

Abschätzung von Restwassermengen für einen Spundwandverbau in tiefen Baugruben im Frankfurter Baugrund

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

Zusammenfassung

Im Zuge der Baumaßnahmen des Terminal 3 am Flughafen Frankfurt am Main wurde die Systemdurchlässigkeit der dort ausgeführten Baugruben untersucht. Die Baugrube wurde mittels wasserundurchlässiger Spundwände und einer 1,0 m dicken Unterwasserbetonsohle hergestellt. Der umgebende Baugrund besteht aus quartären Sanden und Kiesen. Das in die Baugrube eintretende Leckagewasser wurde in einer Restwasserhaltung gesammelt, abgepumpt und dokumentiert. Im umgebenden Baugrund erfolgte eine Überwachung und Untersuchung des Grundwasserstandes. Auf Grundlage der umfangreichen Messdaten wurde ein Ansatz für die Systemdurchlässigkeit für einen Spundwandverbau in tiefen Baugruben im Frankfurter Baugrund abgeleitet.

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. (vgl. [1])

Hier 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 1000 m² benetzter Fläche angegeben. (vgl. [1] und [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 1000m² benetzte Fläche“ vorgestellt. Dieser Wert wird sowohl für Dichtwände als auch für Sohlen angesetzt.

Schnell gibt Durchlässigkeitsbeiwerte für unbewehrte Unterwasserbetonsohlen an, diese liegen zwischen $k = 10^{-8}$ m/s und $k = 10^{-10}$ m/s. (vgl. [3]) Borchert hat Baugruben in Berlin untersucht. Der Restwasserzufluss für Baugrubenwände beträgt dort ca. 2 m³/h je 1000 m² und der Restwasserzufluss der Sohlen ca. 0,5 bis 2 m³/h je 1000 m² pro m Wasserdruckdifferenz. (vgl. [4]) Borchert empfiehlt daher die rechnerische Ermittlung von Restwasserraten für Sohlen. Diese erfolgt abhängig von der jeweiligen Art der Dichtsohle und dem aktuell geschehenden Vorgang auf der Baustelle. Die Restwasserrate zul. q_R (in m³/h je 1000 m²) unterscheidet sich abhängig von dem anstehenden Wasserdruck. (vgl. [2])

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

Sohlenart	w_{zul} [m ³ /h je 1000 m ²]		
	Probeab-senkung	Lenzen	Endzu-stand
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

Tab. 2: Systemdurchlässigkeiten nach dem Stand der Technik [nach Kluckert, 2007] [2]

	Autor	Quelle	Jahr	angegebene Leckagewassermenge		Systemdurchlässigkeit bei $i = 0,5$	Bemerkungen
				l/s je 1000 m ²	m ³ /h je 1000 m ²		
1	Schmidt Seitz	Beton-Kalender	1992 1994 1998	5,0	18,0	1×10^{-5}	Vorschlag allgemein
2	Sänger Hähnig	23. Baugrundtagung Köln	1994	2,5	9,0	5×10^{-6}	Vorgabe für das Projekt
3	Borchert	VDI-Fachtagung „Tiefe Baugruben“ Berlin	1999	1,5	5,4	3×10^{-6}	Regelvorgabe in Berlin
4	Kast et. al.	26. Baugrundtagung Hannover	2000	2,0	7,2	4×10^{-6}	Vorgabe für das Projekt
5	Borchert Richter	15. Chr.Veder Kolloquium Graz	2000	1,5	5,4	3×10^{-6}	Regelvorgabe in Berlin
6	Könemann et al.	Tunnelbau Taschenbuch	2002	1,5	5,4	3×10^{-6}	Regelvorgabe in Berlin
7	Borchert et. al.	29. Baugrundtagung Bremen	2006	1,5	5,4	3×10^{-6}	Regelvorgabe Vorschlag allg.

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 für die jeweilige Sohlenart zulässig ist. (vgl. [2])

Nach [2] gilt:

$$q_R = w_{zul.} \cdot \Delta h \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

$w_{zul.}$ = „Wert in Abhängigkeit von der Dichtsohlenart“ [m³/h je 1000 m²] [vgl. Tab. 1] nach [2]

Δh = „Differenzhöhe der Wasserspiegel“ [m] nach [2]

Tab. 3: Dichtigkeitsklassen nach Kluckert nach [2]

Geotechnische Dichtigkeitsklasse	Bauwerksart	Leckagerate		Systemdurchlässigkeitsbeiwert bei $i = 0,5$ k_f [m/sec]
		l/sec je 1000 m ²	m ³ /h je 1000 m ²	
N	Bauwerke und Baugruben mit <u>normalen Dichtigkeitsanforderungen</u>	1,5	5,4	3×10^{-6}
H	Bauwerke wie Klasse N, <u>jedoch mit hohen Dichtigkeitsanforderungen</u>	0,05	0,18	1×10^{-7}
G	Bauwerke wie Klasse N, <u>jedoch mit geringen Dichtigkeitsanforderungen</u>	2,5	9,0	5×10^{-6}

Eine Zusammenstellung verschiedener Literaturwerte für Restwasserraten von Trogbaugruben gibt Kluckert. (vgl. [2]) Kluckert empfiehlt Bauwerke in Dichtigkeitsklassen einzuordnen und gibt entsprechende Leckageraten und Systemdurchlässigkeitsbeiwerte an. Die Beiwerte und Dichtigkeitsklassen sind in Tab. 2 und Tab. 3 dargestellt.

2. Baugrube des Terminal 3, Flughafen Frankfurt am Main

Am Flughafen Frankfurt am Main, wird seit Oktober 2015 ein neues Terminal (Terminal 3) gebaut. (vgl. [5])



Abb. 1: schematischer Grundriss Terminal 3, Flughafen Frankfurt am Main, inkl. Beschriftung [6]

Die Baugrube ist in 25 Abschnitte unterteilt. Diese Abschnitte grenzen teilweise aneinander an, einige

befinden sich innerhalb anderer 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 mNN und 105 mNN. Die Baugrubensohlen liegen zwischen 89,00 mNN und 97,00 mNN und der Grundwasserstand liegt über den Zeitraum von Januar 2019 bis März 2020 insgesamt an allen betrachteten Stellen zwischen 94,00 mNN und 99,00 mNN. Das heißt, die meisten Baugrubensohlen liegen dauerhaft unterhalb des Grundwasserspiegels. (vgl. [6])

Abb. 1 zeigt den schematischen Grundriss der Baugrube mit der Beschriftung der einzelnen Abschnitte.

2.1 Baugrubenverbau

Die einzelnen Abschnitte der Baugrube sind jeweils durch Spundwände zu den Seiten und durch eine Unterwasserbetonsohle nach unten hin abgeschlossen. Je nach Standort der Spundwand werden sie zusätzlich durch Anker gesichert. Um die Baugrube herum wird außerdem eine Böschung hergestellt.

Die Spundbohlen werden als Einzel- und als Doppelbohlen eingebracht. Sie werden ohne eine zusätzliche Abdichtung hergestellt. Nach dem Einbau der Spundwände wird der Boden im Nassbaggerverfahren mit einer Toleranz von 30 cm ausgehoben und die Unterwasserbetonsohlen werden hergestellt. Diese werden aus einem C35/45 Beton unbewehrt ausgeführt. Zur Auftriebssicherung werden Mikropfähle verwendet. Auf die Unterwasserbetonsohle wird eine Filterschicht und in einigen Bereichen zusätzlich eine Ausgleichsschicht aufgebracht. Um das auftretende Wasser abpumpen zu können, werden Pumpensümpfe hergestellt. Nach der Herstellung der Wände und der Sohlen werden die Baugruben gelenzt und sichtbar werdende Fehlstellen werden abgedichtet. Dieses geschieht abschnittsweise. (vgl. [6] und [7])

Tab. 4: Bodenkennwerte für quartäre Sande und Kiese [7]

Bezeichnung	Symbol	Wert	
Wichte	γ	19-21 kN/m ²	(20 kN/m ²)
	γ'	9-12 kN/m ²	(10 kN/m ²)
Reibungswinkel	φ'	32,5°- 40°	(35°)
Kohäsion	c'	0	
Durchlässigkeit	k	10 ⁻³ -10 ⁻⁴ m/s	(10 ⁻³ m/s)

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 Dünenansende. Das Grundwasser steht maximal bis zu einer Höhe von

99 mNN an. Das heißt, es steht dauerhaft im Bereich der quartären Sande und Kiese. Dieser Untergrund weist die in Tab. 4 erläuterten Eigenschaften auf. (vgl. [7] und [8])

2.2 Grundwasserhaltung und Lenzvorgänge am Terminal 3

Die Grundwasserhaltung am Terminal 3 am Flughafen Frankfurt am Main erfolgt in einer Restwasserhaltung. Sind Spundwände und Unterwasserbetonsohlen hergestellt, werden die einzelnen Abschnitte gelenzt. Das abgepumpte Wasser wird in einer Grundwasserreinigungsanlage (GWRA) aufbereitet und über eine Versickerungsanlage dem natürlichen Grundwasser wieder zugeführt. Die Pumpen und die GWRA laufen ab dem Start des ersten Lenzvorganges 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. (vgl. [6])

Die 25 Abschnitte der Baugrube werden nicht gleichzeitig gelenzt. Die Reihenfolge mit den Zeiträumen der Lenzvorgänge sind in Tab. 5 zusammengefasst. (vgl. [6])

Tab. 5: Intervalle der Lenzvorgänge nach [6]

Intervall	Zeitraum	Was passiert?
Intervall 1	Bis zum 12.05.19	Baugrube 2F, 2H, 2J sind gelenzt
Intervall 2	13.05.19-19.06.19	Baugrube 1a, 2a werden gelenzt
Intervall 3	20.06.19-23.06.19	kein Lenzvorgang
Intervall 4	24.06.19-20.08.19	Baugrube 1, 2, Rampe 1, 1b werden gelenzt
Intervall 5	21.08.19-22.09.19	kein Lenzvorgang
Intervall 6	23.09.19-20.10.19	Baugrube 3 wird gelenzt
Intervall 7	21.10.19-07.11.19	Baugrube 3, 4 werden gelenzt
Intervall 8	08.11.19-10.11.19	Baugrube 4 wird gelenzt
Intervall 9	11.11.19-15.11.19	Unterbrechung durch Störung
Intervall 10	16.11.19-12.12.19	Baugrube 4 wird gelenzt
Intervall 11	13.12.19-min. März 2020	kein Lenzvorgang

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

Während der Lenzvorgänge der Baugruben wird 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, es

kommt nicht die gesamte Wassermenge in der GWRA an und ein Teil geht undokumentiert verloren. Während der Lenzvorgänge sind vereinzelt Fehlstellen in den Spundwänden sichtbar geworden. Diese wurden mit Holzkeilen oder Stahlplatten geschlossen und so abgedichtet. (vgl. [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. (vgl. [9])

3. Die spezifische Restwassermenge am Terminal 3, Flughafen Frankfurt am Main

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

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

Es werden drei Varianten betrachtet. Für Variante 1 und 2 wird eine spezifische Restwassermenge für die Sohlen ermittelt und in Abhängigkeit davon die spezifische Restwassermenge der Wände bestimmt. Für Variante 1 wird ein Durchschnitt der spezifischen Restwassermengen der Sohlen verwendet. Für Variante 2 wird 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:

- $q_{W\ddot{a}nde}$ spezifische Restwassermenge der Spundwände
- q_{Sohle} spezifische Restwassermenge der Unterwasserbetonsohlen
- q_{Gesamt} identische spezifische Restwassermenge für Spundwände und Unterwasserbetonsohlen

3.1 Ermittlung der spezifischen Restwassermengen

Die Ermittlung der spezifischen Restwassermenge der Sohlen erfolgt nach der Formel von Borchert. Borchert definiert über seine Formel, welche Restwasserrate q_R zulässig für die jeweilige Art der Sohle ist. Diese Berechnung wird hier genutzt, um die spezifische Restwassermenge für die Sohlen zu ermitteln. Im weiteren Verlauf wird nicht von der zulässigen Restwasserrate gesprochen, sondern von der ermittelten spezifischen Restwassermenge für die Sohlen q_{Sohle} .

$$zul. q_R = w_{zul.} * \Delta h \quad \text{Restwasserrate für Dichtsohlen [2]} \quad \text{Gl. 1}$$

$$bzw. q_{Sohle} = w_{zul.} * \Delta h \quad \text{Gl. 2}$$

$w_{zul.}$ [m^3/h je $1000 m^2$] wird für Unterwasserbetonsohlen der Tab. 1 entnommen. Der Wert ist für alle drei definierten Vorgänge identisch $w_{zul.} = 1,0 m^3/h$ je $1000 m^2$. Die Ermittlung von Δh erfolgt für jede Baugrube einzeln. Es wird die Oberkante der Unterwasserbetonsohle als tiefst möglicher Wasserstand innerhalb der Baugrube betrachtet, da sich an dieser Stelle die Pumpen befinden. Für den Grundwasserstand außerhalb der Baugrube werden die Daten aus den jeweiligen Intervallen verwendet. Es wird ein Wert pro Zeitraum ermittelt. In einigen Baugruben liegt die Oberkante der Sohle dauerhaft über dem Grundwasserspiegel. Daher ist an diesen Stellen $\Delta h = 0$ und somit auch die ermittelten spezifischen Restwassermengen.

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

Die spezifischen Restwassermengen für alle Baugruben sind in Tab. 6 zusammengefasst.

Die ermittelten Restwassermengen weichen sehr stark voneinander ab. Sie liegen teilweise unterhalb der Literaturwerte. 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, wird der Durchschnitt aus allen Werten gebildet. Der Durchschnittswert der ermittelten Daten ist $2,6 m^3/h$ je $1000 m^2$ bzw. $0,7 l/s$ je $1000 m^2$.

Die Bildung eines Durchschnittswertes stellt hier eine sehr starke Vereinfachung dar. Diese widerspricht der Formel von Borchert, dass die spezifische Restwassermenge der Sohlen abhängig von dem hydraulischen Höhenunterschied ist. Daher werden im Folgenden Variante 1 und 2 betrachtet.

3.1.1 Spezifische Restwassermenge der Wände, Variante 1

Die Ermittlung der spezifischen Restwassermenge für Spundwände $q_{W\ddot{a}nde}$ erfolgt für jeden Tag einzeln. Pro Zeitintervall sind die geometrischen Daten und Grundwasserstände identisch, lediglich der Durchfluss durch die GWRA ist tagesabhängig. Die spezifische Restwassermenge für Sohlen ist die oben Ermittelte von $q_{Sohle} = 0,7 l/s$ je $1000 m^2$.

Tab. 6: Ermittlung der spez. Restwassermenge für Baugrubensohlen nach Borchert, Terminal 3, FRA

Bezeichnung der Baugruben	Δh	$w_{zul.}$	q_{Sohle}	q_{Sohle}
	-	m^2/h je 1000 m^2	m^3/h je 1000 m^2	l/s je 1000 m^2
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

Durchfluss durch die Baugrubensohle:

$$Q_{Sohle} = A_{Sohle,benetzt} * q_{Sohle}/1000m^2 \quad \text{Gl. 3}$$

Durchfluss durch die Baugrubenwände:

$$Q_{Wände} = Q_{Gesamt} - Q_{Sohle} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

$$A_{Sohle,benetzt} = \text{benetzte Sohlfläche [m}^2\text{]}$$

$$q_{Sohle} = \text{spezifische Restwassermenge der Sohle [l/s je 1000 m}^2\text{]}$$

$$Q_{Sohle} = \text{Durchfluss der durch die Sohle eindringt [l/s]}$$

$$Q_{Wände} = \text{Durchfluss der durch die Wände eindringt [l/s]}$$

$$Q_{Gesamt} = \text{Durchfluss der durch das gesamte System eindringt [l/s]}$$

Sind die Durchflussanteile durch die jeweiligen Bauteile ermittelt, wird der Anteil, der durch die Wände eindringt, durch die benetzte Spundwandfläche dividiert. Das Ergebnis ist die spezifische Restwassermenge für Spundwände.

spezifische Restwassermenge der Wände:

$$q_{Wände} = Q_{Wände}/A_{Wände,benetzt} * 1000 \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

$$q_{Wände} = \text{spezifische Restwassermenge der Wände [l/s je 1000 m}^2\text{]}$$

$$A_{Wände,benetzt} = \text{benetzte Wandfläche [m}^2\text{]}$$

$$Q_{Wände} = \text{spezifische Restwassermenge der Wände [l/s je 1000 m}^2\text{]}$$

3.1.2 Spezifische Restwassermenge der Wände, Variante 2

Die zweite Variante der Ermittlung für $q_{Wände}$ erfolgt ähnlich zur Variante 1. Der Unterschied liegt in der spezifischen Restwassermenge der Sohlen q_{Sohle} . Diese wird pro Zeitintervall neu berechnet.

Diese Variante wird nur für die relevanten Intervalle berechnet (Definition siehe Kap. 3.2).

3.1.3 Identische spezifische Restwassermenge für Wände und Sohlen, Variante 3

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

$$q_{Gesamt} = Q_{Gesamt}/A_{Gesamt,benetzt} \quad \text{Gl. 6}$$

3.2 Die spezifischen Restwassermengen am Terminal 3

Zur Auswertung der spezifischen Restwassermengen werden die Intervalle in mehr und weniger relevante Intervalle unterteilt. Alle Intervalle, in denen eine Baugrube gelenzt wird, sind weniger relevant, da das Lenzvolumen mit in die Ermittlung des Beiwertes einfließt. Auch das Intervall, in welchem es zu einer Unterbrechung des Lenzens durch eine Störung kommt, wird als irrelevant betrachtet. Die relevanten Zeiträume sind Intervall 1, 3, 5 und 11. Im dritten Intervall werden insgesamt nur drei Tage betrachtet, wodurch dieser weniger repräsentativ ist als die anderen Intervalle. 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, die dokumentierten Mengen entsprechen nicht den tatsächlichen Wassermengen. Außerdem wird so temporär der

Tab. 7: spezifische Restwassermengen exklusive Niederschlag, Terminal 3, FRA

Zeitraum	Variante 1		Variante 2		Variante 3
	q _{Sohle}	q _{Wände}	q _{Sohle}	q _{Wände}	q _{Gesamt}
	l/s je 1000 m ²	l/s je 1000 m ²	l/s je 1000 m ²	l/s je 1000 m ²	l/s je 1000 m
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
Inklusive Niederschlag					
Intervall 11	0,7	12,01	-	-	1,75
Durchschnitt inkl. Niederschlag	0,7	6,54	-	-	1,42

Wasserdruck auf die bereits gelenzten Baugruben erhöht. Es wird vermutet, dass sich dieser Wasserdruck auch noch unmittelbar nach dem Lenzen auf die spezifischen Restwassermengen auswirkt. Insgesamt gibt daher Intervall 11 die aussagekräftigsten Ergebnisse, da kein Lenzvorgang durchgeführt wird und in dem vorherigen Intervall das gesamte Lenzvolumen durch die GWRA dokumentiert wird.

In Tab. 7 sind alle Ergebnisse zusammengefasst. Es sind außerdem verschiedene Durchschnittswerte angegeben. Neben dem Gesamtdurchschnitt ist auch der Durchschnitt aller relevanten Intervalle (1, 5, 11) angegeben. Die Ergebnisse der Berechnung inklusive Niederschlag werden nicht im Detail dargestellt.

4. Auswertung der Ergebnisse

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

Das erste Diagramm (Abb. 2) 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 den Diagrammen mit eingezeichnet, fließen jedoch nicht mit in die Berechnung der Durchschnittswerte ein.

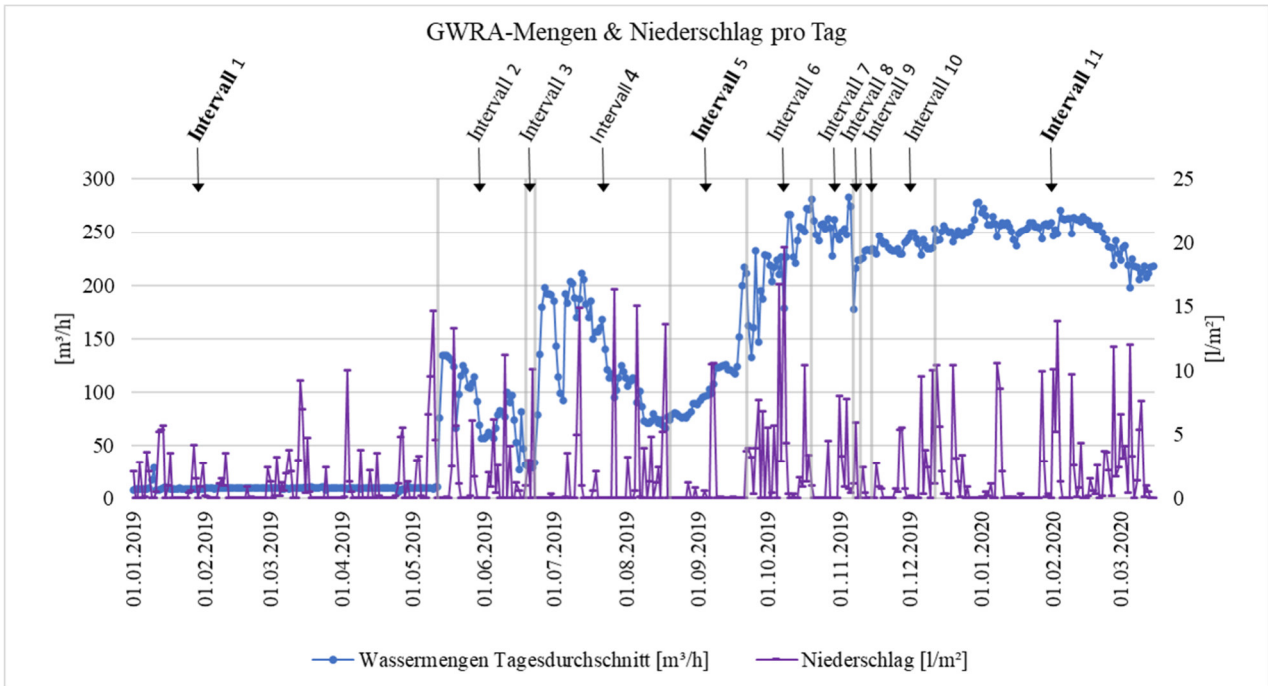


Abb. 2: GWRA-Mengen & Niederschlag pro Tag

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

4.1 Spezifische Restwassermengen, Variante 1 und 3

Zur Auswertung der spezifischen Restwassermengen wird Variante 1 betrachtet. Abb. 3 zeigt den Vergleich von $q_{W\ddot{a}nde}$ 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.

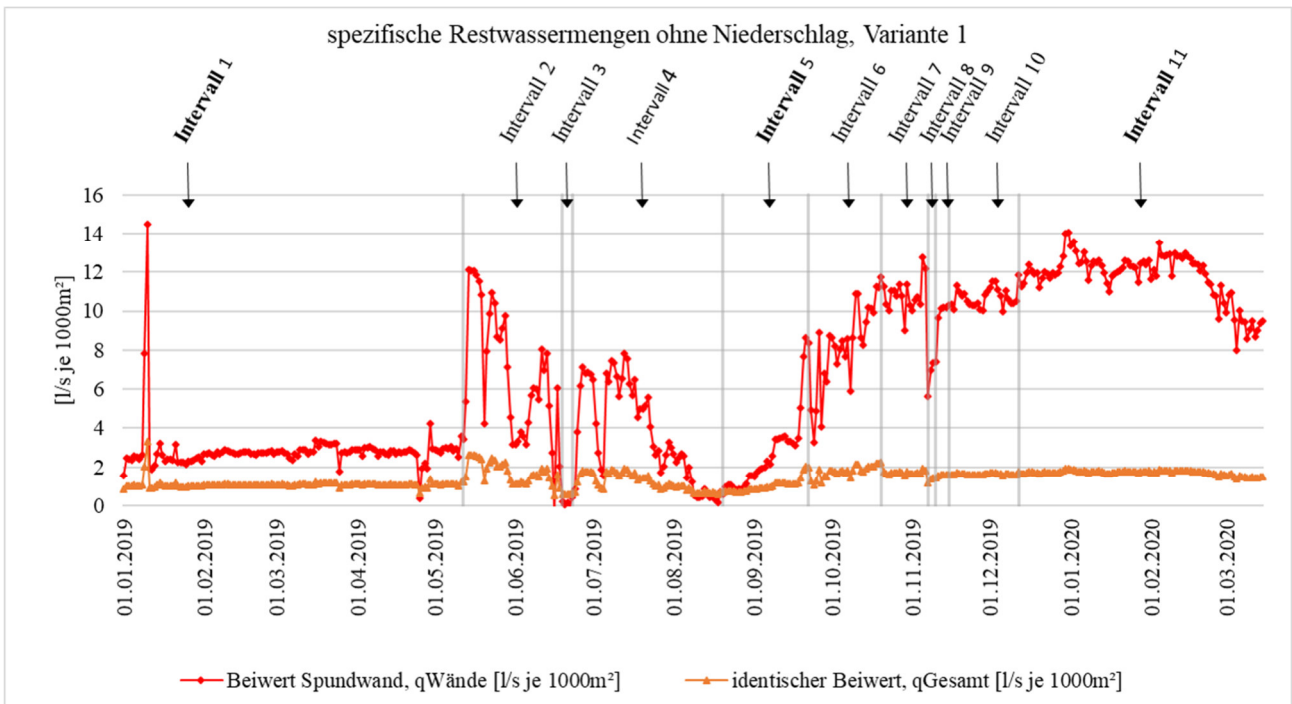


Abb.3: spez. Restwassermenge ohne Niederschlag, Variante 1

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. Dieses 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 1000 m². $q_{Wände}$ schwankt sehr stark. Die Werte liegen zwischen 8,00 l/s je 1000 m² und 14,08 l/s je 1000 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 diese sehr verschieden sind. 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 Spalte sechs verglichen, fällt auf, dass die Werte des identischen Beiwertes durchgängig deutlich kleiner sind. Außerdem unterliegen sie im Vergleich zu $q_{Wände}$ kaum Schwankungen. Auch die Durchschnittswerte aus allen bzw. nur 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 und die Werte für $q_{Wände}$ stark schwanken. Generelle Schwankungen der spezifischen Restwassermengen hängen mit den verschiedenen hohen Wassermengen zusammen. Eine Erklärung für die zum Teil großen Schwankungen der spezifischen Restwassermenge der Wände in Abhängigkeit der spezifischen Restwassermenge der Sohlen ist dieses jedoch nicht. Die zur Berechnung von q_{Sohle} verwendete Formel ist zur 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 ermittelte Wert nur für die Sohle 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 Vorgaben auf die Ergebnisse haben. Daher werden nachstehend verschiedene Aspekte der Geometrie betrachtet. Alle betrachteten Aspekte sind in Tab. 8 zusammengefasst und den ermittelten spezifischen Restwassermengen gegenübergestellt. Die relevanten Intervalle sind fettgedruckt dargestellt.

Tab. 8: Geometrische Verhältnisse Terminal 3, FRA [6]

Zeitraum	Verhältnis benetzte				$q_{Wände}$ (Variante 1) l/s je 1000 m ²	q_{Gesamt} (Variante 3) l/s je 1000 m ²
	Sohlfläche / Wandfläche	Ecken / Wandfläche	Arbeitsfugen Sohle / Sohl- fläche	Kontaktfugen Sohle -Wand / Sohlfläche		
	m ² /m ²	m/m ²	m/m ²	m/m ²		
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

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 $q_{W\ddot{a}nde}$ 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 $q_{W\ddot{a}nde}$.

Das Verhältnis der benetzten Ecken in m pro Fläche der Wand in m^2 liegt zwischen $0,06 m/m^2$ und $0,08 m/m^2$. 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 der 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 sind hier nicht mit inbegriffen, 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, bei mehr Sohlfugen ist die spezifische Restwassermenge klein und nicht wie erwartet groß. Es besteht für die hier 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 am Main 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 $0,12 m/m^2$ und $0,20 m/m^2$. 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 Laufe der Zeit, die Beiwerte schwanken durchgängig bzw. steigt der identische Beiwert insgesamt im Laufe 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, Flughafen Frankfurt am Main

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden für die Baugrube des Terminal 3 am Flughafen Frankfurt am Main die theoretisch zu erwartenden Wassermengen ermittelt. Diese Mengen werden mit den tatsächlichen, dokumentierten Mengen verglichen.

Von Januar 2019 bis März 2020 sind nach [9] insgesamt $1.520.284 m^3$ Wasser durch die GWRA geflossen.

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

Die Ermittlung des Lenzvolumens erfolgt über das Volumen der jeweiligen Baugrube abhängig von der benetzten Wand- und Sohlfläche und wird pro Intervall in die Gesamtmenge einberechnet.

Die Ermittlung der Wassermengen in Abhängigkeit der spezifischen Restwassermengen wird einmal mit Literaturwerten durchgeführt und einmal mit den zuvor ermittelten spezifischen Restwassermengen.

5.1 Wassermenge durch den horizontalen Verbau

Für den Durchfluss durch die horizontale Dichtsohle wird die spezifische Restwassermenge für die Sohlen ermittelt. Hier erfolgt die Ermittlung pro Baugrube und pro Intervall, um am Ende ein möglichst exaktes Ergebnis zu erzielen. Die Berechnung erfolgt 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, Literaturwerte

Für die Ermittlung der Wassermenge, die durch den vertikalen Verbau, also in diesem Fall durch die Spundwände, eintritt, wird die spezifische Restwassermenge benötigt. Dieser Wert liegt zwischen 1,5 l/s je 1000 m² und 5,0 l/s je 1000 m². Zur Ermittlung des Wertes wird die Baugrube zuerst in eine Dichtigkeitsklasse eingeordnet. Abhängig von dieser Dichtigkeitsklasse wird 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 erfolgt nach Tab. 3. Der Baugrubenverbau wird in die Dichtigkeitsklasse N „Bauwerke und Baugruben mit normalen Dichtiganforderungen“ eingeordnet. [2] Diese Klasse entspricht einer spezifischen Restwassermenge von $q = 1,5 \text{ l/s pro } 1000 \text{ m}^2$. Dieser Wert wird oft in der Literatur verwendet und 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 Laufe des betrachteten Zeitraums abgepumpt werden, werden alle zuvor ermittelten Mengen addiert. Es werden jeweils die Mengen pro Intervall und die Gesamtmenge aufgelistet. Tab. 9 zeigt die ermittelten Mengen. Abb. 4 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, wird der Mengenanteil des Wassers für Wände und Sohle mit $q_{Gesamt} = 1,5 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$ ermittelt. Die Ermittlung erfolgt wie bereits erläutert. Daher wird nur das Gesamtergebnis aufgelistet.

5.4 Wassermenge aus ermittelten spezifischen Restwassermengen

Im nächsten Schritt werden 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, wird die ermittelte spezifische Restwassermenge der Wände als Durchschnitt angesetzt. Es wird der Durchschnitt des 11. Intervalls nach Variante 2 der Berechnung angesetzt. Dieser Wert beträgt $q_{Wände} = 11,57 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$. Die Ermittlung der spezifischen Restwassermenge der Sohlen bleibt analog zu Variante 1 und 2. Sie wird pro Baugrube und Intervall ermittelt.

Eine weitere Berechnung der zu erwartenden Wassermengen wird mit der ermittelten identischen spezifischen Restwassermengen für Sohle und Wand q_{Gesamt} durchgeführt. Dieser Wert beträgt $1,73 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$.

In Tab. 9 sind die Gesamtmenen nach den verschiedenen Berechnungsmethoden pro Intervall gegenübergestellt. Die tatsächlichen Wassermengen sind ohne Niederschlag angegeben. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse als Kurven.

Tab. 9: Gesamte Wassermengen

Zeitraum	Gesamtmenen ohne Niederschlag in m ³				
	Tatsächlich	Literaturwerte		ermittelte Werte Terminal 3	
		$q_{Sohle} \text{ individuell} \& q_{Wände} = 1,5 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$	$q_{Gesamt} = 1,5 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$	$q_{Sohle} \text{ individuell} \& q_{Wände} = 11,57 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$	$q_{Gesamt} = 1,73 \text{ l/s je } 1000 \text{ m}^2$
Intervall 1	137669,894	21169,28	40964,67	73261,42	47245,91
Intervall 2	79433,3833	77443,56	102365,31	157074,57	113020,26
Intervall 3	2955,71135	4671,81	7311,48	13032,98	8432,57
Intervall 4	183582,597	187600,91	270921,95	452168,60	305814,28
Intervall 5	87721,4613	78677,99	124979,95	222246,07	144143,54
Intervall 6	147999,815	100533,76	148675,68	220159,67	167806,85
Intervall 7	108409,885	72172,12	113074,52	136984,09	127792,47
Intervall 8	15876,297	10539,30	16437,21	23249,39	18957,59
Intervall 9	27688,5565	14310,68	25976,43	31090,69	29959,48
Intervall 10	153871,396	76560,98	140113,39	166103,49	161597,44
Intervall 11	557742,02	25176,64	486434,46	559735,44	561021,08
Summe	1502951,02	900857,02	1477255,03	2055106,41	1685791,47

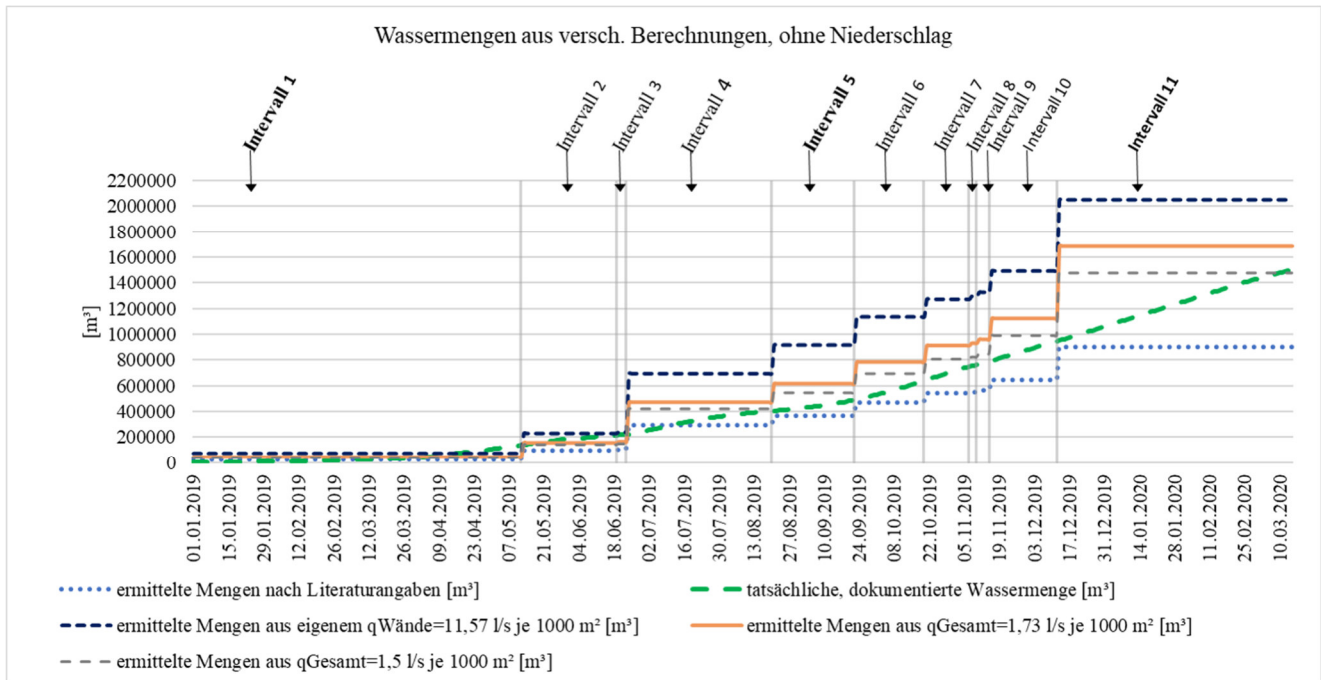


Abb.4: Alle ermittelten und tatsächlichen Wassermengen exklusive Niederschlag

5.5 Vergleich der ermittelten Wassermengen

Im ersten Schritt wird die ermittelte Menge nach Literaturangaben mit verschiedenen spezifischen Restwassermengen für Sohle und Wand betrachtet (Abb. 4 blau gepunktete Kurve).

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die ermittelte Wassermenge weit unter den tatsächlich aufgetretenen Mengen liegen. Der tatsächliche, dokumentierte Höchstwert liegt bei 1,5 Millionen m³ Wasser, der ermittelte liegt bei 900.000 m³. Die ermittelte Wassermenge ist also ungefähr ein Drittel kleiner als die tatsächliche, dokumentierte Wassermenge. Es ist zu beobachten, dass zu Beginn des gesamten Zeitraumes die Werte ähnlich hoch sind. Da die ermittelten Werte pro Intervall und nicht pro Tag ermittelt werden, müssten sich zum Ende eines Intervalls die Kurven schneiden. Dieses 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 angewandten 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 1000 m² (Abb. 4, grau gestrichelte Kurve) betrachtet, wird deutlich wie nah die ermittelte Wassermenge der realen bzw. dokumentierten Menge kommt (Abb. 4, dunkelgrün gestrichelte Kurve). Die ermittelte Menge beträgt 1,47 Millionen m³ Wasser. Es ist zu sehen, dass die Kurve von Intervall 4 bis Intervall 10 über der Kurve der tatsächlichen Menge liegt. Im Zusammenhang mit den Betrachtungen der Flächenverhältnisse in Kapitel 4.2 stellt sich die Frage, ob das insgesamt sehr realitätsnahe Ergebnis Zufall ist. Das heißt,

das Verhältnis von Sohle zu Wand entspricht am Terminal 3 dem Verhältnis, welches eine Verwendung eines identischen Beiwertes unterstützt.

In Abb. 4 ist deutlich zu sehen, dass die Ermittlung mit $q_{Gesamt} = 1,5$ l/s je 1000 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 1000 m² und einem q_{Sohle} abhängig von der hydraulischen Höhe ergibt einen Wert, der 37 Prozentpunkte höher ist (Abb. 4, 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 1000 m² (Abb. 4, orange Kurve) um 12 Prozentpunkte nach oben.

Aufgrund der Tatsache, dass ein Teil der Wassermengen undokumentiert abgepumpt wurde, ist die tatsächliche Wassermenge am Terminal 3 höher als die hier betrachtete, dokumentierte Menge. Daher sollte eine 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 Baugrubenverbau, das bedeutet Spundwände in Verbindung mit einer 1,0 m dicken Unterwasserbetonsohle.

Der Niederschlag hat im Vergleich zu den restlichen Wassermengen hier nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtmenge. Es wird weiterhin festgestellt, dass die spezifische Restwassermenge der Wände deutlich mehr schwankt bei einem festgelegten Wert für die Sohle als bei einer identischen spezifischen Restwassermenge für Sohle und Wände. 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 inklusive 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 1000 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 1000 m² festgelegt werden. Eine Ermittlung mit einem einheitlichen Wert von 1,73 l/s je 1000 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 1000 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.

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, <https://terminal3.frankfurt-airport.com/>, Abfragedatum: 02.06.2020.
- [6] CDM Smith Consult GmbH: Interne Firmen-daten.
- [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, <https://aqasys.hoelscher-wasserbau.de:8443/>.