Grundlagen der Hydrologie
5. Extremereignisse & Hochwasserschutz[1]
Übung im WiSe 2022/23 - TU Bergakademie Freiberg

[1] Begleitend zur Vorlesung **Grundlagen der Hydrologie** von Jun.Prof. Dr. Conrad Jackisch, Rückfragen in der Vorlesung oder per eMail *conrad.jackisch@tbt.tu-freiberg.de*

Ziele der Übung sind:

- Extremereignisse einordnen und Auslegungspegel für Schutzmaßnahmen bestimmen können
- eine empirische Hochwasserstatistik erstellen und anwenden können
- eine theoretische Hochwasserstatistik mit der Gumbel-Verteilung erstellen und anwenden können
- Eine Versickerungsmulde dimensionieren

Einleitung

Insgesamt können in der BSc-Übung natürlich viele Aspekte der Hydrologie nur angerissen werden. Die letzten Übungen haben gezeigt, dass man mit Hilfe der Wasserbilanz (also der Bilanz der Massenflüsse) und der Energiebilanz (also der Bilanz der Energieumsetzungen und Flüsse an der Erdoberfläche und in der Grenzschicht) schon sehr weit kommen kann. Ferner ist mit relativ einfachen Mitteln eine Extremwertstatistik realisierbar, welche häufig die Grundlage zur Auslegung verschiedener Anlagen ist.

In dieser Übung soll ein Teil des Wissens noch einmal vertiefend angewendet werden. Darüber hinaus erweitern wir die Kenntnisse in der Extremwertstatistik.

Aufgabe 5.1: Extremwertstatistik und Hochwasserschutz

Ein extremes Niederschlagsereignis hat zu einem Hochwasser des B-Bachs geführt und dadurch erhebliche Schäden in der Gemeinde A-Dorf (Abb. 1) verursacht. Am Ortsausgang an einer Brücke gibt es einen Pegel, an dem bei diesem Ereignis ein maximaler Wasserstand von $H_{max} = 110\,\text{cm}$ gemessen wurde. Die Bürger von A-Dorf äußern nun den Wunsch ihren Hochwasserschutz soweit zu verbessern, dass Sie zukünftig vor einem 100-jährlichen Hochwasser sicher sind.

Sie erhalten eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Pegel des B-Bachs sowie eine Hochwasserstatistik der letzten 30 Jahre. (Abb. 1 & 2)

1. Bestimmen Sie die Jährlichkeit T_n des gemessenen Ereignisses.
2. Auf welchen Pegelstand müssen die Hochwasserschutzmaßnahmen ausgelegt werden?

Lösung:

Für die Bestimmung der Jährlichkeit des Hochwasserereignisses muss zunächst in Abb. 1 der Wasserstand in einen Abfluss verwandelt werden: Wir können von $5\,\text{m}^3\,\text{s}^{-1}$ ausgehen. Diese verwenden wir in Abb. 2 und lesen eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0.92 ab. Mit der Beziehung $T_n = 1/P_{ü}$ entspricht dies gerade mal einem 1.1-jährlichem Hochwasser.

Ein 100-jährliches Hochwasser hat eine $P_{ü}$ von 0.01. Nun gehen wir den Weg durch die Graphiken rückwärts: $P_{ü=0.01}$ entspricht einem Abfluss von $15\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$. Und $15\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ entspricht einem Pegelstand von 1.6 m.

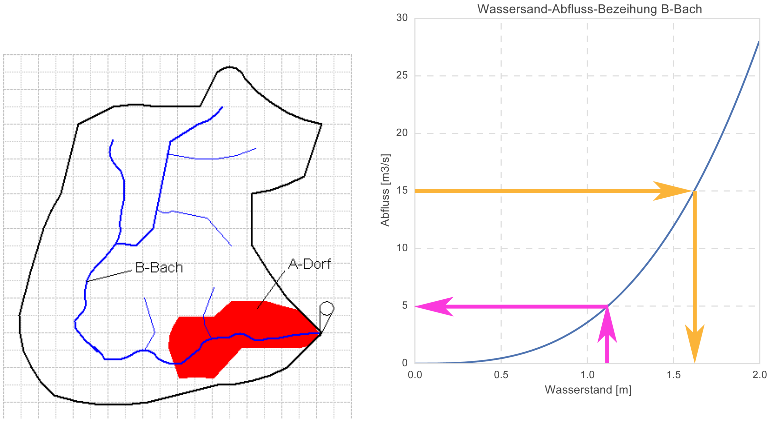

Abbildung 1: B-Bach Wasserstand-Abfluss

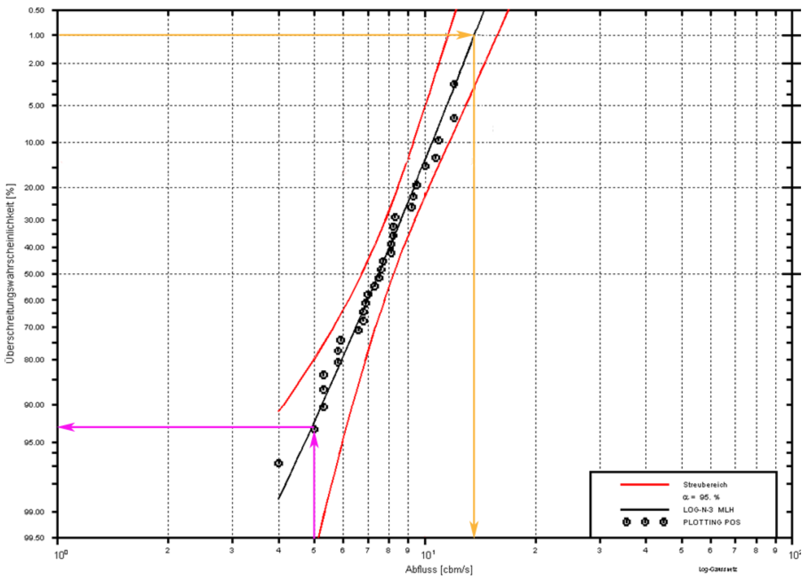

Abbildung 2: B-Bach Hochwasserstatistik

Wiederholung und Erweiterung Hochwasserstatistik

Die Hochwasserstatistik geht davon aus, dass extreme Ereignisse aus einer statistischen Grundgesamtheit zufällig auftreten. Das bedeutet, dass implizit ein stationäres[2] Regime angenommen wird und sich diese Grundgesamtheit nicht verändert. Gleichzeitig wird für diese Analysen auf möglichst lange Zeitreihen zurückgegriffen, was die Stationaritätsannahme zusätzlich unter Druck setzt (Änderung in Landnutzung, Gewässerausbau, Klima, etc.).

[2] Stationär bedeutet, das sich die statistischen Eigenschaften der Grundgesamtheit bzw. des Regimes nicht ändern. In unseren Fragen würde das vor allem gleiche Landnutzung, gleiche Wettermuster und gleiche Wasserbewirtschaftung bedeuten, was allerdings im Anthropozän ein eher seltenes Phänomen ist.

Empirische Wahrscheinlichkeitsanalyse

Sie kennen bereits die Rankstatistik um die experimentellen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten P_u^{exp}, auch als plotting positions bezeichnet, mit

$$P_u^{exp} = \frac{m}{N+1} \tag{1}$$

mit m als Rang und N als Anzahl der Stichproben zu berechnen. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_ü$ ist $P_ü = (1 - P_u)$. Bei der Analyse von Jahresmaxima ist die Jährlichkeit damit der Kehrwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit $Tn = 1/(1 - P_u)$.

Statistische Wahrscheinlichkeitsberechnung

Da aus vielen Untersuchungen bekannt ist, dass die Verteilungen der Wahrscheinlichkeiten stark linksschief ist (es gibt keinen Abfluss unter null und Extrema weichen stark vom Mittelwert ab) wird häufig die Gumbel-Verteilung als ein gängiges statistisches Modell zur Analyse von Hochwasserzeitreihen benutzt. Die Benutzung eines solchen statistischen Modells hat den Vorteil, dass es sich über die (statistischen) Momente der Verteilung definieren lässt:

$$P_u(x) = e^{-e^{-a(x-b)}} \tag{2}$$

wobei $a = \frac{\pi}{\sigma(x)\cdot\sqrt{6}}$ und $b = \bar{x} - (0.5772/a)$. Dabei ist $\bar{x}$ der Mittelwert der Stichprobe (bzw. Zeitreihe in unserem Fall) und $\sigma(x)$ die Standardabweichung mit $\sigma(x) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right)/N}$ Neben der Gumbel-Verteilung können natürlich auch je nach Problemstellung andere Modelle in dieser Art verwendet werden.

Aufgabe 5.2: Partielle Hochwasserserie an der Iller (Pegel Sonthofen)

Sie kennen bereits die Partielle Hochwasserzeitreihe des Pegels Sonthofen (Iller) aus der Vorlesung (Tab. 1). Für die Analyse dieser Zeitreihe haben Sie ein Extremwertwahrscheinlichkeitsnetz zur Verfügung (Abb. 3).

1. Betrachten Sie den Zeitraum von 1986 bis 1998 für eine erste Analyse und bestimmen Sie die Ränge, die Unterschreitungswahrscheinlichkeit sowie die Jährlichkeit der Hochwasser (Tab. 2).

2. Tragen Sie die Plotting Positions in das Extremwertpapier (Abb. 3) ein.

3. Bestimmen Sie damit empirisch die Abflüsse für HQ2, HQ5, HQ10, HQ50, HQ100 und HQ1000 und tragen sie die Werte in Tab. 3.

4. Berechnen Sie die theoretische Unterschreitungswahrscheinlichkeit und die theoretische Jährlichkeit für Ihre Zeitreihe mit

x=..	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
190x	-	250	90	106	130	135	170	124	150	100
191x	300	145	230	132	122	121	78	112	220	137
192x	287	186	260	120	256	247	183	288	255	230
193x	312	238	187	190	201	154	157	190	164	235
194x	270	284	135	173	338	93	188	239	247	86
195x	181	76	84	99	254	168	188	140	209	143
196x	168	267	98	154	228	251	208	120	168	181
197x	274	204	183	183	145	127	257	195	178	146
198x	165	193	210	164	185	181	135	223	186	103
199x	298	192	265	202	122	189	195	185	125	449
200x	331	187	374	160	162	533	186	121	194	138

Tabelle 1: Partielle Hochwasserzeitreihe Pegel Sonthofen an der Iller $Q = [\mathrm{m^3\,s^{-1}}]$.

der Gumbelverteilung für HQ2, HQ5, HQ10, HQ50, HQ100 und HQ1000 und tragen sie die Werte in Tab. 3 in Abb. 3 ein.

5. Ergänzen Sie nun weitere Jahre bis 2005 und führen Sie die Analyse erneut durch.

6. Welcher Jährlichkeit entspricht ein Hochwasser von $400\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ für die beiden Analysezeiträume?

7. Vergleichen Sie jeweils Ihre empirischen und theoretischen Schätzungen und vergleichen Sie den Einfluss des Analysezeitraums.

Lösung:

Jahr	Q_{max}	Rang	P_u^{exp}	T_n	Rang2	$P_u^{exp}2$	T_n2
1986	135.00	4	0.29	1.40	4	0.19	1.24
1987	223.53	11	0.79	4.67	14	0.67	3.00
1988	186.84	6	0.43	1.75	8	0.38	1.62
1989	103.00	1	0.07	1.08	1	0.05	1.05
1990	298.61	13	0.93	14.00	16	0.76	4.20
1991	192.93	8	0.57	2.33	11	0.52	2.10
1992	265.21	12	0.86	7.00	15	0.71	3.50
1993	202.98	10	0.71	3.50	13	0.62	2.62
1994	122.13	2	0.14	1.17	2	0.10	1.11
1995	189.56	7	0.50	2.00	10	0.48	1.91
1996	195.85	9	0.64	2.80	12	0.57	2.33
1997	185.67	5	0.36	1.56	7	0.33	1.50
1998	125.49	3	0.21	1.27	3	0.14	1.17
1999	449.58				19	0.90	10.50
2000	331.31				17	0.81	5.25
2001	187.80				9	0.43	1.75
2002	374.79				18	0.86	7.00
2003	160.24				5	0.24	1.31
2004	162.00				6	0.29	1.40
2005	533.00				20	0.95	21.00

Tabelle 2: Tabelle für die Hochwasserstatistik in Aufgabe 5.2

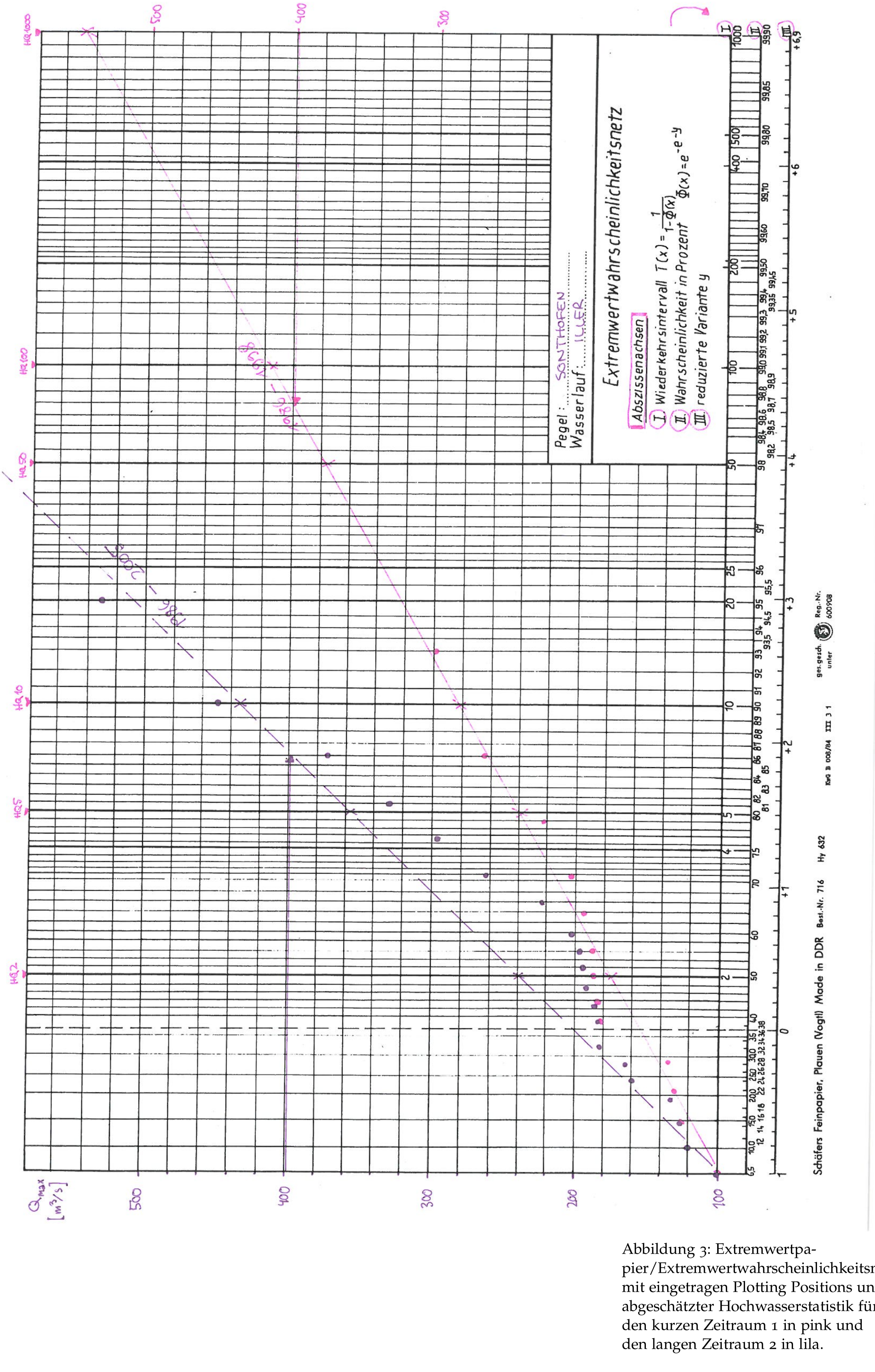

Abbildung 3: Extremwertpapier/Extremwertwahrscheinlichkeitsnetz mit eingetragen Plotting Positions und abgeschätzter Hochwasserstatistik für den kurzen Zeitraum 1 in pink und den langen Zeitraum 2 in lila.

	HQ2	HQ5	HQ10	HQ50	HQ100	HQ1000
exp.1	172	239	282	375	415	548
Gumbel1	177.4	227.2	260.1	332.6	363.3	464.6
exp.2	240	355	432	610	675	910
Gumbel2	212.6	313.0	379.4	525.6	587.4	791.6

Tabelle 3: Hochwasserstatistik

Die experimentellen Ergebnisse ergeben sich aus der graphischen Lösung. Die Ergebnisse auf Grundlage der Gumbel Verteilung setzt Mittelwert und Standardabweichung der jeweiligen Reihen in Gleichung 2 ein.

Im Zeitraum 1 entspricht ein Ereignis von $400\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ einem 70-jährigen Hochwasser. Im Zeitraum 2 ist es ein 7-jähriges.

Zusammenfassend lässt sich hier also sagen: Die theoretische Schätzung über die Gumbel Verteilung passt nicht ideal zu den Daten und tendiert zu unterschätzen Hochwassern höherer Jährlichkeit.

Die Verschiebung der gesamten Statistik durch die Verlängerung der Zeitreihe ist frappierend. Nicht nur, dass sich die Hochwasserscheitel der jeweiligen Stufen nahezu verdoppeln; Auch die Jährlichkeit von zuvor recht seltenen Ereignissen hat sich weit nach unten verschoben. Das zeigt wie wichtig für diese Statistik eine möglichst lange Zeitreihe ist. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass mit langen Zeitreihen die Stationaritätsannahme kritischer zu betrachten ist.

Aufgabe 5.3: Bemessung einer Versickerungsmulde

Für ein Gelände mit Wohngebäude und Garten in einer Senke nahe Useldange soll eine Versickerungsmulde geplant werden, welche sicher stellt, dass bei 5-jährigen Niederschlagsereignissen keine Überflutung stattfindet.

Die zu betrachtende Fläche der Senke ist $1100\,\mathrm{m}^2$. Der größte Teil des Grundstücks ist lehmiger Boden, mit Gras bewachsen. Das Wohngebäude hat eine Grundfläche von $120\,\mathrm{m}^2$. Der Anteil weiterer versiegelter Flächen beträgt $200\,\mathrm{m}^2$. Ferner sind die Jahresmaxima der Niederschlagstagessummen von Useldange und die Bodeneigenschaften am Standort gegeben.

1. Welches Volumen nehmen Sie als Referenz für die Versickerungsmulde? Gehen Sie von Sättigungsoberflächenabfluss der obersten 0.15 m Boden bei Feldkapazität vor dem Ereignis aus. Ein Ereignis sei vereinfacht die Tagesniederschlagssumme.

2. Wie wählen Sie das Verhältnis aus Volumen und Versickerungsoberfläche um auch längere Regenperioden abfangen zu können. Errechnen Sie die hydraulische Oberfläche der Versickerungsgrube, damit das 2-jährigen Maximum der Niederschlagssummen in 14 Tagen bei einer durchschnittlichen Versickerungsrate im Untergrund von $2.3 \times 10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ aufgefangen werden kann. Benutzen Sie das Volumen der Mulde aus Teilaufgabe 1. Verdunstung und Versickerung auf den Offenlandflächen über das Sättigungsdefizit hinaus sollen vernachlässigt werden.

Lösung:

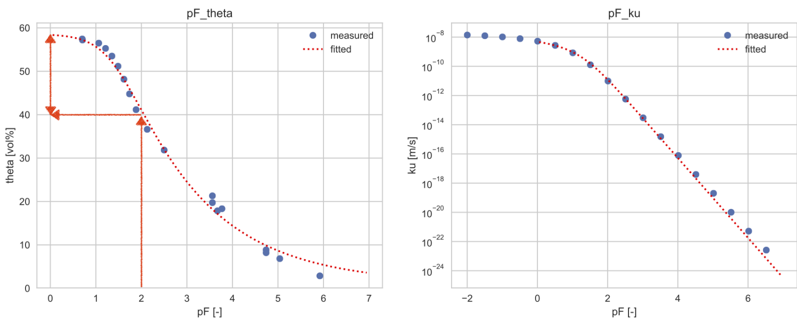

Abbildung 4: Retentionsbeziehung eines Bodens aus der Region. Beachten Sie dass die Feldkapazität bei pF = 2 (100 hPa) angenommen wird. Sie können die gefittete Retentionsbeziehung als Referenz benutzen. Der rechte Plot zeigt die Abhängigkeit der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_u von der Saugspannung. Dies ist für die Aufgabe jedoch nicht erheblich.

Aus der Extremwertstatistik der Niederschläge können wir zunächst ermitteln, für welche Menge Niederschlag die Mulde ausgelegt werden muss. Mit $Tn = 1/(1 - P_u)$ ist die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für ein 5-jähriges Ereignis 0.8. Der Zugehörige Niederschlag ist $51.1\,\mathrm{mm\,d^{-1}}$.

Aus der Retentionsbeziehung können wir das Sättigungsdefizit bei Feldkapazität ablesen: Feldkapazität ist mit pF = 2 angenommen[3]. Für unseren Boden lesen wir 40 vol.% Feuchte ab. Mit der Annahme, dass Sättigung auch die Porosität ist, erhalten wir ein

[3] Der pF-Wert ist analog zum pH-Wert der dekadische Logarithmus des negativen Druckwertes in hPa. Also entspricht die pF = 2 einer Saugspannung von -100 hPa. pF = 0 ist Sättigung des Bodens. Feldkapazität wird mit pF = 1.8 angenommen und wurde hier nur vereinfacht. Bei pF = 4.2 geht man vom permanenten Welkepunkt aus.

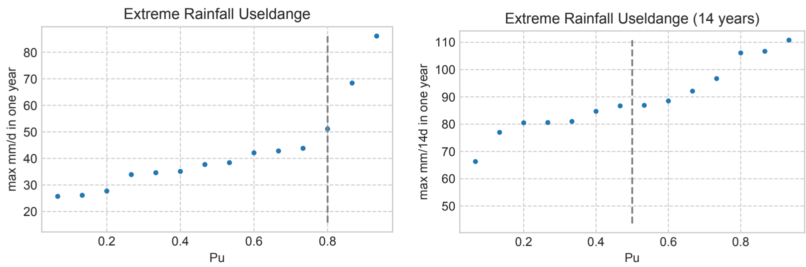

Abbildung 5: Extremniederschläge anhand der maximalen Tagessummen eines Jahres in Useldange. Links: Maximum der Tagessummen in einem Jahr. Rechts: Maximum der 14 Tagessummen in einem Jahr.

Sättigungsdefizit von 18 vol.%. Es ist gegeben, dass die Feuchtefront nur in den obersten 15 cm betrachtet werden soll. Daher können wir davon ausgehen, dass 2.7 cm Wassersäule vom Offenland aufgenommen werden können.

Die versiegelte Fläche beträgt $320\,\mathrm{m}^2$. Hier werden 100% abflusswirksam ($0.0511\,\mathrm{m} \cdot 320\,\mathrm{m}^2 = 16.35\,\mathrm{m}^3$). Das Offenland hat eine Fläche von $780\,\mathrm{m}^2$. Hier wird nur der Überschuss zur Infiltration von 0.027 m abflusswirksam ($(0.0511\,\mathrm{m} - 0.027\,\mathrm{m}) \cdot 780\,\mathrm{m}^2 = 18.8\,\mathrm{m}^3$). Insgesamt müssen also $35.15\,\mathrm{m}^3$ Direktabfluss aufgenommen werden. Dies bestimmt das Volumen der Versickerungsmulde.

Für Teilaufgabe 2 gehen wir davon aus, dass innerhalb von 14 Tagen weitere Niederschläge auftreten können und die Versickerungsmulde also eine so große Kontaktfläche zum Boden braucht, um innerhalb dieser Zeit, ausreichend Wasser abzuführen.

Wir ermitteln über die Extremwertstatistik der 14-Tage-Summen die 2-jährige Referenz ($Pu = 0.5$) mit 86.7 mm in 14 Tagen. Die versiegelte Fläche generiert damit $0.0867\,\mathrm{m} \cdot 320\,\mathrm{m}^2 = 27.7\,\mathrm{m}^3$ Direktabfluss. Das Offenland nimmt wieder 0.027 m auf und erzeugt dadurch $(0.0867\,\mathrm{m} - 0.027\,\mathrm{m}) \cdot 780\,\mathrm{m}^2 = 46.6\,\mathrm{m}^3$ Sättigungsüberschuss. Der Speicher kann $35.15\,\mathrm{m}^3$ aufnehmen wodurch also noch $27.7\,\mathrm{m}^3 + 46.6\,\mathrm{m}^3 - 35.15\,\mathrm{m}^3 = 39.15\,\mathrm{m}^3$ zusätzlich in den 14 Tagen versickern müssen. Mit einer Rate von $2.3 \times 10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ versickern in 14 Tagen pro m^2 $2.3 \times 10^{-6}\,\mathrm{m\,s^{-1}} \cdot (14 \cdot 24 \cdot 3600)\mathrm{s} = 2.78\,\mathrm{m}$. Ergo werden $14\,\mathrm{m}^2$ hydraulisch wirksame Oberfläche in der Versickerungsmulde benötigt.