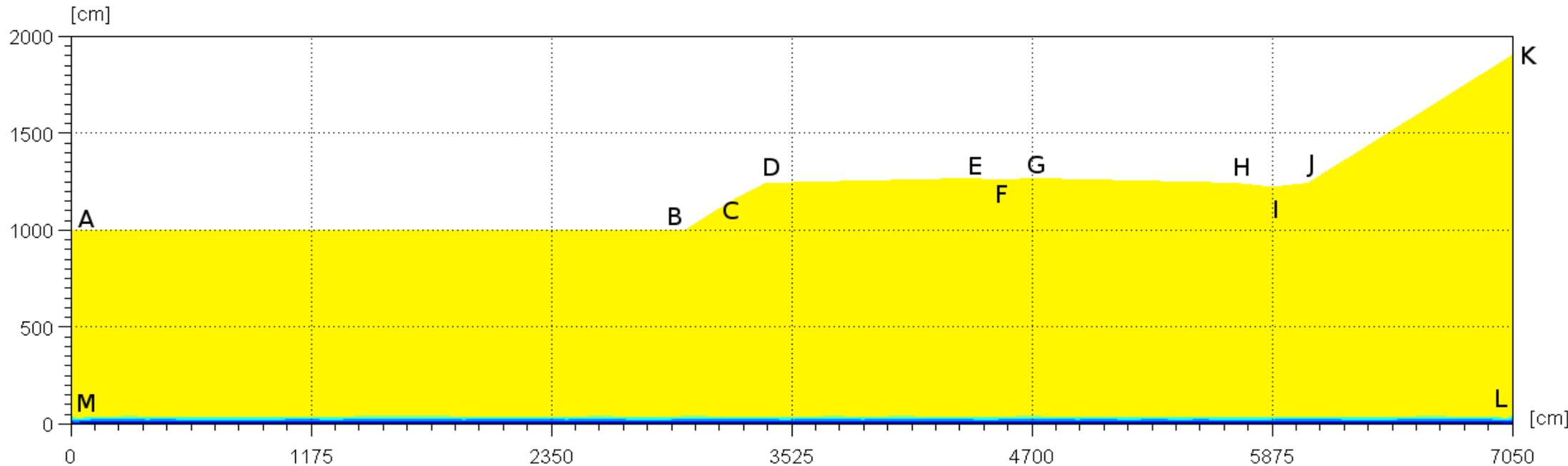
→ Straßenquerschnitt

→ In Anlehnung an Regelquerschnitt 26 aus Richtlinie für die Anlage von Straßen

(gering belastete Autobahnen und Stadtautobahnen)
Regelquerschnitt RQ 26,0 M.: 1 : 50



→ In Koordinatenform für Modellaufbau überführt



- Links: Sickerfläche
- Rechts: Lärmschutzwall
- Grundwasserspiegel 10 m unter GOK

→ Niederschlagsereignis

12. August 2002

Kennung	Station	h_N [mm]	T [a]
SY 10582	Zinnwald-Georgenfeld (WST)	312,0	> 100
SY 10579	Marienberg (AWST)	166,5	> 100
SY 10488	Dresden-Klotzsche (FLUGWEWA)	158,0	> 100
SY 10578	Fichtelberg (WST)	135,4	> 100
SY 10480	Oschatz (WST)	108,5	> 100
SY 10376	Baruth (AWST)	99,0	82
SY 10476	Holzdorf (BW)	95,8	> 100
SY 10490	Doberlug-Kirchhain (AWST)	93,8	53
SY 10791	Großer Arber (WST)	88,5	15
SY 10379	Potsdam (OBS)	84,1	48
SY 10575	Aue (AWST)	79,9	9
SY 10577	Chemnitz (WST)	78,0	30
SY 10796	Zwiesel (AWST)	75,7	8
SY 10385	Berlin-Schönefeld (FLUGWEWA)	68,1	11
SY 10384	Berlin-Tempelhof (FLUGWEWA)	65,1	11
SY 10591	Lichtenhain-Mittel. (WST)	62,3	4
SY 10389	Berlin-Alexanderplatz (AWST)	60,4	7
SY 10492	Cottbus (BW)	59,4	4

→ 12.08.2002 in Dresden

→ 158 mm $\hat{=}$ 158 l/m² in 24h

→ Extremes Niederschlagsereignis

→ Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit dezentraler, naturnaher Versickerungsstrategie ohne zentrales Regenwassersammelsystem

[Quelle: DWD]

→ 7 Modelle, die auf Ausgangsmodell beruhen, erstellt

→ **Agangsmodell: „schwach schluffiger Sand – kumulativ“**

→ Modell „mittel schluffiger Sand – kumulativ“

←
←
Wurden in Diplomarbeit miteinander
verglichen → keine relevanten Unterschiede

→ **Modell „mittel schluffiger Sand - Ganglinie“**

→ Ganglinienmodell „mittel schluffiger Sand – 3x Niederschlag“

→ Ganglinienmodell „mittel schluffiger Sand – 3x Niederschlag innerhalb von 10 h“

→ **Ganglinienmodell „mittel schluffiger Sand – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration“**

→ **Ganglinienmodell „mittel schluffiger Sand – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration mit Grobsandentwässerung“**

Materialparameter:

- Bodenmaterial im gesamten Modell schwach schluffiger Sand → Kurzzeichen **Su2**

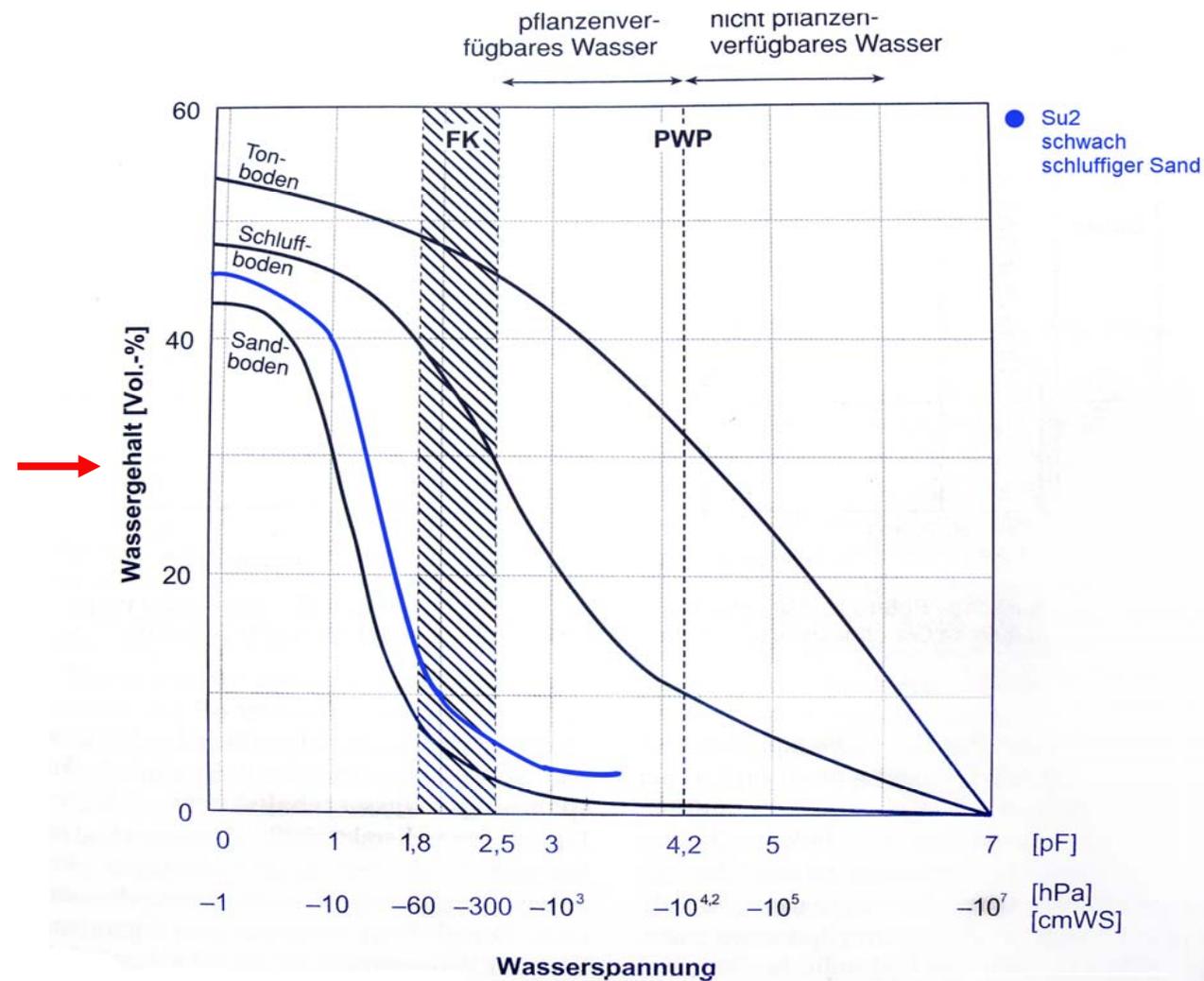
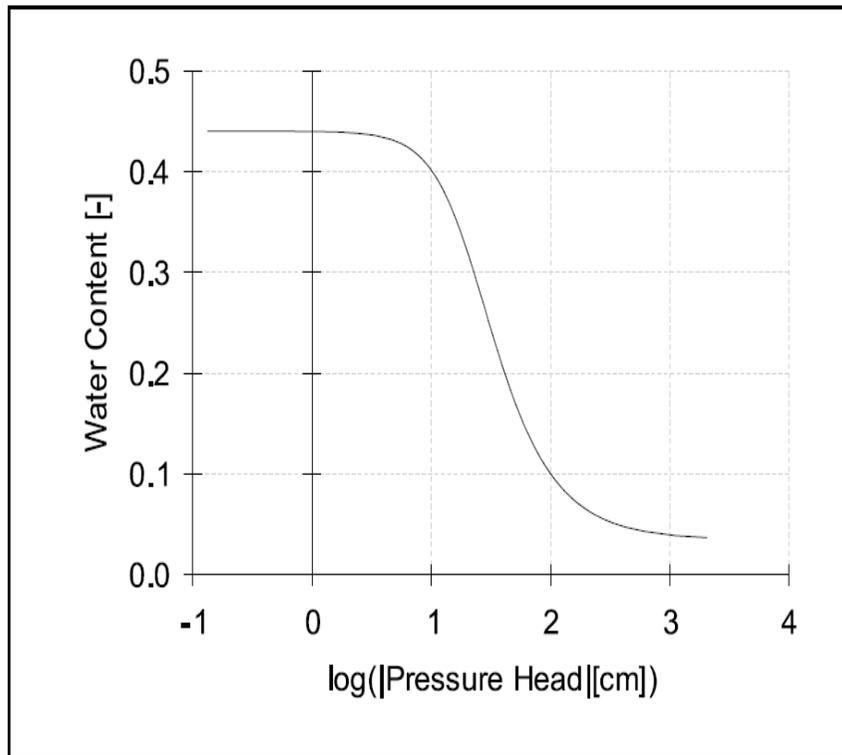
Bodenarten-Hauptgruppe	Bodenarten-Gruppe	Kurzzeichen	Bodenarten	Kurzzeichen	Kornfraktionen Massenanteil in %		
					Ton	Schluff	Sand
Sande	Reinsande	ss	reiner Sand	Se	0 bis 5	0 bis 10	85 bis 100
	Lehmsande	ls	schwach schluffiger Sand	Su2	0 bis 5	10 bis 25	70 bis 90
			schwach lehmiger Sand	Sl2	5 bis 8	10 bis 25	67 bis 85
			mittel lehmiger Sand	Sl3	8 bis 12	10 bis 40	48 bis 82
			schwach toniger Sand	St2	5 bis 17	0 bis 10	73 bis 95
	Schluffsande	us	mittel schluffiger Sand	Su3	0 bis 8	25 bis 40	52 bis 75
			stark schluffiger Sand	Su4	0 bis 8	40 bis 50	42 bis 60

[Quelle: DIN 4220 (2009)]

- Bodenhydraulische- und van Genuchten-Parameter mit Hilfe von Programm RETC ermittelt

Materialparameter:

Hydraulic Properties: Theta vs. log h



[Quelle: Scheffer/Schachtschabel (2002) (verändert)]

Niederschlagsverteilung unter Berücksichtigung von Oberflächenabfluss:

Anfallendes Gesamtvolumen innerhalb von 24 h:

$$158 \text{ l/m}^2 * 70,5 \text{ m}^2 = 11139 \text{ l} = 11,139 \text{ m}^3$$

→ Dieses Volumen wurde unter Berücksichtigung der OA über Modellgebiet verteilt

→ Berechnung der Oberflächenabflüsse im Ausgangsmodell mit Hilfe von Abflussbeiwerten des Arbeitsblattes DWA-A 138*

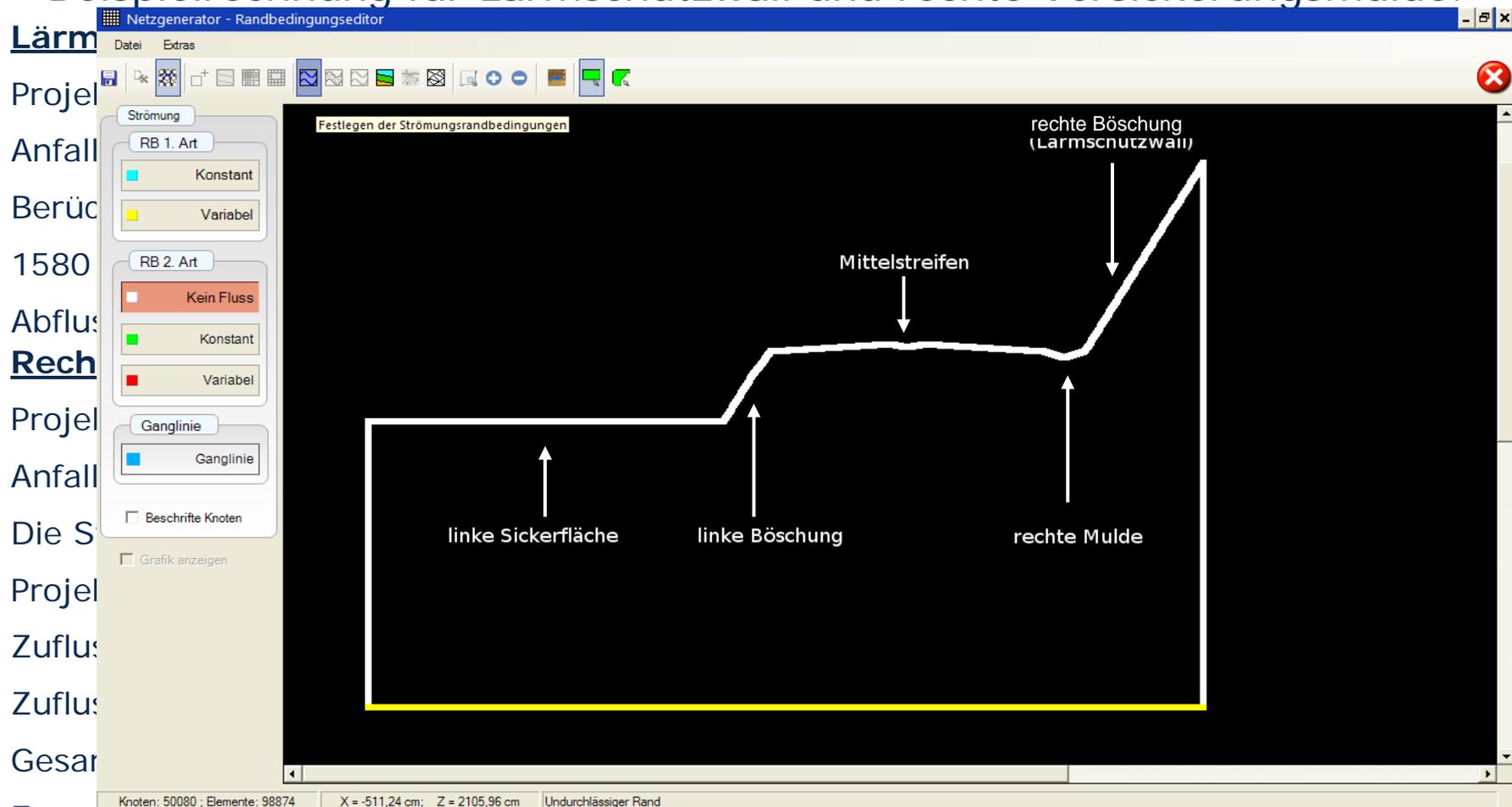
Böschungen, Bankette und Gräben mit Regen- abfluss in das Entwässerungssys- tem	toniger Boden	0,5
	lehmiger Sandboden	0,4
	Kies- und Sandboden	0,3

[Quelle: DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2005)]

*Regelwerk aus dem Jahr 2005 für Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser

Niederschlagsverteilung unter Berücksichtigung von Oberflächenabfluss:

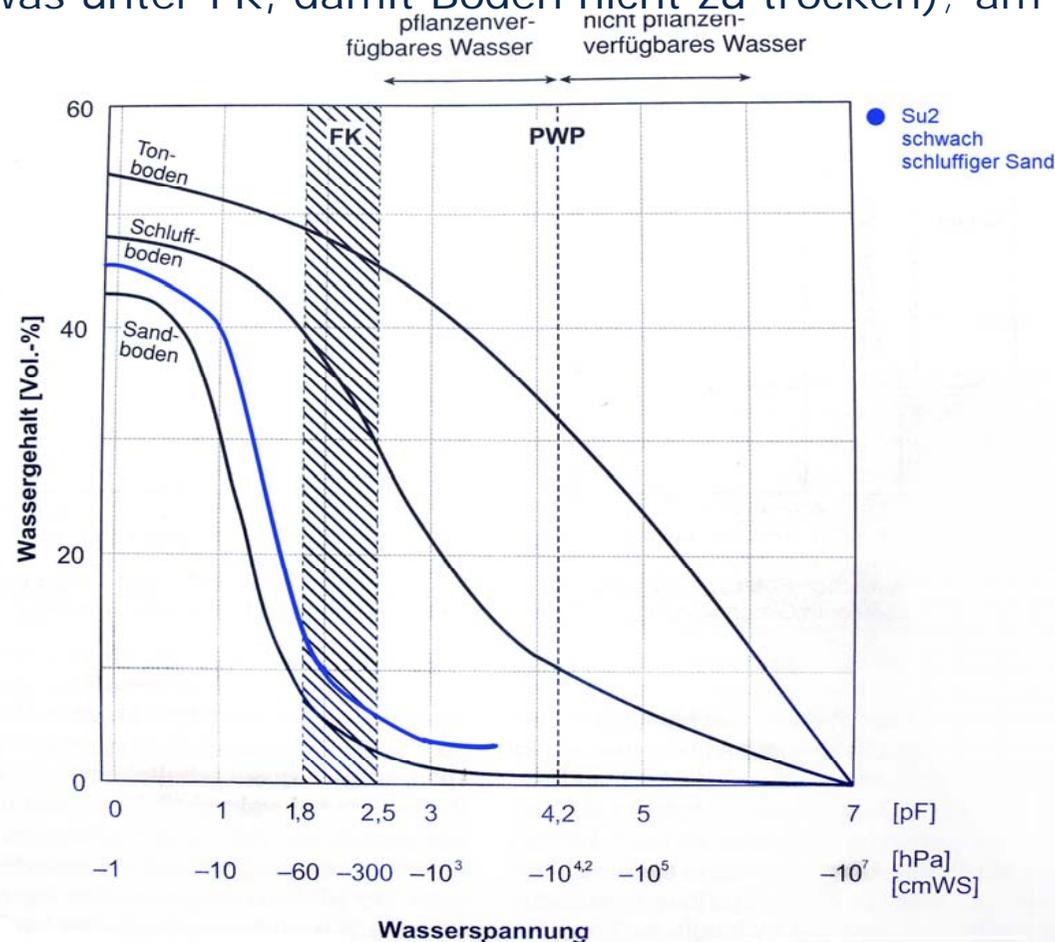
- Beispielrechnung für Lärmschutzwall und rechte Versickerungsmulde:



Zu versickerndes Gesamtvolumen: 553 l + 2212 l = 2765 l

Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen:

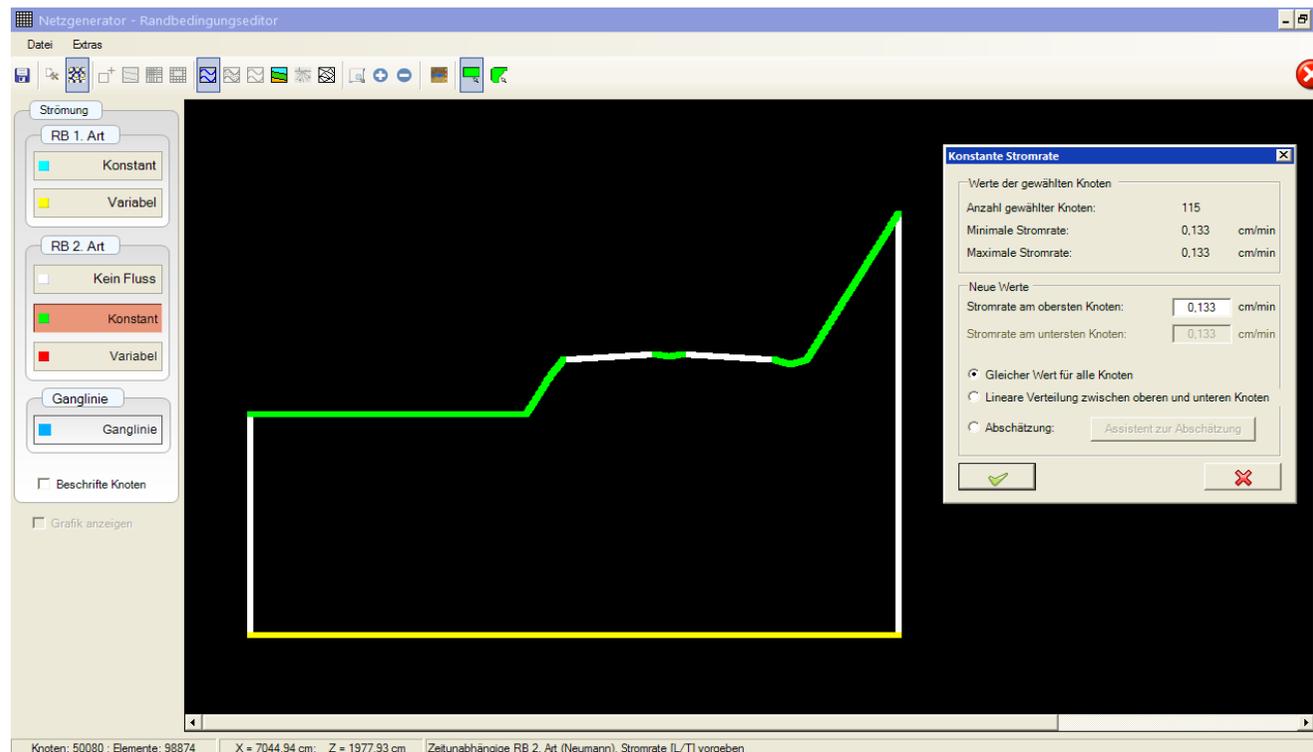
- Für Anfangsbedingung Orientierung an Druckhöhe bei Feldkapazität
- Hier –50 cm (etwas unter FK, damit Boden nicht zu trocken); am GWSP 0 cm



[Quelle: Scheffer/Schachtschabel (2002) (verändert)]

Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen:

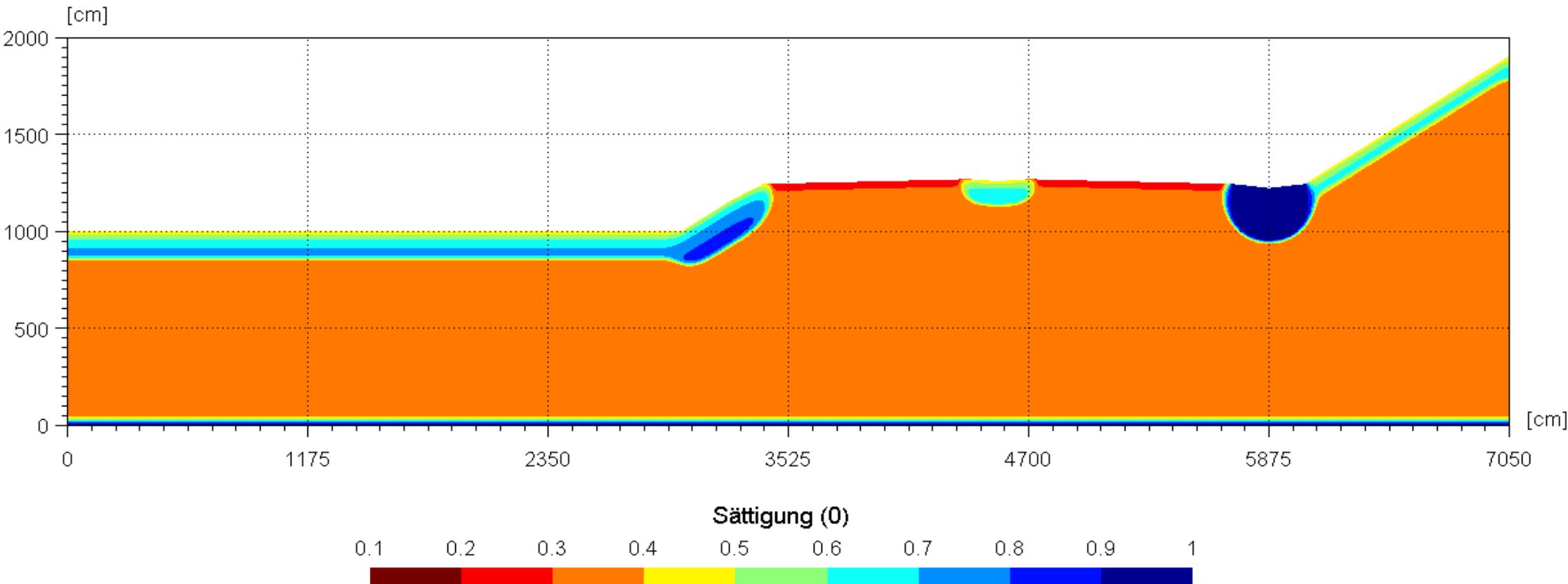
- Randbedingungen:
 - Unterer Modellrand: zeitabhängige Grundwasserspiegelhöhe
 - Straßenflächen: undurchlässiger Rand bzw. keine Stromrate
 - Seitenränder: undurchlässiger Rand bzw. keine Stromrate
 - Modellabschnitte mit Versickerung: konstante Stromrate



- Da die ersten Modelle mit RB konstanten Stromraten und diese nicht innerhalb einer Simulation zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu- oder abgeschaltet werden konnten, setzte sich das Gesamtmodell aus sieben Varianten kumulativ zusammen
 - Vorlaufvariante - 2 Tage ohne Infiltration → Einstellen Feldkapazität
 - Variante „Lärmschutzwall“ – 71,1 min Infiltration/Simulationsdauer
 - Variante „Mittelstreifen“ – 118,5 min Infiltration/Simulationsdauer
 - Variante „Linke Sickerfläche“ – 140,7 min Infiltration/Simulationsdauer
 - Variante „Linke Böschung“ – 248,9 min Infiltration/Simulationsdauer
 - Variante „Rechte Versickerungsmulde“ – 592,6 min Infiltration/Simulationsdauer
 - Langzeitvariante - 31 Tage ohne Infiltration

Simulationsergebnisse:

Abschluss der letzten Infiltration – nach 592,6 min

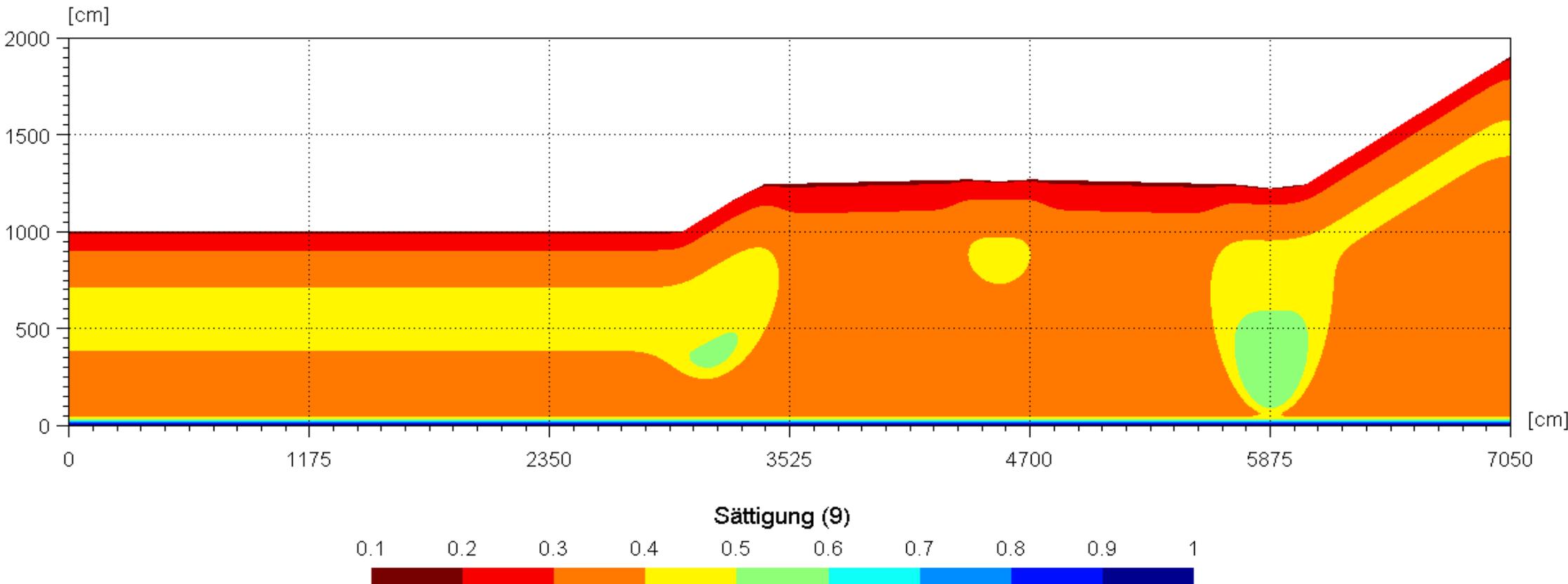


Infiltrationszeiten der Varianten:

- Rechte Böschung: 71,1 min
- Mittelstreifen: 118,5 min
- Linke Sickerfläche: 140,7 min
- Linke Böschung: 248,9 min
- Rechte Mulde: 592,6 min

Simulationsergebnisse:

9 Tage nach Abschluss der letzten Infiltration

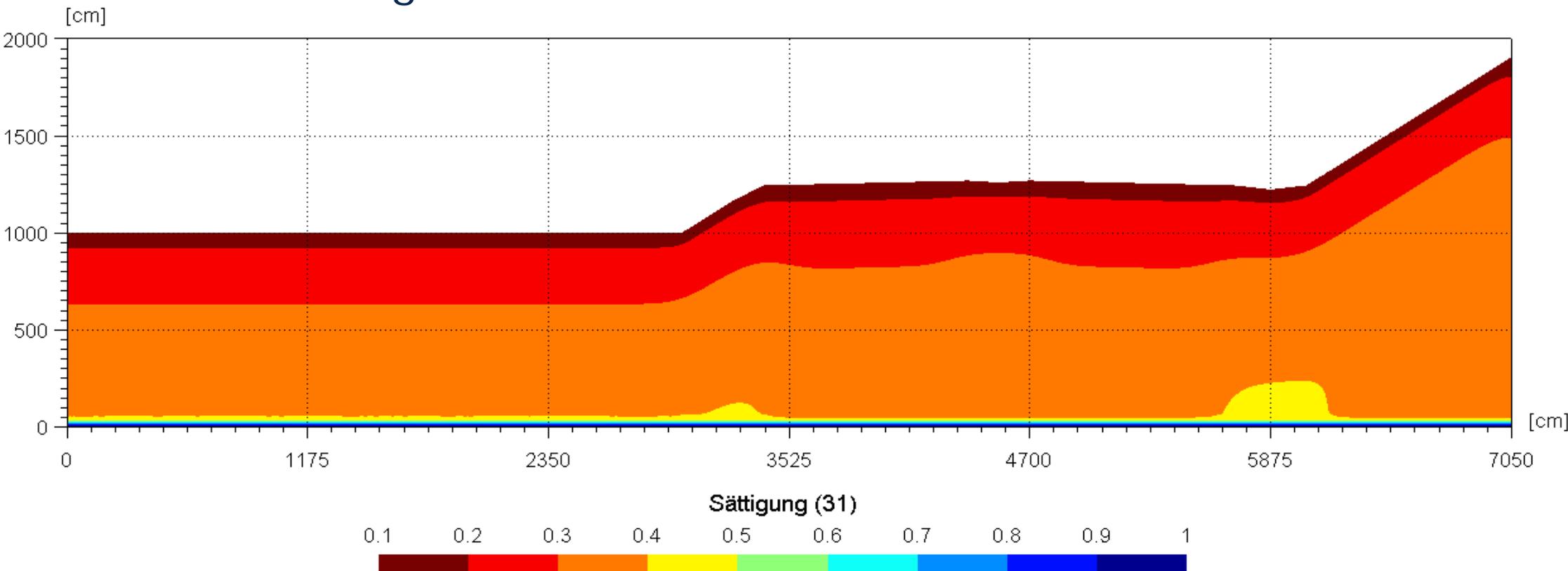


Infiltrationszeiten der Varianten:

- Rechte Böschung: 71,1 min
- Mittelstreifen: 118,5 min
- Linke Sickerfläche: 140,7 min
- Linke Böschung: 248,9 min
- Rechte Mulde: 592,6 min

Simulationsergebnisse:

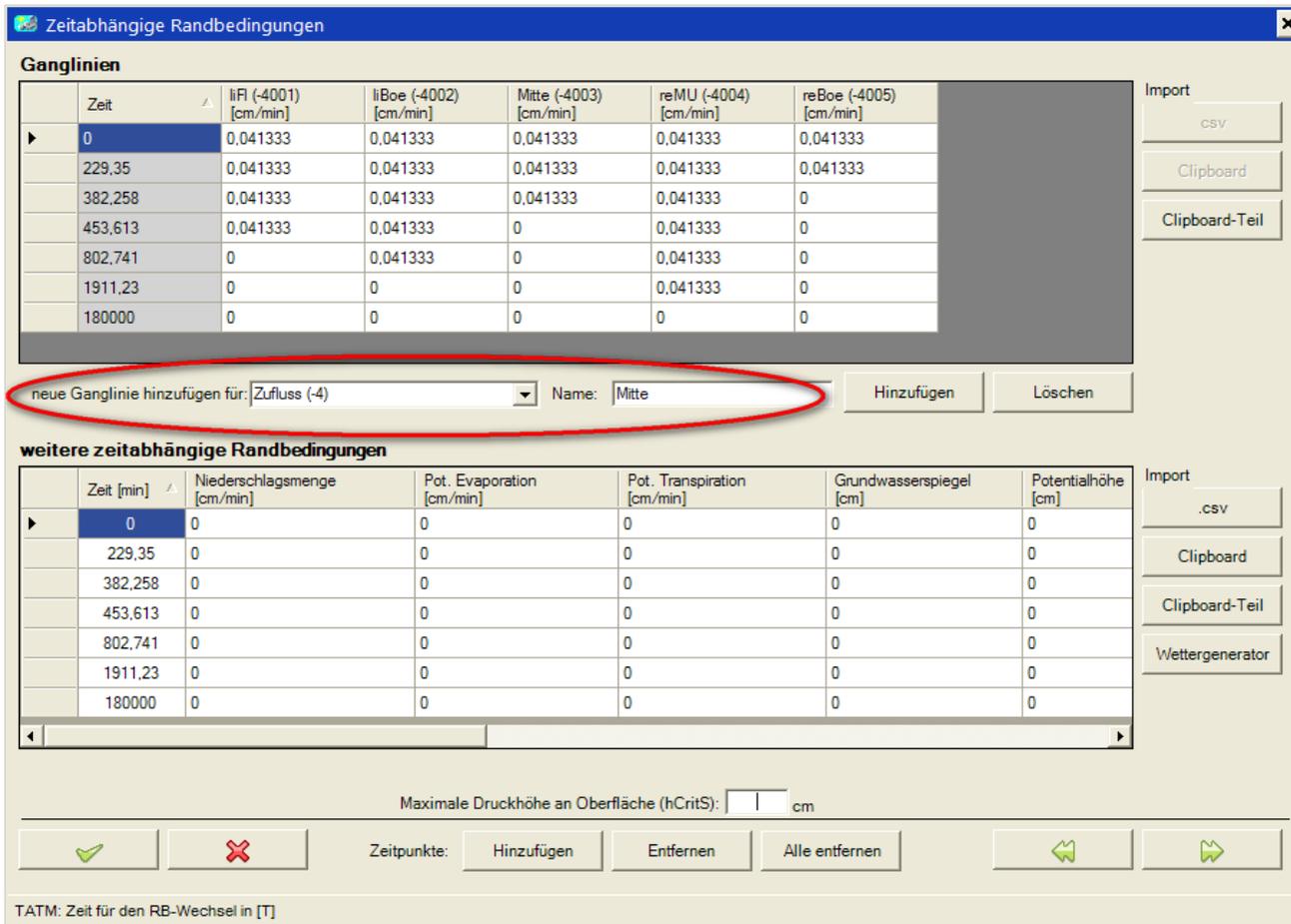
31 Tage nach Abschluss der letzten Infiltration



Infiltrationszeiten der Varianten:

- Rechte Böschung: 71,1 min
- Mittelstreifen: 118,5 min
- Linke Sickerfläche: 140,7 min
- Linke Böschung: 248,9 min
- Rechte Mulde: 592,6 min

→ Diplomarbeit gab Anstoß für Entwicklung des Moduls Ganglinien



Ganglinien

Zeit	liFl (-4001) [cm/min]	liBoe (-4002) [cm/min]	Mitte (-4003) [cm/min]	reMU (-4004) [cm/min]	reBoe (-4005) [cm/min]
0	0,041333	0,041333	0,041333	0,041333	0,041333
229,35	0,041333	0,041333	0,041333	0,041333	0,041333
382,258	0,041333	0,041333	0,041333	0,041333	0
453,613	0,041333	0,041333	0	0,041333	0
802,741	0	0,041333	0	0,041333	0
1911,23	0	0	0	0,041333	0
180000	0	0	0	0	0

neue Ganglinie hinzufügen für: Name:

weitere zeitabhängige Randbedingungen

Zeit [min]	Niederschlagsmenge [cm/min]	Pot. Evaporation [cm/min]	Pot. Transpiration [cm/min]	Grundwasserspiegel [cm]	Potentialhöhe [cm]
0	0	0	0	0	0
229,35	0	0	0	0	0
382,258	0	0	0	0	0
453,613	0	0	0	0	0
802,741	0	0	0	0	0
1911,23	0	0	0	0	0
180000	0	0	0	0	0

Maximale Druckhöhe an Oberfläche (hCritS): cm

TATM: Zeit für den RB-Wechsel in [T]

→ Ab April erstmals möglich mit atmosphärischen Randbedingungen mit unterschiedlichen Stromraten für verschiedene Modellabschnitte in einer Variante zu arbeiten

→ Alle Varianten eines kumulativen Modells konnten in einer Variante vereint

→ Mehrere aufeinander folgende Niederschlagsereignisse mit unterschiedlichen Stromraten in einer Variante simulierbar

Materialparameter:

- Bodenmaterial im gesamten Modell mittel schluffiger Sand
→ Kurzzeichen **Su3**

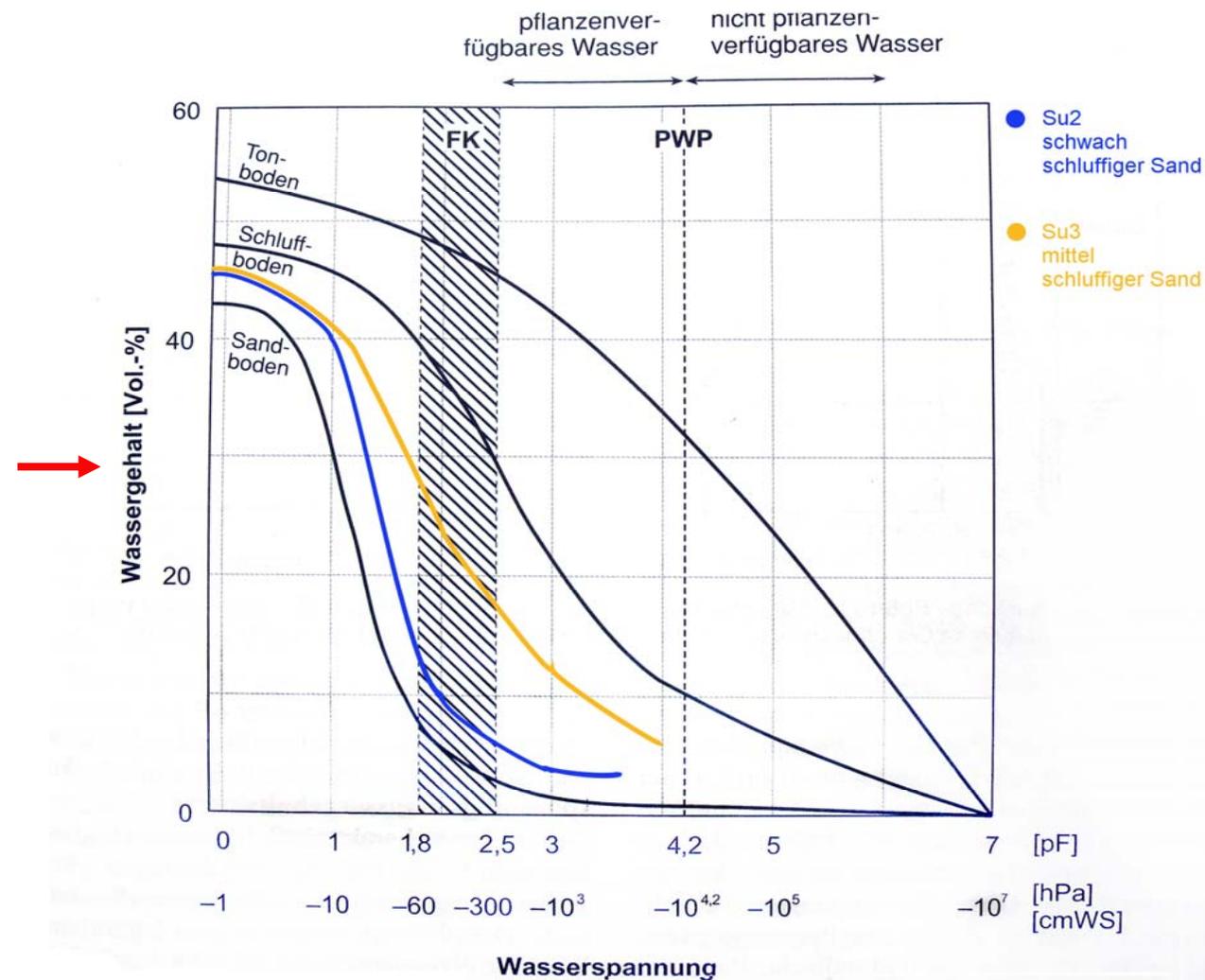
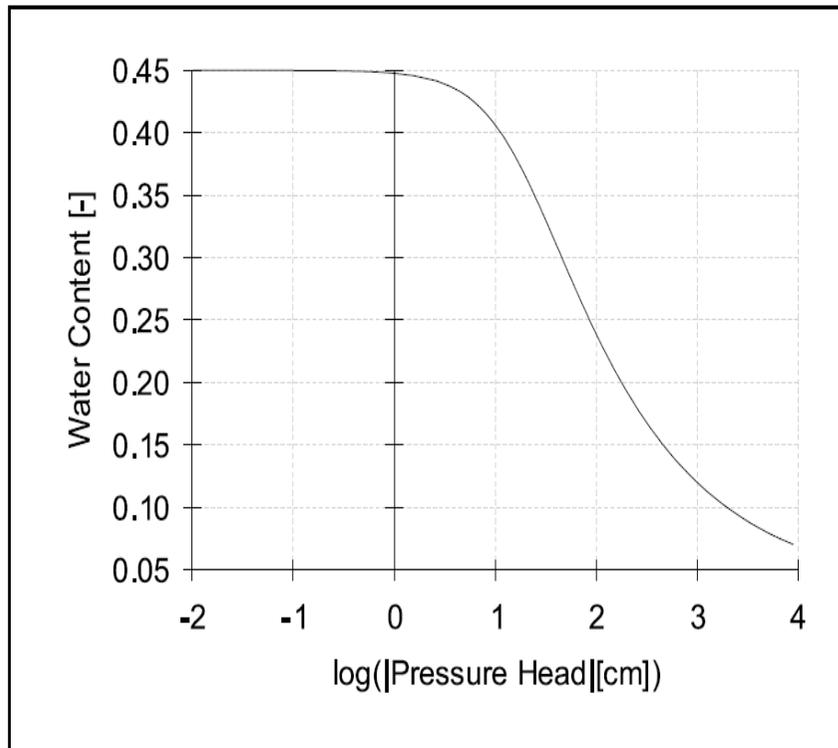
Bodenarten- Hauptgruppe	Bodenarten- Gruppe	Kurz- zeichen	Bodenarten	Kurz- zeichen	Kornfraktionen Massenanteil in %		
					Ton	Schluff	Sand
Sande	Reinsande	ss	reiner Sand	Ss	0 bis 5	0 bis 10	85 bis 100
	Lehmsande	ls	schwach schluffiger Sand	Su2	0 bis 5	10 bis 25	70 bis 90
			schwach lehmiger Sand	Sl2	5 bis 8	10 bis 25	67 bis 85
			mittel lehmiger Sand	Sl3	8 bis 12	10 bis 40	48 bis 82
			schwach toniger Sand	St2	5 bis 17	0 bis 10	73 bis 95
	Schluffsande	us	mittel schluffiger Sand	Su3	0 bis 8	25 bis 40	52 bis 75
			stark schluffiger Sand	Su4	8 bis 8	40 bis 50	42 bis 60

[Quelle: DIN 4220 (2009)]

- Bodenhydraulische- und van Genuchten-Parameter mit Hilfe von Programm RETC ermittelt

Materialparameter:

Hydraulic Properties: Theta vs. log h

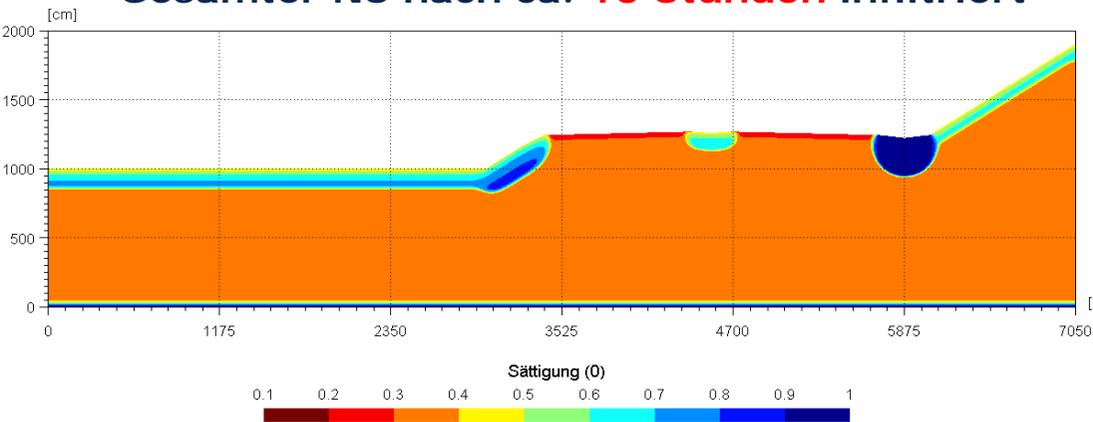


[Quelle: Scheffer/Schachtschabel (2002) (verändert)]

Simulationsergebnis:

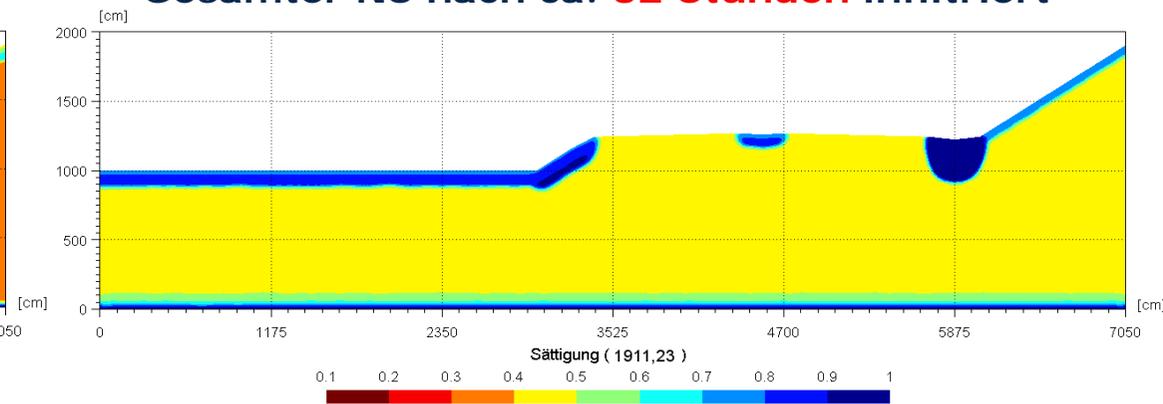
„Su2- kumulativ“

Gesamter NS nach ca. **10 Stunden** infiltriert

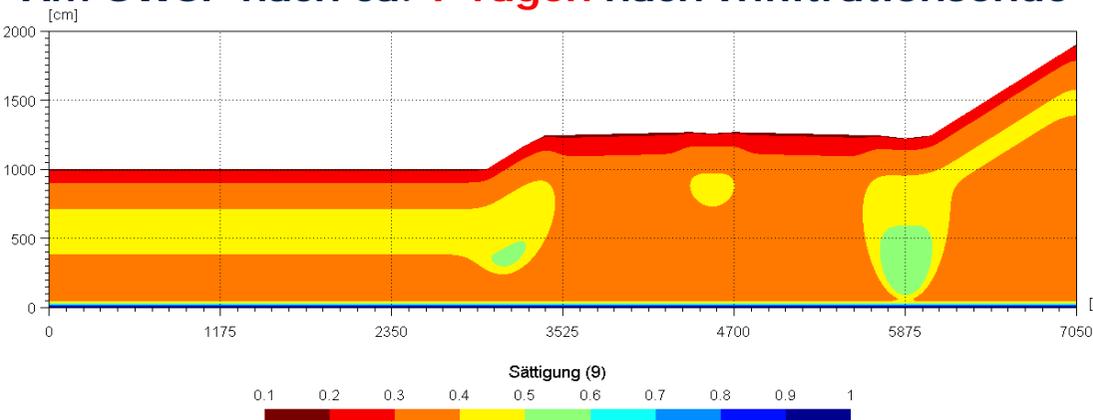


„Su3 - Ganglinie“

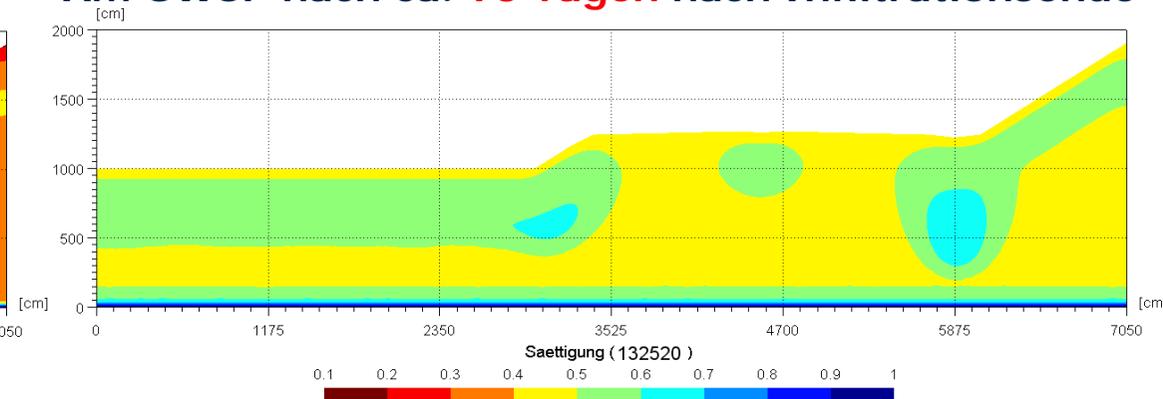
Gesamter NS nach ca. **32 Stunden** infiltriert



Am GWSP nach ca. **9 Tagen** nach Infiltrationsende



Am GWSP nach ca. **90 Tagen** nach Infiltrationsende



→ Erst nach 111,5 Tagen

→ Andere Berechnung der Oberflächenabflüsse

→ Vorher:

Volumen über Modell mit Abflussbeiwerten verteilt (auch im Straßenbau zur Bemessung von Entwässerungseinrichtungen angewendet) und versickert

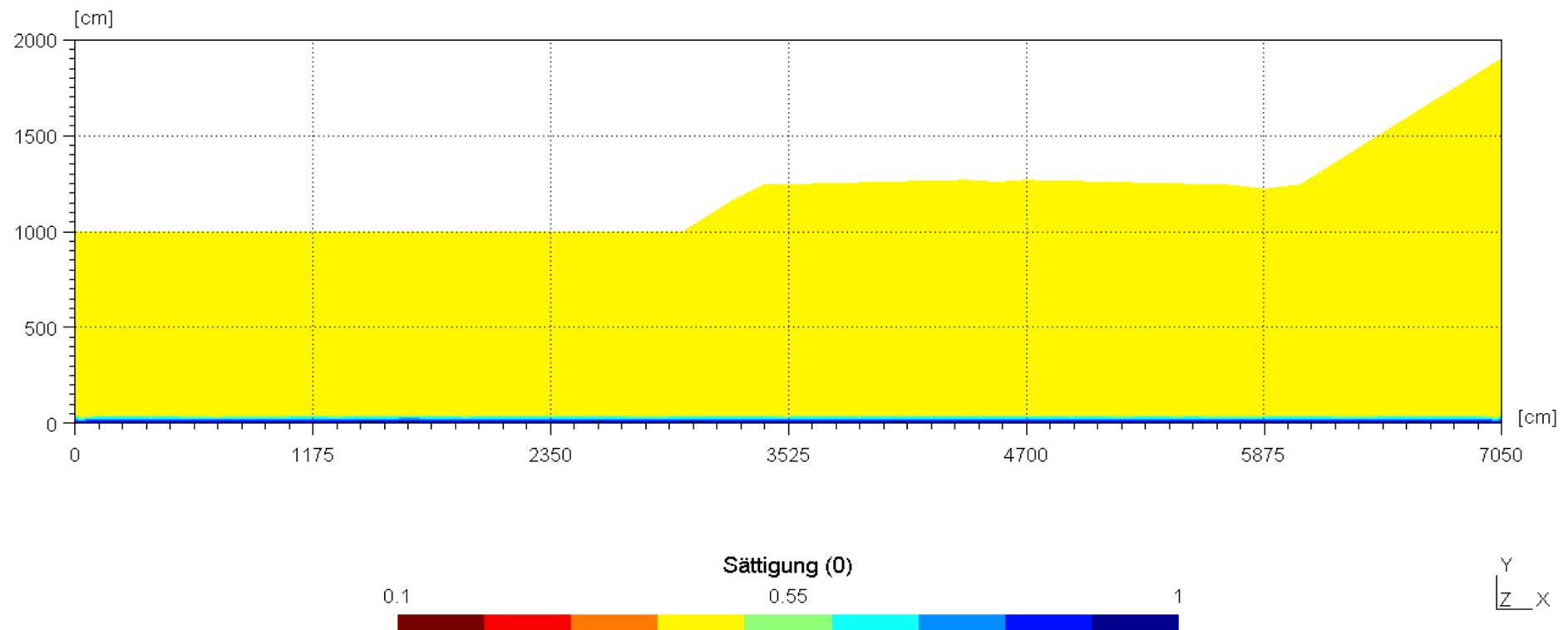
→ Jetzt:

Szenario: Niederschlag fällt innerhalb von 10 Stunden und
Abflussberechnung anhand der Versickerungsleistung des Bodenmaterials

- Bildung von Oberflächenwasser bzw. –abfluss nur wenn Niederschlagsintensität größer als Infiltrationsrate des Bodenmaterials
- Anpassung der Stromraten, dass Infiltrationszeit mindestens 600 min, da Niederschlag so lang anhält

Simulationsergebnis:

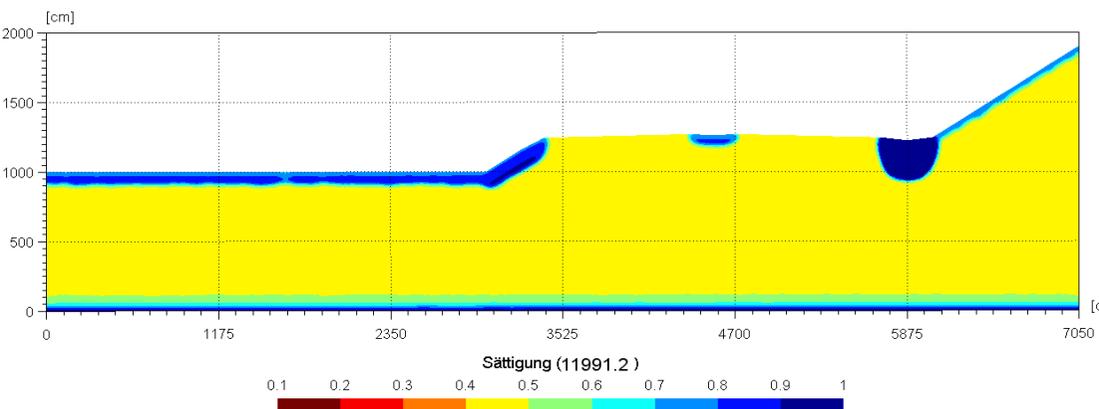
- Erste 7 Tage ohne Infiltration → Infiltration erster Niederschlag
- 5 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des ersten Niederschlagsereignisses
- 31 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des zweiten Niederschlagsereignisses
- 31 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des dritten Niederschlagsereignisses



Simulationsergebnis:

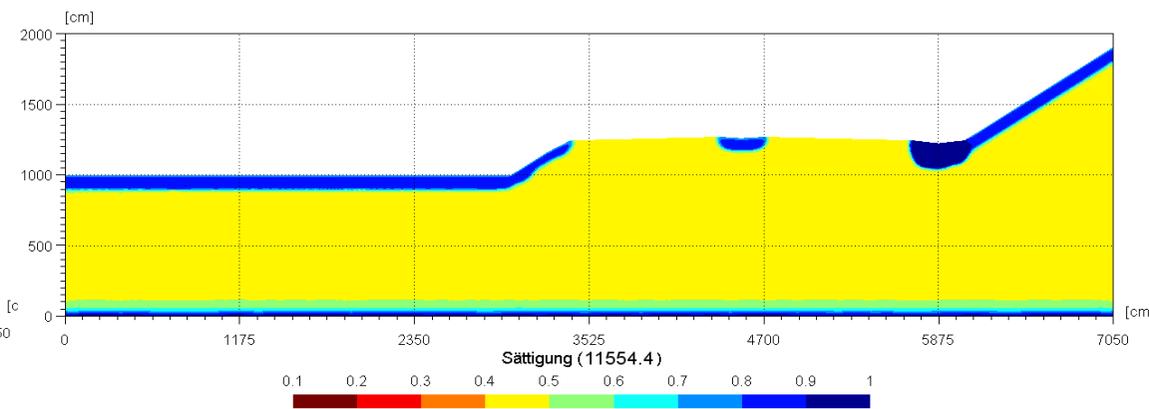
Modell „Su3 - Ganglinie“
→ Mit Abflussbeiwerten

Gesamter NS nach ca. **32 Stunden** infiltriert



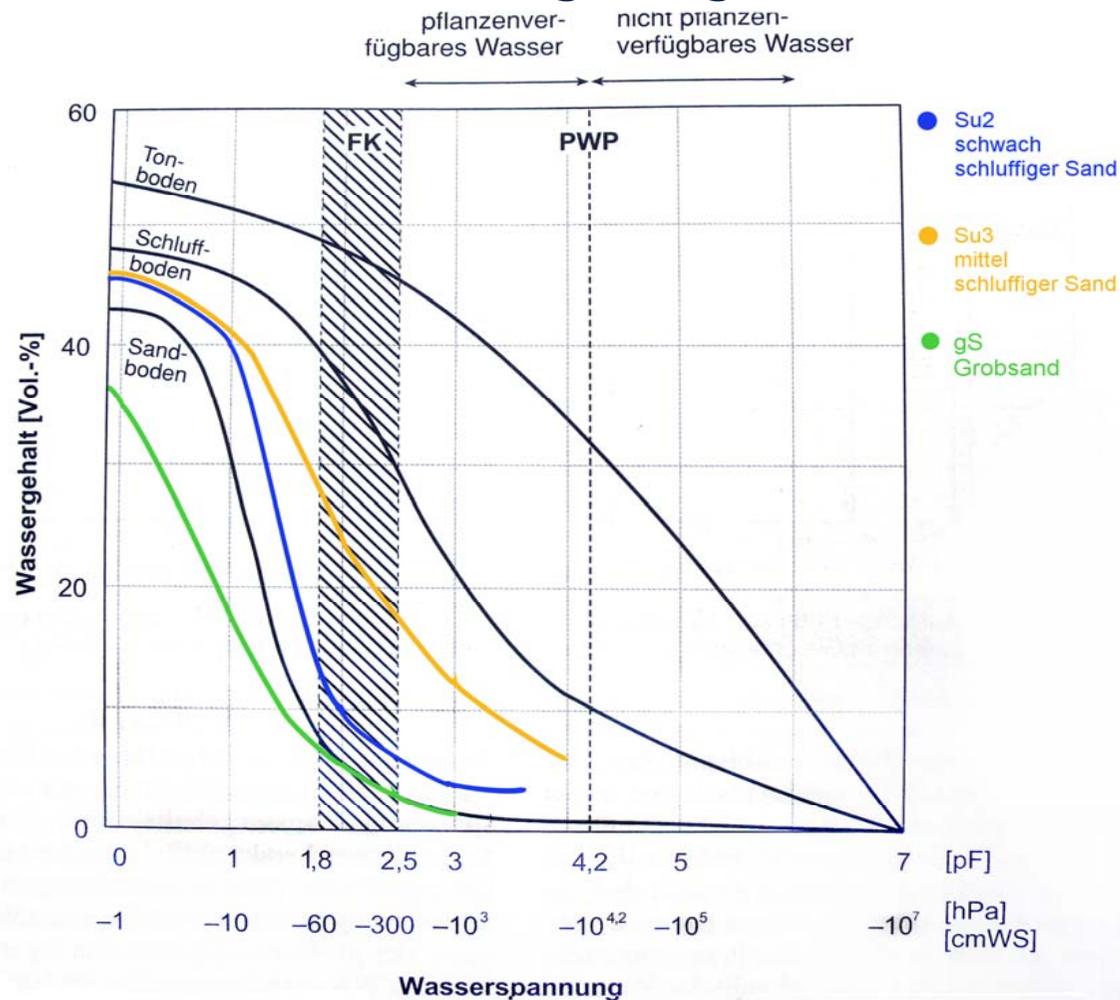
Ganglinienmodell „Su3 – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration“

Gesamter NS nach ca. **24,5 Stunden** infiltriert



→ Starker Unterschied zur Berechnung mit Abflussbeiwerten, welche im Straßenbau zur Bemessung von Entwässerungseinrichtungen angewendet werden!

→ Grobsand im Bereich der rechten Mulde zur Entwässerung eingesetzt

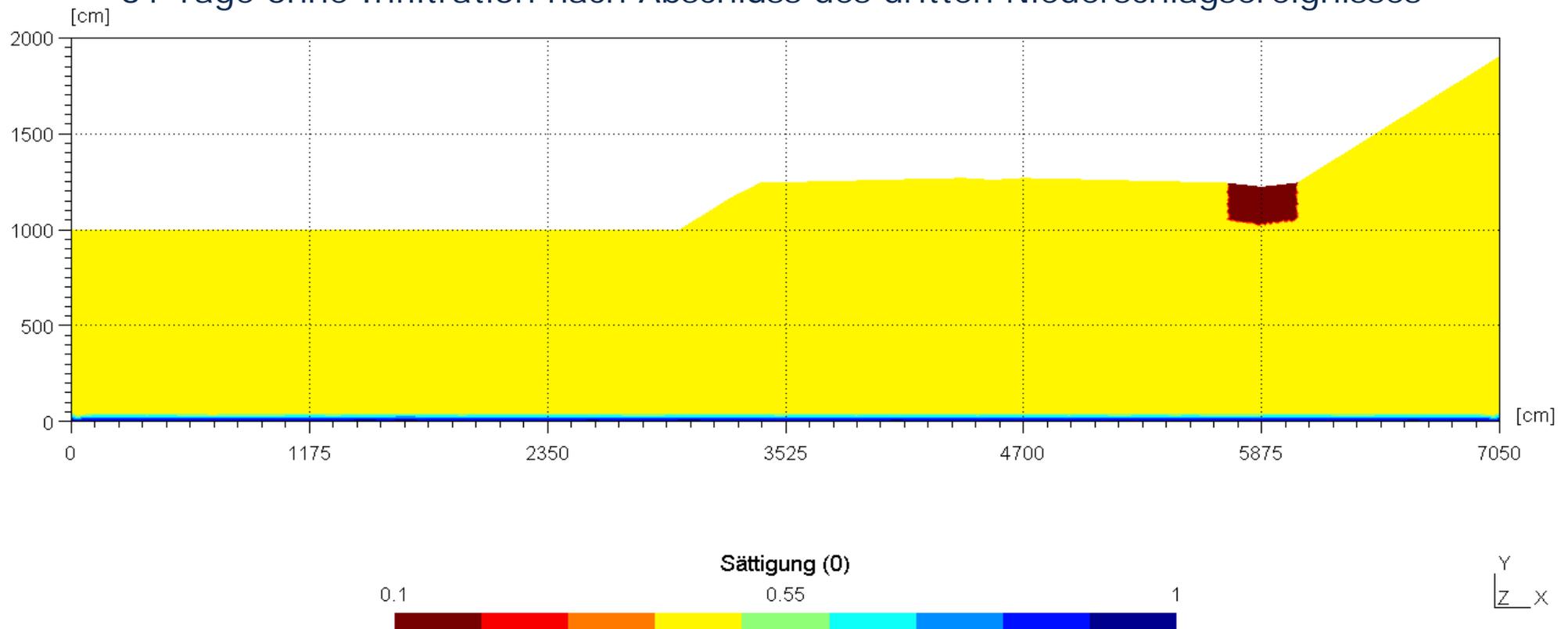


[Quelle: Scheffer/Schachtschabel (2002) (verändert)]

- Materialparameter direkt aus PCSiWaPro[®] entnommen, da Material in RETC nicht enthalten
- Benötigtes Grobsandvolumen mit Hilfe der Porosität berechnet

Simulationsergebnis:

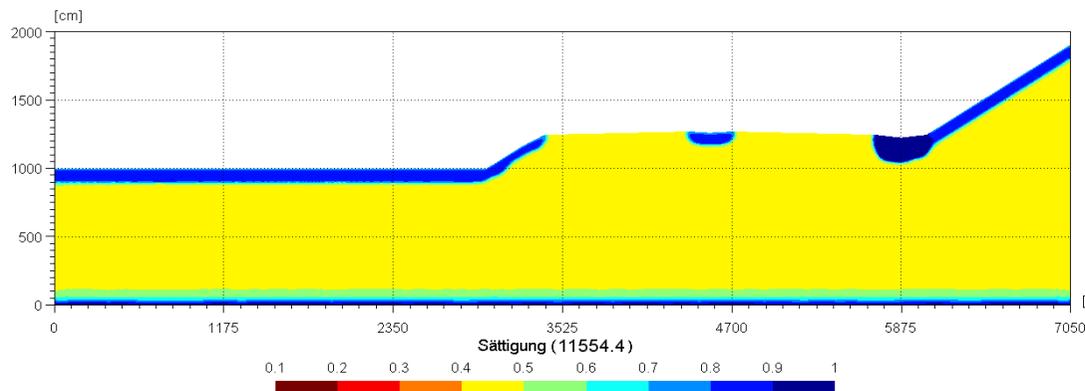
- Erste 7 Tage ohne Infiltration → Infiltration erster Niederschlag
- 5 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des ersten Niederschlagsereignisses
- 31 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des zweiten Niederschlagsereignisses
- 31 Tage ohne Infiltration nach Abschluss des dritten Niederschlagsereignisses



Simulationsergebnis:

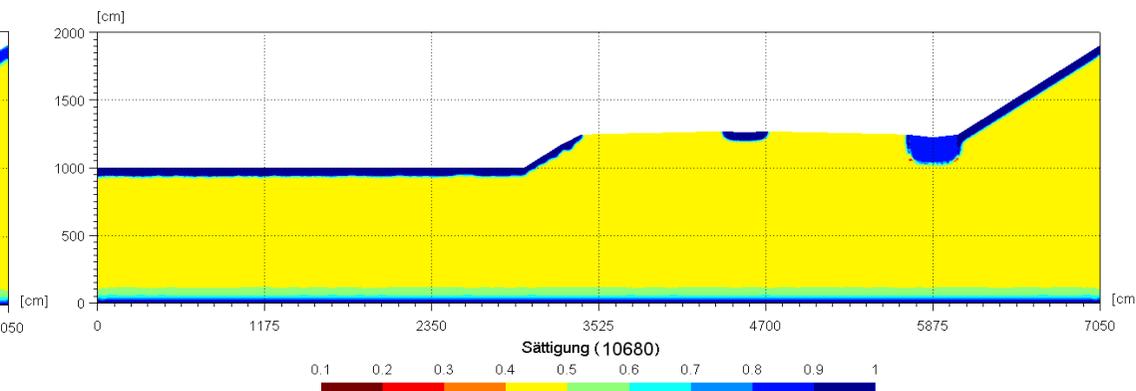
- Vergleich zu Ganglinienmodell „Su3 – 3x Niederschlag innerhalb 10 h mit mindestens 600 min Infiltration“

Gesamter NS nach 24,5 Stunden infiltriert



→ Wasser staut sich ca. 14,5 Stunden an der rechten Mulde

Gesamter NS nach 10 Stunden infiltriert



→ Wasser staut sich nicht an der rechten Mulde

- Gesamtes anfallendes Niederschlagsvolumen konnte somit sofort von der Oberfläche abgeführt werden
- Stellt eine einfache Entwässerung mit hoher Leistung dar!

- Herangehensweise zur Simulation der Strömungsverhältnisse unter Berücksichtigung von Oberflächenabflüssen erarbeitet
- Anstoß zur Entwicklung des Moduls „Ganglinien“ → Aufwand der Erstellung von Modellen dieser Art wurde erheblich geringer
- Unterschiedliche Oberflächenabflussberechnungen zeigten, dass die Bemessung von Entwässerungseinrichtungen mit Abflussbeiwerten im Straßenbau zu überdenken ist
- Vorschlag einer dezentralen, einfachen, effektiven und kostengünstigeren Entwässerung mit Grobsand, welche extreme Niederschlagsmengen abführen kann
- Stofftransport von Schadstoffen aus Straßenabflüssen mit PCSiWaPro® untersuchen (MTBE, PAK, Schwermetalle usw.)
- Simulation des Einflusses von Vegetation an den Straßenrändern auf Entwässerungsleistung
- Durch Erhebung von Messdaten (Oberflächenabflüsse, Materialparameter, Anfangsbedingungen usw.) kann in Zukunft eine optimierte Entwässerungsstrategie für konkrete Fälle im Vorfeld erarbeitet werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!