Ableitung der Systemdurchlässigkeit für tiefe Baugruben in Frankfurt am Main

Christin Kübel, M.Eng., Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Darmstadt, Deutschland
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Darmstadt, Deutschland
Dr.-Ing. Heiko Huber, CDM Smith Consult GmbH, Bickenbach, Deutschland

Der Beitrag beschreibt die Ableitung der Systemdurchlässigkeit für tiefe Baugruben auf der Grundlage von Messungen, die im Rahmen der Baumaßnahmen des Terminal 3 am Flughafen Frankfurt am Main durchgeführt wurden.

Geotechnik • Baugruben • Wasser • Durchlässigkeit

1 Einleitung

Bei wasserundurchlässigen Baugruben ist als ein wichtiger Parameter die Restwassermenge zu definieren. Für die Berechnung der Restwassermenge ist die Systemdurchlässigkeit der Baugrube abzuschätzen, die von der Verbauart, der Abdichtung der Baugrubensohle und dem Baugrund abhängig ist.

Das in wasserundurchlässig ausgeführten Baugruben auftretende Restwasser kann verschiedener Herkunft sein. Es handelt sich sowohl um Grund- als auch um Oberflächenwasser. Es kommt aus Undichtigkeiten der vertikalen und horizontalen Baugrubenumschließung, aus Niederschlag oder aus eingeschlossenem Porenwasser, welches vor dem Aushub der Baugrube im Boden eingeschlossen ist. [1]

In diesem Artikel liegt der Fokus auf der Systemdurchlässigkeit des Verbaus und der Wassermenge, die durch den Verbau eindringt. Das Restwasser, das durch unentdeckte Fehlstellen eindringt und das Porenwasser werden vernachlässigt.

Die Systemdurchlässigkeit wird über eine spezifische Restwassermenge oder -rate in l/s je 1.000 m² benetzter Fläche angegeben [1, 2]. Eine klare Trennung der Wassermengen für horizontalen Verbau und vertikale Abdichtung ist schwierig. Einige Autoren geben verschiedene Werte für Sohle und Wand an, andere einheitliche.

In [1] wird ein Wert von „1 bis 5 l/s auf 1.000 m² benetzte Fläche“ vorgestellt. Dieser Wert wird sowohl für Dichtwände als auch für Sohlen angesetzt. SCHNELL gibt Durchlässigkeitsbeiwerte für unbewehrte Unterwasserbetonsohlen an. Sie liegen zwischen $k = 10^{-8}$ m/s und $k = 10^{-1}$ m/s [3]. BORCHERT hat Baugruben in Berlin untersucht. Der Restwasserzufluss für Baugrubenwände beträgt dort ca. 2 m³/h je 1.000 m² und der Restwasserzufluss der Sohlen ca. 0,5 bis 2 m³/h je 1.000 m² pro m Wasserdruckdifferenz [4]. BORCHERT empfiehlt daher die rechnerische Ermittlung von Restwasserraten für Sohlen abhängig von der jeweiligen Art der Dichtsohle und dem aktuellen Vorgang auf der Baustelle. Die Restwasserrate $zul.\,q_R$ in m³/h je 1.000 m² unterscheidet sich abhängig vom anstehenden Wasserdruck [2]. BORCHERT differenziert nach Art der Sohle, da die Bauabläufe und mögliche Versagensarten unterschiedliche Einflüsse auf den Durchfluss haben. Außerdem ist z. B. bei Unterwasserbetonsohlen eine Abdichtung von Fehlstellen dauerhaft möglich, wodurch der Durchfluss gesteuert werden kann. Der ermittelte Wert nach BORCHERT definiert, welcher Durchfluss q_R für die jeweilige Sohlenart zulässig ist [2]. Nach [2] gilt:

$$zul.\,q_R = w_{zul} \cdot \Delta h \quad (1)$$

mit:

w_{zul}: zulässige Wasserrate in m²/h je 1.000 m² abhängig von Dichtsohlenart nach **Tabelle 1** [2]
Δh: Differenzhöhe der Wasserspiegel in m nach [2]

Eine Zusammenstellung verschiedener Literaturwerte für Restwasserraten von Trogbaugruben gibt KLUCKERT [2]. KLUCKERT empfiehlt, Bauwerke in Dichtigkeitsklassen einzuordnen, und gibt entsprechende Leckageraten und Systemdurchlässigkeitsbeiwerte an. Die Beiwerte und Dichtigkeitsklassen sind in **Tabelle 2** und **3** dargestellt.

2 Baugrube des Terminal 3

Am Flughafen Frankfurt a. M. wird seit Oktober 2015 ein neues Terminal (Terminal 3) gebaut [5]. Die Baugrube ist in 25 Abschnitte unterteilt. **Bild 1** zeigt den schematischen Grundriss der Baugrube mit der Kennzeichnung der einzelnen Abschnitte. Diese Abschnitte grenzen teilweise aneinander an, einige befinden sich innerhalb an-

Tabelle 1: w_{zul} für die Ermittlung der zulässigen Restwasserrate [2]

Sohlenart	w_{zul} [m²/h je 1.000 m²]		
	Probeabsenkung	Lenzen	Endzustand
Weichgelsohle (Natriumsilikat mit einem anorganischen Reaktiv)	0,5	0,5	0,5
Unterwasserbetonsohle	1,0	1,0	1,0
Tiefliegende Düsenstrahlsohle	2,0	2,0	2,0
Hochliegende Düsenstrahlsohle	0,25	0,5	0,5
Mittelhochliegende Düsenstrahlsohle	0,5	0,5	0,5
Tiefliegende Feinstzementsohle	2,0	2,0	2,0

Tabelle 2: Systemdurchlässigkeiten nach dem Stand der Technik nach KLUCKERT [2]

Nr.	Autor	Quelle	Jahr	Angegebene Leckagewassermenge		Systemdurchlässigkeit k_f	Bemerkungen
				[l/s je 1.000 m²]	[m³/h je 1.000 m²]	[m/s bei i = 0,5]	
1	Schmidt Seitz	Beton-Kalender	1992 1994 1998	5,0	18,0	$1x10^{-5}$	Vorschlag allgemein
2	Sänger Hähnig	23. Baugrundtagung Köln	1994	2,5	9,0	$5x10^{-6}$	Vorgabe für das Projekt
3	Borchert	VDI-Fachtagung „Tiefe Baugruben" Berlin	1999	1,5	5,4	$3x10^{-6}$	Regelvorgabe Berlin
4	Kast et. al.	26. Baugrundtagung Hannover	2000	2,0	7,2	$4x10^{-6}$	Vorgabe für das Projekt
5	Borchert Richter	15. Chr. Veder Kolloquium Graz	2000	1,5	5,4	$3x10^{-6}$	Regelvorgabe in Berlin
6	Könemann et. al.	Tunnelbau Taschenbuch	2002	1,5	5,4	$3x10^{-6}$	Regelvorgabe in Berlin
7	Borchert et. al.	29. Baugrundtagung Bremen	2006	1,5	5,4	$3x10^{-6}$	Regelvorgabe Vorschlag allg.



Bild 1: Schematischer Grundriss von Terminal 3 am Flughafen Frankfurt am Main mit Kennzeichnung der Baugrubenabschnitte [6]



Bild 2: Mit Holzkeilen abgedichtete Fehlstelle einer Spundwand am Terminal 3 in Frankfurt am Main

derer Abschnitte und wieder andere sind unberührt von den restlichen. Alle Abschnitte zusammen haben eine Grundfläche von über 38.500 m². Das gesamte Gelände ist deutlich größer. Die Geländeoberkante liegt zwischen 98,65 und 105 mNN. Die Baugrubensohlen liegen zwischen 89,00 und 97,00 mNN und der Grundwasserstand lag im Zeitraum von Januar 2019 bis März 2020 an allen betrachteten Stellen zwischen 94,00 und 99,00 mNN. Somit liegen die Baugrubensohlen überwiegend dauerhaft unterhalb dem Grundwasserspiegel [6].

2.1 Baugrubenverbau

Die einzelnen Abschnitte der Baugrube wurden jeweils durch Spundwände zu den Seiten und durch eine 1,0 m dicke Unterwasserbetonsohle nach unten hin abgeschlossen. Die Spundwände wurden je nach Standort zusätzlich durch Anker gesichert. Um die Baugrube herum wird außerdem eine Böschung hergestellt.

Die Spundbohlen wurden als Einzel- und als Doppelbohlen eingebracht. Sie wurden ohne eine zusätzliche Abdichtung hergestellt. Nach dem Einbau der Spundwände wurde der Boden mit einer Toleranz von 30 cm im Nassbaggerverfahren ausgehoben. Danach wurden die Unterwasserbetonsohlen aus einem unbewehrten Beton C 35/45 hergestellt. Zur Auftriebssicherung dienen Mikropfähle. Auf die Unterwasserbetonsohle wurde eine Filterschicht und in einigen Bereichen zusätzlich eine Ausgleichsschicht aufgebracht. Um Wasser abpumpen zu können, wurden Pumpensümpfe hergestellt. Nach der Herstellung der Wände und der Sohlen wurden die Baugruben abschnittsweise gelenzt

und sichtbar werdende Fehlstellen abgedichtet. **Bild 2** zeigt z. B. eine mit Holzkeilen abgedichtete Fehlstelle in einer der Spundwände [6, 7].

Der Untergrund am Terminal 3 besteht bis zu einer Höhe von 103 mNN aus quartären Sanden und Kiesen, darüber (bis 104 mNN) befinden sich quartäre Dünensande. Das Grundwasser steht maximal bis zu einer Höhe von 99 mNN an. Es steht also dauerhaft im Bereich der quartären Sande und Kiese. Dieser Untergrund weist die in **Tabelle 4** angegebenen Eigenschaften auf. [7, 8]

2.2 Grundwasserhaltung und Lenzvorgänge am Terminal 3

Die Grundwasserhaltung am Terminal 3 des Flughafens Frankfurt a. M. erfolgt in einer Restwasserhaltung. Nach Herstellung der Spundwände und Unterwasserbetonsohlen wurden die einzelnen Abschnitte gelenzt. Das abgepumpte Wasser wurde in einer Grundwasserreinigungsanlage (GWRA) aufbereitet und über eine Versickerungsanlage dem natürlichen Grundwasser wieder zugeführt. Die Pumpen und die GWRA liefen ab dem Start des ersten Lenzvorgangs ohne Pause. Der Baugrubenverbau ist nahezu – aber nicht komplett – wasserdicht. Wasser dringt durch Fehlstellen, wie z. B. an Arbeitsfugen oder Übergängen zwischen Sohle und Wand ein, außerdem tritt Wasser aus Niederschlägen auf. In der GWRA wird die Wassermenge gemessen und dokumentiert. [6]

Die 25 Abschnitte der Baugrube wurden nicht gleichzeitig gelenzt. Die Reihenfolge mit den Zeiträumen der Lenzvorgänge ist in **Tabelle 5** zusammengefasst. [6]

Im Intervall 1 sind die ersten Baugruben bereits vollständig gelenzt. Intervall 11 endet mit dem Ende der Bauphase. Im Zuge dieser Ausarbeitung wurden die Daten bis zum 15.03.2020 ausgewertet. Daher ist im letzten Intervall der Zeitraum bis März 2020 angegeben.

Während der Lenzvorgänge der Baugruben wurde ein Teil des Wassers durch zusätzliche Pumpen in benachbarte Baugruben gepumpt, um den Vorgang zu beschleunigen. Es ist unbekannt, wie viele Pumpen über welchen Zeitraum zusätzlich verwendet wurden. Das bedeutet, dass nicht die gesamte Wassermenge in der GWRA ankommt und ein Teil undokumentiert verlorengeht. Während der Lenzvorgänge wurden vereinzelte Fehlstellen in den Spundwänden sichtbar. Diese wurden mit Holzkeilen oder Stahlplatten geschlossen und so abgedichtet. [6]

Die Daten der GWRA können online live verfolgt werden und werden außerdem in Wochen- und Monatsberichten zusammengefasst. Es sind unter anderem die Tagesdurchschnittsmengen sowie die tatsächlichen Wassermengen aufgelistet. [9]

3 Spezifische Restwassermenge am Terminal 3

Die Auswertung der erfassten Daten erfolgte tabellarisch. Insgesamt wurden zur Ermittlung der spezifischen Restwassermenge die Daten der GWRA verwendet. Es wurden Berechnungen inklusive und exklusive Niederschlag durchgeführt. Im Vorfeld wurde die Menge des in den Baugruben anstehenden Wassers nicht ermittelt. In der Auswertung wurden Intervalle, in denen Baugruben aktiv gelenzt wurden, getrennt von Intervallen ohne Lenzvorgang betrachtet.

Die benetzen Spundwand- und Sohlflächen und auch die benetzten Arbeitsfugen der Sohlen wurden für die verschiedenen Zeiträume ermittelt. Die Daten wurden für jeden Tag ausgewertet, um am Ende Schwankungen beurteilen zu können.

Es wurden drei Varianten betrachtet. Für Variante 1 und 2 wurde eine spezifische Restwassermenge für die

Tabelle 3: Dichtigkeitsklassen nach KLUCKERT nach [2]

Geotechnische Dichtigkeitsklasse	Bauwerksart	Leckagerate je 1.000 m²		Systemdurchlässigkeitsbeiwert k_f bei $i = 0{,}5$
		[l/s]	[m³/h]	[m/s]
N	Bauwerke und Baugruben mit normalen Dichtigkeitsanforderungen	1,5	5,4	3×10^{-6}
H	Bauwerke wie Klasse N, jedoch mit hohen Dichtigkeitsanforderungen	0,05	0,18	1×10^{-7}
G	Bauwerke wie Klasse N, jedoch mit geringen Dichtigkeitsanforderungen	2,5	9,0	5×10^{-6}

Tabelle 4: Bodenkennwerte für quartäre Sande und Kiese [7]

Bezeichnung	Symbol	Wert	
Wichte	γ	19 bis 21 kN/m³	(20 kN/m³)
	γ'	9 bis 12 kN/m³	(10 kN/m³)
Reibungswinkel	φ'	32,5 bis 40°	(35°)
Kohäsion	c'	0	
Durchlässigkeit	k	10^{-3} bis 10^{-4} m/s	(10^{-3} m/s)

Tabelle 5: Intervalle der Lenzvorgänge nach [6]

Intervall	Zeitraum	Was passiert?
1	Bis zum 12.05.19	Baugrube 2F, 2H, 2J sind gelenzt
2	13.05.19 bis 19.06.19	Baugrube 1a, 2a werden gelenzt
3	20.06.19 bis 23.06.19	kein Lenzvorgang
4	24.06.19 bis 20.08.19	Baugrube 1, 2, Rampe 1, 1b werden gelenzt
5	21.08.19 bis 22.09.19	kein Lenzvorgang
6	23.09.19 bis 20.10.19	Baugrube 3 wird gelenzt
7	21.10.19 bis 07.11.19	Baugrube 3, 4 werden gelenzt
8	08.11.19 bis 10.11.19	Baugrube 4 wird gelenzt
9	11.11.19 bis 15.11.19	Unterbrechung durch Störung
10	16.11.19 bis 2.12.19	Baugrube 4 wird gelenzt
11	13.12.19 bis min. März 2020	kein Lenzvorgang

Tabelle 6: Ermittlung der spez. Restwassermenge für Baugrubensohlen nach BORCHERT, Terminal 3, FRA

Bezeichnung der Baugruben	Δh	w_{zul} je 1.000 m²	q_{Sohle} je 1.000 m²	
	-	m²/h	m³/h	l/s
1A	2,54	1,00	2,54	0,71
1a_D West & Ost	3,84	1,00	3,84	1,07
2A	2,68	1,00	2,68	0,75
2a_D West	3,98	1,00	3,98	1,11
2a_D Ost	3,98	1,00	3,98	1,11
4	2,34	1,00	2,34	0,65
3	3,29	1,00	3,29	0,91
3_E West & Ost	4,39	1,00	4,39	1,22
1 F	3,77	1,00	3,77	1,05
1 H	0	1,00	0	0
1 J	0,32	1,00	0,32	0,09
1	4,20	1,00	4,20	1,17
1 M	7,38	1,00	7,38	2,05
1 N	4,56	1,00	4,56	1,27
2	3,48	1,00	3,48	0,97
2 M	6,66	1,00	6,66	1,85
2 F	2,96	1,00	2,96	0,82
2 H, 2 J	0	1,00	0	0
1b West_K	1,19	1,00	1,19	0,33
1b West	0,34	1,00	0,34	0,09
1b Mitte	0,31	1,00	0,31	0,09
1b Ost	0,39	1,00	0,39	0,11
Durchschnitt			**2,6**	**0,7**

Sohlen ermittelt und in Abhängigkeit davon die spezifische Restwassermenge der Wände bestimmt. Für Variante 1 wurde ein Durchschnitt der spezifischen Restwassermengen der Sohlen verwendet. Für Variante 2 wurde ein individueller Wert pro Baugrube und Intervall angesetzt. Für Variante 3 wird davon ausgegangen, dass die spezifische Restwassermenge für Sohle und Wand identisch ist. Es werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

- $q_{Wände}$: spezifische Restwassermenge der Spundwände
- q_{Sohle}: spezifische Restwassermenge der Unterwasserbetonsohlen
- q_{Gesamt}: identische spezifische Restwassermenge für Spundwände und Unterwasserbetonsohlen

3.1 Zur Ermittlung der spezifischen Restwassermengen

Die Ermittlung der spezifischen Restwassermenge der Sohlen erfolgte nach der Formel von BORCHERT. BORCHERT definiert über seine Formel, welche Restwasserrate *zul.* q_R zulässig für die jeweilige Art der Sohle ist. Diese Berechnung wird genutzt, um die spezifische Restwassermenge für die Sohlen zu ermitteln. Im weiteren Verlauf wird nicht wie in (1) von der zulässigen Restwasserrate *zul.* q_R [2] gesprochen, sondern von der ermittelten spezifischen Restwassermenge für die Sohlen q_{Sohle}:

$$q_{Sohle} = w_{zul} \cdot \Delta h \quad \text{.....} \quad (2)$$

w_{zul} [m³/h je 1000 m²] wurde für Unterwasserbetonsohlen der **Tabelle 1** entnommen. Der Wert ist für alle drei definierten Vorgänge identisch w_{zul} = 1,0 m²/h je 1.000 m². Die Ermittlung von Δh erfolgte für jede Baugrube einzeln. Es wurde die Oberkante der Unterwasserbetonsohle als tiefstmöglicher Wasserstand innerhalb der Baugrube betrachtet, da sich an dieser Stelle die Pumpen befinden. Für den Grundwasserstand außerhalb der Baugrube wurden die Daten aus den jeweiligen Intervallen verwendet. Es wurde ein Wert pro Zeitraum ermittelt. In einigen Baugruben lag die Oberkante der Sohle dauerhaft über dem Grundwasserspiegel. Daher ist an diesen Stellen $\Delta h = 0$ und somit auch die ermittelten spezifischen Restwassermengen.

Δh wurde bewusst über den Durchschnittswert der Grundwasserstände ermittelt und nicht auf der sicheren Seite liegend durch den höchsten Grundwasserstand, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten.

Die spezifischen Restwassermengen für alle Baugruben sind in **Tabelle 6** zusammengefasst. Die ermittelten Restwassermengen weichen sehr stark voneinander ab. Sie liegen teilweise unter den Literaturwerten. Die größten Werte liegen bei den flächenmäßig kleinsten Baugruben vor (1M, 2M), an anderen Stellen ist der Wert 0. Zur Vereinfachung und, um am Ende nur einen Wert zu erhalten, wurde der Durchschnitt aus allen Werten gebildet. Der Durchschnittswert der ermittelten Daten beträgt 2,6 m³/h bzw. 0,7 l/s je 1.000 m².

Die Bildung eines Durchschnittswerts stellt eine sehr starke Vereinfachung dar. Diese widerspricht der Formel von BORCHERT, dass die spezifische Restwassermenge der Sohlen abhängig vom hydraulischen Höhenunterschied ist. Daher werden im Folgenden die Varianten 1 und 2 betrachtet.

3.1.1 Variante 1 der spezifischen Restwassermenge der Wände

Die spezifische Restwassermenge für Spundwände $q_{Wände}$ wurde für jeden Tag einzeln ermittelt. Pro Zeitintervall sind die geometrischen Daten und Grundwasserstände identisch, lediglich der Durchfluss durch die GWRA ist tagesabhängig. Die spezifische Restwassermenge für Sohlen beträgt gemäß Angabe in **Tabelle 2** 0,7 l/s je 1.000 m².

Durchfluss durch die Baugrubensohle:

$$Q_{Sohle} = A_{Sohle,benetzt} \cdot q_{Sohle} / 1.000\,\text{m}^2 \quad \text{.....} \quad (3)$$

Durchfluss durch die Baugrubenwände:

$$Q_{Wände} = Q_{Gesamt} - Q_{Sohle} \quad (4)$$

mit:

$A_{Sohle,benetzt}$: benetzte Sohlfläche [m²]
q_{Sohle}: spezifische Restwassermenge der Sohle [l/s je 1.000 m²]
Q_{Sohle}: Durchfluss durch die Sohle [l/s]
$Q_{Wände}$: Durchfluss durch die Wände [l/s]
Q_{Gesamt}: Durchfluss durch das gesamte System [l/s]

Zur Ermittlung der Durchflussanteile durch die jeweiligen Bauteile wurde der Anteil, der durch die Wände eindringt, durch die benetzte Spundwandfläche dividiert. Das Ergebnis ist die spezifische Restwassermenge $q_{Wände}$ für Spundwände.

$$q_{Wände} = Q_{Wände} / A_{Wände,benetzt} \cdot 1.000 \quad (5)$$

mit:

$q_{Wände}$: spezifische Restwassermenge der Wände [l/s je 1.000 m²]
$A_{Wände,benetzt}$: benetzte Wandfläche [m²]
$Q_{Wände}$: spezifische Restwassermenge der Wände [l/s je 1.000 m²]

3.1.2 Variante 2 der spezifischen Restwassermenge der Wände

Die zweite Variante von $q_{Wände}$ wurde ähnlich wie in Variante 1 ermittelt. Der Unterschied liegt in der spezifischen Restwassermenge der Sohle q_{Sohle}. Diese wurde pro Zeitintervall neu berechnet. Diese Variante wurde nur für die relevanten Intervalle gemäß Definition im Kap. 3.2 berechnet.

3.1.3 Variante 3 mit identischer spezifischer Restwassermenge für Wände und Sohlen

In Variante 3 wurde die spezifische Restwassermenge unter der Annahme ermittelt, dass diese für Sohle und Wand identisch ist. Die Ermittlung des Beiwerts erfolgt analog zur Ermittlung für getrennte Beiwerte.

$$q_{Gesamt} = Q_{Gesamt} / A_{Gesamt,benetzt} \quad (7)$$

3.2 Für die Varianten 1 bis 3 ermittelte spezifische Restwassermengen am Terminal 3

Zur Auswertung der spezifischen Restwassermengen wurden die Intervalle in mehr und weniger relevante Intervalle unterteilt. Alle Intervalle, in denen eine Baugrube gelenzt wurde, sind weniger relevant, da das Lenzvolumen mit in die Ermittlung des Beiwerts einfließt. Auch das Intervall, in welchem es zu einer Unterbrechung des Lenzens durch eine Störung kam, wurde als irrelevant betrachtet. Die relevanten Zeiträume sind Intervall 1, 3, 5 und 11. Im dritten Intervall wurden insgesamt nur drei Tage betrachtet, wodurch dieser weniger repräsentativ als die anderen Intervalle ist. Außerdem sind in diesem Intervall bei Variante 2 der Berechnungen die Ergebnisse negativ. Daher wird dieses Intervall nicht zu den relevanten gezählt.

Während der Lenzvorgänge wurde Wasser in die benachbarten Baugruben gepumpt. Das bedeutet, dass die dokumentierten Mengen nicht den tatsächlichen Wassermengen entsprechen. Außerdem wurde so temporär der Wasserdruck auf die bereits gelenzten Baugruben erhöht. Es wird vermutet, dass sich dieser Wasserdruck auch noch unmittelbar nach dem Lenzen auf die spezifischen Restwassermengen auswirkte. Insgesamt gibt daher Intervall 11 die aussagekräftigsten Ergebnisse, da kein Lenzvorgang durchgeführt wurde und in dem vorherigen Intervall das gesamte Lenzvolumen durch die GWRA dokumentiert wurde.

In **Tabelle 7** sind alle Ergebnisse zusammengefasst. Es sind außerdem verschiedene Durchschnittswerte angegeben. Neben dem Gesamtdurchschnitt ist auch der Durchschnitt relevanter Intervalle 1, 5 und 11 angegeben. Die Ergebnisse der Berechnung inklusive Niederschlag werden nicht im Detail dargestellt.

4 Auswertung der Ergebnisse

Zur Auswertung der Ergebnisse wurden Diagramme erstellt. In allen Diagrammen sind die Intervalle durch vertikale Linien begrenzt. Die Summe der benetzten Bereiche steigt insgesamt im Lauf der Zeit an. Zwischenzeitlich kam es teilweise zu einer Verringerung der benetzten Flächen und Längen, da der Grundwasserstand sank und somit einige Flächen nicht mehr benetzt waren. Die zur Berechnung verwendeten Flächen und Daten sind in allen Diagrammen identisch.

Das erste Diagramm (**Bild 3**) zeigt die dokumentierten Wassermengen der GWRA als Durchschnittswert pro Tag im Vergleich zu den Niederschlagsmengen. Es ist zu erkennen, dass zwischen den beiden Graphen kein Zusammenhang besteht bzw. dass der Niederschlag kaum einen Einfluss auf die auftretenden Wassermengen hat. Um die ermittelten spezifischen Restwassermengen und Daten möglichst realitätsnah auszuwerten, zeigen alle weiteren Diagramme die Ergebnisse ohne die Wassermengen aus Niederschlag.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zuerst für alle Intervalle vorgestellt. Danach wird genauer auf die relevanten Intervalle eingegangen.

An wenigen Tagen ist der ermittelte Beiwert für die Spundwände negativ (16.06.2019, Intervall 2; 22.06.2019, Intervall 3, Variante 1), an einem anderen Tag ist der ermittelte Wert deutlich größer als einen Tag vorher und nachher (10.01.2019, Intervall 1, Variante 1). Da diese Werte nur vereinzelt auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass an diesen Tagen Messungenauigkeiten vorliegen. Diese Werte sind in die Diagramme eingetragen, jedoch nicht in die Berechnung der Durchschnittswerte eingeflossen.

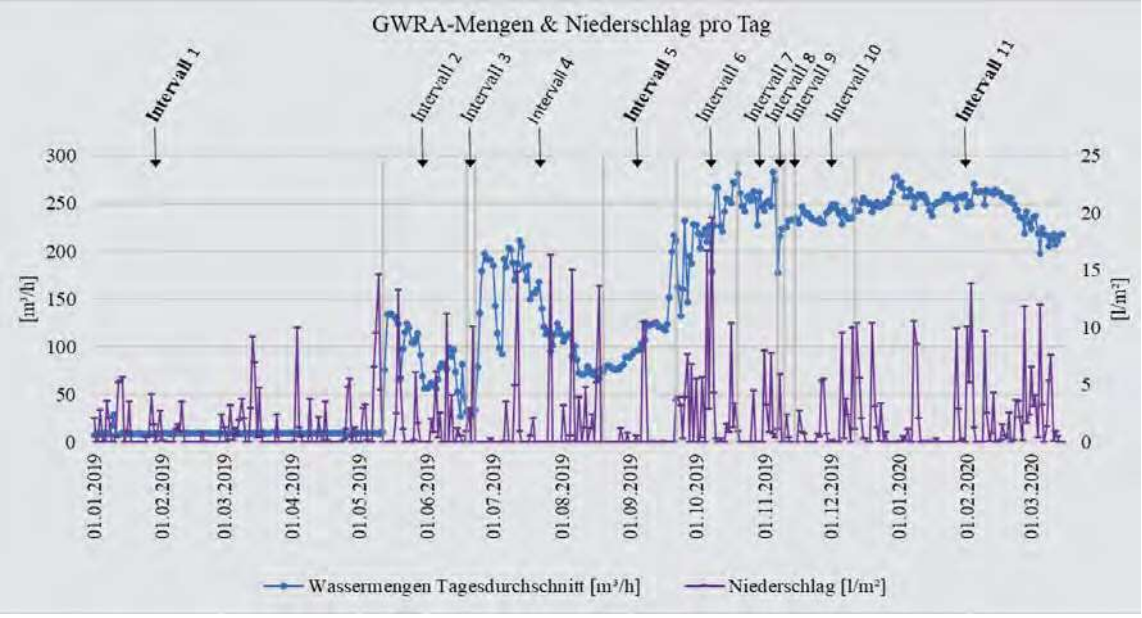


Bild 3: GWRA-Mengen und Niederschläge pro Tag

Tabelle 7: Spezifische Restwassermengen für die Varianten 1 bis 3 am Terminal 3 des Frankfurter Flughafens

Niederschlag	Zeitraum	Variante 1		Variante 2		Variante 3
		q_{Sohle}	$q_{Wände}$	q_{Sohle}	$q_{Wände}$	q_{Gesamt}
		l/s je 1.000 m²	l/s je 1.000 m²	l/s je 1.000 m²	l/s je 1.000 m²	l/s je 1.000 m
ohne	Intervall 1	0,7	2,74	Individuell pro Baugrube	3,15	1,09
	Intervall 2	0,7	6,86		-	1,75
	Intervall 3	0,7	0,23		-0,49	0,62
	Intervall 4	0,7	3,62		-	1,21
	Intervall 5	0,7	2,78		2,15	1,06
	Intervall 6	0,7	8,29		-	1,78
	Intervall 7	0,7	10,53		-	1,69
	Intervall 8	0,7	7,24		-	1,45
	Intervall 9	0,7	10,10		-	1,60
	Intervall 10	0,7	10,71		-	1,65
	Intervall 11	**0,7**	**11,77**		**11,57**	**1,73**
	Durchschnitt		**6,42**		**6,09**	**1,40**
	Durchschnitt Intervall 1, 3, 5, 11		**5,97**		**-**	**1,31**
	Durchschnitt Intervall 1, 5, 11		**6,07**		**6,09**	**1,32**
	Maximum, gesamt		14,08		13,87	2,65
	Minimum, gesamt (ohne negative Werte)		0,06		0,17	0,59
	Maximum, Intervall 11		14,08		13,87	1,94
	Minimum Intervall 11		8,00		7,80	1,38
mit	Intervall 11	0,7	12,01	-	-	1,75
	Durchschnitt inkl. Niederschlag	**0,7**	**6,54**	**-**	**-**	**1,42**

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse im Vergleich als Durchschnittswerte über die betrachteten relevanten Intervalle. Insgesamt unterscheiden sich die Ergebnisse der spezifischen Restwassermengen der Wände $q_{Wände}$ von Variante 1 und 2 nur wenig. Die weitere Auswertung bezieht sich daher auf Variante 1.

4.1 Spezifische Restwassermengen in Variante 1 und 3

Zur Auswertung der spezifischen Restwassermengen wurde Variante 1 betrachtet. Bild 4 zeigt den Vergleich von $q_{Wände}$ und dem identischen Beiwert q_{Gesamt}. Die obere Kurve zeigt die spezifische Restwassermenge für Spundwände, der untere Graph zeigt den Wert, wenn dieser für Sohle und Wand identisch angesetzt wird.

Beim Vergleich der beiden Graphen entsteht der Eindruck, dass der identische Beiwert q_{Gesamt} über den gesamten Zeitraum nahezu konstant ist. Vor allem in den letzten beiden Intervallen schwankt dieser kaum. Der Beiwert nur für die Wände $q_{Wände}$ unterliegt hingegen größeren absoluten Schwankungen. Es fällt auf, dass dieser fast durchgängig größer ist als der identische Beiwert. Wird die Kurve von q_{Gesamt} genauer betrachtet, ist zu erkennen, dass auch der identische Beiwert Schwankungen unterliegt. Diese sind absolut betrachtet jedoch deutlich geringer als die Schwankungen der spezifischen Restwassermenge für die Spundwände.

Es ist zu sehen, dass die spezifische Restwassermenge für Spundwände $q_{Wände}$ mit der Zeit steigt. Das liegt jedoch hauptsächlich an den steigenden Wassermengen aus der GWRA. Bei Betrachtung des identischen Beiwerts fällt auf, dass dieser deutlich weniger steigt. Wird nur Intervall 11 betrachtet, ist q_{Gesamt} nahezu konstant und liegt im Durchschnitt bei 1,75 l/s je 1.000 m². Die Restwassermenge $q_{Wände}$ schwankt sehr stark. Die Werte

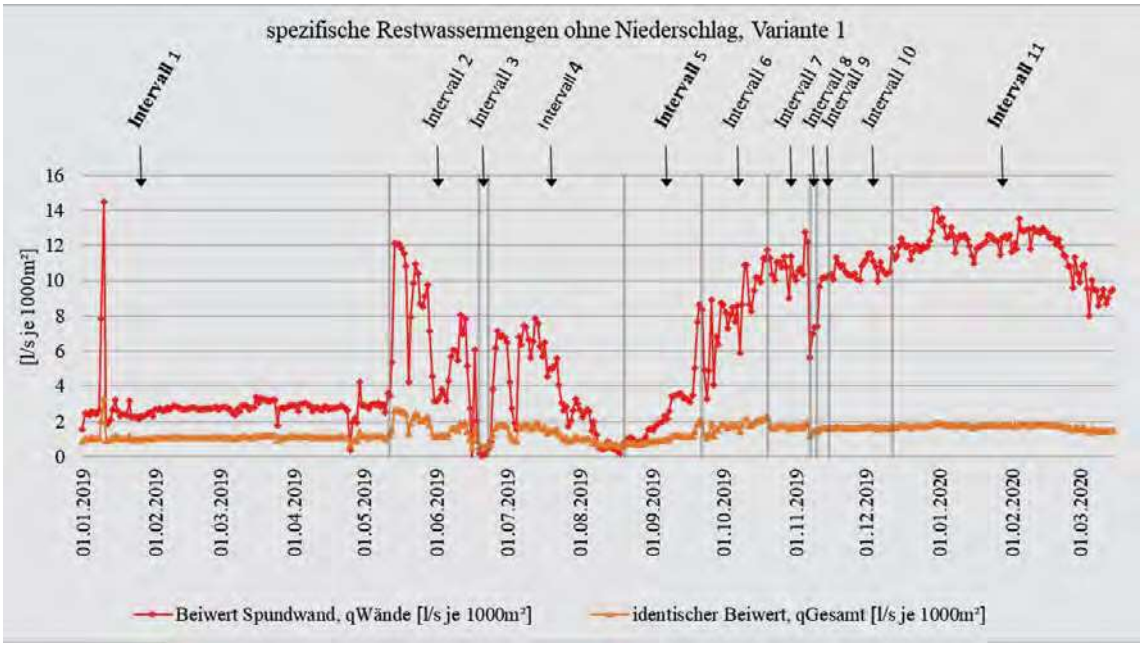


Bild 4: Spezifische Restwassermenge ohne Niederschlag in Variante 1

liegen zwischen 8,00 und 14,08 l/s je 1.000 m². Diese großen Differenzen lassen sich kaum logisch erklären, da sich das System und die benetzten Flächen nicht ändern.

Werden alle Durchschnittswerte der Intervalle für $q_{Wände}$ betrachtet, fällt auf, dass sie stark variieren. Wird der Durchschnitt aus allen Werten gebildet, ist dieser höher als der Durchschnittswert aus den relevanten Intervallen. Werden diese Werte mit denen für den identischen Beiwert q_{Gesamt} in **Tabelle 7** verglichen, fällt auf, dass die Werte des identischen Beiwerts durchgängig deutlich kleiner sind. Außerdem unterliegen sie im Vergleich zu $q_{Wände}$ kaum Schwankungen. Auch die Durchschnittswerte aus allen bzw. nur aus den relevanten Intervallen unterscheiden sich bei q_{Gesamt} weniger. Werden der höchste und der niedrigste Wert verglichen, unterscheiden diese sich für jede Wertegruppe deutlich. Insgesamt fällt auf, dass der identische Beiwert q_{Gesamt} kaum schwankt, aber die Werte für $q_{Wände}$ stark schwanken. Generelle Schwankungen der spezifischen Restwassermengen hängen mit den verschieden hohen Wassermengen zusammen. Eine Erklärung für die zum Teil großen Schwankungen der spezifischen Restwassermengen der Wände in Abhängigkeit der spezifischen Restwassermenge der Sohlen ist dieses jedoch nicht. Die zur Berechnung von q_{Sohle} verwendete Formel ist für die Ermittlung der zulässigen Restwasserrate definiert. Die starken Schwankungen der Ergebnisse von $q_{Wände}$ führen zu der Frage, ob die verwendete Formel für diese Berechnung sinnvoll ist.

Insgesamt stellt sich die Frage, ob eine Berechnung mit einer identischen spezifischen Restwassermenge der Realität entspricht. Der nur für die Sohle ermittelte Wert ist kleiner, der Wert für die Spundwände deutlich größer.

4.2 Einfluss der Baugrubengeometrie auf die Ergebnisse

Alle ermittelten Werte beziehen sich auf die Gegebenheiten der untersuchten Baugrube. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss die geometrischen Verhältnisse auf die Ergebnisse haben. Daher werden nachstehend verschiedene Aspekte der Geometrie betrachtet. Alle betrachteten Aspekte sind in **Tabelle 8** zusammengefasst

Tabelle 8: Geometrische Verhältnisse am Terminal 3 [6]

Zeitraum	Verhältnis benetzte				$q_{Wände}$ (Variante 1)	q_{Gesamt} (Variante 3)
	Sohlfläche / Wandfläche	Ecken / Wandfläche	Arbeitsfugen Sohle / Sohlfläche	Kontaktfugen Sohle -Wand / Sohlfläche		
	m²/m²	m/m²	m/m²	m/m²	l/s je 1.000 m²	l/s je 1.000 m²
Intervall 1	**4,28**	**0,06**	**0,05**	**0,20**	**2,74**	**1,09**
Intervall 2	4,86	0,07	0,04	0,13	6,86	1,75
Intervall 3	4,87	0,07	0,06	0,13	0,23	0,62
Intervall 4	4,77	0,06	0,04	0,14	3,62	1,21
Intervall 5	**4,84**	**0,06**	**0,04**	**0,14**	**2,78**	**1,06**
Intervall 6	6,00	0,06	0,04	0,14	8,29	1,78
Intervall 7	8,94	0,09	0,05	0,12	10,53	1,69
Intervall 8	7,68	0,08	0,05	0,12	7,24	1,45
Intervall 9	9,39	0,08	0,05	0,12	10,10	1,60
Intervall 10	9,50	0,08	0,05	0,12	10,71	1,65
Intervall 11	**9,79**	**0,08**	**0,05**	**0,12**	**11,77**	**1,73**

und den ermittelten spezifischen Restwassermengen gegenübergestellt. Die relevanten Intervalle sind fettgedruckt dargestellt.

Insgesamt wird das Verhältnis von benetzter Sohlfläche zu benetzter Wandfläche im Laufe der Zeit größer. In den ersten Intervallen ist viermal so viel Sohlfläche benetzt wie Wandfläche, zum Ende hin ist es zehnmal so viel Sohlfläche. Dieser Verlauf spiegelt sich in dem Beiwert für die Spundwände $q_{Wände}$ wider. Wird im Vergleich der identische Beiwert q_{Gesamt} betrachtet, steigt auch dieser an. Ab Intervall 7 steigt und fällt q_{Gesamt} mit dem Verhältnis von Sohle zu Wand, in den ersten Intervallen ist dieser Zusammenhang weniger eindeutig zu erkennen. Insgesamt ist ein geringfügiger Zusammenhang der spezifischen Restwassermengen zu dem Verhältnis von Sohle zu Wand erkennbar. Je größer der Anteil der Sohle wird, desto höher wird $q_{Wände}$.

Das Verhältnis der benetzten Ecken in m pro Fläche der Wand in m² liegt zwischen 0,06 m/m² und 0,08 m/m². Die Verhältniswerte werden fast kontinuierlich größer, es gibt folglich immer mehr benetzte Ecken pro Quadratmeter Fläche und damit mehr potenzielle Fehlstellen im Laufe der Zeit. Es kann jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zu den ermittelten spezifischen Restwassermengen erkannt werden. Auch die spezifische Restwassermenge für die Wände steigt insgesamt an, die Intervalle, in denen die Werte sinken, unterscheiden sich jedoch. Ähnliches ist bei dem identischen Beiwert im Zusammenhang mit den Eckpunkten zu beobachten.

Nach Auswertung der Ergebnisse der spezifischen Restwassermengen stellt sich die Frage, ob es realistisch ist, den Beiwert der Sohle als konstant anzusehen, um die spezifische Restwassermenge für die Wände zu ermitteln bzw. ob es realistisch ist, die spezifische Restwassermenge der Sohlen nur von der Differenzhöhe der Wasserspiegel Δh abhängig zu machen. Je nach Herstellungsweise der Sohlen weisen sie mehrere oder wenige Arbeitsfugen und damit potenzielle Fehlstellen auf. Die Schnittstellen zwischen Spundwand und Sohlen werden nicht berücksichtigt, da es nur um den Einfluss der Herstellung der Sohlen gehen soll.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Verhältniswert der Arbeitsfugen der Sohlen zur Sohlfläche wenig schwankt. Außer in Intervall 3 ist dieser annähernd konstant. In Intervall 3 sind die ermittelten spezifischen Restwassermengen beide niedrig. Das bedeutet, dass bei mehr Sohlfugen die spezifische Restwassermenge klein und nicht wie erwartet groß ist. Es besteht für die betrachtete Baugrube also kein direkter Zusammenhang zwischen dem Anteil an benetzten Sohlfugen und den ermittelten Beiwerten, da ihr Anteil über den gesamten Zeitraum kaum schwankt. Die Annahme, dass die spezifische Restwassermenge für Sohlen als konstant angenommen wird, ist für die Baugrube am Terminal 3 am Flughafen Frankfurt a. M. also prinzipiell möglich, kann aber nicht verallgemeinert werden.

Eine weitere potenzielle Fehlstelle bei der Herstellung der Baugruben ist die Fuge zwischen Wand und Sohle. Zur Überprüfung des Einflusses wird das Verhältnis zwischen Grundfläche und Länge an Kontaktfugen gebildet Dieses liegt zwischen 0,12 und 0,20 m/m². Es fällt auf, dass in den Intervallen, in welchen der Verhältniswert am größten ist (Intervall 1 und 5), die ermittelten spezifischen Restwassermengen niedrig sind. In den Intervallen 7 bis 11 ändert sich der Verhältniswert kaum, die spezifischen Restwassermengen schwanken deutlich mehr. Es ist kaum ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Restwassermenge und dem Verhältnis von Sohle zu Kontaktlängen zu erkennen. Der Verhältniswert fällt insgesamt im Lauf der Zeit, die Beiwerte schwanken durchgängig bzw. der identische Beiwert steigt insgesamt im Lauf der Zeit an. Die Erwartung, dass bei mehr potenziellen Fehlstellen durch den Übergang zwischen Sohle und Wand auch mehr Wasser eindringt und damit der Beiwert steigt, wird nicht bestätigt.

5 Ermittlung der rechnerisch zu erwartenden Wassermenge am Terminal 3

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden für die Baugrube des Terminal 3 am Flughafen Frankfurt a. M. die theoretisch zu erwartenden Wassermengen ermittelt. Diese Mengen wurden mit den tatsächlich dokumentierten verglichen.

Von Januar 2019 bis März 2020 sind nach [9] insgesamt 1.520.284 m³ Wasser durch die GWRA geflossen.

Im ersten Schritt wurde der Anteil des Wassers ermittelt, der unabhängig von der spezifischen Restwassermenge ist, nämlich das Lenzvolumen der Baugruben. Die Wassermenge aus Niederschlag wird nicht betrachtet.

Das Lenzvolumen wurde über das Volumen der jeweiligen Baugrube abhängig von der benetzten Wand- und Sohlfläche ermittelt und pro Intervall in die Gesamtmenge einberechnet.

Die Wassermengen in Abhängigkeit der spezifischen Restwassermengen wurden einmal mit Literaturwerten ermittelt und einmal mit den zuvor ermittelten spezifischen Restwassermengen.

5.1 Wassermenge durch den horizontalen Verbau

Für den Durchfluss durch die horizontale Dichtsohle wurde die spezifische Restwassermenge für die Sohlen ermittelt. Sie wurde pro Baugrube und pro Intervall ermittelt, um am Ende ein möglichst exaktes Ergebnis zu erzielen. Die Berechnung erfolgte analog zu Variante 2. Über die spezifische Restwassermenge wird dann der Durchfluss und über die Dauer des jeweiligen Intervalls die Menge des Restzustromwassers pro Intervall ermittelt.

5.2 Wassermenge durch den vertikalen Verbau aus Literaturwerten

Um die Wassermenge zu ermitteln, die durch den vertikalen Verbau, also in diesem Fall durch die Spundwän-

de, eintritt, ist die spezifische Restwassermenge nötig. Dieser Wert liegt zwischen 1,5 und 5,0 l/s je 1.000 m². Zur Ermittlung des Werts wurde die Baugrube zuerst in eine Dichtigkeitsklasse eingeordnet. Abhängig von dieser Dichtigkeitsklasse wurde die spezifische Restwassermenge festgelegt, um dann die Menge des Wassers zu ermitteln, die über den betrachteten Zeitraum durch die Spundwände eintritt.

Die Einordnung in eine Klasse erfolgte nach **Tabelle 3**. Der Baugrubenverbau wurde in die Dichtigkeitsklasse N „Bauwerke und Baugruben mit normalen Dichtigkeitsanforderungen" eingeordnet [2]. Diese Klasse entspricht einer spezifischen Restwassermenge von q = 1,5 l/s pro 1.000 m². Dieser Wert wird oft in der Literatur verwendet und wurde daher auch hier zur Ermittlung angesetzt. Die Ermittlung der Wassermengen erfolgt pro Intervall und Baugrube.

5.3 Wassermenge mit Literaturwerten

Zur Ermittlung der theoretisch zu erwartenden gesamten Wassermengen, die im Lauf des betrachteten Zeitraums abgepumpt werden, werden alle zuvor ermittelten Mengen addiert. In **Tabelle 9** werden jeweils die Mengen pro Intervall und die Gesamtmenge aufgelistet. **Tabelle 9** zeigt die ermittelten Mengen. **Bild 5** zeigt die ermittelten Mengen im Vergleich zu den tatsächlichen, dokumentierten Mengen ohne Niederschlag. Um einen weiteren Vergleichswert für die in der Literatur empfohlenen Werte zu bekommen, wurde der Mengenanteil des Wassers für Wände und Sohle mit q_{Gesamt} = 1,5 l/s je 1.000 m² ermittelt. Die Ermittlung erfolgte wie bereits erläutert. Angegeben sind nur die Gesamtergebnisse.

5.4 Wassermenge aus ermittelten spezifischen Restwassermengen

Im nächsten Schritt wurden die zu erwartenden Wassermengen, die durch den Verbau eindringen, mit den zuvor ermittelten spezifischen Restwassermengen berechnet. Für den Wasseranteil, der durch den vertikalen Verbau eindringt, wurde die ermittelte spezifische Restwassermenge der Wände als Durchschnitt angesetzt. Es wurde der Durchschnitt des 11. Intervalls nach Variante 2 der Berechnung angesetzt. Dieser Wert beträgt $q_{Wände}$ = 11,57 l/s je 1.000 m². Die spezifische Restwassermenge der Sohlen wurde analog zu Variante 1 und 2pro Baugrube und Intervall ermittelt.

Eine weitere Berechnung der zu erwartenden Wassermengen wurde mit der ermittelten identischen spezifischen Restwassermenge für Sohle und Wand q_{Gesamt} durchgeführt. Dieser Wert beträgt 1,73 l/s je 1.000 m².

In **Tabelle 9** sind die Gesamtmengen nach den verschiedenen Berechnungsmethoden pro Intervall gegenübergestellt. Die tatsächlichen Wassermengen sind ohne Niederschlag angegeben. **Bild 5** zeigt die Ergebnisse als Kurven.

Tabelle 9: Gesamte Wassermengen

Zeitraum	Gesamtmengen ohne Niederschlag in m³				
	Tatsächlich	Literaturwerte		für Terminal 3 ermittelte Werte (Tabelle 7)	
		$q_{Sohle\ individuell} + q_{Wände}$ = 1,5 l/s je 1.000 m²	q_{Gesamt} = 1,5 l/s je 1.000 m²	$q_{Sohle\ individuell} + q_{Wände}$ = 11,57 l/s je 1.000 m²	q_{Gesamt} = 1,73 l/s je 1.000 m²
Intervall 1	137.669,894	21.169,28	40.964,67	73.261,42	47.245,91
Intervall 2	79.433,3833	77.443,56	102.365,31	157.074,57	113.020,26
Intervall 3	2.955,71135	4.671,81	7.311,48	13.032,98	8.432,57
Intervall 4	183.582,597	187.600,91	270.921,95	452.168,60	305.814,28
Intervall 5	87.721,4613	78.677,99	124.979,95	222.246,07	144.143,54
Intervall 6	147.999,815	100.533,76	148.675,68	220.159,67	167.806,85
Intervall 7	10.8409,885	72.172,12	113.074,52	136.984,09	127.792,47
Intervall 8	1.5876,297	10.539,30	16.437,21	23.249,39	18.957,59
Intervall 9	27.688,5565	14.310,68	25.976,43	31.090,69	29.959,48
Intervall 10	153.871,396	76.560,98	140.113,39	166.103,49	161.597,44
Intervall 11	557.742,02	25.176,64	486.434,46	559.735,44	561.021,08
Summe	**1.502.951,02**	**900.857,02**	**1.477.255,03**	**2.055.106,41**	**1.685.791,47**

5.5 Vergleich der ermittelten Wassermengen

Im ersten Schritt wird die ermittelte Menge nach Literaturangaben mit verschiedenen spezifischen Restwassermengen für Sohle und Wand betrachtet (**Bild 5**, blau gepunktete Kurve).

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die rechnerisch ermittelten Wassermengen weit unter den tatsächlich aufgetretenen Mengen liegen. Der tatsächlich gemessene und dokumentierte Höchstwert liegt bei 1,5 Mio. m³ Wasser, der rechnerisch ermittelte liegt bei 900.000 m³. Die rechnerisch ermittelte Wassermenge ist also ungefähr ein Drittel kleiner als die tatsächlich gemessene und dokumentierte Wassermenge. Es ist zu beobachten, dass zu Beginn des gesamten Zeitraums die Werte ähnlich hoch sind. Da die Werte pro Intervall und nicht pro Tag ermittelt werden, müssten sich zum Ende eines Intervalls die Kurven schneiden. Das ist von Anfang an nicht der Fall. Vor allem im letzten betrachteten Intervall liegen die beiden Kurven weit auseinander. Diese Beobachtung stellt die angesetzten Literaturwerte und die angewendeten Berechnungsverfahren in Frage.

Wird im zweiten Schritt die Wassermenge aus der identischen spezifischen Restwassermenge für Wände und Sohle q_{Gesamt} = 1,5 l/s je 1.000 m² (**Bild 5**, grau gestrichelte Kurve) betrachtet, wird deutlich, wie gut die rechnerisch ermittelte Wassermenge mit der realen bzw. dokumentierten Menge übereinstimmt (**Bild 5**, dunkelgrün gestrichelte Kurve). Die ermittelte Menge beträgt 1,47 Mio. m³ Wasser. Es ist zu sehen, dass die Kurve von Intervall 4 bis 10 über der Kurve der tatsächlichen Menge liegt. Im Zusammenhang mit den Betrachtungen der

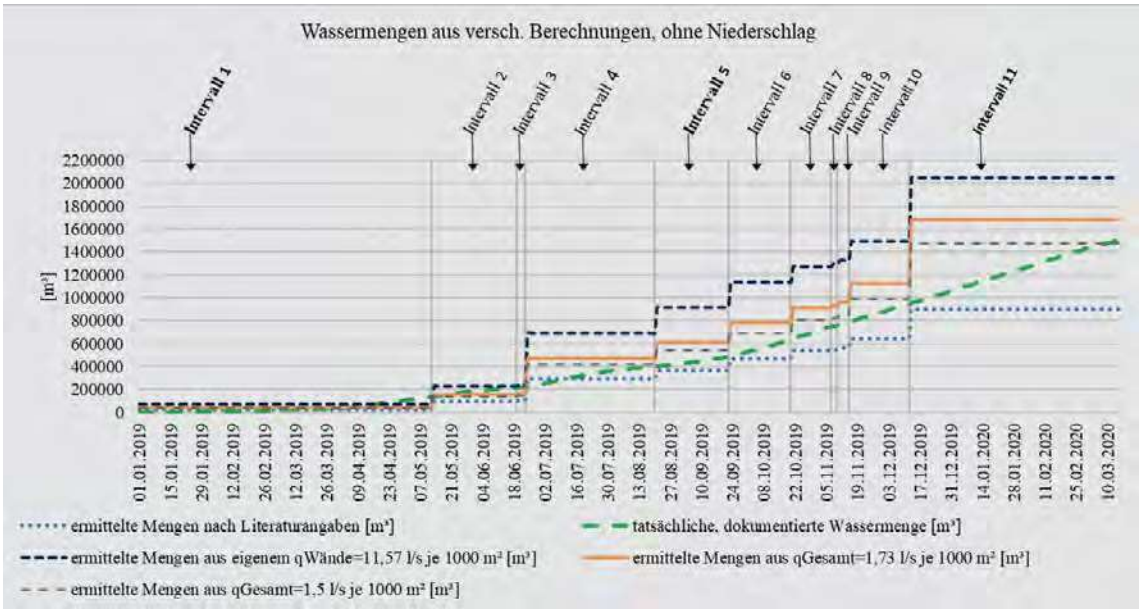


Bild 5: Alle ermittelten und tatsächlichen Wassermengen exklusive Niederschlag

Flächenverhältnisse im Kapitel 4.2 stellt sich die Frage, ob das insgesamt sehr realitätsnahe Ergebnis Zufall ist, also das Verhältnis von Sohle zu Wand am Terminal 3 dem Verhältnis entspricht, welches eine Verwendung eines identischen Beiwerts unterstützt.

Im **Bild 5** ist deutlich zu sehen, dass die Ermittlung mit q_{Gesamt} = 1,5 l/s je 1.000 m² für die spezifische Restwassermenge des Verbaus der Realität am nächsten kommt. Sie weicht nur um 2 Prozentpunkte von der tatsächlichen, dokumentierten Wassermenge ab. Die Ermittlung mit einem Spundwandbeiwert von $q_{Wände}$ = 11,57 l/s je 1.000 m² und einem q_{Sohle} abhängig von der hydraulischen Höhe ergibt einen Wert, der 37 Prozentpunkte höher ist (**Bild 5**, dunkelblau gestrichelte Kurve). Es ist jedoch fraglich, wie genau die hydraulische Höhe im Vorfeld bestimmt werden kann, da Grundwasserstandsschwankungen nicht exakt vorhergesagt werden können. Beim Ansatz eines identischen Grundwasserstands über den gesamten Zeitraum, ist die Differenz der hydraulischen Höhen größer und damit wird auch die errechnete Wassermenge höher. Eine Ermittlung nach diesem Verfahren, ohne Beachtung der Schwankungen des Grundwassers bzw. dem Abfall des Grundwasserstands, liefert somit ein Ergebnis auf der sicheren Seite. Die Ermittlung mit zwei Beiwerten, wie sie in der Literatur erklärt werden, weicht um 40 Prozentpunkte nach unten ab und die Mengen aus den Ermittlungen durch q_{Gesamt} = 1,73 l/s je 1.000 m² (**Bild 5**, orange Kurve) um 12 Prozentpunkte nach oben.

Aufgrund der Tatsache, dass ein Teil der Wassermengen undokumentiert abgepumpt wurde, war die tatsächliche Wassermenge am Terminal 3 höher als die hier betrachtete, dokumentierte Menge. Daher sollte die rechnerisch ermittelte Menge über der dokumentierten liegen. Beide Wassermengen, die durch die spezifischen Restwassermengen ermittelt werden, liegen über der dokumentierten Menge. Da unklar ist, ob der Ansatz einer identischen spezifischen Restwassermenge immer realistisch ist bzw. wie groß der Einfluss aus dem Verhältnis von Wand zu Sohle im Allgemeinen ist, ist eine Ermittlung mit zwei Beiwerten allgemeingültig sinnvoller.

6 Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt gelten alle hier vorgestellten Ergebnisse für sandige Böden mit einer Durchlässigkeit in einer Größenordnung von $k = 10^{-3}$ m/s. Bei einer hiervon abweichenden Durchlässigkeit ergeben sich entsprechend abweichende Wassermengen. Analog gilt dies auch für den Aufbau des Baugrubenverbaus mit Spundwänden in Verbindung mit einer 1,0 m dicken Unterwasserbetonsohle.

Der Niederschlag hatte im Vergleich zu den restlichen Wassermengen nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtmenge. Es wird weiterhin festgestellt, dass die spezifische Restwassermenge der Wände bei einem festgelegten Wert für die Sohle deutlich mehr als bei einer identischen spezifischen Restwassermenge für Sohle und Wände schwankt. Es konnte kaum ein Einfluss der Fugen zwischen Sohle und Wand und der Arbeitsfugen der Unterwasserbetonsohle festgestellt werden. Außerdem war das jeweilige Verhältnis nahezu konstant über den betrachteten Zeitraum.

Alle Empfehlungen gelten für die Ermittlung der Wassermengen exklusive Niederschlag. Es ist unklar, ob die Menge aus Niederschlag für jedes Bauvorhaben einen solch geringen Anteil an der Gesamtmenge ausmacht oder nur für das hier untersuchte Bauvorhaben.

Die Ergebnisse sind nur schwierig auf andere Baugruben zu übertragen, es können jedoch trotzdem einige Empfehlungen für zukünftige Baugruben formuliert werden:

- Die Ermittlung mit einer exakten Berechnung der spezifischen Restwassermenge für Sohlen und eine Erhöhung für die Spundwände auf 11,57 l/s je 1.000 m² liefert die höchsten Werte. Ist eine genaue Ermittlung der spezifischen Restwassermenge der Sohle nicht gewünscht, kann diese auf ca. 0,7 l/s je 1.000 m² festgelegt werden. Eine Ermittlung mit einem einheitlichen Wert von 1,73 l/s je 1.000 m² für Wände und Sohle liefert ein ähnliches Ergebnis.
- Um auftretende Fehlstellen von Anfang an mit einzuplanen, empfiehlt es sich, die ermittelten Wassermengen zu erhöhen.

Außerdem hat sich die in der Literatur oft verwendete spezifische Restwassermenge von 1,5 l/s je 1.000 m² insgesamt als zu niedrig herausgestellt. Unabhängig von der Geometrie bzw. dem Verhältnis von Sohl- zu Wandfläche ist eine Berechnung mit getrennten Werten für die Sohlen und Wände realistischer.

Christin Kübel, M. Eng.

ist Absolventin im Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt.

Kontakt:
christin-kuebel@hotmail.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt

vertritt im Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Forschungs- und Lehrgebiete Geotechnik, Tunnelbau und CAD.

Kontakt:
juergen.schmitt@h-da.de



Dr.-Ing. Heiko Huber

arbeitet bereits seit Ende 2012 bei der CDM Smith Consult GmbH als Senior Projekt Manager im Geschäftsbereich Geotechnik.

Kontakt:
heiko.huber@cdmsmith.com



7 Literaturverzeichnis

[1] Stelzig, S.: Kapitel 6: Wasserhaltung. In Boley, C.: Handbuch Geotechnik: Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.

[2] Borchert, K.-M.: Innerstädtische Baugruben, Erfahrungen zu Verformungen und Dichtigkeit, 6. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 22.-23.01.2008, S. 25–38.

[3] Schnell, W.: Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, Teubner Verlag, Stuttgart, 1990.

[4] Borchert, K.-M.: Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlen-Konstruktionen - Lehren aus Schadensfällen, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Jahrbuch 1999, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.

[5] Fraport AG: Terminal 3 - Frankfurt Airport: Was bisher geschah. Online (Abfragedatum: 02.06.2020): https://terminal3.frankfurt-airport.com/

[6] CDM Smith Consult GmbH: Interne Firmendaten.

[7] Ingenieurgemeinschaft Tragwerksplanung Terminal 3: Genehmigungsstatik - Baugrubensicherung Gebäude und Rampen Anlieferhof.

[8] ICP Rhein-Main GmbH: Bauzeitliches Grundwassermonitoring. Wochenberichte, 2018-2020.

[9] Aqasys Hoelscher: Datenmanagement Grundwasserreinigungsanlage. Online: https://aqasys.hoelscher-wasserbau.de:8443/

A.S.T. BOCHUM

Armaturen - Schlauch - und Tunneltechnik



- Hochwertige Produkte und Dienstleistungen
- Für die Bauindustrie, Maschinen-, Agrar- und Kommunaltechnik
- Für Beton, Wasser und Pressluft
- Große Auswahl, schnelle Verfügbarkeit, pünktliche Lieferung, umfangreiche Garantieleistungen

- High-quality products and services
- For construction industry, machine and municipal technology/ agricultural engineering
- For concrete, water and compressed air
- Wide selection, quick availability, timely delivery, comprehensive warranty services



NEU Katalog 3.0: Jetzt anfordern!!!

New Catalogue 3.0: Order now!!!

Tel: +49 (0) 234 5996310 - info@astbochum.de
www.astbochum.de