



D I P L O M A R B E I T

M A S T E R T H E S I S

# Anwendung von Suffosions- und Erosionskriterien im Dammbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Peter Tschernutter**

E222

am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Forschungsbereich für Wasserbau

und der Mitbetreuung von

Proj.Ass. Dipl.-Ing. **Adrian Kainrath**

E220-2

am Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Melanie Piskernik**

Matr.Nr.: 0826025

Sturzgasse 30/14

A - 1150 Wien

Wien, im Februar 2016

\_\_\_\_\_  
(Melanie Piskernik)

## Danksagung

Die folgende Arbeit stellt den Abschluss meines Studiums an der Technischen Universität Wien dar. Daher möchte ich an dieser Stelle all jenen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der größte Dank gilt meiner ganzen Familie, ohne deren Unterstützung mein Studium nicht möglich gewesen wäre. Im Besonderen danke ich meinen Eltern und meiner Schwester für den Rückhalt, den sie mir jederzeit gaben und auch weiterhin geben.

Ein spezieller Dank gilt alle meinen Freunden und Studienkollegen, die mich auf meinem Weg begleitet haben und mir auch künftig zur Seite stehen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Tschernutter für das Bereitstellen des Themas und die Unterstützung während der Ausarbeitung.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei Herrn Proj.Ass. Dipl.-Ing. Adrian Kainrath bedanken, der durch seine hervorragende Betreuung einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

## Kurzfassung

Bei einigen Staudämmen hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass eine Abdichtung des Untergrunds bei schwierigen geologischen Verhältnissen, wie zum Beispiel eine Abdichtung des Untergrunds bis auf das Niveau des anstehenden Felsens oder einer ausreichend dichten Schicht im Untergrund, unwirtschaftlich oder technisch nicht machbar ist. In diesem Fall ist mit einer Unterströmung des Damms zu rechnen.

Tritt eine Unterströmung auf, sind die geologischen und geotechnischen Verhältnisse des Untergrunds für die Sicherheit der Stauanlage entscheidend. Hier sind besonders die Suffosions- und Erosionsstabilität des Untergrunds zu berücksichtigen, um einen durch die Strömung verursachten Materialaustrag zu verhindern bzw. zu minimieren.

Um Aussagen über die Sensibilität des Untergrunds treffen zu können, müssen die Strömungsverhältnisse, die geohydraulischen Kennwerte sowie die strukturgeologischen Bedingungen bekannt sein.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden die theoretischen Grundlagen der Suffosion und Erosion dargestellt und an einem konkreten Beispiel, dem Damm Eberlaste, angewandt. Dafür wird ein ebenes numerisches Modell zur Berechnung der Strömungsverhältnisse im Damm und im Untergrund entworfen. Die Kalibrierung des Modells erfolgt anhand von Messdaten des bestehenden Damms, wobei die Messdaten auch räumliche Verhältnisse berücksichtigen, die in das ebene numerische Modell nicht einfließen. Daher sind die Ergebnisse nicht direkt auf den Damm Eberlaste übertragbar.

Darauf aufbauend werden die in der Literatur vorhandenen Suffosions- und Erosionskriterien am Beispiel eines repräsentativen Querschnitts angewandt. Die Einflussfaktoren auf die Verfahren sowie deren Grenzen werden aufgezeigt.

## Abstract

In the past it has been found that sealings of the subsoil below dams are not always possible. In case of difficult or complex geological conditions, flow around the dam cannot be excluded.

If there is flow around the dam sealing, the geological conditions of the subsoil are important for the safety of the dam construction. In particular, the stability against internal erosion needs to be considered. It is necessary to prevent or minimize the material discharge caused by the groundwater flow.

In order to estimate the sensitivity of the subsoil, the flow conditions, the geohydraulic parameters, and the geological conditions must be known.

In this thesis, the basics of internal erosion are introduced. A numeric model to calculate the groundwater flow for a specific example is designed. To calibrate the two-dimensional numeric model measured values of the existing dam and subsoil are used. The third dimension is not considered in the numeric model, therefore, the results are not directly comparable with the dam from which the data has been taken.

In further consequence, internal erosion criteria will be applied to the representative cross section of the present example. The influencing factors and the limits of the criteria are shown.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Staudamm Eberlaste</b>	<b>3</b>
2.1	Allgemeines . . . . .	3
2.2	Geologische Voraussetzungen . . . . .	5
2.3	Gründung und Dichtung . . . . .	6
2.4	Dammkonstruktion . . . . .	7
2.5	Durchströmungsverhalten . . . . .	8
2.6	Betriebseinrichtungen . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Suffosion und Erosion</b>	<b>11</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	11
3.2	Grundlegende Begriffsdefinitionen . . . . .	12
3.3	Suffosion . . . . .	15
3.3.1	Geometrische Suffosionskriterien . . . . .	16
3.3.2	Hydraulische Suffosionskriterien . . . . .	21
3.4	Erosion . . . . .	24
3.4.1	Geometrische Kontakterosion . . . . .	25
3.4.2	Hydraulische Kontakterosion . . . . .	34
3.4.2.1	Typ 1/1, 1/3 und 3/1 . . . . .	34
3.4.2.2	Typ 2/2 . . . . .	35
3.4.2.3	Typ 3/2 . . . . .	38
3.4.2.4	Typ 2/3, 3/3 . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Numerisches Modell</b>	<b>44</b>
4.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	44
4.1.1	Grundwasserströmung . . . . .	45
4.1.2	Darcy'sches Filtergesetz . . . . .	46
4.1.3	Kontinuitätsgleichung . . . . .	48
4.1.4	Strömungsgleichung . . . . .	49
4.1.5	Randbedingungen . . . . .	49
4.2	Modellbeschreibung . . . . .	50
4.2.1	Vorgangsweise . . . . .	50

4.2.2	Eingangswerte und Randbedingungen . . . . .	53
4.3	Ergebnisse . . . . .	54
4.3.1	Grundwasserströmung . . . . .	54
4.3.2	Auswertungspunkte . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien</b>	<b>62</b>
5.1	Bodenklassifikation . . . . .	62
5.2	Geometrische Suffosion . . . . .	68
5.2.1	Kriterium nach <i>Ziems</i> . . . . .	68
5.2.1.1	Kontaktsuffosion nach <i>Ziems</i> . . . . .	70
5.2.2	Kriterium nach <i>Sherard</i> für Materialien mit Ausfallkörnung . . . . .	71
5.2.3	Kriterium nach <i>BAW-MAK</i> in Deutschland . . . . .	72
5.2.4	Kriterium nach <i>Burenkova</i> für Materialien mit gleichmäßiger Kornverteilung und höherem Feinanteil . . . . .	75
5.2.5	Kriterium nach <i>Kenney/Lau</i> . . . . .	77
5.3	Hydraulische Suffosion . . . . .	80
5.3.1	Kriterium für Erdstoffe mit stetiger Korngrößenverteilung nach <i>Busch et al.</i> . . . . .	80
5.3.2	Kriterium für Erdstoffe mit unstetiger Korngrößenverteilung nach <i>Istomina</i> . . . . .	82
5.4	Geometrische Erosion . . . . .	83
5.4.1	Kriterium nach <i>Terzaghi/Peck</i> . . . . .	83
5.4.2	Kriterium nach <i>Sherard/Dunnigan</i> . . . . .	85
5.4.3	Kriterium nach <i>Fell et al.</i> . . . . .	87
5.4.4	Kriterium nach <i>Kenney/Lau</i> . . . . .	89
5.4.5	Kriterium nach <i>Locke/Indraratna</i> . . . . .	90
5.5	Hydraulische Erosion . . . . .	90
5.5.1	Typ 2/2 . . . . .	90
5.5.1.1	Kriterium nach <i>Ovodov</i> . . . . .	90
5.5.1.2	Kriterium nach <i>Davidenkoff</i> . . . . .	91
5.5.1.3	Kriterium nach <i>Ziems</i> . . . . .	92
5.5.2	Typ 3/2 . . . . .	93
5.5.2.1	Kriterium nach <i>Istomina</i> . . . . .	93
5.5.2.2	Kriterium nach <i>Brauns</i> . . . . .	94
5.6	Zusammenfassung der Auswertung . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>Auswertungspunkte</b>	<b>108</b>
<b>B</b>	<b>Sieblinien und Korndurchmesser</b>	<b>113</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Der Dammbau ist Sondergebiet des Erdbaus, welcher wiederum Bestandteil des Wissenschaftsgebietes der Geotechnik ist, und hat umfangreiche Verbindungen zu anderen Fachgebieten. [29]

Dämme werden sowohl im Verkehrswege-, als auch im Deponie- oder Wasserbau verwendet. Die jeweiligen Anforderungen können je nach Einsatzgebiet stark variieren. Im Folgenden wird ausschließlich auf Dämme als Wasserbauwerk eingegangen.

Bei Dämmen handelt sich um wasserdruckhaltende Bauwerke. Je nach Länge der Wassereinwirkung kann hier eine Unterscheidung in Staudämme - die Wassereinwirkung tritt ständig oder über lange Perioden auf - und in Hochwasserschutzdämme - die Wassereinwirkung tritt periodisch auf - getroffen werden. Unabhängig davon, um welche Art von Dammbauwerk es sich handelt, sind die wesentlichen Anforderungen gleichbleibend. Es müssen die Dichtheit, die innere und äußere Standfestigkeit und die Überströmsicherheit des Bauwerks jederzeit gegeben sein. Besondere Ansprüche werden dadurch an den Baugrund der Sperrenstelle und auch an jenen des Stauraums gestellt. Diese haben die Aufgabe, alle äußeren Einwirkungen abzuleiten, ohne dabei die Stabilität zu gefährden. Es ist daher unumgänglich, genaue Untersuchungen über die geplante Aufstandsfläche des Dammes und den Speicherraum anzustellen.

Die wesentlichen Punkte zur Beurteilung des Untergrunds sind dessen Durchlässigkeit und die anstehenden geologischen Verhältnisse. Prinzipiell kann die Dammaufstandsfläche wie folgt beschaffen sein: [31]

- Dicht bzw. nahezu undurchlässig
- Dichter bzw. nahezu undurchlässiger Horizont in erreichbarer Tiefe
- Dichter bzw. nahezu undurchlässiger Horizont in nicht erreichbarer Tiefe (unterströmte Dämme)

Bei unterströmten Dämmen ist besonderes Augenmerk auf den Untergrund zu legen, da dieser verstärkt die Gefahr einer Ausspülung von Feinteilen (Erosion) oder einer Umlagerung von Feinteilen (Suffosion) birgt.

Folgender Merksatz wurde von der Internationalen Kommission für große Talsperren (ICOLD - International Commission on Large Dams) zu diesem Thema ausgegeben:

Eine Dammstruktur kann nicht sicherer als ihre Fundierung sein! [10]

In dieser Arbeit wird beispielhaft ein Damm betrachtet, bei dem eine Unterströmung gegeben ist. Es handelt sich um den Erddamm Eberlaste, der den Stillupspeicher begrenzt und im Tiroler Zillertal gelegen ist. Das Bauwerk ist Teil der Kraftwerksgruppe Mayrhofen. Zusammen mit den Kraftwerken Roßhang und Häusling bildet dieses die Speicherkraftwerke Zemm-Ziller, die leistungsstärkste Kraftwerksgruppe Österreichs.

Ziel ist es, anhand dieses bestehenden Dammes ein ebenes numerisches Modell zu entwerfen, das die vorhandenen Bedingungen hinreichend genau beschreibt. Die aus dem Modell gewonnenen Daten der Unterströmungsberechnung dienen in weiterer Folge als Ausgangsbasis für die Anwendung und den Vergleich verschiedener Suffosions- und Erosionskriterien.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass für die Modellierung und die Auswertung der Suffosions- und Erosionskriterien Annahmen getroffen wurden. Diese sind nicht auf die realen örtlichen Gegebenheiten und die Untergrundsituation - speziell auf die räumlichen Verhältnisse - beim Erddamm Eberlaste übertragbar. Diese Arbeit stellt daher keine Beurteilung des Dammes und des Untergrunds dar.

Es wird der Versuch unternommen zu zeigen, inwieweit die Anwendungen von Suffosions- und Erosionskriterien im Zusammenhang mit einem numerischen Modell sinnvoll sein können, wo Grenzen gegeben und Unterschiede in den Aussagen, sowie Widersprüche bei Ergebnissen möglich sind.



# Kapitel 2

## Staudamm Eberlaste

### 2.1 Allgemeines

Der Erddamm Eberlaste, der den Stillupspeicher begrenzt, wurde im Zuge des Baus der Zemmkraftwerke im Tiroler Zillertal errichtet. Die gesamte Kraftwerksgruppe umfasst neben dem erwähnten Erddamm und diversen Nebeneinrichtungen noch die Sperre Schlegeis sowie die Kraftwerke Mayrhofen und Roßhang.



**Abbildung 2.1:** Staudamm Eberlaste [19]

Die Zemmkraftwerke wurden in den Jahren 1965 bis 1971 von der Tauernkraftwerke AG erbaut. Durch den ständig steigenden Energiebedarf wurde die gesamte Kraftwerksanlage in den darauf folgenden Jahren weiter ausgebaut. Der derzeitige Ausbaustand der Kraftwerke im Zillertal ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.

Der Speicher Stillup dient für die Krafthäuser Roßhang und Häusling als Unterwasser. Beide Kraftwerke können auch im Pumpbetrieb betrieben werden, wobei der Speicher hierfür das Wasser zur Verfügung stellt. Für das Kraftwerk Mayrhofen bildet der Stillup-Speicher das Oberwasser.

## 2. Staudamm Eberlaste

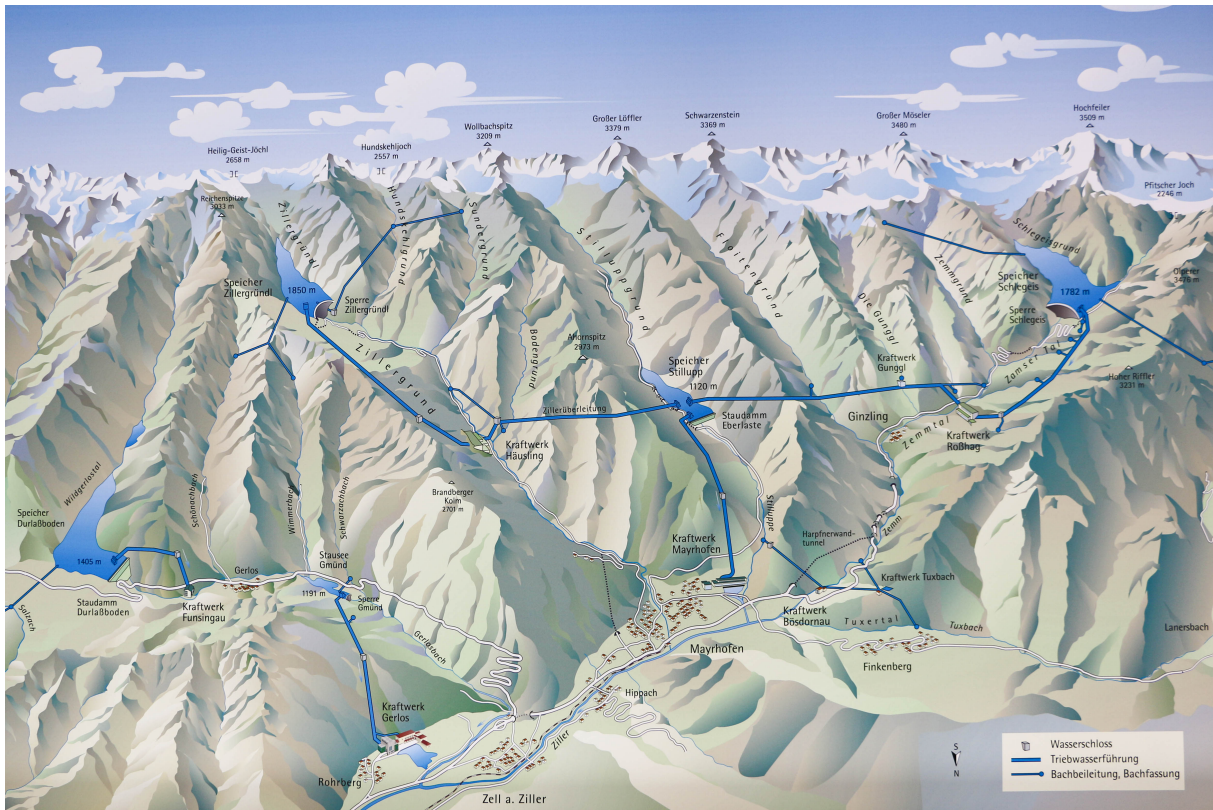


Abbildung 2.2: Kraftwerksgruppe Zillertal [32]

Durch den Umstand, dass das Kraftwerk Rößhang zum Zeitpunkt der Projektierung bereits bestand, war die Möglichkeit der Situierung des Damms Eberlaste sehr begrenzt. Zu beachten gab es daher, neben den üblichen Randbedingungen, die ein solches Absperrbauwerk mit sich zieht, insbesondere die Höhenlage des Krafthauses Rößhang. Dadurch kam höhenmäßig nur ein verhältnismäßig kleiner Bereich für die Errichtung des Staudamms Eberlaste in Frage, der unter folgenden Gesichtspunkten zu bewerten war: [14]

- Der Damm sollte in den dichten Untergrund eingebunden werden
- Schäden durch Lawinen, Felsstürze und Muren waren zu unterbinden

Bei der Vorkundung zeigte sich schnell, dass unter den gegebenen Voraussetzungen nur eine Stelle brauchbar war. Des weiteren war ersichtlich, dass die geologischen und bodenmechanischen Bedingungen für die Errichtung eines Sperrbauwerks nicht ideal waren. Durch die gewonnenen Erkenntnisse wurde schon vor Projektbeginn mit erheblichen Aufwendungen für die Gründung und Dichtung des Bauwerks gerechnet. Um die Situation besser beurteilen zu können, wurde ein aufwändiges Erkundungsprogramm durchgeführt. [23]

**Tabelle 2.1:** Übersicht Staudamm Eberlaste - Speicher Stillup [32]

Sperrtyp	geschütteter Damm mit Asphaltbetonkern
Baujahr	1967/68
Dammhöhe	28 m
Kronenlänge	480 m
Kronenbreite	6 m
max. Basisbreite	156 m
Kubatur der Schüttung	800.000 m <sup>3</sup>
Stauraumvolumen	6,6 Mio m <sup>3</sup>

## 2.2 Geologische Voraussetzungen

Die geologischen Untersuchungen, die von 1956 bis 1962 durchgeführt wurden, umfassten 26 Bohrungen mit einer Länge von circa 1.100 m, sowie drei Schächte mit jeweils 11 m Länge. Zusätzlich wurden in den Jahren 1961 bis 1963 Pump- und Versickerungsversuche durchgeführt, um die Durchlässigkeiten der Bodenschichten zu bestimmen.

Durch die Bodenaufschlüsse wurde ersichtlich, dass auf beiden Talflanken unter geringer Überdeckung Fels ansteht. Dieser fällt sehr steil mit ungefähr 60° gegen die Talmitte ein. Bohrungen, die in Talmitte durchgeführt wurden, konnten - trotz Tiefen von bis zu 124 m - den gewachsenen Fels nicht erreichen. Das legt nahe, dass die Felsrinne im Talboden sehr tief und mit mächtigen Schichten Lockermasse überlagert ist. Der Anschluss des Damms an den gewachsenen Felsen in Talmitte stellt sich dadurch als unmöglich heraus. [14]

Die Bodenaufschlüsse ergaben, dass die Lockermasse aus sehr heterogenen Schichten besteht. Im wesentlichen sind das sandige, kiesige Ablagerungen, die in Talmitte mit einer circa 20 m mächtigen Schluffsandschicht überdeckt sind. An den Talrändern liegt die Talauffüllung mit Hangschutt verzahnt vor. Die erwähnte Schluffsandschicht wurde an den Talrändern nicht angetroffen. Es wurde festgestellt, dass benachbarte Bodenaufschlüsse im Talquerprofil größere Abweichungen im Kornaufbau zeigten, als jene in Richtung der Talachse. [23]

Bei der Auswertung der Pump- und Versickerungsversuche zeigte sich, dass der Untergrund verschiedene Grundwasserleiter aufweist. Die Durchlässigkeiten der sandigen Kiese in Talmitte wurden mit  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s und jene der Schluffsande mit  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s beurteilt. Der Hangschutt am Talrand stellt sich aufgrund von blockreichen Einstreuungen fünf Mal durchlässiger als die sandigen Kiese dar. [23]

Die geologisch anstehenden sandigen Kiese sind mit der ermittelten Durchlässigkeit noch injizierbar. Wirtschaftliche Überlegungen und der Umstand, dass die höher liegenden schluffigen Sande nicht injizierbar sind, sprachen aber gegen die Anwendung von Injektionen als Dichtung.

Aufgrund der vorhandenen Geologie musste mit großen Setzungen gerechnet werden. Je

nach getroffenen Annahmen wurden diese in Talmitte mit ein bis zwei Meter veranschlagt. Das musste sowohl bei der Wahl der Gründung als auch beim Entwurf des Dammes selbst berücksichtigt werden. Messungen während dem Bau und nach Bauende ergaben eine maximale Setzung von 2,2 m. [22]

## 2.3 Gründung und Dichtung

Durch die oben beschriebenen schwierigen Voraussetzungen und die teilweise nicht injizierbaren Schluffsande wurde als Dichtungselement eine Schlitzwand gewählt. Für die Festlegung der erforderlichen Tiefe wurde Professor *Breth* von der Technischen Universität Darmstadt zu Rate gezogen. Von ihm wurden die damals für das Problem der Sickerwasserströmung üblichen Versuche - elektrisches Analogiemodell und Ölströmung zwischen zwei Glasplatten - durchgeführt. Darüber hinaus wurde am Institut ein Versuch entwickelt, das elektrische Widerstandsnetzwerk, der auch hier Anwendung gefunden hat. [23]

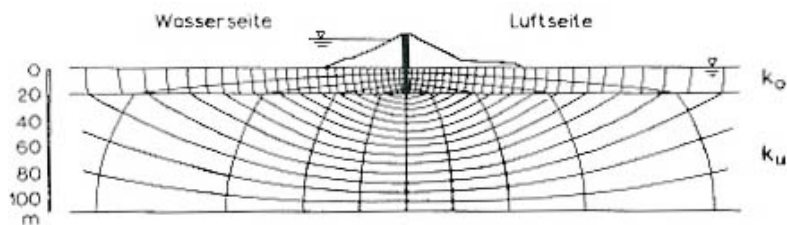


Abbildung 2.3: Strömungsnetz ohne Entspannungsbrunnen [23]

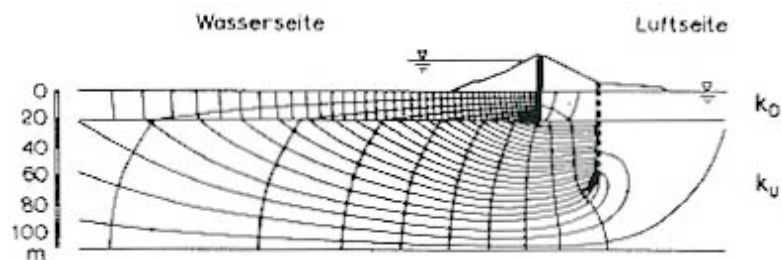


Abbildung 2.4: Strömungsnetz mit Entspannungsbrunnen [23]

Die Unterströmung stellt im vorliegenden Fall prinzipiell ein räumliches Problem dar, nicht zuletzt wegen der extrem heterogenen Geologie. Für die Dimensionierung der Gründung wurde die Sickerwasserströmung als ein ebenes Problem betrachtet. Es wurde jedoch zwischen Talmitte und Talflanke unterschieden.

Im Zuge der Untersuchung wurde festgestellt, dass Entspannungsbrunnen im Unterwasser angeordnet werden mussten, da speziell in Talmitte ein Abteufen eines Dichtungselements auf einen Stauer unwirtschaftlich bzw. technisch nicht möglich war. Es wurden 15 Entspannungsbrunnen mit einer Tiefe von 60 m und einem gegenseitigen Abstand von 25 m gleichmäßig über den Talquerschnitt verteilt.

## 2. Staudamm Eberlaste

Die zur Ausführung gebrachte Schlitzwand reicht in der Talmitte 23 m und im Randbereich 53 m tief unter das Urgelände. Die unterschiedliche Tiefe der Schlitzwand ergibt sich aus dem Umstand, dass an den Talflanken die Schluffandschichten fehlen. Die umströmte Länge muss daher erhöht werden, um das Strömungsgefälle entsprechend zu reduzieren (siehe dazu Kapitel 4.1.2). Im Bereich der seichten Schlitzwand in Talmitte zeigten die Untersuchungen, dass eine Strömung in Richtung unterwasserseitiger Stützkörper auch durch den Einbau von Entspannungsbrunnen nicht komplett verhindert werden kann. Um Erosion zu vermeiden wurde der Stützkörper auf einer 8 cm starken Asphaltabdichtung (Flächenfilter) errichtet. [14]

Breth errechnete für das beschriebene System eine zehnfache Grundbruchsicherheit. Da aber räumliche Einflüsse nicht berücksichtigt wurden, ist die tatsächliche Sicherheit geringer. Aus diesem Grund wurde darüber hinaus noch eine Druckbank mit einer durchschnittlichen Höhe von 4 m und einer Länge von 50 m errichtet.

Um die erwarteten großen Setzungen unbeschadet zu überstehen und um unerwünschten Last- und Spannungskonzentrationen infolge einer zu starren Ausführung zu vermeiden, wurde die Schlitzwand aus plastischem Ton-Zement-Beton hergestellt. Dafür wurden zwei unterschiedliche Mischungen aus den gleichen Grundstoffen verwendet. Die Mischung für die seichte Schlitzwand in Talmitte war plastischer als jene an den Talflanken. Die Anfangsfestigkeit war dadurch geringer. Die Setzungen führten zu keinen Undichtheiten in der Schlitzwand, was anhand von Wasserabpressversuchen überprüft wurde. [14, 24]

Der Anschluss der Schlitzwand an die Felsflanken erfolgte mit Zementinjektionen. Um die Bildung einer Gleitfläche zu verhindern, wurde der Dammquerschnitt in Tallängsachse abgestuft.

## 2.4 Dammkonstruktion

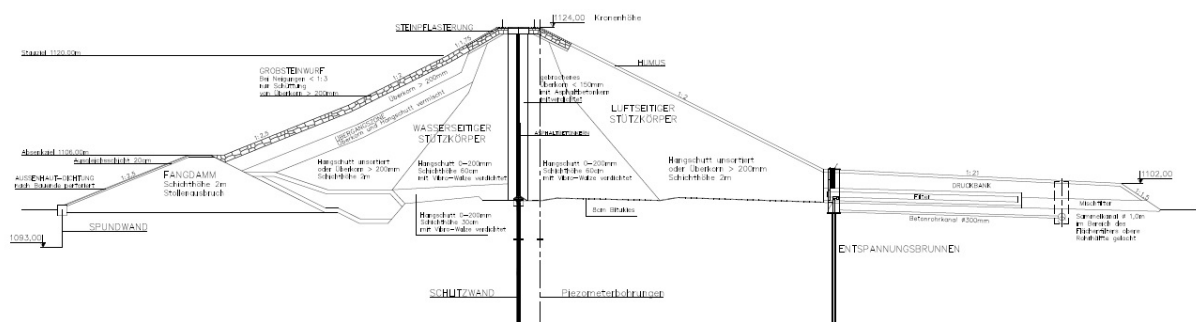


Abbildung 2.5: Erddamm Eberlaste Regelprofil

Bei der Dammkonstruktion musste auf die zu erwartenden großen Setzungen Rücksicht genommen werden. Daher wurde als Konstruktion ein Erddamm mit zentralem Dichtungskern gewählt. Bei den Voruntersuchungen stellte sich heraus, dass vor Ort ausreichend geeignetes Material zur Verfügung stand. Der natürliche Wassergehalt für das Kernmaterial

## 2. Staudamm Eberlaste

war allerdings über dem Optimum. Um eine aufwendige Trocknung zu vermeiden, wurde aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen einem Asphaltbetonkern Vorzug gegenüber einem vergüteten Erdkern gegeben.

Der Asphaltbetonkern wurde in der unteren Hälfte 50 cm und in der oberen 40 cm stark ausgeführt. Während des Mischens und des Einbaus wurden ständig Qualitätskontrollen durchgeführt, um die Dichtigkeit des Kerns zu gewährleisten. Wissend, dass der Berührungspunkt zwischen Schlitzwand und Asphaltbetonkern wesentlichen Einfluss auf die Dichtigkeit des Gesamtsystems hat, wurde der Anschluss mit größter Sorgfalt hergestellt. [15]

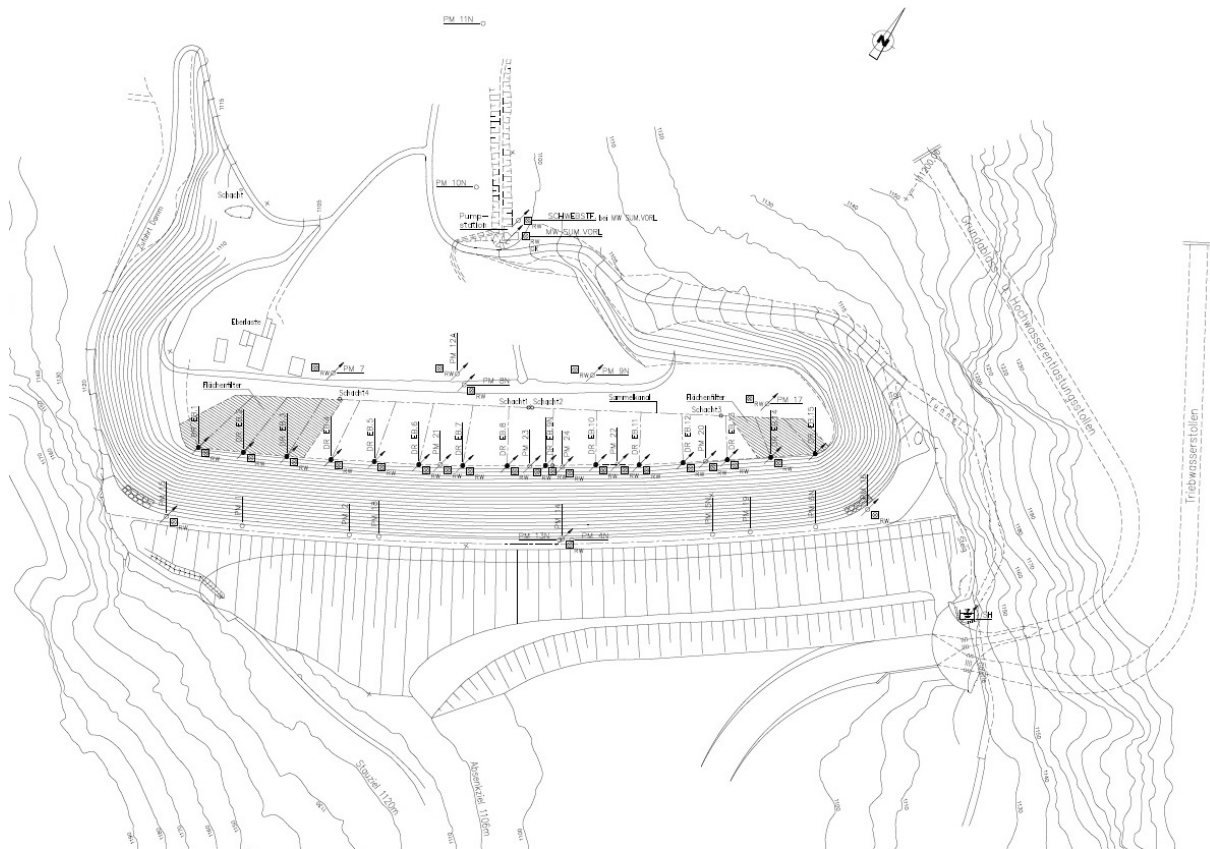


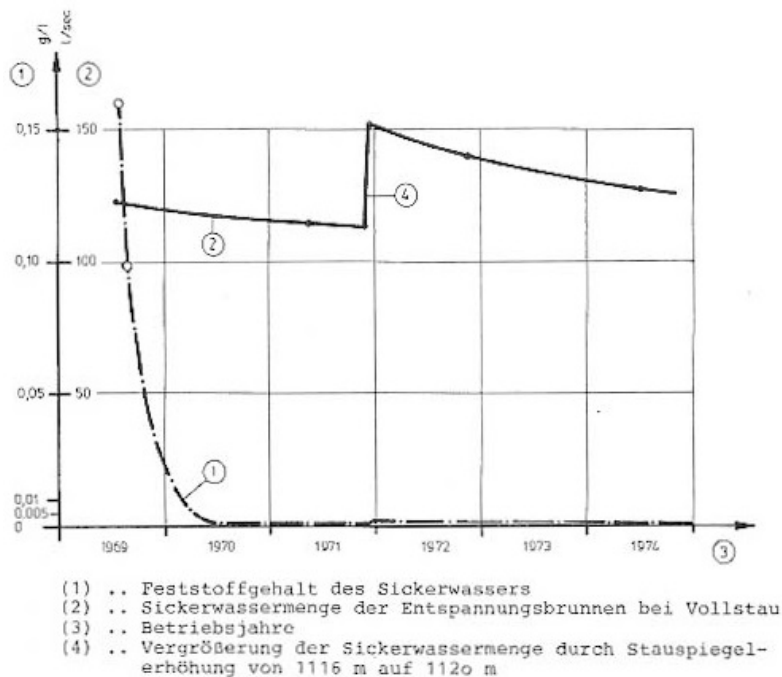
Abbildung 2.6: Erddamm Eberlaste Lageplan

Das Schüttmaterial wurde luftseitig des Dammes der linken Talflanke entnommen. Da im Hangschutt alle Korngrößen vorhanden waren, konnte eine standfeste Schüttung hergestellt werden. Es zeigt sich wiederum, dass die Standsicherheit der Konstruktion nicht von der Schüttung selbst, sondern vorwiegend vom Verhalten des Untergrunds abhängt.

## 2.5 Durchströmungsverhalten

Durch die planmäßige Unterströmung des Dammes und den Umstand, dass in den schluffigen Sandschichten Suffosion bzw. Erosion nicht ausgeschlossen werden konnten, ist die

ständige Kontrolle der Wasserverhältnisse erforderlich. Es wurden daher bei der Projektierung bereits Maßnahmen getroffen, um das Langzeitverhalten zu beobachten. So wurden und werden auch weiterhin die luftseitigen Grundwasserverhältnisse, die Sickerwassermenge und der darin enthaltene Feststoffanteil kontrolliert.



**Abbildung 2.7:** Zeitlicher Verlauf Feststoffgehalt und Sickerwassermenge [24]

In Abbildung 2.7 sind die Schwebstoff- und Sickerwassermessungen ab dem ersten Einstau 1969 dokumentiert. Der Stauspiegel wurde stufenweise auf das damalige Stauziel von Kote 1116,0 m erhöht. Die Messungen zeigen, dass der Schwebstoffgehalt trotz weiteren Einstaus bis 1970 stark abnimmt. Es gibt zudem keinen direkten Zusammenhang zwischen ausfließendem Sickerwasser und dem Feststoffgehalt. Es ist daher von einer Selbstdichtung im Stauraum beim ersten Einstau auszugehen. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch, dass der Schwebstoffgehalt im natürlichen Zufluss höher als der im Sickerwasser gemessene ist. Auffallend ist in Abbildung 2.7 der Sprung der Sickerwassermenge im Jahre 1971. Dieser resultiert aus der Erhöhung des Stauziels auf Kote 1120 m. Der Schwebstoffgehalt bleibt trotz der höheren Wassermenge niedrig. [24]

## 2.6 Betriebseinrichtungen

Die Betriebseinrichtungen des Speichers Stillup wurden in einer baulichen Einheit zusammengefasst. Das Einlaufbauwerk umfasst daher den Grundablass, die Hochwasserentlastung und den Triebwasserstollen. Der Grundablassstollen dient im Falle eines Hochwassers auch zur Abfuhr des selben.



**Abbildung 2.8:** Einlaufbauwerk Eberlaste [32]

In den Speicherraum münden neben dem Stillupbach, auf der linken Talflanke die Überleitung des Krafthauses Gunggl und auf der rechten Talflanke die Zillerüberleitung aus dem Kraftwerk Häuling (vergleiche Abbildung 2.2 auf Seite 4).



# Kapitel 3

## Grundlagen der Suffosion und Erosion

Wie im Kapitel 2 erwähnt, liegen beim Erddamm Eberlaste Schichten vor, die eine Suffosions- bzw. Erosionsgefahr aufweisen. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen dieser Prozesse und einige ausgewählte Kriterien zur Bewertung vorgestellt.

### 3.1 Allgemeines

Bei der Suffosion und Erosion handelt es sich um Erscheinungsformen der hydrodynamischen Bodendeformationen. Diese stellen neben dem Überströmen von Dammbauwerken eine der häufigsten Versagensarten von Dämmen dar. [12] Mit hydrodynamischer Bodendeformation ist in diesem Zusammenhang die durch Sickerwasser verursachte Bewegung von Bodenpartikeln gemeint. Die Bewegung ist dabei nicht nur auf den Damm selbst beschränkt, auch der Untergrund wird hier mit eingeschlossen.

Die hydrodynamische Bodendeformation umfasst mehrere Prozesse, die nach *Ziems* wie folgt eingeteilt werden: [21]

- Suffosion
  - innere Suffosion
  - äußere Suffosion
  - Kontaktsuffosion
- Erosion
  - äußere Erosion
  - innere Erosion
  - Kontakterosion
  - Fugenerosion
- Kolmation

Bei der Kolmation handelt es sich um den der Suffosion gegenteiligen Prozess. Es werden durch die Sickerströmung transportierte Teilchen feinen Materials in den Poren des gröberen Materials abgelagert. Das verringert die Durchlässigkeit und führt zu einer höheren Lagerungsdichte des Bodens. [6, 20]

## 3.2 Grundlegende Begriffsdefinitionen

Der Boden stellt ein poröses Medium bestehend aus Korngefüge und darin eingeschlossenem Porenvolumen dar. Die Poren können luft- oder wassergefüllt sein. Das Korngefüge besteht dabei aus unterschiedlich großen Körnern, deren Verteilung anhand der Korngrößenverteilung dargestellt wird. Zur Beschreibung dieser werden üblicherweise die Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl herangezogen. Die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  gibt die Steilheit der Kornverteilung im Bereich zwischen 10 und 60 Masseprozent wider, während die Krümmungszahl  $C_c$  den Verlauf der Kurve beschreibt. [1]

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (3.2)$$

$U$	... Ungleichförmigkeitszahl [–]
$C_c$	... Krümmungszahl [–]
$d_{10}$	... Korngröße bei 10M% Siebdurchgang [m]
$d_{30}$	... Korngröße bei 30M% Siebdurchgang [m]
$d_{60}$	... Korngröße bei 60M% Siebdurchgang [m]

**Tabelle 3.1:** Klassifizierung gemäß ÖNORM EN 14688-2:2004

Korngrößenverteilung	Kennzahlen
enggestuft	$U < 6$ und $C_c < 1$
gut gestuft	$6 < U < 15$ und $C_c < 1$
weitgestuft	$U > 15$ und $1 < C_c < 3$
intermittierend gestuft	im Allgemeinen $U$ groß und $C_c$ beliebig

Das Dreiphasensystem Boden lässt sich anhand des Einheitswürfels beschreiben, welcher in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Anhand dessen werden die grundlegenden Bodenkennwerte definiert.

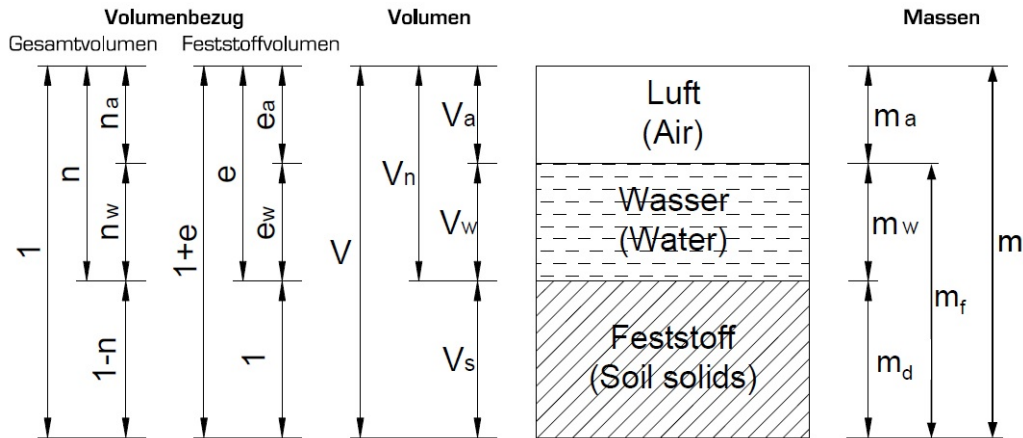


Abbildung 3.1: Einheitswürfel [1]

$$n = \frac{V_n}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (3.3)$$

$$e = \frac{V_n}{V_s} = \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 = \frac{n}{1 - n} \quad (3.4)$$

- $n$  ... Porenanteil [–]
- $e$  ... Porenzahl [–]
- $V$  ... Gesamtvolumen [ $cm^3$ ]
- $V_n$  ... Porenvolumen [ $cm^3$ ]
- $V_s$  ... Feststoffvolumen [ $cm^3$ ]
- $\rho_d$  ... Trockendichte [ $g/cm^3$ ]
- $\rho_s$  ... Korn- bzw. Rohdichte [ $g/cm^3$ ]

Die Eigenschaften von nicht bindigen Böden sind stark von der Lagerungsdichte  $I_D$  abhängig. Die bezogene Lagerungsdichte stellt einen Vergleichswert zwischen vorhandener Lagerungsdichte und dem maximalen und minimalen Wert dar. [17]

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.5)$$

- $I_D$  ... bezogene Lagerungsdichte, Dichteindex [–]
- $e$  ... Porenzahl natürliche Lagerung [–]
- $e_{min}$  ... Porenzahl dichteste Lagerung [–]
- $e_{max}$  ... Porenzahl lockerste Lagerung [–]

Bei bindigen Böden werden die Eigenschaften vorwiegend durch die Plastizität  $I_P$  der feinen Kornfraktion bestimmt. Diese wird durch die Fließgrenze und die Ausrollgrenze definiert. [17]

$$I_P = w_L - w_P \quad (3.6)$$

$I_P$  ... Plastizitätszahl [–]

$w_L$  ... Fließgrenze [–]

$w_P$  ... Ausrollgrenze [–]

Die Geometrie der Porenkanäle hat für die Prozesse Suffosion und Erosion entscheidende Bedeutung. Durch die in der Natur vorkommenden unzähligen Kombinationsmöglichkeiten von Größe, Form und Lagerung der einzelnen Körner muss bei der Beschreibung auf mathematische Modelle zurückgegriffen werden. Für nicht bindige Böden hat das Kugelmodell die größte Bedeutung. Es werden der minimale Porendurchmesser  $d_{p,min}$ , der mittlere Porendurchmesser  $d_p$  und die Größenverteilung der Poren erfasst. [6]

Um den minimalen Porendurchmesser  $d_{p,min}$  zu beschreiben, werden heterodisperse Schüttungen herangezogen. Das bedeutet, dass die Anordnung der Körner dem Zufall überlassen wird. Für die genaue Herleitung wird auf *Busch et al.* [6] verwiesen.

Die Ermittlung des mittleren Porendurchmessers  $d_p$  erfolgt mittels des linearen Widerstandsgesetzes der Porenströmung (Darcy'sches Filtergesetz). Eine Ausnahme ist hier lediglich *Wittmann* [34], er bestimmt den mittleren Porendurchmesser auf Basis der heterodispersen Kugelschüttung. Da bei *Wittmann* ein Abminderungsfaktor für jedes Material aus Versuchen bestimmt werden muss, hat diese Art der Bestimmung des mittleren Porendurchmessers nur theoretische Bedeutung. Der mittlere Porendurchmesser wird auch als hydraulisch äquivalenter Porenkanaldurchmesser  $d_k$  bezeichnet. [6]

Da ebenfalls nach *Wittmann* die Gleichungen nach *Istomina* und *Patrasev* qualitativ und quantitativ ähnliche Ergebnisse liefern wie die Formel nach *Pavčič*, wird diese hier zur Bestimmung des mittleren Porendurchmessers angewandt. [6, 20]

Der mittlere Porendurchmesser ergibt sich somit nach *Busch et al.* zu:

$$d_p = 0,455 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (3.7)$$

$d_p$  ... mittlerer hydraulischer Porendurchmesser [m]

$d_{17}$  ... Korngröße bei 17M% Siebdurchgang [m]

Die Ermittlung der Porenengstellenverteilung basiert auf der Forschung *Silveiras*. Rechnerisch können die Extremwerte für kugelige Erdstoffe über die Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung ermittelt werden. [20]

Ein Bodenpartikel, dessen Durchmesser  $d$  dem minimalen Porendurchmesser  $d_{p,min}$  entspricht, kann den Porenkanal in der Regel nicht passieren. Auf Basis dieser Überlegung wird ein Durchgangsfaktor  $F$  wie folgt angegeben:

$$d \leq F \cdot d_{p,min} \quad (3.8)$$

Der Durchgangsfaktor hängt unter anderem ab von: [6]

- Brückenbildungsfaktor (Brückenbildung feiner Körner über Engstellen der Porenkanäle)
- Größe der transportierten Teilchen
- Dicke der gebundenen Wasserhüllen
- Abweichung der Teilchen von der Kugelform

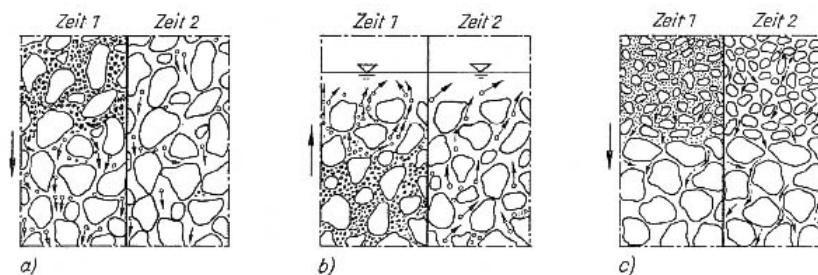
### 3.3 Suffosion

Als Suffosion wird das Umlagern bzw. Ausspülen von Feinanteilen eines Bodens durch Porenwasserströmung bezeichnet. Das tragende Korngerüst wird dabei in seiner Struktur nicht verändert. [2]

Mit Boden werden hier nichtbindige, ungleichförmige Materialien bezeichnet. Das tragende Korngerüst wird in der Literatur oftmals auch als Erdstoffskelett bezeichnet, das von den feineren Kornfraktionen ausgefüllt wird. [6, 29]

Nach *Muckenthaler* können durch Suffosion die Porosität  $n$  und der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  des Bodens erhöht werden. Sie kann auch Einfluss auf die Scherfestigkeitsparameter von Böden haben. Erdstoffe mit einer relativ hohen Ungleichförmigkeitszahl und jene mit einer Ausfallkörnung sind besonders suffosionsanfällig. [20]

Die Suffosion kann nach *Ziems* in innere, äußere und Kontaktsuffosion eingeteilt werden.



**Abbildung 3.2:** a) innere Suffosion, b) äußere Suffosion, c) Kontaktsuffosion [6]



**Tabelle 3.2:** Überblick geometrischer Suffosionskriterien

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Ziems	basiert auf geometrischen Größenverhältnissen	-
Sherard	gröberer Teil des Materials wirkt als Filter für den feineren Teil	für Materialien mit Ausfallkörnungen
BAW-MAK	geometrische Größenverhältnisse aus Basis von Cistin und Ziems	-
Burenkova	empirisch ermittelt, auf Basis von Versuchen	für gleichmäßige Kornverteilungen mit hohem Feinanteil
Kenney und Lau	empirisch ermittelt, auf Basis von Versuchen	-

#### ***Kriterium nach Ziems***

Das geometrische Suffosionskriterium lässt sich nach *Ziems* wie folgt darstellen: [6]

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}}{F \cdot d_p} \geq 1,5 \quad (3.9)$$

- $\eta_{S,G}$  ... geometrische Suffosionssicherheit [-]
- $d_{min}$  ... Korngröße bei 0M% Siebdurchgang (für weniger bedeutenden Nachweise auch bis  $d_{3\%}$ ) [m]
- $F$  ... Durchgangsfaktor [-]
- $d_p$  ... mittlerer Porendurchmesser [m]

Im Hinblick auf die im Kapitel 3.2 beschriebenen Abhängigkeiten und bezugnehmend auf *Busch et al.* wird der Durchgangsfaktor mit  $F \approx 0,6$  festgelegt. Damit wird der Durchmesser des größten suffosionsgefährdeten Kornes  $d_S$  zu: [6]

$$d_S = 0,6 \cdot d_p \quad (3.10)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 3.7 ergibt sich daraus:

$$d_S = 0,27 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (3.11)$$

Aufgrund der oben genannten Zusammenhänge gelten laut *Busch et al.* folgende Böden als suffosionssicher:

- Erdstoffe mit  $U \approx 1,0$
- Erdstoffe mit  $U < 10$  bei gerader Kornverteilungslinie in halblogarithmischer Darstellung, unabhängig von  $I_D$
- Erdstoffe mit  $U > 10$  für  $I_D < 0,6$
- Erdstoffe mit  $U < 8$  bei stetiger Kornverteilungslinie, unabhängig von  $I_D$

Wenn die Kornverteilungslinien Ausfallkörnungen, starke Knicke oder Krümmungen aufweisen, ist die Formel für den mittleren Porendurchmesser nicht mehr anzuwenden und die Vorgangsweise ändert sich. Es wird das größte suffosionsgefährdete Korn ermittelt und der Anteil des gefährdeten Materials grafisch dargestellt. Für eine ausführlichere Darstellung wird hier auf *Henzinger* [9] verwiesen.

Bei der Kontaktsuffosion handelt es sich um eine Sonderform der äußeren Erosion. Sie kann auftreten, wenn der Porenkanaldurchmesser des Filters größer als das maßgebende suffosionsgefährdete Korn des Erdstoffs ist. Die Kontaktsuffosion als Sonderform der Suffosion tritt hier nur dann ein, wenn das allgemeine Suffosionskriterium nicht erfüllt ist, sonst ist sie auf wenige Zentimeter beschränkt. Durch Versuche ist folgendes Kriterium als brauchbar bestätigt worden: [6]

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{min}^I + d_S^I}{2 \cdot 0,6 \cdot d_p^{II}} \geq 1,5 \quad (3.12)$$

- $\eta_{S,G}$  ... geometrische Suffosionssicherheit [–]  
 $d_{min}^I$  ... kleinster suffosionsgefährdeter Korndurchmesser des Erdstoffes (Basis) [m]  
 $d_S^I$  ... maßgebendes suffosionsgefährdetes Korn des Erdstoffes (Basis) [m]  
 $d_p^{II}$  ... Porenkanaldurchmesser des Filters [m]

#### ***Kriterium nach Sherard für Materialien mit Ausfallkörnung***

Nach [8] wird bei diesem Kriterium die Kornverteilungslinie bei der Ausfallkörnung getrennt. Der grobe Teil des Materials wird dem feinen als Filter gegenübergestellt. Die Suffosionssicherheit ist gegeben, wenn folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$\frac{D_{15grob}}{D_{85fein}} < 5 \quad (3.13)$$

- $D_{15grob}$  ... Korngröße bei 15M% Siebdurchgang grobe Teilkörnung [mm]  
 $D_{85fein}$  ... Korngröße bei 85M% Siebdurchgang feine Teilkörnung [mm]



**Kriterium nach BAW-MAK**

Das in [2] beschriebene Kriterium zur Beurteilung der Suffosionsicherheit gilt für gebundene und ungebundene Kornmaterialien, die an Wasserstraßen als Böschungs- oder Sohlfilter bzw. für andere bauliche Anlagen als Filter eingesetzt werden.

Die vorhandene Körnungslinie wird hierbei an beliebiger Stelle getrennt. Es werden die neuen Körnungslinien des Basis- und Filterstoffes ermittelt. Um die Filterstabilität nachzuweisen, wird das zulässige Abstandsverhältnis nach *Cistin und Ziems* geprüft. Die Suffosionsicherheit ist gegeben, wenn das Abstandsverhältnis für mehrere beliebige Trenndurchmesser nicht überschritten wird.

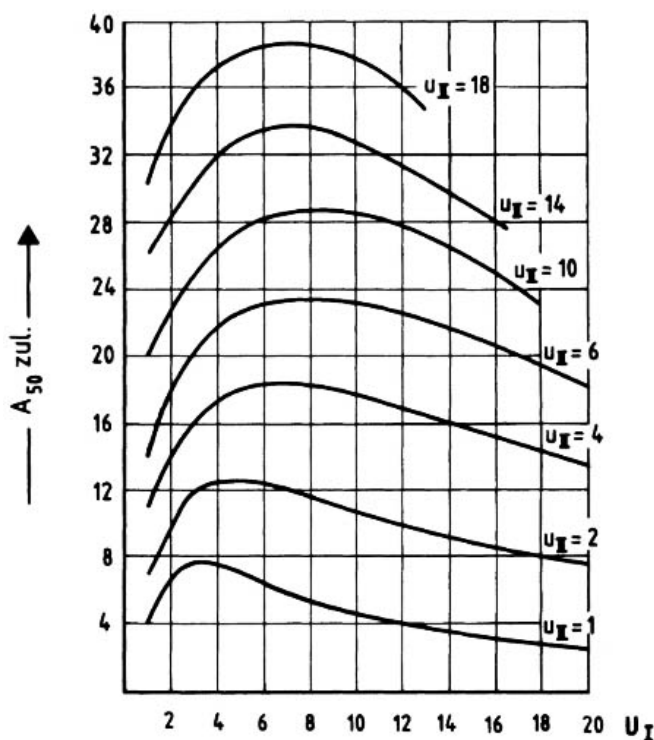


Abbildung 3.4: Diagramm nach *Cistin/Ziems* [2]

- $A_{50}$  ... Verhältnis der mittleren Korndurchmesser der Deckschicht und des zu schützenden Bodens [–]
- $U_I$  ... Ungleichförmigkeitszahl des Bodens [–]
- $U_{II}$  ... Ungleichförmigkeitszahl der Deckschicht [–]

Die Anwendbarkeit des in Abbildung 3.4 dargestellten Diagramms wird mit  $0,1 < d < 30 \text{ mm}$  für Basiserdstoffe und mit  $4 < d < 100 \text{ mm}$  für Filtererdstoffe angegeben. Zur Abschätzung, ob Filterschichten notwendig sind, kann es aber auch für größere Bereiche herangezogen werden. [2]

**Kriterium nach Burenkova für Materialien mit gleichmäßiger Kornverteilung und höherem Feinanteil**

Für Materialien mit höherem Feinanteil und einer gleichmäßigen Kornverteilung empfehlen *Fell et al.* die Anwendung des Kriteriums nach *Burenkova*. [8]

Hier wird über das Verhältnis der Korndurchmesser  $d_{15}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{90}$  des zu beurteilenden Erdstoffs einer von vier Bereichen ermittelt. Der ermittelte Bereich gibt Aufschluss darüber, ob der Boden geometrisch suffosionsgefährdet ist.

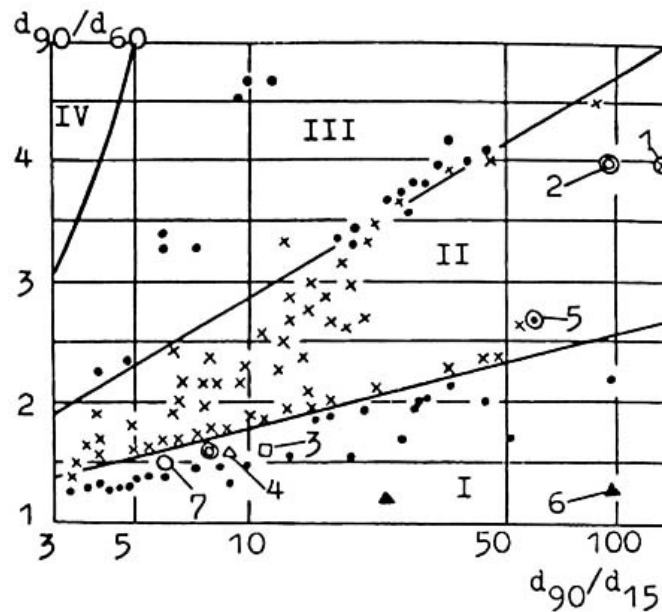


Abbildung 3.5: Suffosionskriterium nach Burkenkova [8]

- I ... Suffosionsgefährdeter Bereich [-]
- II ... Suffosionssicherer Bereich [-]
- III ... Suffosionsgefährdeter Bereich [-]
- IV ... Bereich künstlicher Böden [-]

**Kriterium nach Kenney/Lau**

*Kenney und Lau* geben eine empirisch ermittelte Grenze zwischen suffosionssicherem und suffosionsgefährdetem Material an. Auf Basis der Kornverteilungskurve wird ein Verhältnis  $H/F$  ermittelt. Wenn dieser Zusammenhang  $H/F > 1$  genügt, ist das Material suffosionssicher. Mit  $H$  wird der Massenanteil zwischen zwei Korndurchmessern  $D$  und  $4 \cdot D$  beschrieben. Durch  $F$  wird der Anteil des Masseprozent, der kleiner als  $D$  ist, gekennzeichnet.

Wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, wird die Kornverteilung in die Bereiche  $D$  bis  $4 \cdot D$  eingeteilt. Es werden die zugehörigen Masseprozent  $F$  und  $H$  ermittelt, welche in ein  $H-F$

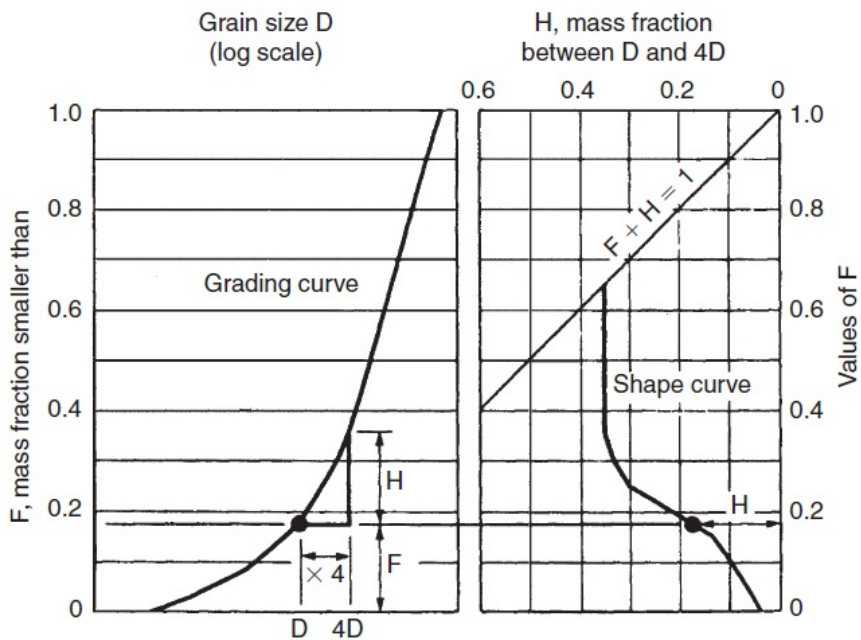


Abbildung 3.6: Suffosionskriterium nach Kenney/Lau [8]

Diagramm übertragen werden. Die gesamte Kornverteilungslinie wird dieser Systematik folgend abgearbeitet. Die aufgetragenen Werte werden mit der Grenzgeraden ( $H = F$ ) verglichen, so kann eine Aussage über die Suffosionssicherheit des Materials getroffen werden.

### 3.3.2 Hydraulische Suffosionskriterien

Wird das geometrische Suffosionskriterium nicht eingehalten, ist der Erdstoff suffosionsgefährdet. Tatsächlich stellt sich aber erst Suffosion ein, wenn die Kraftwirkung der Sickerwasserströmung groß genug ist, um die Teilchen des Erdstoffs zu transportieren. [6]

Der Nachweis der hydraulischen Suffosionssicherheit ergibt sich daher über das kritische hydraulische Gefälle zu: [6]

$$\eta_{S,H} = \frac{i_{S,krit}}{i_{vorh}} \geq 2,0 \quad (3.14)$$

- $\eta_{S,H}$  ... hydraulische Suffosionssicherheit [–]
- $i_{S,krit}$  ... kritisches hydraulisches Gefälle [–]
- $i_{vorh}$  ... vorhandenes hydraulisches Gefälle [–]

In Tabelle 3.3 sind die hydraulischen Suffosionskriterien überblicksmäßig zusammengestellt.

**Tabelle 3.3:** Überblick hydraulischer Suffosionskriterien

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Busch et al.	empirisches Kriterium auf Basis der Bodeneigenschaften und der Strömungsrichtung	für Erdstoffe mit stetiger Korngrößenverteilung
Istomina	die auf ein Einzelkorn wirkenden Strömungskraft wird der Gewichtskraft des Kornes gleichgesetzt	-
Wittmann *	ähnlich Istomina; die Partikelsinkgeschwindigkeit wird der mittleren Porengeschwindigkeit gleichgesetzt	weiterführende Literatur [20]

\* Kriterium wird nicht ausgewertet und daher im Folgenden nicht näher beschrieben

#### ***Kriterium für Erdstoffe mit stetiger Korngrößenverteilung nach Busch et al.***

Das kritische hydraulische Gefälle für innere Suffosion bei Erdstoffen mit stetiger Korngrößenverteilung ergibt sich abhängig von der Ungleichförmigkeit, der Durchlässigkeit, der Porosität und dem größten suffosionsgefährdeten Korn. Dabei wird die Richtung der Strömung bezogen auf die Vertikale berücksichtigt. [6, 25]

$$i_{krit} = 0,6 \cdot \left( \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1 \right) \cdot [0,82 - 1,8 \cdot n + 0,0062 \cdot (U - 5)] \cdot \sin\left(30^\circ + \frac{\alpha}{8}\right) \cdot \sqrt{\frac{n \cdot g \cdot d_S^2}{v_v \cdot k}} \quad (3.15)$$

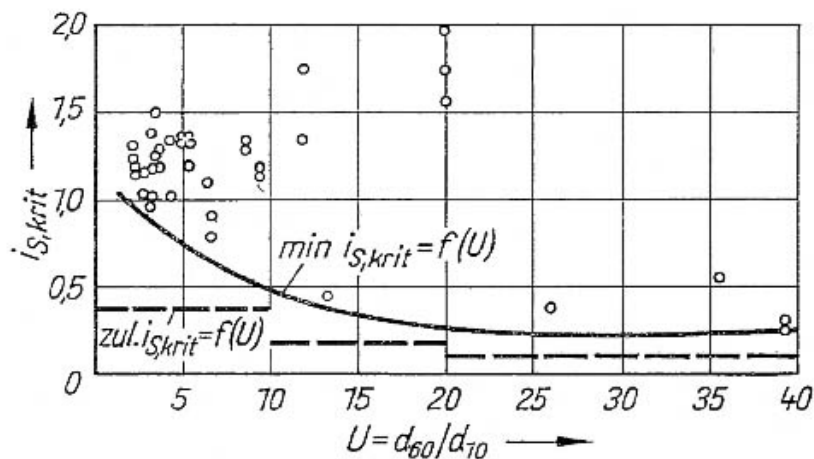
$$\alpha = \begin{cases} 0^\circ & \text{für } \downarrow \\ 90^\circ & \text{für } \rightarrow \\ 180^\circ & \text{für } \uparrow \end{cases}$$

- $\rho_d$  ... Trockendichte [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_w$  ... Dichte Wasser [ $kg/m^3$ ]
- $n$  ... Porosität [—]
- $U$  ... Ungleichförmigkeitszahl [—]
- $\alpha$  ... Winkel zwischen der Vertikalen und der Strömungsrichtung [ $^\circ$ ]
- $g$  ... Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
- $d_S$  ... größtes suffosionsgefährdetes Korn nach Gl. 3.11 [ $m$ ]
- $\nu_w$  ... kinematische Zähigkeit des Wassers [ $m^2/s$ ]
- $k$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [ $m/s$ ]

**Kriterium für Erdstoffe mit unstetiger Korngrößenverteilung nach Istomina**

*Istomina* gibt ein Kriterium für ungleichförmige Erdstoffe mit aufwärts gerichteter Strömung an, das sich durch Versuche begründen lässt. Um den Nachweis zu führen, werden Körner  $d \geq 1 \text{ mm}$  dem Skelett zugeordnet, kleinere Körner stellen die Füllung dar. Durch die willkürliche Festlegung zwischen Skelett und Füllung stellt dieses Kriterium laut *Busch et al.* nur eine grobe Näherung dar und wird hier nicht ausgewertet. [6]

Aus den Versuchen mit überwiegend aufwärts gerichteter Strömung leitet *Istomina* einen zulässigen hydraulischen Gradienten, der ausschließlich auf der Ungleichförmigkeit beruht, ab. Dieser gilt für äußere Suffosion und ergibt sich unter der in Abbildung 3.7 dargestellten Einhüllenden  $f(U) = \min i_{S,krit}$ .



**Abbildung 3.7:** Kritisches Gefälle für äußere Suffosion nach *Istomina* [6]

Der zulässige Gradient beträgt bereits unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes: [20]

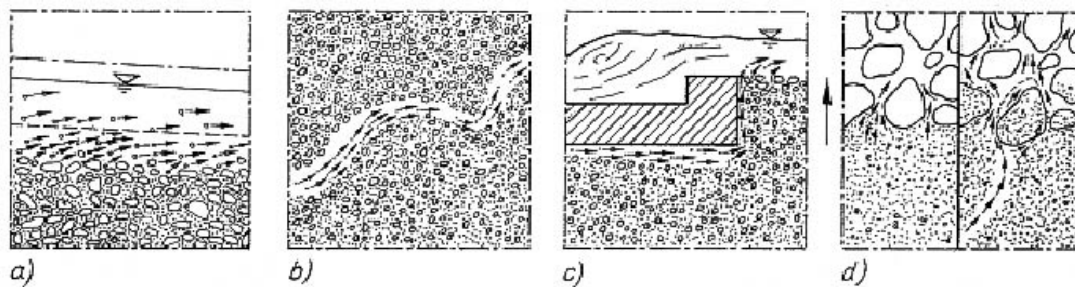
$$i_{zul} = \begin{cases} 0,3 - 0,4 & \text{für } U < 10 \\ 0,2 & \text{für } 10 \leq U \leq 20 \\ 0,1 & \text{für } U > 20 \end{cases}$$

Striegler [29] gibt diese Werte generell als Abschätzung der Suffosionssicherheit an, ohne dabei im Speziellen auf die Strömungsrichtung einzugehen.

## 3.4 Erosion

Im Vergleich zur Suffosion erfolgt bei der Erosion eine Umlagerung und Transport der Teilchen an der freien Oberfläche oder in größeren vorhandenen oder entstehenden röhrenförmigen Hohlräumen durch das strömende Wasser. Damit ist eine progressive Zerstörung des Erdstoffes verbunden. [29]

Wie in Abbildung 3.8 ersichtlich, wird dabei zwischen äußerer, innerer, Fugen- und Kontakterosion unterschieden.



**Abbildung 3.8:** a) äußere Erosion, b) innere Erosion, c) Fugenerosion, d) Kontakterosion mit rückschreitender innerer Erosion [6]

Äußere Erosion findet an der Grenze eines Erdstoffes zur freien Oberfläche statt. Sie ist daher von der Fließgeschwindigkeit bzw. der Schleppspannung des fließenden Wassers abhängig und stellt somit einen Teilbereich der Oberflächenhydraulik dar.

Die innere Erosion wird auch als *piping* bezeichnet und tritt in röhrenförmigen Hohlräumen des Erdkörpers auf. Die Entstehung dieser Hohlräume kann auf pflanzliche oder tierische Einwirkungen, auf Auswaschungen oder rückschreitende Erosion zurückgeführt werden. Es liegt hier kein Grundwasserströmungsproblem vor, vielmehr handelt es sich um die Schleppkraftproblematik in Rohren. Ein Nachweis kann nicht mit Hilfe von physikalischen Verfahren geführt werden, dafür sind wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze notwendig. Die Voraussetzungen die ein Auftreten der inneren Erosion begünstigen können allerdings verhindert bzw. begrenzt werden. Das geschieht zum Beispiel durch das Verhindern von Kontakterosion und den Einbau von Entlastungsanlagen. [6]

Fugenerosion kann zwischen Massivbauwerken und dem Erdkörper auftreten. Sie stellt speziell bei auf dem Untergrund errichteten Bauwerken, sowie bei massiven Einbauten in Dämmen ein hohes Risiko dar.

Bei der Kontakterosion treten an der Grenzfläche von feinen zu grobem Material die feinen Teilchen in die Poren des größeren Materials ein. Die Kontakterosion wird analog der Kontaktsuffosion nach *Ziems* eingeteilt (vergleiche dazu Kapitel 3.3, Abbildung 3.3). Um die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion zu bestimmen, kommen Filterregeln zur Anwendung. Diese werden im nachfolgenden Kapitel genauer beschrieben.

#### 3.4.1 Geometrische Kontakterosion

Bei den Kriterien für die geometrische Kontakterosion handelt es sich um Filterkriterien. Diese bilden die Grundlage der Filterbemessung im Dammbau. In Tabelle 3.4 sind die gängigsten Kriterien überblicksmäßig dargestellt.

**Tabelle 3.4:** Übersicht geometrischer Erosionskriterien

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Terzaghi/Peck	gründet auf Abstandsverhältnis	konservativ, zur Abschätzung gut geeignet
USBR *	Beziehung zwischen Korndurchmessern	lt. [16] ist Kriterium konservativ für tonige Dammdichtungsstoffe; lt. [8] nicht zu empfehlen
Sherard/Dunnigan	mit Hilfe von Versuchen und <i>no erosion filter</i> (NEF) - Tests Kriterium für kritische Filter ermittelt	-
Fell et al.	Weiterentwicklung von Sherard/Dunnigan	zur Bewertung bestehender Dammbauwerke entwickelt; enthält keine Sicherheiten
Vaughan/Soares *	aufgrund eines Schadensfalls entwickelt	Forderung nach <i>perfektem Filter</i> der auch die kleinsten transportierbaren Teilchen aufhalten kann; Kriterium wird allgemein als zu streng angesehen und hat sich daher nicht durchgesetzt; hängt von der Durchlässigkeit ab, die Überwachung im Feld ist daher nicht praktisch

### 3. Grundlagen der Suffosion und Erosion

---

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Bertram *	für gleichförmige Sande mit Durchströmung von oben nach unten entwickelt	-
Witt/Brauns *	wahrscheinlichkeits-theoretisch untermauertes Kriterium, anhängig von Ungleichförmigkeitsgrad	lt. [11] für suffosionssichere Böden vorgeschlagen, die relativ geringe Ungleichförmigkeiten aufweisen; lt. [8] sehr konservativ
Zweck/Davidenkoff *	für waagrechte Filter gleichförmiger Böden mit nach unten gerichteter Strömung entwickelt	-
Kenny/Lau	Ermittlung eines Engstellendurchmessers des Filters	Kriterium liegt von der Sicherheit zwischen Sherard/Dunnigan und Vaughan/Soares
Lafleur et al. *	für weit gestufte, nicht kohäsive eiszeitliche Moränematerialien entwickelt	-
Cistin/Ziems *	gründet auf Abstandsverhältnis	im Staudambau kaum verbreitet
Sichardt *	für kugelförmige Erdstoffe, entstammt Erfahrungen mit Kiesschüttbrunnen	Ungleichförmigkeit findet keine Berücksichtigung
US Army Corps of Engineers *	gründet auf Abstandsverhältnis	setzt stetige Kornverteilung voraus
Locke/Indraratna	Modifikation von Sherard, für weitgestufte Basismaterialien	-

\* Kriterium wird nicht ausgewertet und daher im Folgenden nicht näher beschrieben

#### ***Kriterium nach Terzaghi/Peck***

Beim Filterkriterium nach *Terzaghi und Peck* handelt es sich um ein weit verbreitetes und einfach anzuwendendes Kriterium. Es konnte bei Versuchen mit Sanden und Kiesen festgestellt werden, dass das Kriterium auf der sicheren Seite liegt und daher als konservativ zu betrachten ist. [27]



Das Kriterium besteht aus zwei Teilen. Der linke Teil der Ungleichung 3.16 stellt das Kontakterosionskriterium dar, der rechte die Durchlässigkeitsregel. [29, 30]

$$\frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} < 4 < \frac{d_{15,F}}{d_{15,B}} \quad (3.16)$$

Zu beachten ist, dass die Versuche auf Basis von enggestuften kohäsionslosen Sanden und Kiesen durchgeführt wurden. *Kutzner* empfiehlt daher Ungleichförmigkeiten von ungefähr 2 bis 4 einzuhalten. [16]

#### ***Kriterium nach Sherard/Dunnigan***

Nach *Sherard und Dunnigan* werden die Erdstoffe in vier Kategorien eingeteilt. Zu beachten ist dabei, dass nur jeweils der Kornanteil feiner als 4,75 mm zur Einteilung der Kategorien herangezogen wird. Dieser Schritt wurde eingeführt, um Probleme mit sehr breit abgestuften Böden, die sich nicht selbst filtern, zu verhindern. [12, 26]

Es wird dabei unterschieden zwischen:

1. Bodengruppe Feinkörnige Schluffe und Tone mit einem Siebdurchgang von mehr als 85M% unter 0,075 mm
2. Bodengruppe Schluffige und tonige Sande, sowie sandige Schluffe und Tone mit einem Siebdurchgang von 40 bis 85M% unter 0,075 mm
3. Bodengruppe Sande und Kiessande mit geringerem Feinkornanteil die einen Siebdurchgang von weniger als 15M% unter 0,075 mm aufweisen
4. Bodengruppe Erdstoffe zwischen den Gruppen zwei und vier, mit einem Siebdurchgang von 15 bis 40M% unter 0,075 mm

Das Erosionskriterium nach Sherard und Dunnigan ergibt sich zu: [26]

1. Bodengruppe  $d_{15,F} \leq 9 \cdot d_{85,B}$  (1)
2. Bodengruppe  $d_{15,F} \leq 0,7 \text{ mm}$
3. Bodengruppe  $d_{15,F} \leq 4 \cdot d_{85,B}$  (2)
4. Bodengruppe  $d_{15,F} \leq (40 - A)/(40 - 15) \cdot (4 \cdot d_{85,B} - 0,7 \text{ mm}) + 0,7 \text{ mm}$  (3)

- $d_{15,F}$  ... Korngröße bei 15M% Siebdurchgang Filter [mm]  
 $d_{85,B}$  ... Korngröße bei 85M% Siebdurchgang Basiserdstoff [mm]  
 $A$  ... Prozentsatz kleiner 0,075 mm nach der Umstufung
- (1) wenn  $9 \cdot d_{85,B}$  kleiner als 0,2 mm ist, wird 0,2 mm angesetzt [11]
  - (2) in Bodengruppe 3 kann  $d_{85,B}$  aus der originalen Kornverteilung ermittelt werden, eine Umstufung der Kornfraktionen größer 4,75 mm ist hier nicht erforderlich [11]
  - (3) wenn  $4 \cdot d_{85,B}$  kleiner als 0,7 mm ist, wird 0,7 mm angesetzt [11]

Nach *Fell et al.* ist dabei Folgendes zu berücksichtigen: [8]

- Fell verlangt, dass für die Bodengruppen 1 und 2 die Filter komplett aus Sand oder Kiessand bestehen (nicht mehr als 40M% der Kornverteilung feiner als 4,75 mm), mit einem maximalen Korndurchmesser von 50 mm.
- Für die Bodengruppen 1 und 2 kann das Kriterium unabhängig von der Form der Kornverteilungslinie angewandt werden. Bei Böden der Gruppe 3 und 4 gilt das Kriterium für einigermaßen gut abgestufte Kornverteilungen. Wenn Ausfallkörnungen vorhanden sind, kann der Filter auf den feineren Teil bemessen werden. Alternativ kann auch im Labor ein *No Erosion Filter - Test* (kurz NEF-Test) durchgeführt werden, um einen passenden Filter auszuwählen.
- Filter sollten nicht mehr als 5M% Feinteile aufweisen, die kleiner als 0,075 mm sind, und diese sollen kohäsionslos sein.

*Sherard und Dunnigan* geben an, dass das Kriterium bereits einen ausreichenden Sicherheitsfaktor enthält. [26]

#### **Kriterium nach Fell et al.**

*Fell et al.* schlagen eine Bemessungsmethode für Filter mit Durchströmung normal zur Filterebene vor. Die Methode basiert auf dem bereits erwähnten Kriterium nach *Sherard und Dunnigan*. Es wird darauf hingewiesen, dass *Sherard und Dunnigan* keine expliziten Anweisungen zur Anwendung ihres Kriteriums geben. Bei dem Kriterium ist darüber hinaus zu beachten, dass es als *no erosion* Kriterium entwickelt wurde und zur Bewertung bestehender Dammbauwerke herangezogen wird. Es enthält daher keine Sicherheiten. [8]

*Fell et al.* geben eine Vorgehensweise in Schritten zur Ermittlung eines Filters an. Die Grenzen der Bodeneinteilung werden gegenüber *Sherard und Dunnigan* leicht modifiziert. Um eine Verwechslung auszuschließen, werden die geänderten Kategorien zusätzlich mit dem Buchstaben  $A$  gekennzeichnet.

Die schrittweise Ermittlung eines Filters nach *Fell et al.* stellt sich wie folgt dar:

1. Die Kornverteilungslinie des Basiserdstoffs wird ermittelt. Es sind genügend Proben zur Ermittlung heranzuziehen, um eine repräsentative Kurve zu erhalten.

### 3. Grundlagen der Suffosion und Erosion

---

2. Es kann mit Punkt vier fortgefahren werden, wenn das Basismaterial keinen Kies (Material größer als 4,75 mm) enthält, oder wenn der Basiserdstoff ein Feinfilter ist, zu dem ein Grobfilter ermittelt werden soll.
3. Erstellen einer bereinigten, umgestuften Korngrößenverteilung für Basiserdstoffe mit Kiesanteil:
  - Ermitteln eines Korrekturfaktors  $K = \frac{100\%}{\text{Masseprozent } d > 4,75 \text{ mm}}$
  - Der Korrekturfaktor K wird mit den Masseanteil der einzelnen Kornfraktionen  $d < 4,75 \text{ mm}$  multipliziert
  - Zeichnen der umgestuften Kornverteilungslinie.
  - Mit der umgestuften Kornverteilungslinie weiter zu Punkt vier.
4. Einteilung des Basiserdstoffs in die nachfolgenden Bodengruppen:

Kategorie	M% feiner als 0,075 mm	Beschreibung
1	> 85	Feine Schluffe und Tone
2A	35 – 85	Schluffige und tonige Sande, sandige Tone, Ton, Schluff, Sand und Kies-Mischungen
4A	15 – 35	Schluffiger und lehmiger Sand und Kies
3	< 15	Sand und Kies

5. Um die Filterwirksamkeit zu sichern, wird der maximal zulässige Durchmesser  $D_{15,F}$  des Filters wie folgt ermittelt.

Kategorie	Filterkriterium
1	$D_{15,F} \leq 9 \cdot D_{85,B}$ (a)
2A	$D_{15,F} \leq 0,7 \text{ mm}$ (b)
3	$D_{15,F} \leq 4 \cdot D_{85,B}$
4A	$D_{15,F} \leq (35 - A)/(35 - 15) \cdot (4 \cdot D_{85,B} - 0,7 \text{ mm}) + 0,7 \text{ mm}$ (c)

(a)  $\leq 6 \cdot D_{85,B}$  für dispersive Böden. (b)  $\leq 0,5 \text{ mm}$  für dispersive Böden. (c) wenn  $4 \cdot d_{85,B}$  kleiner als  $0,7 \text{ mm}$  ist, wird  $0,7 \text{ mm}$  angesetzt.

6. Für die hydraulische Filterwirksamkeit wird der minimale Durchmesser  $D_{15,F}$  ermittelt. Die Anforderung wird am Basiserdstoff ohne vorherige Umstufung überprüft.

Kategorie	Kriterium
alle Kategorien	$\min D_{15,F} \geq 4 \cdot D_{15,B}$ ; Basiserdstoff ohne vorherige Umstufung; $D_{15,F}$ darf jedoch nicht kleiner als 0,1 mm; darüber hinaus dürfen nicht mehr als 2M% (maximal 5M%) der Feinteile kleiner als 0,075 mm sein; die Feinteile sollen nicht plastisch sein.

- Das zu bemessene Filterband wird zwischen den in Schritt 5 und 6 errechneten Korndurchmessern ermittelt. Es sollte möglichst eng gehalten werden, um Ausfallkörnungen zu vermeiden, aber weit genug, um die Herstellung zu ermöglichen. Daher wird die Ungleichförmigkeit des Körnungsbands mit  $U \leq 6$  vorgegeben. Die Breite des Filterbands sollte so ausgebildet sein, dass das Verhältnis des Maximal- zum Minimaldurchmesser bei einem gegebenen Durchgangswert von 60 % kleiner 5 ist.
- Um bei der Herstellung keine Entmischungerscheinungen zu erhalten, sollte bei maximal 2 m breiten Vertikalfilter bzw. 0,5 m dicken Horizontalfilter ein Maximalkorn des Filtermaterials mit 75 mm eingehalten werden. Für Filterzonen mit geringeren Abmessungen gelten Maximaldurchmesser von 37 bis 50 mm. Darüber hinaus ist auf das Verhältnis  $D_{90,F}/D_{10,F}$  zu achten. Unter der Annahme, dass  $U \leq 6$  gilt, kann  $D_{10,F}$  durch Division des minimalen  $D_{15,F}$  durch 1,2 ermittelt werden. Der zugehörige  $D_{90,F}$  lässt sich aus folgender Tabelle ablesen:

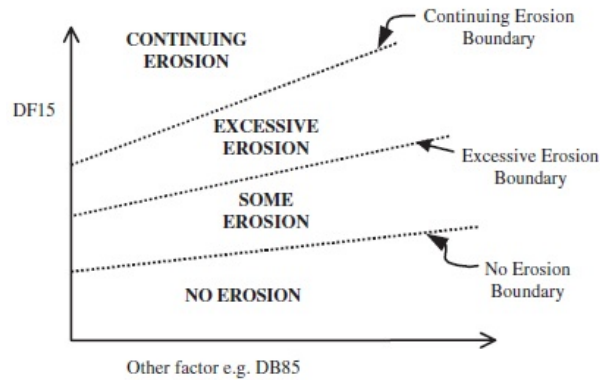
Kategorie	$D_{10,F}$ [mm]	maximales $D_{90,F}$ [mm]
	< 0,5	20
	0,5 - 1,0	25
Alle Kategorien	1,0 - 2,0	30
	2,0 - 5,0	40
	5,0 - 10	50
	> 10	60

Sandfilter, für die  $D_{90,F} < 20$  mm gilt, brauchen in der Regel keine Anpassung der Filterbandbreite. Generell gilt für gröbere Filter, die als Filter- und Drainagezonen wirken, sollte das Verhältnis  $D_{90,F}/D_{10,F}$  schnell mit steigendem  $D_{10,F}$  fallen.

- Verbinden der ermittelten Punkte der feinen und groben Seite des Filterbands. Das Filterband wird durch Extrapolation der Grenzpunkte vervollständigt. Danach können die restlichen, zu den Sieben passenden, Masseprozent ausgelesen werden.

Für Bemessungssituationen, in denen Filter nahe den zulässigen Grenzen in Erwägung gezogen werden, oder wenn Filter in einem existierenden Damm überprüft werden, empfehlen *Fell et al.* einen NEF-Test nach *Sherard und Dunnigan*. Dies ist besonders bei

feinkörnigen Böden zu empfehlen, wo die Trennung zwischen der *no erosion* und der *some erosion* Grenze klein ist und bei dispersiven Böden, wegen der begrenzten Menge an Tests, auf denen die Entwurfskriterien basieren. [8]



**Abbildung 3.9:** Erosionsgrenzen nach *Fell et al.* [8]

#### **Kriterium nach Kenney/Lau**

*Kenney und Lau* führten umfangreiche Tests an Filtern durch und entwickelten aus ihren Erkenntnissen ein Erosionskriterium. Es wird der Engstellendurchmesser  $D_C$  des Filters ermittelt. Das ist jener Durchmesser, der dem größten durch die Strömung transportierten Korn durch den Filter äquivalent ist. Sie fanden heraus, dass der Engstellendurchmesser hauptsächlich von der feinen Kornfraktion des Filters abhängt und nicht von der Form der Kornverteilung als Ganzes. [8]

Während der Versuche wurde die Versuchszelle leicht geschüttelt, um Vibrationen zu simulieren. Wie zu erwarten, hatte das wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei den Versuchen wurden hydraulische Gradienten von 3 bis 50 angesetzt.

$$D_C \leq 0,25 \cdot d_{5,F} \quad (3.17)$$

$$D_C \leq 0,20 \cdot d_{15,F} \quad (3.18)$$

Für kohäsionslose Basiserdstoffe empfehlen *Kenney und Lau* folgende Bedingung:

$$d_{5,F} < 4 \cdot d_{50,B} \quad (3.19)$$

$$d_{15,F} < 5 \cdot d_{50,B} \quad (3.20)$$

$D_C$	...	Engstellendurchmesser
$d_{5,F}$	...	Korngröße bei 5M% Siebdurchgang Filter
$d_{15,F}$	...	Korngröße bei 15M% Siebdurchgang Filter
$d_{50,B}$	...	Korngröße bei 50M% Siebdurchgang Basiserdstoff

Dieser Kriterium setzt voraus, dass die kohäsionslosen Basiserdstoffe und Filter eine Ungleichförmigkeit von  $U \leq 6$  aufweisen. Der größere der beiden errechneten Filter sollte zur Anwendung kommen. Wenn sich der Basiserdstoff nicht selbst filtert, wird nach *Kenney und Lau* die Prüfung der zulässigen Verlusts von Feinteilen notwendig.

Für kohäsive Basiserdstoffe schlagen sie die sinnvolle Wahl eines Engstellendurchmessers  $D_C$  vor, der den Filter nicht passieren darf. Für den gewählten Engstellendurchmesser sind die zugehörigen Formeln 3.17 und 3.18 anzuwenden. [8]

#### **Kriterium nach Locke/Indraratna**

Breit abgestuften Basiserdstoffen können sich nicht immer selbst filtern, da die Grobfraktion des Materials oft zu grob ist, um der Feinfraktion als Filter zu dienen. Wenn mit herkömmlichen Filterkriterien der Filter auf das grobe Material bemessen wird, besteht die Möglichkeit, dass die Feinteile des Basiserdstoffs erodieren, weil keine Selbstfiltration zustande kommt. [18]

Daher entwickelten *Locke und Indraratna* ein Filterkriterium für weitgestufte Basismaterialien. Sie bauen dabei auf dem Kriterium nach *Sherard und Dunnigan* auf. Bei Versuchen wurde festgestellt, dass das Kriterium nach *Sherard und Dunnigan* in den Bodengruppen 1 und 2 das Verhalten der untersuchten Proben nicht ausreichend genau beschreibt.

Daher wird eine neue Technik, die *reduced PSD method* (particle size distribution; reduzierte Korngrößenverteilung) eingeführt, um die sich selbst filternde stabile Kornfraktion eines breit abgestuften Basiserdstoffes zu bestimmen. [18]

Um diese sich selbst filternde Fraktion zu bestimmen, wird die Kornverteilungskurve an einem Punkt  $n$  geteilt und die zugehörigen Durchmesser  $d_{15,grob}$  und  $d_{85,fein}$  bestimmt.

$$d_{15,grob} = d_{n+0,15 \cdot (100-n)} \quad (3.21)$$

$$d_{85,fein} = d_{0,85 \cdot n} \quad (3.22)$$

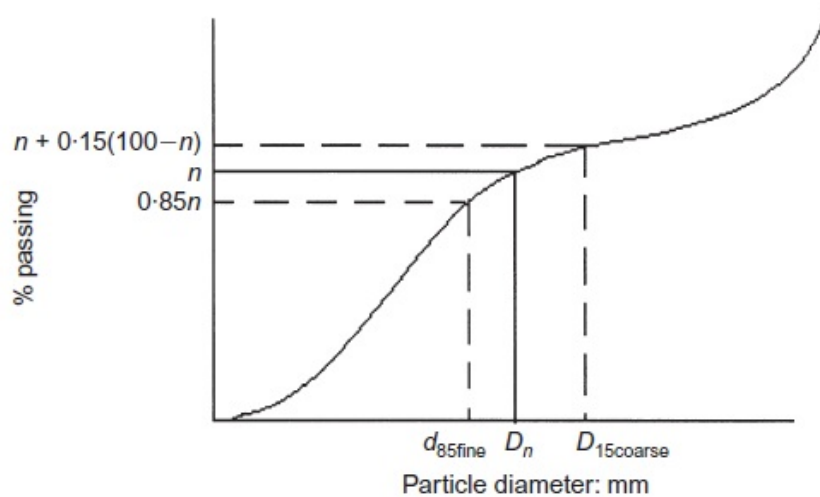


Abbildung 3.10: Methode zur Bestimmung der Selbstfiltration [18]

In [18] wird an dieser Stelle auf *Bertram* verwiesen, der sich unter der Anleitung von *Terzaghi* detailliert mit der Frage beschäftigte, bis wohin die Grobfraction in der Lage ist, den Feinanteil zu erhalten. Für einen effektiven Filter, welcher in der Lage ist, sich selbst zu filtern, wurde folgender konservativer Zusammenhang festgelegt:

$$\frac{d_{15,grob}}{d_{85,fein}} \leq 5 \quad (3.23)$$

Es wird jener Prozentsatz ermittelt, bei dem die Ungleichung 3.23 noch erfüllt ist und  $d_{15,grob}$  den größten Wert annimmt. Die reduzierte Korngrößenverteilung - nur unter der Berücksichtigung der Teilchen, die feiner als  $d_{15,grob}$  sind - definiert die stabile Eigenfilterfraktion des Bodens, auf die der Filter bemessen wird.

*Locke und Indraratna* geben an, dass das Kriterium nach *Sherard und Dunnigan* in den Bodengruppen 1 und 2 zu konservativ ist, da es den Einfluss der Plastizität feinkörniger Basiserdstoffe nicht berücksichtigt. Sie gehen davon aus, dass schluffige und tonige Partikel größere Flocken bilden und so gröbere Filter zulässig sind. Die Einteilung der Bodengruppen ändert sich dabei gegenüber *Sherard und Dunnigan* nicht.

Die überarbeiteten Entwurfsregeln ergeben sich zu:

1. Bodengruppe:

$$D_{15,Filter} \leq 12 \cdot d_{85,reduziert} \quad (3.24)$$

2. Bodengruppe:

$$D_{15,Filter} \leq 9 \cdot d_{85,reduziert} \text{ für } I_P > 10 \quad (3.25)$$

$$D_{15,Filter} \leq 4 \cdot d_{85,reduziert} \text{ für } I_P < 10 \quad (3.26)$$

Im Vergleich zum häufig verwendeten Kriterium nach *Sherard und Dunnigan* erlaubt dieses Kriterium oft gröbere Filter, wenn der Basiserdstoff selbstfilterstabil ist. Für breit abgestufte Materialien die in sich nicht stabil sind, ergeben sich aber deutlich feinere Filter. [18]

### 3.4.2 Hydraulische Kontakterosion

Die Einteilung der Kontakterosion erfolgt analog jener der Kontaktsuffosion (vergleiche dazu Kapitel 3.3 und Abbildung 3.3). Es wird hier die Strömungsrichtung des Wassers in Bezug zur Vertikalen und der Lage der Bodenschichten gesetzt.

Der Nachweis der hydraulischen Kontakterosion ist gegeben, wenn gilt: [6]

$$\eta_{KE,H} = \frac{i_{KE,krit}}{i_{I,vorh}} \geq 1,5 \quad (3.27)$$

- $\eta_{KE,H}$  ... hydraulische Kontakterosionssicherheit [–]
- $i_{KE,krit}$  ... kritischer hydraulischer Gradient im Basiserdstoff [–]
- $i_{I,vorh}$  ... vorhandener hydraulischer Gradient im Basiserdstoff [–]

#### 3.4.2.1 Typ 1/1, 1/3 und 3/1

Nach *Busch et al.* ist die Kontakterosionssicherheit nur dann gegeben, wenn das geometrische Erosionskriterium erfüllt ist. Eine Auswahl von geometrischen Kriterien ist in Tabelle 3.4 wiedergegeben. Vielfach wird für diese drei Typen der Kontakterosion auch  $i_{KE,krit} \approx 0$  gefordert. [6]

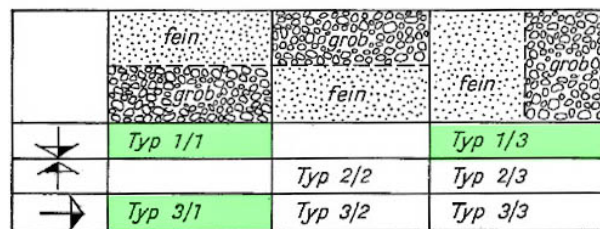


Abbildung 3.11: Grundtypen Kontakterosion 1/1, 1/3 und 3/1 [9]



### 3.4.2.2 Typ 2/2

Beim Typ 2/2 kann Kontakterosion dann eintreten, wenn das Eigengewicht des unter Auftrieb stehenden Bodens kleiner als die nach oben gerichtete Strömungskraft ist. Betrachtet man den Zusammenhang unabhängig von geometrischen Randbedingungen, so ergibt sich das kritische hydraulische Gefälle zu: [6]

$$i_{KE,krit} = \frac{(1 - n) \cdot (\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (3.28)$$

$\rho_s$  ... Trockendichte [ $g/cm^3$ ] bzw. [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_w$  ... Dichte Wasser [ $g/cm^3$ ] bzw. [ $kg/m^3$ ]


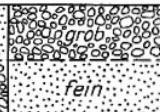




			
	Typ 1/1	Typ 2/2	Typ 1/3
		Typ 2/2	Typ 2/3
	Typ 3/1	Typ 3/2	Typ 3/3

Abbildung 3.12: Grundtypen Kontakterosion 2/2 [9]

Da es jedoch an der Kontaktstelle Basiserdstoff - Filter zu einer Einschnürung des Strömrohrenquerschnitts kommt, kann sich der hydraulische Gradient an dieser Stelle vergrößern. Wenn die Porosität des Basiserdstoffes zunimmt und die des Filtererdstoffes abnimmt, wächst diese Strömungskonzentration an der Kontaktfläche. [20]

Darüber hinaus wirken noch andere Einflussfaktoren auf die hydraulische Sicherheit. Einen wesentlichen Einfluss hat die Schichtdicke der betrachteten Erdstoffe. Durch eine ausreichende Schichtdicke des gröbereren Erdstoffes kann das Anheben des feineren Erdstoffes, bei vertikal nach oben gerichteter Strömung, vermieden werden. Ebenfalls von Bedeutung ist das Abstandsverhältnis des gröbereren zum feineren maßgebenden Porendurchmesser der Schichten. Die Größe der Spannungen im Basiserdstoff haben ebenfalls Einfluss. Ein Kriterium, das alle diese Effekte berücksichtigt existiert nicht. Ebenfalls bleiben bei den in Tabelle 3.5 aufgeführten Kriterien die Scherfestigkeit des Basiserdstoffes und dynamische Einflüsse unbeachtet. [20]

In Tabelle 3.5 sind die hydraulischen Erosionskriterien für Typ 2/2 zusammengestellt.

**Tabelle 3.5:** Kriterien für Typ 2/2

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Ovodov bzw. Ziems	basiert auf Gleichung Terzaghis für den hydraulischen Grundbruch	-
Izbaš *	kritische Porengeschwindigkeit setzt sich aus kleinst möglicher Geschwindigkeit, bei der Partikelbewegung eintritt und einer Funktion des Abstandsverhältnisses $d_F/d_B$ zusammen	lt. [20] physikalischer Sachverhalt falsch erfasst
Davidenkoff	Weiterentwicklung von Izbaš	für gleichförmige Erdstoffe
Zweck/Davidenkoff *	empirisch ermittelt in Abhängigkeit des Abstandsverhältnis $A_{50}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffs	Ziems vermutet, dass Zweck und Davidenkoff das Gefälle im Bruchzustand darstellen, anstatt des kritischen hydraulischen Gradienten [20]
Ziems	empirisch ermittelt auf Basis von Izbaš und Gesetz nach Darcy	für locker gelagerte, gleichförmige Erdstoffe mit kugelige Kornform
Wittmann *	basiert auf Versuchen, die zeigen dass der gemessene kritische hydraulische Gradient kleiner als der durch den Grundbruchnachweis von Terzaghi ermittelte ist	Modellvorstellung bei der Strömungskraft in zwei Komponenten aufgeteilt wird

---

\* Kriterium wird nicht ausgewertet und daher im Folgenden nicht näher beschrieben

#### **Kriterium nach Ovodov**

Der Effekt der Strömungskonzentration lässt sich nach *Ziems* durch einen Faktor  $\chi$  beschreiben. Nach *Ovodov* ergibt sich der kritische hydraulische Gradient zu: [20]

$$i_{KE,krit} = \chi \cdot \frac{(1-n) \cdot (\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (3.29)$$

$$\text{mit } \chi = 0,7 \text{ bis } 0,8$$

- $\chi$  ... Faktor der Stromröhrenkonzentration [–]  
 $\rho_s$  ... Trockendichte [ $g/cm^3$ ]  
 $\rho_w$  ... Dichte Wasser [ $g/cm^3$ ]

#### **Kriterium nach Davidenkoff**

Das Kriterium beruht auf den Untersuchungen von *Izbaš*, setzt darüber hinaus aber gleichförmige Erdstoffe ( $U \approx 1$ ) voraus.

$$i_{KE,krit} = 0,26 + \frac{260}{A_{60}^2} \quad (3.30)$$

$$\text{mit } A_{60} = \frac{d_{60,F}}{d_{60,B}}$$

- $A_{60}$  ... Abstandsverhältnis [–]  
 $d_{60,F}$  ... Korngröße bei 60M% Siebdurchgang Filter [ $mm$ ]  
 $d_{60,B}$  ... Korngröße bei 60M% Siebdurchgang Basiserdstoff [ $mm$ ]

#### **Kriterium nach Ziems**

Bei Versuchen fand *Ziems* heraus, dass das kritische hydraulische Gefälle bei abnehmender Korngröße des Basisstoffs stark ansteigt. Aus dieser Erkenntnis, der Vorarbeit von *Izbaš* und dem Gesetz von *Darcy* entwickelte er folgendes Kriterium: [20]

$$i_{KE,krit} = 0,66 + \frac{6}{d_{10,B}^2 \cdot A_{50}^2} \quad (3.31)$$

$$\text{mit } A_{50} = \frac{d_{50,F}}{d_{50,B}}$$

### 3. Grundlagen der Suffosion und Erosion

- $A_{50}$  ... Abstandsverhältnis [-]
- $d_{10,B}$  ... Korngröße bei 10M% Siebdurchgang Basiserdstoff [mm]
- $d_{50,F}$  ... Korngröße bei 50M% Siebdurchgang Filter [mm]
- $d_{50,B}$  ... Korngröße bei 50M% Siebdurchgang Basiserdstoff [mm]

Das Kriterium ist in Abbildung 3.13 grafisch dargestellt. Es gilt für Basiserdstoffe mit einer Ungleichförmigkeit von  $U \leq 5$ . Die Ungleichförmigkeitszahl des Filtererdstoffs ist beliebig, eine runde Kornform wird allerdings vorausgesetzt. [20]

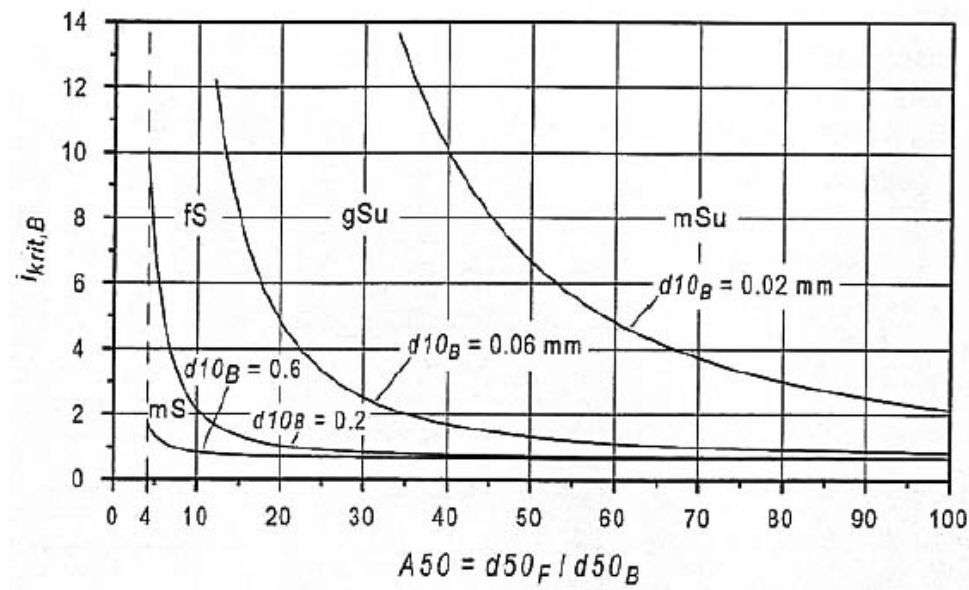


Abbildung 3.13: Kritischer hydraulischer Gradient nach Ziemss [25]

#### 3.4.2.3 Typ 3/2

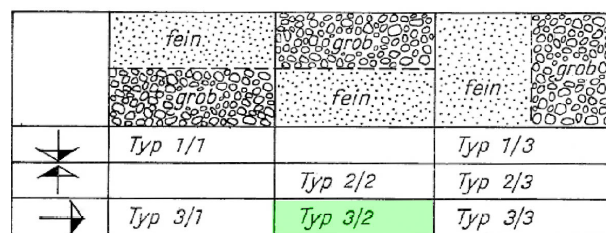


Abbildung 3.14: Grundtypen Kontakterosion 3/2 [9]

Nach Busch et al. werden für diesen Typ die gleichen allgemeinen Beziehungen wie für den Typ 2/2 benutzt. [6]

Im Gegensatz dazu gibt Muckenthaler eine Reihe von Kriterien an, die bei schichtenparalleler Durchströmung angewandt werden, um Aussagen über die Kontakterosionsicherheit

### 3. Grundlagen der Suffosion und Erosion

---

zu treffen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Erosion schon bei sehr niedrigen hydraulischen Gradienten einsetzt. Die angeführten Kriterien geben, im Gegensatz zu allen bisher erwähnten, den kritischen hydraulischen Gradienten bei Erosionsbeginn im Filterstoff an. [20]

In Tabelle 3.6 sind die hydraulischen Erosionskriterien für den Typ 3/2 zusammengestellt.

**Tabelle 3.6:** Kriterien für Typ 3/2

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Istomina	empirisch ermittelt; basiert auf Annahme, dass bei einer Sicherheit von 1,5 ein kritischer hydraulischer Gradient im Filtermaterial von 1,3 maßgebend ist	lt. [20] nur grobe Näherung
Graauw *	empirisch ermittelt; hydraulischer Gradient als Funktion der charakteristischen Basis-, Filtererdstoffgrößen und der Strömungsart	lt. [20] sehr kritisch, vor allem bei kleinen Abstandsverhältnissen
Brauns	basiert auf Erkenntnis, dass bei großem Abstandsverhältnis die Kontakterosion der äußeren Erosion ähnelt	-
Bakker *	wurde für niederländische Sande entwickelt	-
Bezuijen *	zur Bemessung wasserseitigen Deckwerks entwickelt	aus Diagramm abgelesener kritischer hydraulischer Gradient enthält noch keine Sicherheiten

\* Kriterium wird nicht ausgewertet und daher im Folgenden nicht näher beschrieben

### Kriterium nach Istomina

Das Kriterium basiert auf der Annahme, dass bei einer Sicherheit von 1,5 ein kritischer hydraulischer Gradient im Filtermaterial von 1,3 nicht überschritten werden darf. Daraus wird eine Grenzlinie zwischen filterfesten und nicht filterfesten Bereich ermittelt, die in Abbildung 3.15 ersichtlich ist. [20]

Die Eingangsgrößen sind das Abstandsverhältnis  $d_{50,F}/d_{50,B}$ , sowie der Quotient der Ungleichförmigkeit  $U_F/U_B$ .

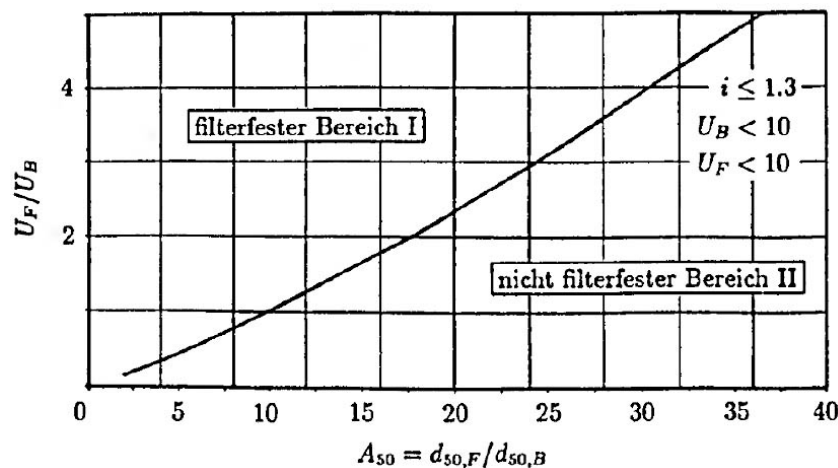


Abbildung 3.15: Dimensionierung eines Filters nach Istomina [20]

*Muckenthaler* merkt an, dass Auswertungen dieses Kriteriums von *Scherzinger* nur unzureichende Ergebnisse lieferten. Das Kriterium kann daher als Annäherung verwendet werden, die Realität lässt sich dadurch nicht im ausreichenden Maße abbilden. [20]

### Kriterium nach Brauns

*Brauns* teilt das Problem der schichtenparallelen Durchströmung in drei Fälle: [4]

- a) Die zu betrachtenden Schichten sind gegeneinander filterstabil. Hier kann aufgrund geometrischer Randbedingungen keine Erosion stattfinden. Zur Feststellung der Filterstabilität eignen sich die geometrischen Erosionskriterien.
- b) Die betrachteten Schichten weisen große Abstandsverhältnisse aus. Das Basismaterial kann sich im Filter bewegen. Die hydraulischen Bedingungen werden maßgebend (ähnlich der äußeren Erosion).
- c) Im Grenzbereich zwischen den oben genannten Punkten herrscht eine Kombination aus Einflüssen. Sind die haltenden Kräfte erstmal überwunden, kann sich das Basismaterial bewegen, bis es die geometrischen Randbedingungen nicht mehr zulassen.

Zur Beurteilung, welcher der Fälle vorliegt, führt *Brauns* die Abstandskennzahl  $\kappa$  ein.

$$\kappa = n_F \cdot \frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \quad (3.32)$$

$\kappa$	...	Abstandskennzahl [-]
$d_{15,F}$	...	Korngröße bei 15M% Siebdurchgang Filter [mm]
$d_{85,B}$	...	Korngröße bei 85M% Siebdurchgang Basiserdstoff [mm]

- a)  $\kappa \leq 3$   
geometrische Erosionsstabilität gegeben
- b)  $\kappa \geq 10$   
hydraulische Bedingungen maßgebend
- c)  $3 < \kappa < 10$   
Übergangsbereich ohne eindeutiges Kriterium, da hier die gegenläufigen geometrischen und hydraulischen Einflüsse zu einer Streuung führen

*Brauns* leitet die kritische Kontakterosionsgeschwindigkeit wie folgt her: [4]

$$v_{F,krit} = Fr_{krit}^* \cdot n_F \cdot \sqrt{\frac{\gamma'_S \cdot d_{50,B}}{\rho_W}} \quad (3.33)$$

$$\text{mit } Fr_{krit}^* = 0,65 \text{ bis } 0,70$$

$v_{F,krit}$	...	kritische Filtergeschwindigkeit
$Fr_{krit}^*$	...	Froude-Zahl
$n_F$	...	Porenanteil Filter
$\gamma'_S$	...	Auftriebswichte Basiserdstoff
$d_{50,B}$	...	Korngröße bei 50M% Siebdurchgang Basiserdstoff
$\rho_W$	...	Dichte Wasser

Mit der bekannten kritischen Filtergeschwindigkeit kann über das Widerstandsgesetz nach *Darcy* das kritische hydraulische Gefälle bestimmt werden. Das gilt zumindest bei gleichförmigen Basis- und Filtererdstoffen.

Für grobkörnigere Schichten greift *Brauns* auf Überlegungen von *Wittmann* zurück. Der lineare Zusammenhang zwischen hydraulischem Gefälle, Filtergeschwindigkeit und Durchlässigkeit gilt hier nicht mehr uneingeschränkt. [4]

$$i = a \cdot v_F + b \cdot v_F^2 \quad (3.34)$$

$$a = \frac{1}{k} = \frac{270(1 - n_F)^2 \cdot \eta}{n_F^3 \cdot \gamma_W \cdot d_W^2} \quad (3.35)$$

$$b = \frac{\lambda_V}{2 \cdot n_F^2 \cdot T^2 \cdot g \cdot d_W} \quad (3.36)$$

$$d_W = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta p_{mi}}{d_i}} \quad (3.37)$$

- $k$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [ $m/s$ ]
- $\eta$  ... dynamische Zähigkeit Wasser [ $Ns/m^2$ ]
- $n_F$  ... Porenanteil Filter [-]
- $\gamma_W$  ... Wichte Wasser [ $N/m^2$ ]
- $d_W$  ... wirksame Korngröße [ $mm$ ]
- $\lambda_V$  ... mittlerer Verlustbeiwert ( $\approx 4$ ) [-]
- $T$  ... Tortuosität der Porenkanäle ( $\approx 0,65$ ) [-]
- $g$  ... Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
- $d_i$  ... kennzeichnende Korngröße der  $i$ -ten Kornklasse [ $mm$ ]
- $\Delta p_{mi}$  ... Massenprozent der  $i$ -ten Kornklasse [ $mm$ ]

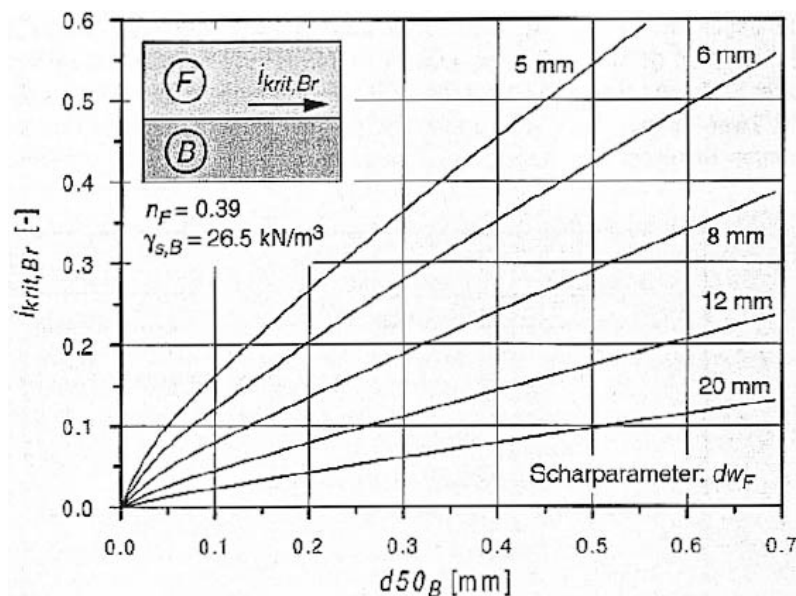


Abbildung 3.16: Kritischer hydraulischer Gradient nach Brauns [25]

Der wirksame Korndurchmesser kann bei kleinen Ungleichförmigkeiten mit  $d_W = d_{50}$  angenommen werden.



*Brauns* führt die oben genannten Gleichungen zusammen und formuliert daraus ein Kriterium für den nicht erosionsstabilen Bereich. Er nimmt dabei die Froude-Zahl auf der sicheren Seite mit  $Fr_{krit}^* \approx 0,65$  an.

Das Filterkriterium nach *Brauns* ist in Abbildung 3.16 für typische Bodenkennwerte grafisch dargestellt.

#### 3.4.2.4 Typ 2/3, 3/3

Dieser Typ der Kontakterosion trifft im vorliegenden Beispiel nicht zu und wird daher auch nicht gesondert ausgewertet. Eine Übersicht der Kriterien ist in Tabelle 3.7 gegeben. Für eine detailliertere Beschreibung wird an dieser Stelle auf [9] verwiesen.

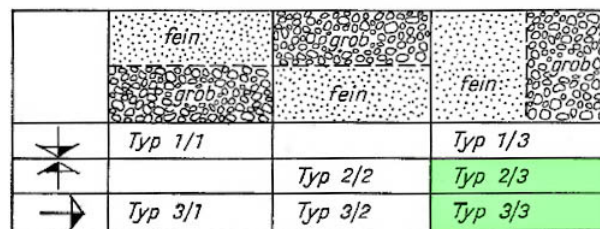


Abbildung 3.17: Grundtypen Kontakterosion 2/3 und 3/3 [9]

Tabelle 3.7: Kriterien für Typ 2/3 und 3/3

Kriterium	Annahme	Bemerkung
Zweck/Davidenkoff *	empirisch ermittelt in Abhängigkeit des Abstandsverhältnis $A_{50}$ und der absoluten Korngröße des Basiserdstoffs	-
Muckenthaler *	beruht auf mehreren erweiterten phänomenologischen Ansätzen zur hydrodynamischen Bodendeformation	geometrische Effekte haben großen Einfluss

\* Kriterium wird nicht ausgewertet und daher im Folgenden nicht näher beschrieben

# Kapitel 4

## Numerisches Modell

Ziel der numerischen Modellierung ist es, ein Modell für die Strömungsberechnung zu finden, dass die vorhandenen Bedingungen hinreichend genau beschreibt. Wie bereits im Kapitel 1 beschrieben, wird hierfür die Unterströmung des Erddammes Eberlaste als Grundlage herangezogen. Ausgehend von den geologischen Aufschlüssen wird ein numerisches Modell entworfen welches in weiterer Folge mit den Messergebnissen verglichen wird.

Für die Simulation kam das Finite-Elemente-Programm *PLAXIS 2D* in der Version 2015.01 zur Anwendung. Bei *PLAXIS 2D* handelt sich um ein zweidimensionales Finite-Elemente-Programm, entwickelt für die Analyse von Verformungen, Stabilitätsbetrachtungen und Grundwasserströmungen in der Geotechnik. Die Entwicklung begann 1987 an der *Delft University of Technology*, um die Stabilität von Uferdämmen in den Niederlanden zu beurteilen. In den folgenden Jahren wurde *PLAXIS* so weiter entwickelt, dass es für alle Bereiche der Geomechanik einsetzbar ist.

Die Eingabe erfolgt über eine konventionelle grafische Benutzeroberfläche, welche die genaue geometrische Modellierung ermöglicht. Von der Geometrie ausgehend kann, über den automatischen Netzgenerator, ein Netz aus 6-Knoten- oder 15-Knoten-Dreieckselementen erstellt werden. Die Feinheit ist dabei global und lokal entlang von Elementen variierbar. Die Konstruktion von in geotechnischen Projekten oft vorkommenden Elementen, wie zum Beispiel Ankern, Wänden, Platten und Geokunststoffen, ist ebenfalls möglich.

In *PLAXIS* sind eine Vielzahl von Stoffgesetzen implementiert. Die meisten davon kommen bei Verformungsberechnungen in der Geotechnik zur Anwendung und werden daher hier nicht weiter ausgeführt. Für die durchgeführte Simulation wurde das Strömungsmodul genutzt, dessen Grundlagen nachfolgend beschrieben werden.

### 4.1 Theoretische Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die theoretischen Hintergründe der Grundwasserströmung ausgeführt.

### 4.1.1 Grundwasserströmung

Die Grundwasserströmung wird grundlegend über die *Bernoulli Gleichung* beschrieben. Sie gibt wieder, das Wasser von Orten höherer Energie zu jenen niedriger Energie strömt. [13]

$$h = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} h & \dots \text{hydraulische Höhe [m]} \\ z & \dots \text{geodätische Höhe [m]} \\ p/\gamma & \dots \text{Druckhöhe [m]} \\ v^2/(2 \cdot g) & \dots \text{Geschwindigkeitshöhe [m]} \end{aligned}$$

Bei Grundwasserströmungen ist die Geschwindigkeit  $v$  im Allgemeinen sehr klein, daher kann der Term der Geschwindigkeitshöhe in Gleichung 4.1 vernachlässigt werden und man erhält: [13]

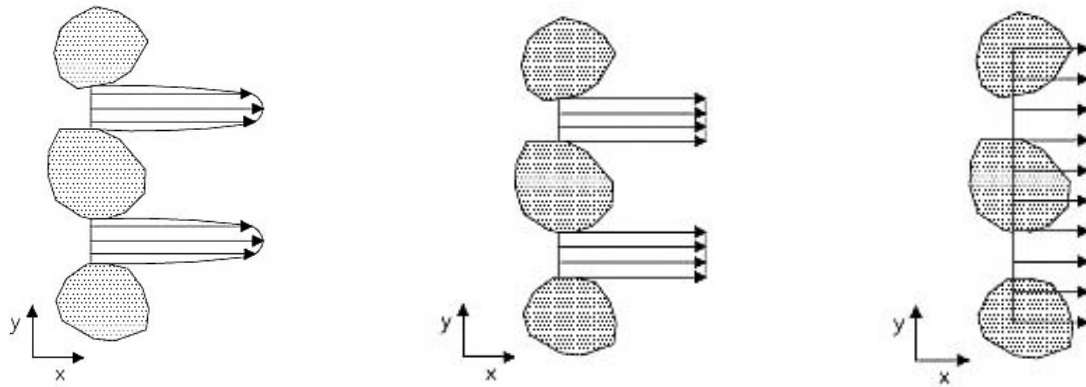
$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (4.2)$$

In diesem Zusammenhang ist der Begriff *Geschwindigkeit* näher zu definieren. Bei Grundwasserströmungen unterscheidet man zwischen der tatsächlichen Geschwindigkeit  $\hat{v}^f$ , der über den Porenraum gemittelten Geschwindigkeit  $v^f$  und der Filtergeschwindigkeit  $v$ . Die Geschwindigkeit  $v^f$  gibt an, welche Länge ein Wasserpartikel in einer Zeiteinheit zurück legt, sie wird deshalb auch als Abstandsgeschwindigkeit bezeichnet. Die Filtergeschwindigkeit  $v$  gibt an, welches Wasservolumen pro Zeiteinheit (Durchfluss) pro Flächeneinheit den Boden durchfließt. Bei Grundwasserströmungen ist meist der Durchfluss von entscheidender Bedeutung, deshalb wird mit der Filtergeschwindigkeit  $v$  gearbeitet. [13]

Die Abstandsgeschwindigkeit  $v^f$  kann näherungsweise durch die Filtergeschwindigkeit und die Porosität berechnet werden: [33]

$$v^f = \frac{v}{n} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} v^f & \dots \text{Abstandsgeschwindigkeit [m/s]} \\ v & \dots \text{Filtergeschwindigkeit [m/s]} \\ n & \dots \text{Porosität [-]} \end{aligned}$$



(a) Verteilung der tatsächlichen Geschwindigkeit  $\hat{v}^f$

(b) Über Porenraum gemittelte Geschwindigkeit  $v^f$

(c) Filtergeschwindigkeit  $v$

**Abbildung 4.1:** Geschwindigkeitsverteilung Grundwasserströmung [13]

### 4.1.2 Darcy'sches Filtergesetz

Das Filtergesetz nach *Darcy* bildet die Grundlage für die Beurteilung von Grundwasserströmungen im Boden. Das Gesetz besagt, dass die durch einen Filterquerschnitt  $A$  fließende Wassermenge  $Q$  proportional zu dem Druckgefälle, der Filterfläche und der Durchlässigkeit des Filters ist. Dieser Zusammenhang lässt sich wie folgt darstellen: [13]

$$Q = k_f \cdot \frac{\Delta h}{l} \cdot A \quad (4.4)$$

- $Q$  ... durchfließende Wassermenge [ $m^3/s$ ]
- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [ $m/s$ ]
- $\Delta h$  ... Druckhöhendifferenz [ $m$ ]
- $l$  ... Fließlänge [ $m$ ]
- $A$  ... Filterquerschnitt [ $m^2$ ]

Die Versuchsanordnung nach *Darcy* ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die dimensionslose Größe  $\frac{\Delta h}{l}$  wird als hydraulisches Gefälle bzw. hydraulischer Gradient bezeichnet. Das Gesetz von *Darcy* vereinfacht sich somit zu:

$$v = k_f \cdot i \quad (4.5)$$

- $v$  ... Filtergeschwindigkeit nach *Darcy* [ $m/s$ ]
- $i = \frac{\Delta h}{l}$  ... hydraulisches Gefälle [-]

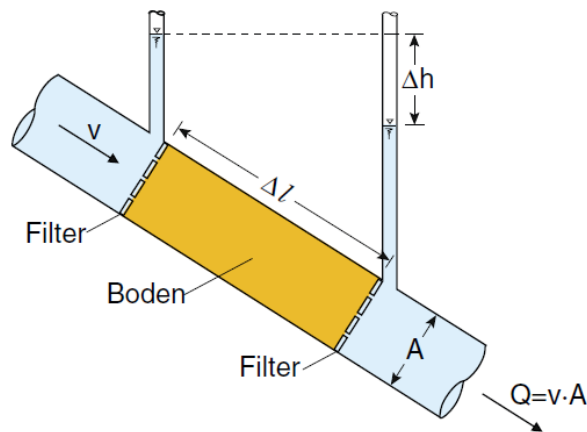


Abbildung 4.2: Versuchsanordnung nach Darcy [13]

Der Filterquerschnitt besteht aus den Bodenpartikeln (Feststoffvolumen) und dem Porenvolumen dazwischen. Die Filtergeschwindigkeit nach Gleichung 4.5 stellt somit einen fiktiven Mittelwert aus Feststoffen und Poren dar, da das Wasser nur durch das Porenvolumen fließt. [1]

Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  ist ein Maß für die Durchlässigkeit des Bodens und ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit, insbesondere von Größe, Form sowie Lagerung der Bodenpartikel. Geringe Werte von  $k_f$  lassen auf eine geringe Durchlässigkeit schließen. Darüber hinaus besteht auch eine Abhängigkeit zur Viskosität des durch die Poren strömenden Fluids. Diese wird als Permeabilitätskoeffizient oder als spezifische Permeabilität bezeichnet. [33]

$$\kappa = \frac{\mu \cdot k_f}{\rho \cdot g} \quad (4.6)$$

- $\kappa$  ... spezifische Permeabilität [ $m^2$ ]
- $\mu$  ... Viskosität des Fluids [ $kg/(m \cdot s)$ ]
- $k_f$  ... Durchlässigkeitsbeiwert [ $m/s$ ]
- $\rho$  ... Dichte des Fluids [ $kg/m^3$ ]
- $g$  ... Erdbeschleunigung [ $m/s$ ]

Das *Darcy'sche Gesetz* besitzt jedoch nur unter folgenden Einschränkungen Gültigkeit: [13]

- Der Boden ist voll gesättigt.
- Der Boden ist isotrop, die Durchlässigkeit ist in alle Raumrichtungen gleich.
- Es handelt sich um eine laminare Strömung.
- Die Bodenpartikel befinden sich in Ruhe.

- Bei stark tonhaltigen Böden können die Haltekräfte zwischen den einzelnen Bodenpartikeln nicht vernachlässigt werden. Die Grundwasserströmung setzt erst bei Überwindung eines gewissen hydraulischen Gradienten ein.

Das Gesetz von *Darcy* lässt sich auch dreidimensional anschreiben. Das wird notwendig, um die in der Realität vorhandenen Strömungsverhältnisse zu berücksichtigen. Die Durchlässigkeit ist in der Natur oft vom Ort und der Richtung abhängig. Das wird auch als anisotrope Durchlässigkeit bezeichnet. Das allgemeine Geschwindigkeitsfeld der Filterströmung für die Hauptrichtungen der Durchlässigkeit ergibt sich zu: [33]

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Stellt man Gleichung 4.7 für isotrope Verhältnisse in Komponentenschreibweise dar, ergibt sich:

$$v_x = -k_f \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.8)$$

$$v_y = -k_f \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.9)$$

$$v_z = -k_f \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.10)$$

### 4.1.3 Kontinuitätsgleichung

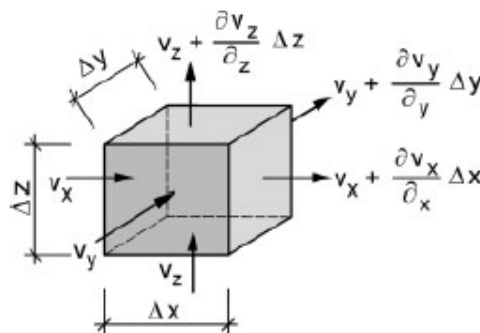


Abbildung 4.3: Zu- und Abflüsse im Kontrollvolumen [33]

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt den Massenerhalt in einem Kontrollvolumen. Liegt eine stationäre Strömung vor, bedeutet das, dass die Strömungsverhältnisse innerhalb eines betrachteten Bereichs zeitunabhängig sind. Die Kontinuitätsgleichung beschreibt diesen Zusammenhang dadurch, dass sich die Zu- und Abflüsse im wassergesättigten Kontrollvolumen als gleich groß darstellen. [33]

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.11)$$

Ändert sich mit der Zeit die Grundwasserpotenzialverteilung und/oder die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des betrachteten Bereichs, handelt es sich um eine instationäre Strömung. Die Gleichung erweitert sich hier um die Zeitabhängigkeit. Das geschieht in Form eines im Kontrollvolumen gespeicherten spezifischen Speicherkoeffizienten. Die Kontinuitätsgleichung stellt sich für instationäre, wassergesättigte Verhältnisse wie folgt dar: [33]

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.12)$$

#### 4.1.4 Strömungsgleichung

Als Strömungsgleichung wird die Verknüpfung der Gleichung nach *Darcy* mit der Kontinuitätsgleichung bezeichnet. Für die Annahme von isotropen Durchlässigkeitsverhältnissen und stationärer Strömung ergibt sich die Strömungsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.13)$$

Die Gleichung 4.13 wird in der Literatur auch als Laplace-Gleichung bezeichnet. Sie beschreibt das ortsabhängige hydraulische Potenzial im dreidimensionalen Strömungsfeld. [33]

Für instationäre Verhältnisse ergibt sich die Strömungsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{k_f} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.14)$$

Gleichung 4.14 wird auch als Diffusionsgleichung bezeichnet. Mit ihr wird das hydraulische Potenzial orts- und zeitabhängig im Strömungsfeld beschrieben. [33]

#### 4.1.5 Randbedingungen

In Tabelle 4.1 sind die im PLAXIS 2D Strömungsmodul möglichen Randbedingungen zusammengestellt. [5]

**Tabelle 4.1:** Übersicht der möglichen Randbedingungen

Randbedingung	Bemerkung
Geschlossen	Durchflussmenge wird mit Null festgelegt
Zufluss	Randbedingung erlaubt einen fixen Zufluss vorzuschreiben
Abfluss	stellt das Gegenteil des Zuflusses dar, es wird ein fixer Abfluss definiert
Festpotenzial	Vorgabe einer festen Potenzialhöhe
Infiltration	-
Versickerung	-
Infiltrationsbrunnen	-
Extraktionsbrunnen	-
Drain	-

## 4.2 Modellbeschreibung

Wie in Kapitel 4 beschrieben, erfolgt die Simulation mit *PLAXIS 2D*. Nachfolgend findet sich eine Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Modells, der gewählten Eingangswerte, eine Beschreibung des Ablaufs der Simulation und der daraus resultierenden Ergebnisse.

### 4.2.1 Vorgangsweise

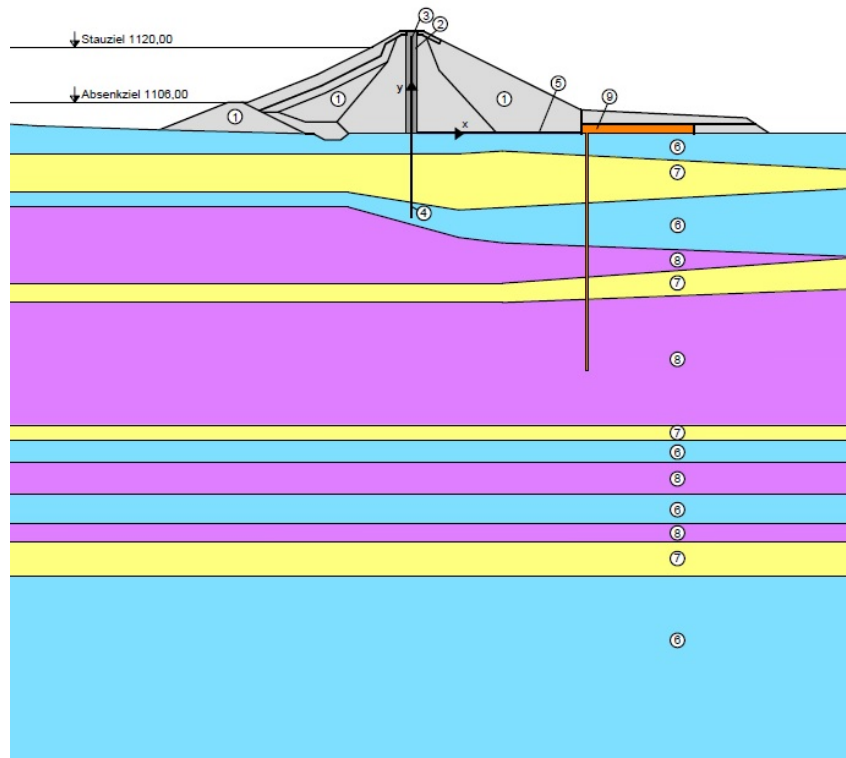
Als Grundlage des Modells wurde ein Schnitt durch den Damm gewählt, der in Abbildung 4.4 dargestellt ist. Dieser wurde so platziert, dass er durch einen Entspannungsbrunnen im Bereich der seichten Schlitzwand (vergleiche Kapitel 2) geht. Darüber hinaus wurde darauf bedacht genommen, möglichst viele Informationen aus den geologischen Aufschlüssen zur Verfügung zu haben. Als letzter wichtiger Punkt der Schnittwahl wurde auf die Situierung der Messstellen Rücksicht genommen, um in weiterer Folge die Ergebnisse mit den Messwerten abgleichen zu können.

Das numerische Modell besteht aus einem 26 m hohen und 156 m langen zweidimensionalen Dammkörper. Dieser gründet auf einem, im Modell mit 180 m Höhe und 1500 m Länge definierten, Untergrund aus drei Schichten. Die Schichten wurden nahe an der Geologie des vorliegenden Beispiels angenommen, es wird in weiterer Folge zwischen Schluff, Sand und Kies unterschieden.

In der Mitte des Dammes ist ein Dichtkörper, in Form einer innen liegenden Asphaltbetonkerndichtung, angeordnet. Die Dichtebene wird im Untergrund durch eine 21,5 m tiefe Schlitzwand weitergeführt. Diese beiden Dichtungselemente werden im Modell mit Hilfe von zwei starren aneinander gekoppelten Platten simuliert. Um die Interaktion zwischen diesen und dem darum liegenden Boden zu modellieren, werden im *PLAXIS* vorgesetzte







**Abbildung 4.5:** Genereller Modellaufbau

Die Simulation erfolgt als *plane strain Model* mit 15-Knoten-Dreieckselementen. Die globale Netzfeinheit wird, um die sonst zu lange Rechenzeit zu vermeiden, im mittleren Bereich gewählt. Entlang wichtiger Strukturen - wie zum Beispiel der Schichtgrenzen hinter der Schlitzwand, der Dammaufstandsfläche und dem Entspannungsbrunnen - wird das Netz lokal verfeinert. Insgesamt beinhaltet das Modell 11.825 Elemente mit 95.155 Knoten, die mittlere Elementgröße liegt dabei bei 5,11 m.

Um die sich aufgrund des Aufstauens einstellende Durchströmung zu berechnen, werden 15 Berechnungsphasen gewählt. Diese können in folgende fünf Abschnitte gegliedert werden:

- Herstellung Damm, Dichtung und Entspannungsbrunnen (Phasen: 1-5)
- Nil Step (Phase: 6)
- Teilstau (Phase: 7)
- Aufstau (Phase: 8-14)
- Vollstau (Phase: 15)

Im ersten Berechnungsschritt erfolgt der Aufbau des Modells. Zuerst wird der Untergrund, in Form der Bodenschichten, aktiviert. Anschließend wird, dem üblichen Bauablauf entsprechend, die Schlitzwand als Dichtungselement im Boden hergestellt. Darauf wird der Damm mit der Asphaltbetondichtung errichtet. Der Entspannungsbrunnen wird abgeteuft.

Daraufhin erfolgt ein so genannter *Nil Step*. Dieser ist für die Berechnung der Durchströmung entscheidend, da hier die durch die Lastaufbringung des ersten Berechnungsschrittes entstehenden Spannungen abgebaut werden. Auch werden hier die Deformationen auf Null gesetzt, da diese für die Modellierung der Durchströmung nicht weiter von Interesse sind. Während dieser zwei Berechnungsabschnitte wird der Wasserspiegel konstant 2 m unter der Geländeoberfläche gehalten.

Der dritten Berechnungsschritt dient dazu, die Wasserlast von dem eben erwähnten Stauspiegel (2 m unter der Geländeoberfläche) auf jenen des Teilstaus zu erhöhen. Im vierten Abschnitt wird die Wasserlast jeweils um 2 m erhöht, bis sie im letzten Schritt den Vollstau von 1120 m erreicht.

### 4.2.2 Eingangswerte und Randbedingungen

In Tabelle 4.2 sind die grundlegenden Parameter der Dammkonstruktion dargestellt. Tabelle 4.3 zeigt die wesentlichen Eingangswerte des Untergrunds. Die Kennwerte der einzelnen Bodenschichten wurden aus der Literatur zum Damm Eberlaste entnommen. Wenn keine Parameter vorhanden waren, wurden die Schichten mit üblichen Werten nach [1] abgeschätzt.

**Tabelle 4.2:** Kennwerte Dammkonstruktion

Parameter	Stützkörper	Kerndichtung	Bitukies	Einheit
$\gamma$	16,0	16,0	21,0	$[kN/m^3]$
$\gamma_{ges}$	20,0	18,00	22,0	$[kN/m^3]$
$E$	20.000	1.500	100.000	$[kN/m^2]$
$\nu$	0,33	0,35	0,35	$[-]$
$c$	5,0	$[-]$	1,0	$[kN/m^2]$
$\varphi$	31,0	$[-]$	35,0	$[^\circ]$
$k_x$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$[m/s]$
$k_y$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$[m/s]$

Das *linear-elastische Modell* wurde in der Simulation zur Beschreibung der Asphaltbetondichtung und der Schlitzwand herangezogen. Für die Beschreibung des Bodens wird das *Mohr-Coulomb Modell* verwendet. Da das Hauptaugenmerk der Simulation auf der Berechnung der Durchströmung liegt, werden die Setzungen des Dammes nicht eingehend betrachtet, womit das Verwenden eines weiterführenden Stoffgesetzes hier nicht notwendig erscheint.

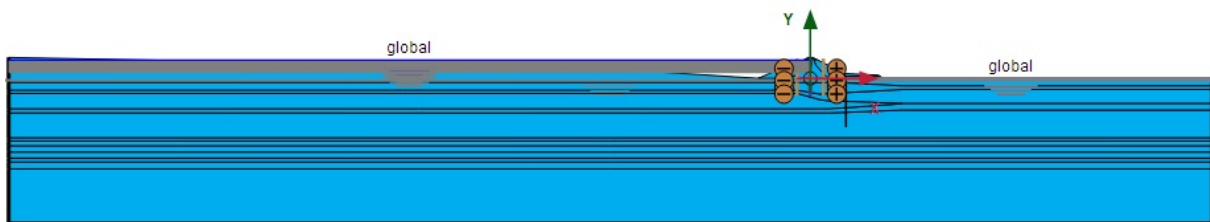
Die Definition des globalen Koordinatensystems ist Abbildung 4.5 zu entnehmen. Die Durchlässigkeit der jeweiligen Schichten wurde für die Modellierung in x- und y-Richtung gleich groß gewählt. Das stellt eine Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar.

**Tabelle 4.3:** Rechenkennwerte für den Untergrund

Parameter	Schluff	Sand	Kies	Brunnen bzw. Filter	Einheit
$\gamma$	17,98	18,90	19,88	21,00	$[kN/m^3]$
$\gamma_{ges}$	21,38	21,90	22,40	24,00	$[kN/m^3]$
$E$	20.000	80.000	100.000	100.000	$[kN/m^2]$
$\nu$	0,35	0,35	0,35	0,35	$[-]$
$c$	15,0	1,0	1,0	1,0	$[kN/m^2]$
$\varphi$	27,0	32,0	35,0	35,0	$[^\circ]$
$k_x$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$[m/s]$
$k_y$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$[m/s]$
$n$	0,35	0,30	0,25	0,30	$[-]$
$e$	0,538	0,429	0,333	0,430	$[-]$
$\rho_s$	2,75	2,70	2,65	3,00	$[g/cm^3]$
$\rho_d$	1,79	1,89	1,99	2,10	$[g/cm^3]$
$\rho_{sat}$	2,14	2,19	2,24	2,40	$[g/cm^3]$

Der linke und der untere Modellrand wurden mit geschlossenen Randbedingungen definiert. In Abbildung 4.6 ist das durch die schwarzen Linien ersichtlich. Über diese Ränder erfolgt kein Zufluss zum Modell.

Die Bodenschichten und der Dammkörper wurden als durchlässige Schichten - mit den in Tabelle 4.3 ersichtlichen Werten - definiert, während die Spundwand und die Dichtung als undurchlässig angesetzt wurden. Die Wasserlast wird auf das Modell über die unterschiedlichen Stauspiegel in den einzelnen Berechnungsphasen aufgebracht.



**Abbildung 4.6:** Randbedingungen Modell

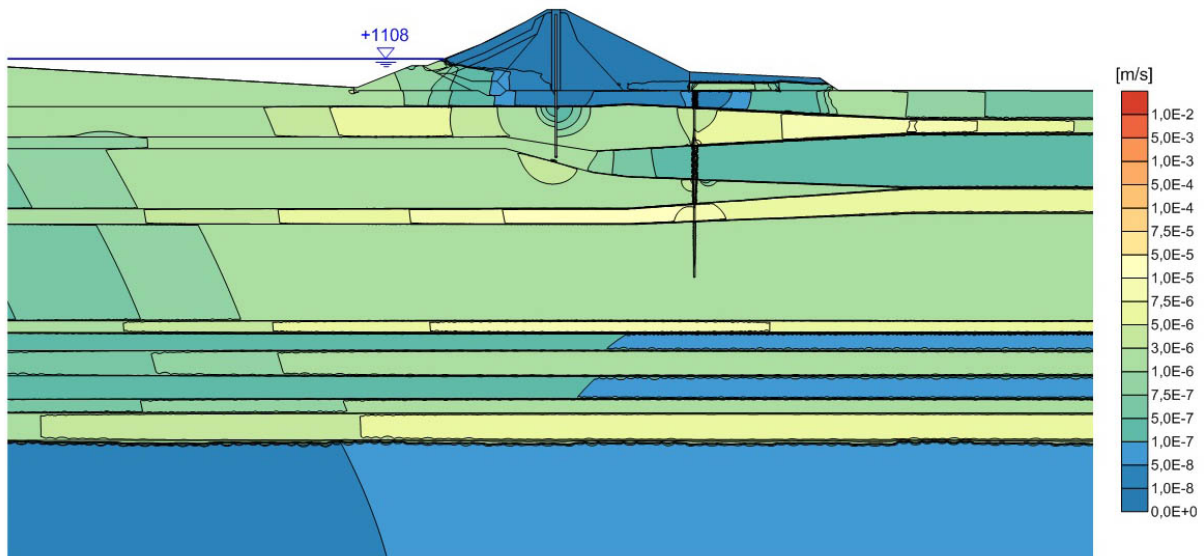
## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Grundwasserströmung

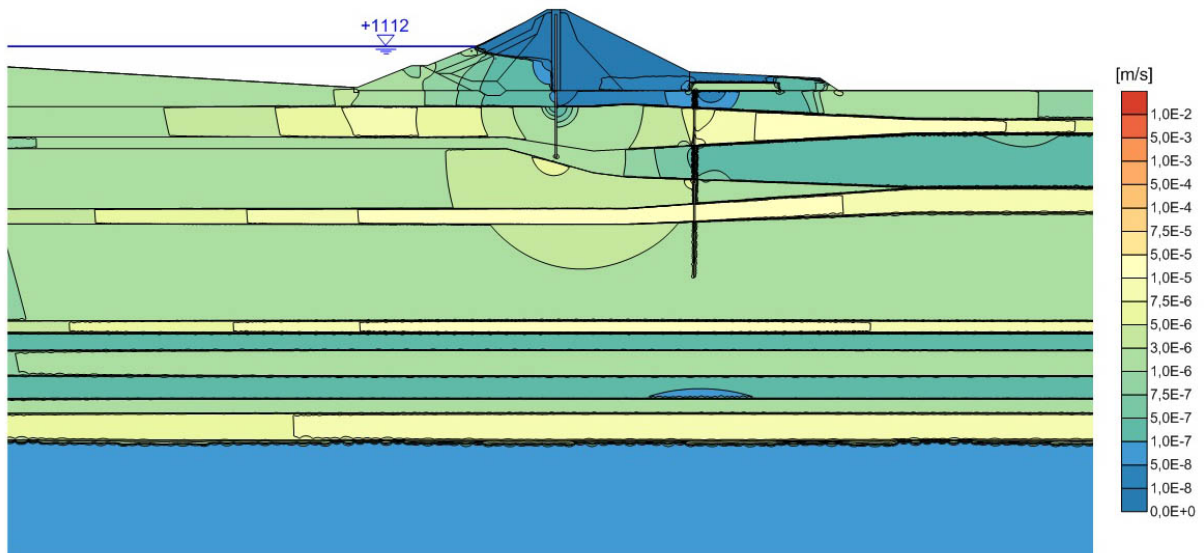
In den Abbildungen 4.7 bis 4.10 sind die sich aus der numerischen Simulation abgeleitete Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Differenz zwischen den Stauspiegeln beträgt hier jeweils 4 m. Es wird ersichtlich, wie sich die Strömung mit zunehmender Stauhöhe

#### 4. Numerisches Modell

im Untergrund ausbreitet. Auch der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten in den einzelnen Schichten und die Umströmung der Schlitzwand sind deutlich zu erkennen. Die Abbildungen 4.11 bis 4.14 zeigen ebenfalls die Strömungsgeschwindigkeiten, allerdings in Vektordarstellung. Hier gehen die Strömungsrichtungen noch deutlicher hervor.



**Abbildung 4.7:** Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1108 m



**Abbildung 4.8:** Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1112 m

Die Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Modell ergeben sich zu den in Tabelle 4.4 ersichtlichen Werten. Hierbei handelt es sich nicht um die globalen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, sondern um jene, die im in weiterer Folge betrachteten Querschnitt des Bodenaufschlusses E10 auftreten. Diese Geschwindigkeiten wurden für die hydraulische Auswertung der Suffosions- und Erosionskriterien im Kapitel 5 herangezogen.

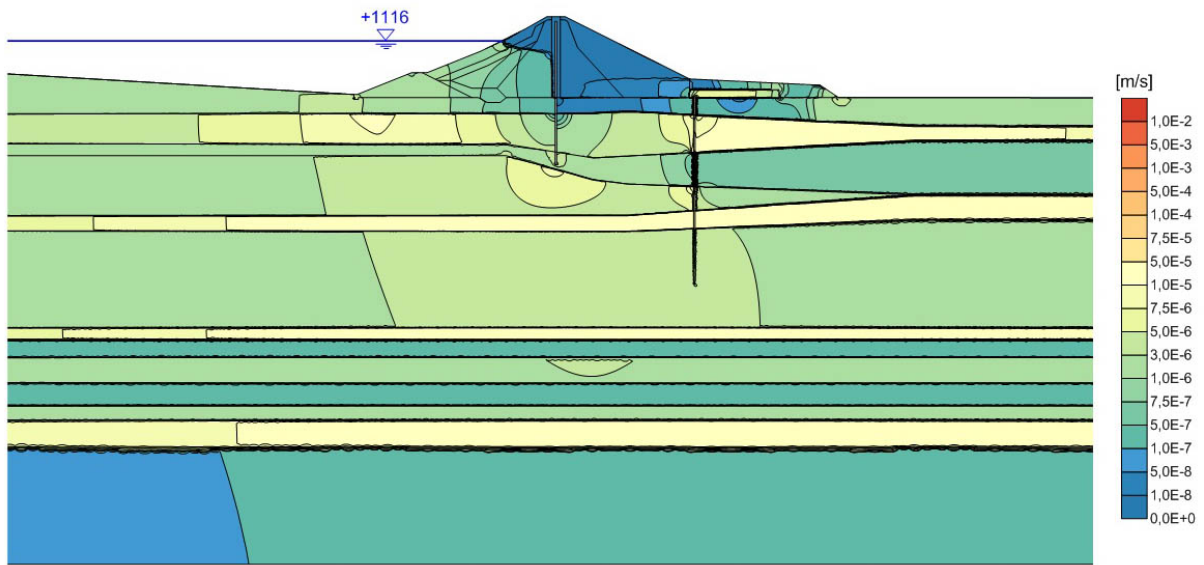


Abbildung 4.9: Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1116 m

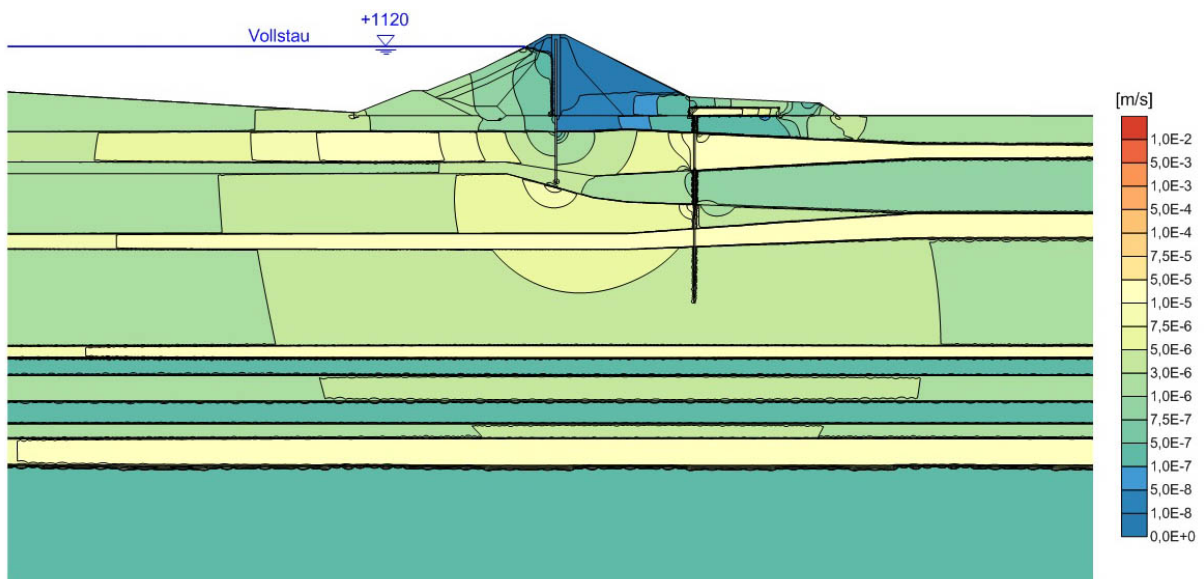


Abbildung 4.10: Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1120m

Tabelle 4.4: Maximalwerte der Strömungsgeschwindigkeiten in Anhängigkeit der Bodenart

	$q_x$ [m/s]	$q_y$ [m/s]	$q$ [m/s]
Schluff	2,83E-07	1,92E-06	1,93E-06
Sand	2,81E-05	2,17E-06	2,81E-05
Kies	2,76E-05	1,86E-06	2,76E-05

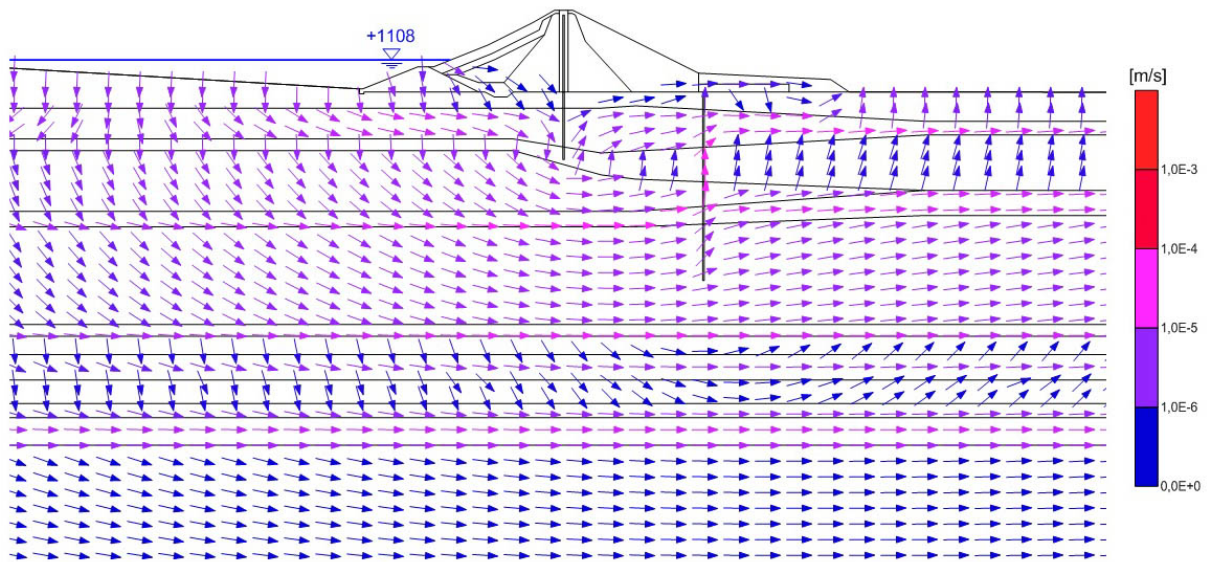


Abbildung 4.11: Vektordarstellung Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1108 m

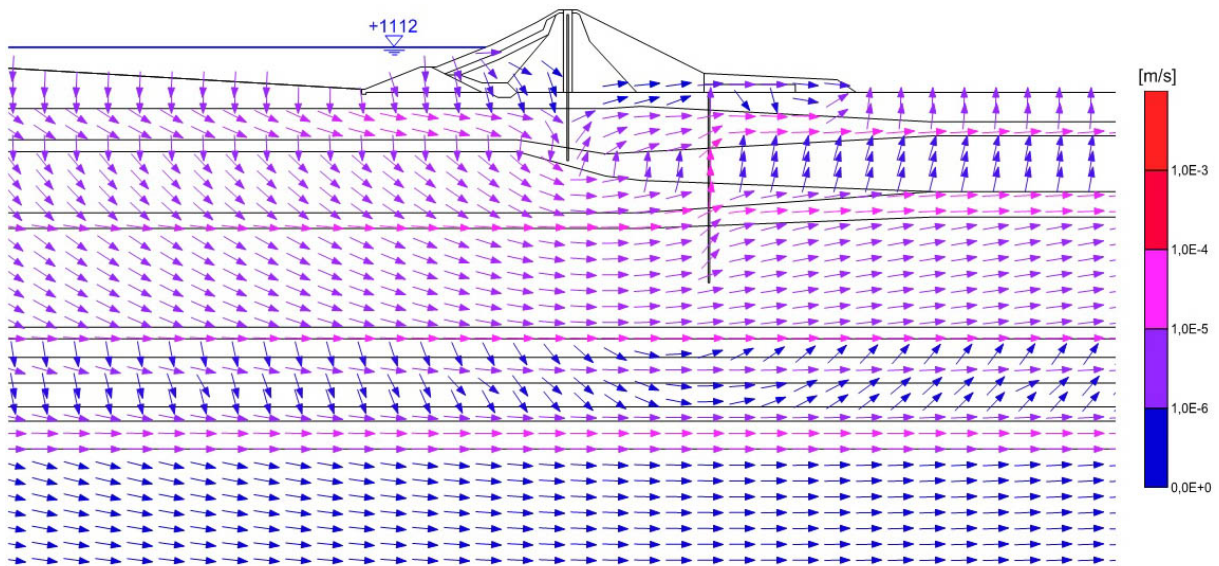


Abbildung 4.12: Vektordarstellung Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1112 m

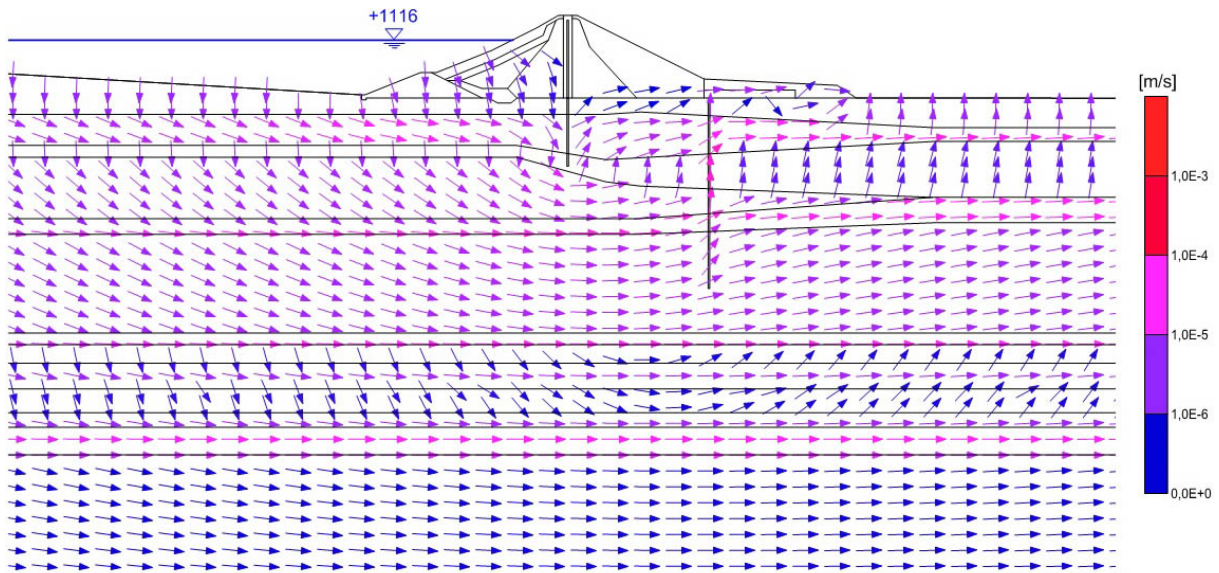


Abbildung 4.13: Vektordarstellung Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1116 m

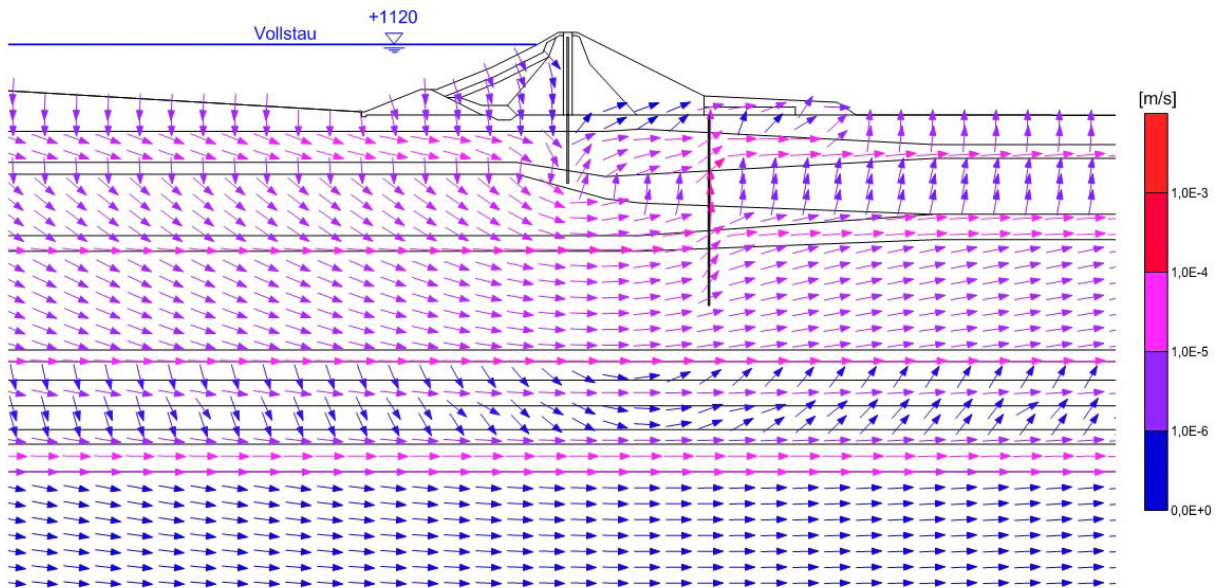
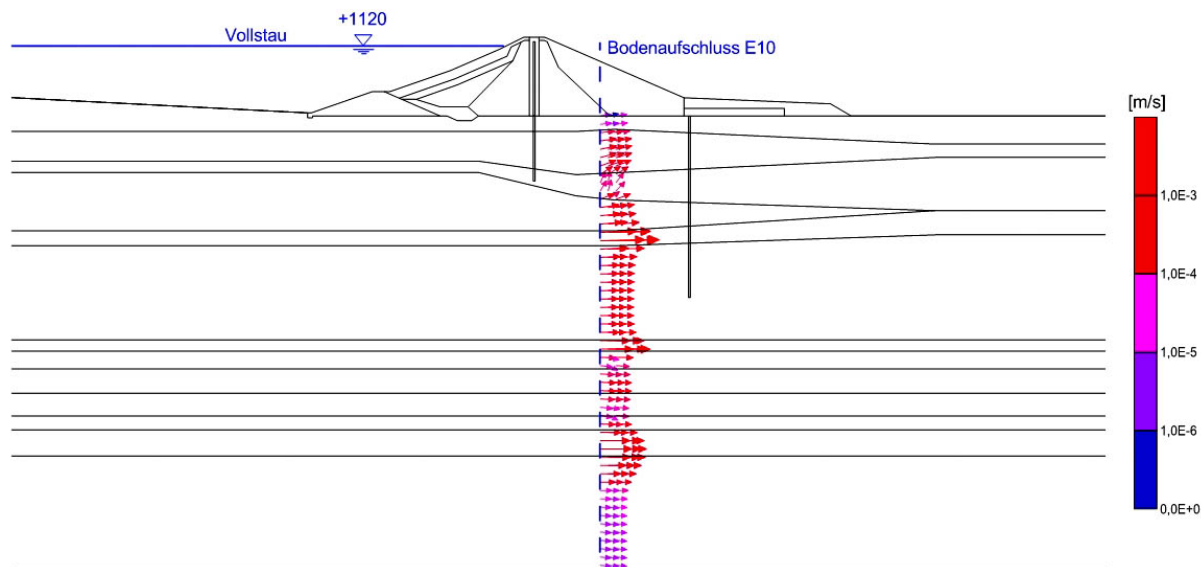


Abbildung 4.14: Vektordarstellung Strömungsgeschwindigkeiten Stauhöhe 1120 m





**Abbildung 4.15:** Vektordarstellung Strömungsgeschwindigkeiten Bodenaufschluss E10  
Stauhöhe 1120 m

### 4.3.2 Auswertungspunkte

Für die Auswertung werden Punkte herangezogen, an denen Piezometer eingebaut sind, weshalb ein Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messergebnissen möglich ist. Die Lage der Piezometer ist Anhang A zu entnehmen. In Tabelle 4.5 sind die zur Auswertung kommenden Punkte zusammengestellt.

**Tabelle 4.5:** Übersicht der im Damm eingebauten Piezometer

Bezeichnung	Lage
PM 4N	hinter Dichtungselement auf Höhe Schlitzwandunterkante
PM 13N	hinter Dichtungselement
PM 14	hinter Dichtungselement auf Höhe Schlitzwandunterkante
PM 23	nahe Entspannungsbrunnen auf Höhe Schlitzwandunterkante
PM 24	nahe Entspannungsbrunnen auf Höhe Schlitzwandunterkante
PM 8N	hinter Entspannungsbrunnen und Druckbank auf halber Schlitzwandhöhe
PM 9N	hinter Entspannungsbrunnen und Druckbank auf halber Schlitzwandhöhe
PM 10N	hinter Pumpstation

In den Abbildungen 4.16 und 4.17 sind die Potenzialhöhen in Abhängigkeit der Stauhöhe dargestellt. Um Rückschlüsse auf die tatsächlichen Strömungsverhältnisse im Damm führen zu können, wurde eine lineare Regression durch die im Anhang A dargestellten Messwerte geführt.

## 4. Numerisches Modell

Am numerischen Modell wurde - für die selben Punkte - ebenfalls die Abhängigkeit zwischen Stauspiegel und Potenzialhöhe bestimmt und in die Abbildungen eingetragen. Dabei zeigt sich grundsätzlich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Rechenergebnissen.

Bei Piezometer PM 13N zeigt sich, dass die tatsächlich gemessenen Potenzialhöhen deutlich unter den Rechenergebnissen liegen. Dies dürfte vor allem auf lokale Unstetigkeiten im Bereich der Schlitzwand zurückzuführen sein, die im Modell nicht berücksichtigt werden können.

Die Piezometer PM 24 und PM 8N in Abbildung 4.17 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Mess- und Rechenergebnissen. Die große Abweichung von Piezometer PM 9N lässt vermuten, dass sich der Messpunkt in einer dichteren Schicht befindet. Auch zeigt sich, dass Piezometer PM 10N weniger stark vom Stauspiegel im Speicher beeinflusst wird als es die Simulation vermuten lässt. Das Modell überschätzt die Strömungsverhältnisse in gewissen Bereichen.

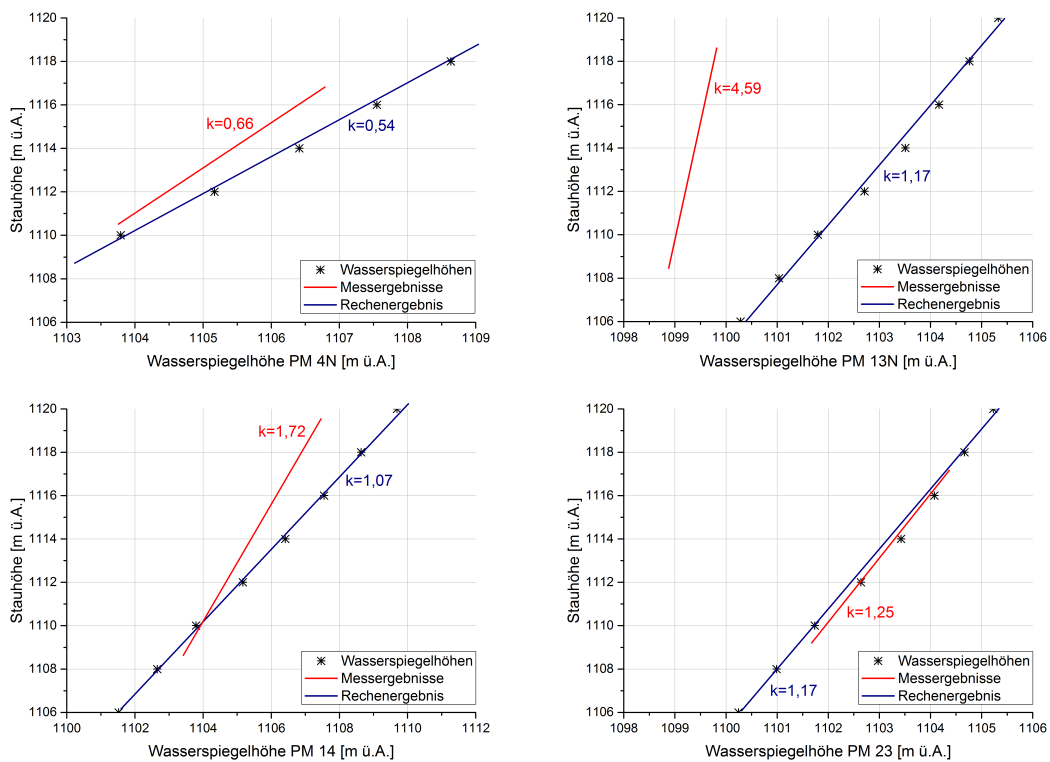


Abbildung 4.16: Auswertung der Piezometer

## 4. Numerisches Modell

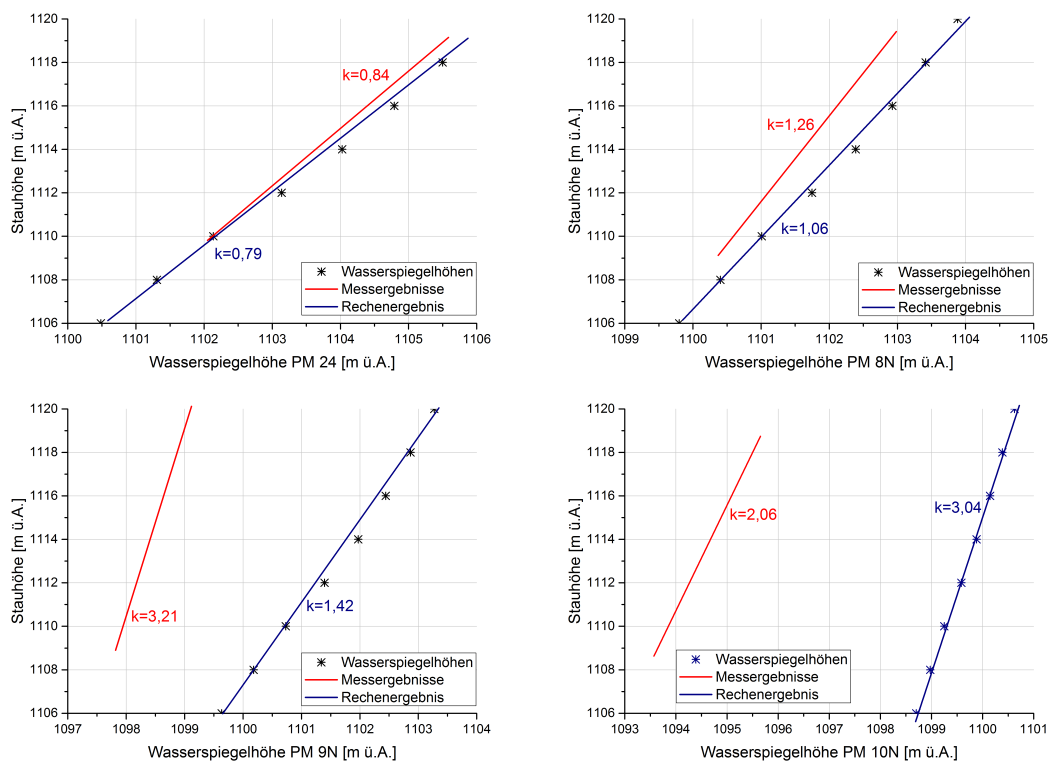


Abbildung 4.17: Auswertung der Piezometer

# Kapitel 5

## Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

Die Auswertung der Suffosions- und Erosionskriterien erfolgt anhand der original Bodenaufschlüsse am Beispiel des Dammes Eberlaste. Die Sieblinien aller Aufschlüsse sind im Anhang B ersichtlich.

Für die sinnvolle Anwendung der Kriterien ist es notwendig, die Bodenaufschlüsse in Kategorien ähnlicher Bodeneigenschaften zusammen zu fassen. Dies wurde hier in Form von oberen und unteren Grenzsieblinien umgesetzt. Für die genauere Auswertung wurde zwischen den beiden Grenzkurven noch eine in der Mitte liegende Sieblinie eingefügt (vergleiche Abbildungen 5.2 bis 5.9).

### 5.1 Bodenklassifikation

Für die Bodenklassifikation und die Auswertung der Kriterien werden die Bodenaufschlüsse E10, E12, E13, SE13 und E14 herangezogen. Deren Lage ist in Abbildung 5.1 ersichtlich.

Die Bodenklassifikation erfolgt nach ÖNORM B4400-1:2010. Für die vorhandenen Sieblinien ergeben sich folgende Bodenklassifikationen die in Tabelle 5.1 dargestellt sind.

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien



Abbildung 5.1: Lageplan der Bodenaufschlüsse

Tabelle 5.1: Bodenklassifikation

Kurve/Aufschlüsse		E10	E12	E13	E14	SE13
Typ I	oben	Si fsa; E	Sa/Gr; I	Si; G	Si; G	Sa/Gr; W
	mitte	si Sa; E	Sa/Gr; W	si Sa; G	-	Sa/Gr; W
	unten	si Sa; E	Gr; W	si Sa; G	si Sa; E	Gr; W
Typ II	oben	si Sa; G			si Sa; G	-
	mitte	si Sa; G	Gr; W	si Sa; I	-	-
	unten	Sa; G			si Sa; G	-
Typ III	oben	Sa/Gr; W	-	si Sa; W	si Sa; G	-
	mitte	Gr; W	-	Sa/Gr; W	-	-
	unten	Gr; W	-	Gr; W	si Sa; G	-
Typ IV	oben	Si; E	-	-	si Sa; W	-
	mitte	Si; E	-	-	Gr; W	-
	unten	si Sa; G	-	-	Gr; W	-
Typ V	oben	si Sa; W	-	-	-	-
	mitte	si Sa; W	-	-	-	-
	unten	Sa/Gr; W	-	-	-	-

Si = Schluff; si SA = Sand-Schluff-Gemisch; Sa = Sand; Sa/Gr = Kies-Schluff-Gemisch; Gr = Kies; E = eng gestuft; G = gut gestuft; W = weit gestuft; I = intermittierend gestuft

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

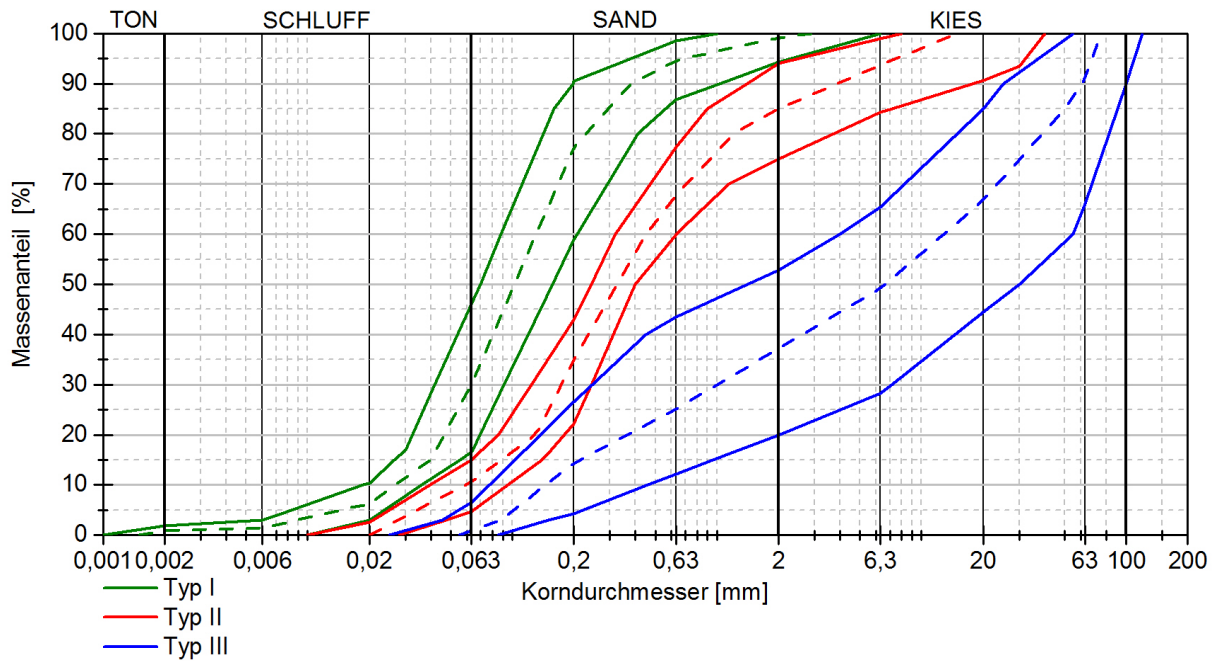


Abbildung 5.2: Korngrößenverteilung E10, Typ I bis III

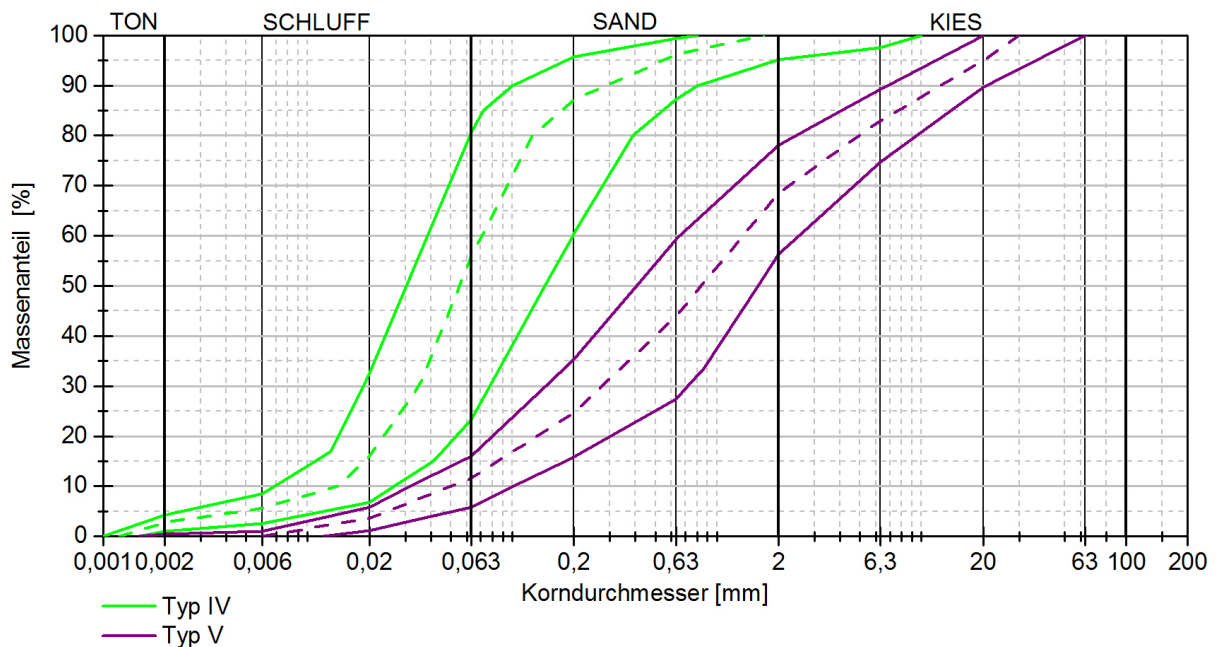


Abbildung 5.3: Korngrößenverteilung E10, Typ IV bis V

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

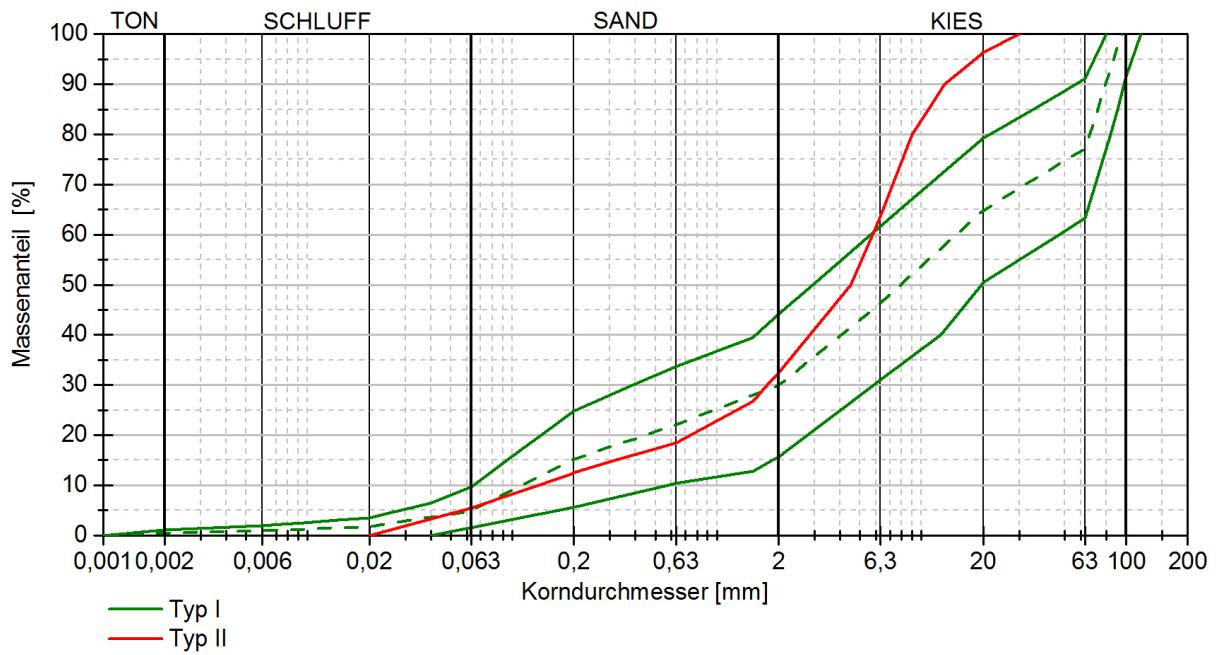


Abbildung 5.4: Korngrößenverteilung E12, Typ I und II

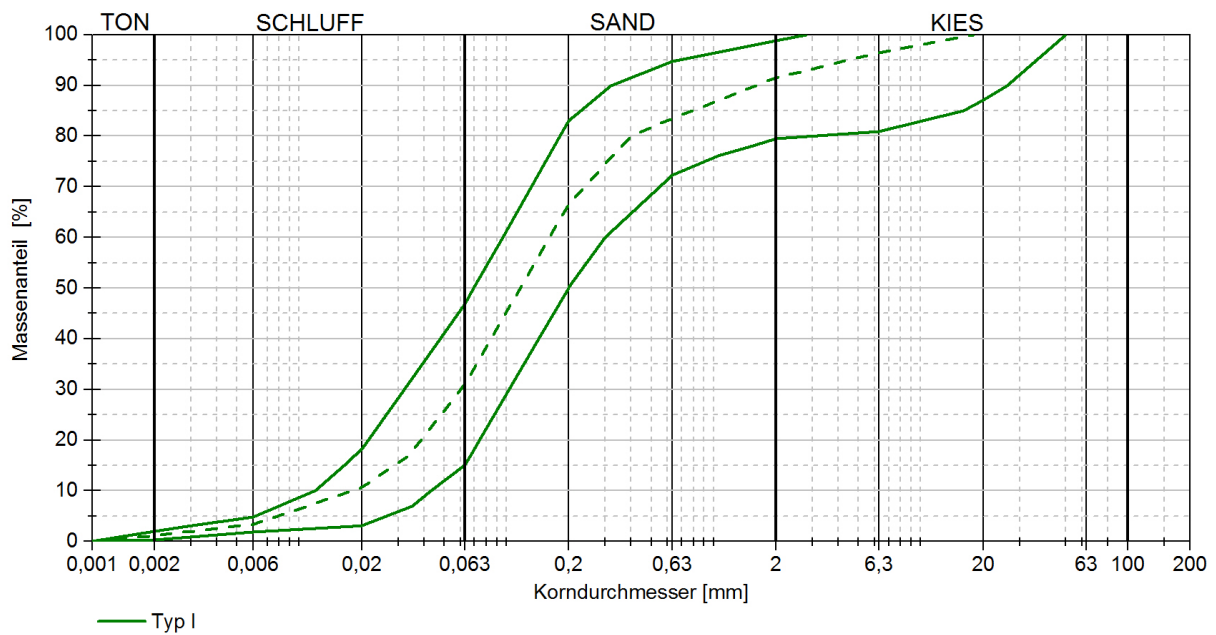


Abbildung 5.5: Korngrößenverteilung E13, Typ I

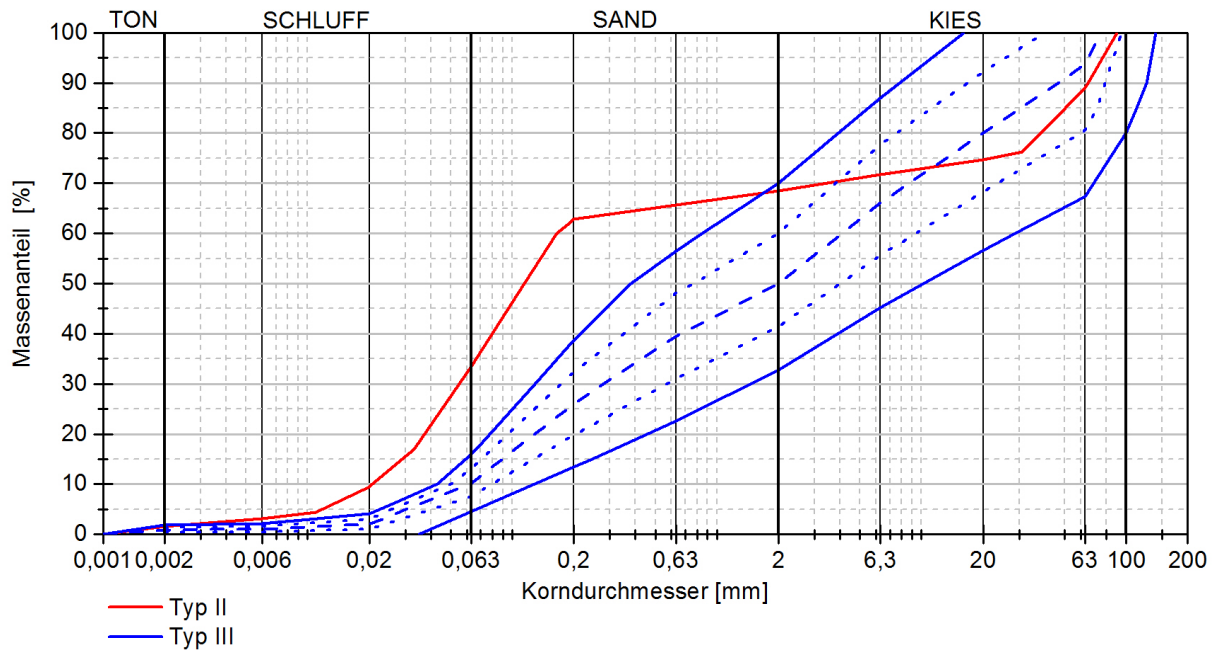


Abbildung 5.6: Korngrößenverteilung E13, Typ II und III

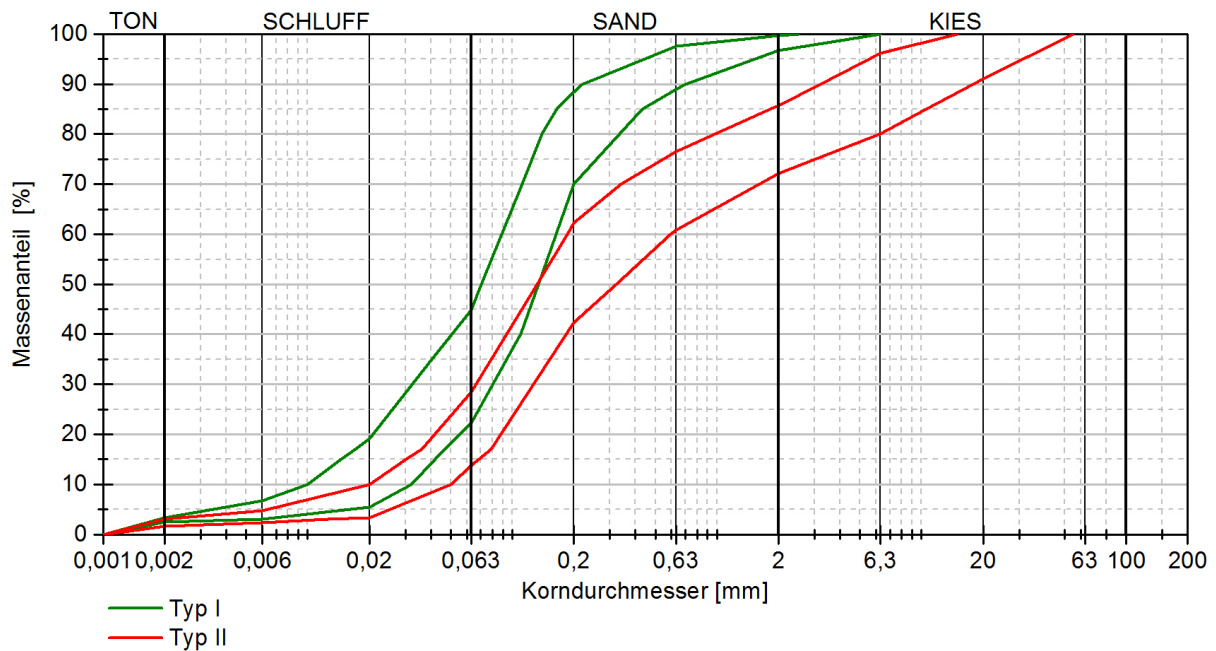


Abbildung 5.7: Korngrößenverteilung E14, Typ I und II



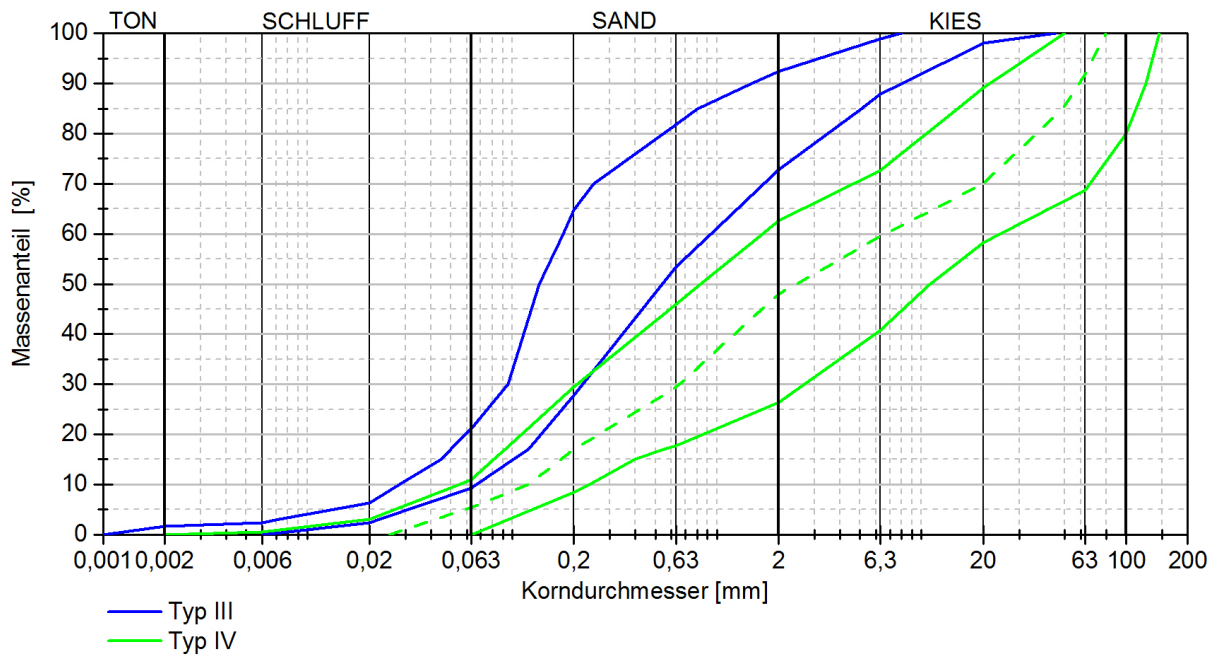


Abbildung 5.8: Korngrößenverteilung E14, Typ III und IV

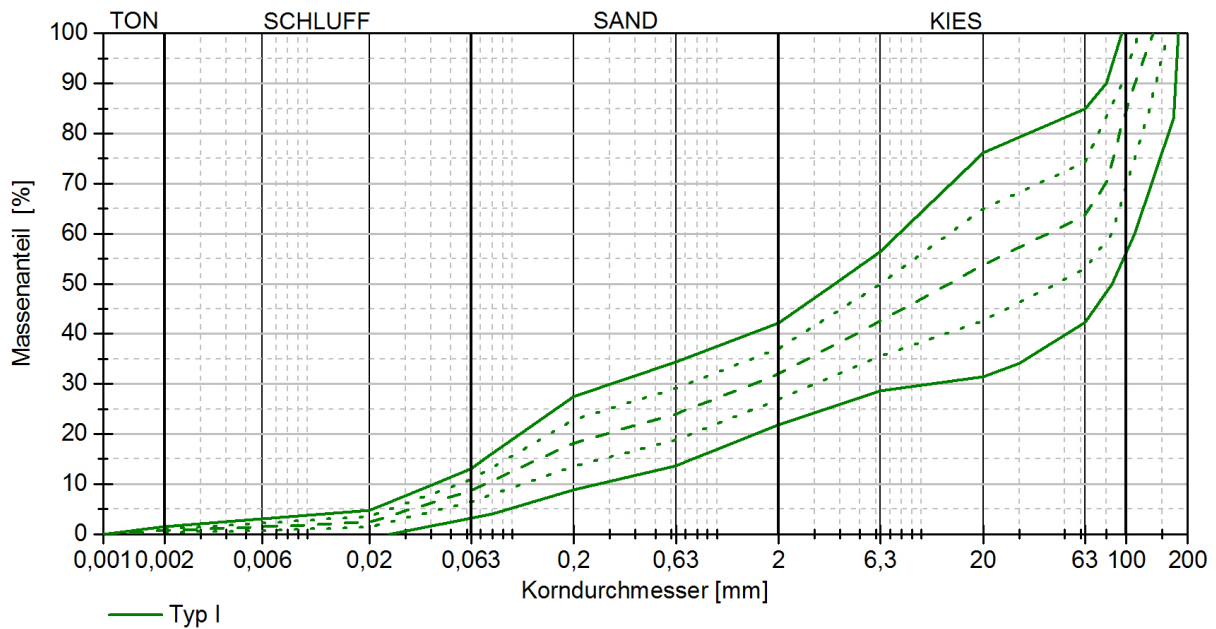


Abbildung 5.9: Korngrößenverteilung SE13, Typ I

## 5.2 Geometrische Suffosion

### 5.2.1 Kriterium nach *Ziems*

Wie in 3.3.1 beschrieben, trifft dieses Kriterium nur auf nichtbindige Erdstoffe - und daher nicht auf alle definierten Kornverteilungslinien - zu. Beim Bohrloch E10 erfolgt die Auswertung der Typen *I* bis *III* und *V*. Bei den Körnungslinien Typ *IV* handelt es sich um bindige Erdstoffe (siehe dazu Bodenklassifizierung 5.1). Im Bohrloch E12 werden beide Bodentypen ausgewertet. Bei den Körnungslinien E13 erfolgt die Auswertung dieses Kriteriums für die Bodentypen *I* und *III*. Die Bodentypen *II* bis *IV* werden im Bohrloch E14 zur Auswertung herangezogen. Im Bohrloch SE13 wird der Bodentyp *I* ausgewertet.

Eine Übersicht über die vorhandenen Bodenkennwerte ist Tabelle 4.3 auf Seite 54 zu entnehmen. Die Ungleichförmigkeitszahlen und die Korndurchmesser sind im Anhang B ersichtlich. Durch Einsetzen der Formeln 3.9 und 3.11 erhält man die Suffosionssicherheit der einzelnen Körnungslinien. Anzumerken ist, dass für den Nachweis  $d_3$  herangezogen wurde. Das folgt aus dem Umstand, dass bei den Bodenaufschlüssen keine Schlämmanalyse durchgeführt wurden und so  $d_0$  nicht zweifelsfrei feststeht. Die Kornverteilungslinien wurden in diesem Bereich extrapoliert.

Beispielhaft wird hier die Vorgehensweise an der Schicht Typ  $I_{mitte}$  des Bodenaufschlusses E10 gezeigt:

$$\begin{aligned}d_3 &= 0,009 \text{ mm} \\d_S &= 0,27 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \\&= 0,27 \cdot \sqrt[6]{5,46} \cdot 0,43 \cdot 0,034 = 0,0052 \text{ mm} \\ \eta_{S,G} &= \frac{d_3}{d_S} \geq 1,5 \\&= \frac{0,009}{0,0052} = 1,7 \text{ Kriterium erfüllt}\end{aligned}$$

Die Ergebnisse nach dem Kriterium nach *Ziems* sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Rot markierte Zahlen weisen darauf hin, dass das Kriterium nicht erfüllt ist.

**Tabelle 5.2:** Auswertung Sicherheit  $\eta$

	Kurve	E10	E12	E13	E14	SE13
Typ I	<b>oben</b>	*	0,5	0,8'	*	0,3
	<b>mitte</b>	1,7	0,5	0,9'	-	0,5
	<b>unten</b>	2,0	0,2	1,7	*	0,2
Typ II	<b>oben</b>	1,9			0,3'	-
	<b>mitte</b>	1,7	0,4	*	-	-
	<b>unten</b>	1,9			0,9	-
Typ III	<b>oben</b>	2,3	-	0,8	0,9'	-
	<b>mitte</b>	1,9	-	1,2	-	-
	<b>unten</b>	0,6	-	0,7	1,0	-
Typ IV	<b>oben</b>	*	-	-	1,1	-
	<b>mitte</b>	*	-	-	1,2	-
	<b>unten</b>	*	-	-	0,9	-
Typ V	<b>oben</b>	0,8	-	-	-	-
	<b>mitte</b>	0,8	-	-	-	-
	<b>unten</b>	0,7	-	-	-	-

\* Kriterium nicht zutreffend; ' Ungleichförmigkeit  $U < 10$ , Kriterium nach Randbedingungen 3.3.1 erfüllt

Nach den in [6] definierten und bereits in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Randbedingungen sind im Bohrloch E10 die Bodentypen *I* und *II* als suffosionssicher einzustufen. Bei Bodentyp *III* wird der Nachweis für die untere Kornverteilung nicht erfüllt. Es handelt sich hier um einen sehr groben Erdstoff. Hier muss besonderes Augenmerk auf die hydraulischen Randbedingungen gelegt werden, um eine Suffosion zu verhindern. Bei Bodentyp *V* erfüllt keine der Kornverteilungslinien das geometrische Suffosionskriterium. Es handelt sich um gut abgestufte grobkörnige Böden, weitere Betrachtungen sind hier erforderlich, um eine Suffosion auszuschließen.

Bei der Auswertung von Bohrloch E12 ist deutlich ersichtlich, dass keine der Kornverteilungslinien das geometrische Suffosionskriterium erfüllt. In weiterer Folge sind hier speziell die hydraulischen Verhältnisse ausschlaggebend.

Im Bohrloch E13 ist Typ *I* als suffosionssicher einzustufen, das gründet vorwiegend auf der geringen Ungleichförmigkeit der Sieblinien. Typ *III* ist dagegen suffosionsgefährdet.

Bei den Ergebnissen von Bohrloch E14 und Bohrloch SE13 zeichnet sich ein ähnliches Bild. Die Kornverteilungen mit höherem Feinanteil sind überwiegend suffosionssicher, wohingegen bei den gröberen Kornfraktionen Probleme mit der geometrischen Suffosionsstabilität erkennbar werden.

### 5.2.1.1 Kontaktsuffosion nach *Ziems*

Die Kontaktsuffosion wird hier speziell für das Bohrloch E10 ausgewertet. Als Basiserdstoff werden hier die Bodentypen *I* bis *IV* definiert, die jeweils mit den zwei Filtererdstoffen Typ *V<sub>mitte</sub>* und Typ *V<sub>unten</sub>* verglichen werden.

Die zur Anwendung kommende Formel ist 3.12 im Kapitel 3.3.1. Für  $d_{min}$  wird  $d_3$  des Basiserdstoffes eingesetzt. Der maßgebende suffosionsgefährdete Korndurchmesser der Basis ergibt sich aus Formel 3.11, der Porenkanaldurchmesser  $d_p$  des Filters wird nach 3.7 ermittelt.

Beispielhaft wird hier die Vorgehensweise an der Schicht Typ *I<sub>oben</sub>* als Basiserdstoff und der Schicht Typ *V<sub>unten</sub>* als Filtererdstoff beschrieben:

$$\begin{aligned}
 d_{min}^I &= 0,002 \text{ mm} \\
 d_S^I &= 0,27 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \\
 &= 0,27 \cdot \sqrt[6]{4,55} \cdot 0,54 \cdot 0,025 = 0,0047 \text{ mm} \\
 d_p^{II} &= 0,455 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot e \cdot d_{17} \\
 &= 0,455 \cdot \sqrt[6]{24,70} \cdot 0,43 \cdot 0,224 = 0,0748 \text{ mm} \\
 \eta_{S,G} &= \frac{d_{min}^I + d_S^I}{2 \cdot 0,6 \cdot d_p^{II}} \geq 1,5 \\
 &= \frac{0,0020 + 0,0047}{2 \cdot 0,6 \cdot 0,0748} = 0,075 \text{ Kriterium nicht erfüllt}
 \end{aligned}$$

Es zeigt sich, dass die Ungleichung nicht erfüllt ist, und somit die Sicherheit gegen Kontaktsuffosion nicht gegeben ist. Diese Vorgangsweise wurde bei der Auswertung aller anderen Schichten gleich angewandt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 auf Seite 71 zusammengestellt.

**Tabelle 5.3:** Kontaktsuffosion nach *Ziems* - Bohrloch E10

	Kurve	Typ V mitte	Typ V unten
Typ I	<b>oben</b>	n	n
	<b>mitte</b>	n	n
	<b>unten</b>	n	n
Typ II	<b>oben</b>	n	n
	<b>mitte</b>	n	n
	<b>unten</b>	j	n
Typ III	<b>oben</b>	j	n
	<b>mitte</b>	j	n
	<b>unten</b>	j	j
Typ IV	<b>oben</b>	n	n
	<b>mitte</b>	n	n
	<b>unten</b>	n	n
Typ V	<b>oben</b>	n	n

j = Kriterium erfüllt; n = Kriterium nicht erfüllt

### 5.2.2 Kriterium nach *Sherard* für Materialien mit Ausfallkörnung

Da es sowohl bei Bohrloch E10, E12, E14 als auch bei SE13 keine Ausfallkörnungen gibt, erfolgt für diese Kornverteilungslinien keine Auswertung dieses Kriteriums.

Die einzige Sieblinie, die für Auswertung herangezogen wird, ist Typ *II* vom Bodenaufschluss E13. Die Kornverteilungslinie wird an der Stelle der Ausfallkörnung getrennt, das ist hier bei 2,0 mm. Daraus ergeben sich die groben und feinen Teilkörnungen, mit denen der Nachweis geführt wird.

$$\frac{D_{15grob}}{D_{85fein}} < 5 = \frac{11,42}{0,16} = 71,4 \text{ Kriterium nicht erfüllt}$$

Es ist klar ersichtlich, dass die Ungleichung nicht erfüllt und der Nachweis somit nicht erbracht ist.

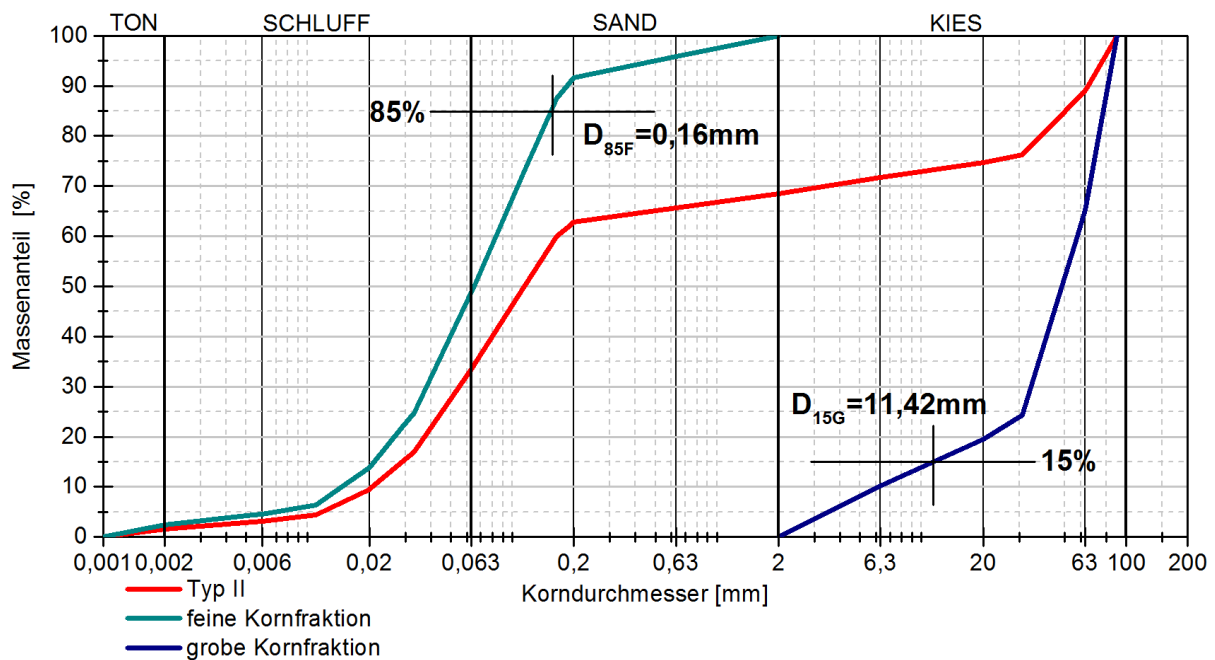


Abbildung 5.10: Gespaltene Kornverteilungslinie nach dem Verfahren nach *Sherard*, Typ II im Bodenaufschluss E13

### 5.2.3 Kriterium nach *BAW-MAK* in Deutschland

Die Auswertung dieses Kriteriums erfolgt für alle Kornverteilungslinien aller bekannten Bodenaufschlüsse. Die Kornverteilungslinien werden dabei an beliebiger Stelle geteilt. Durch diese Teilung werden ein Boden (feinkörniges Material) und eine Deckschicht (grobkörniges Material) definiert. Daraus werden die Ungleichförmigkeitszahlen des Bodens und der Deckschicht ermittelt, welche in das in Abbildung 3.4 auf Seite 19 dargestellte Diagramm eingetragen werden. Dadurch lässt sich ein zulässiges Abstandsverhältnis ermitteln, das mit dem vorhandenen verglichen wird. So kann eine Aussage über die geometrische Suffosionsstabilität im Sinne dieses Kriteriums getroffen werden.

Die Abbildungen 5.11 bis 5.14 zeigen die abgearbeiteten Kornverteilungslinien mit den entsprechenden Trenndurchmessern und den ermittelten Sicherheiten.

Wie schon bei der Auswertung nach *Ziems* im Kapitel 5.2.1 wird ersichtlich, dass speziell die grobkörnigen Kiese geometrisch nicht suffosions sicher sind. Bei den Schluffen ist die Suffosions sicherheit durchgehend gegeben. Bei den Sanden spielt besonders die Wahl des Trenndurchmessers eine entscheidende Rolle. Werden diese zu groß gewählt, ist die Sicherheit gegen Suffosion nicht mehr gegeben.

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

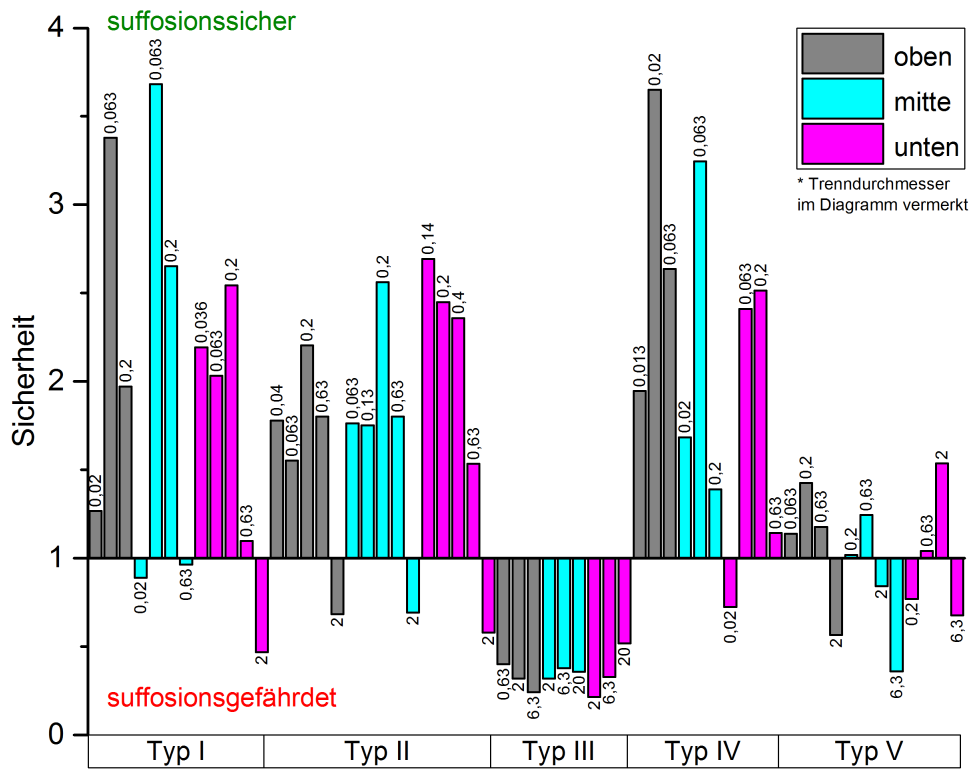


Abbildung 5.11: Zusammenstellung Bodenaufschluss E10

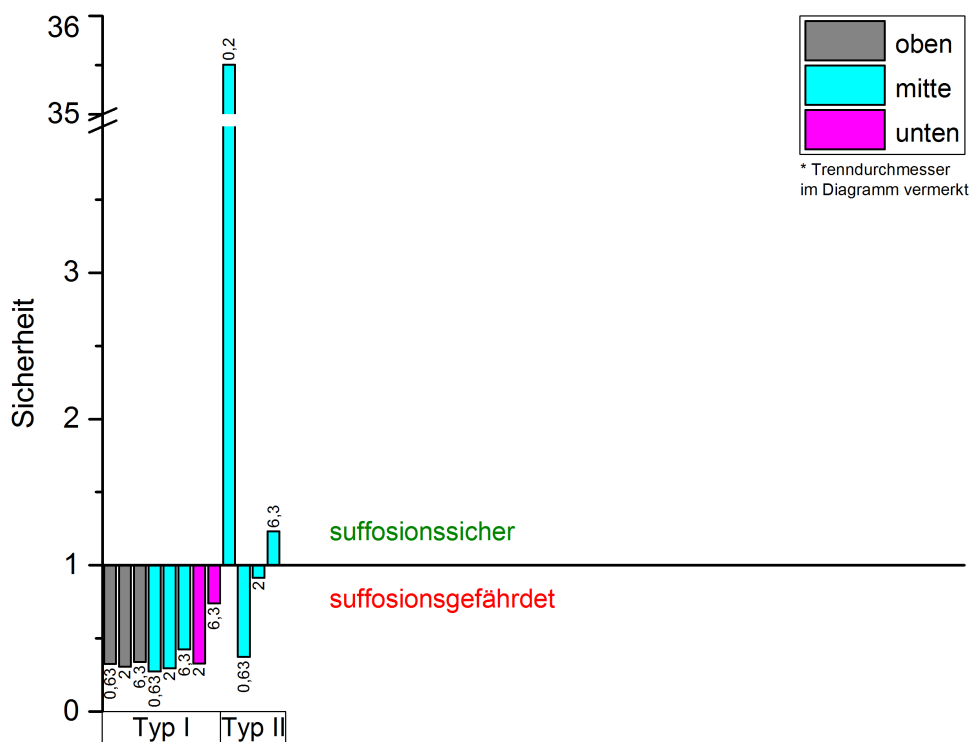


Abbildung 5.12: Zusammenstellung Bodenaufschluss E12

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

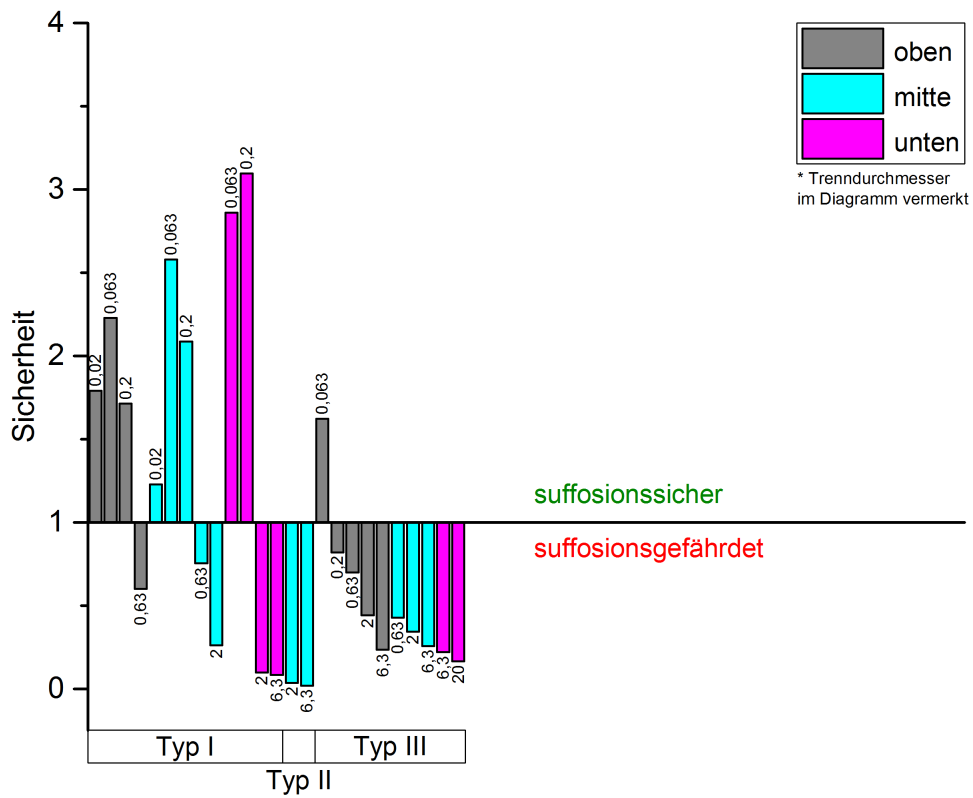


Abbildung 5.13: Zusammenstellung Bodenaufschluss E13

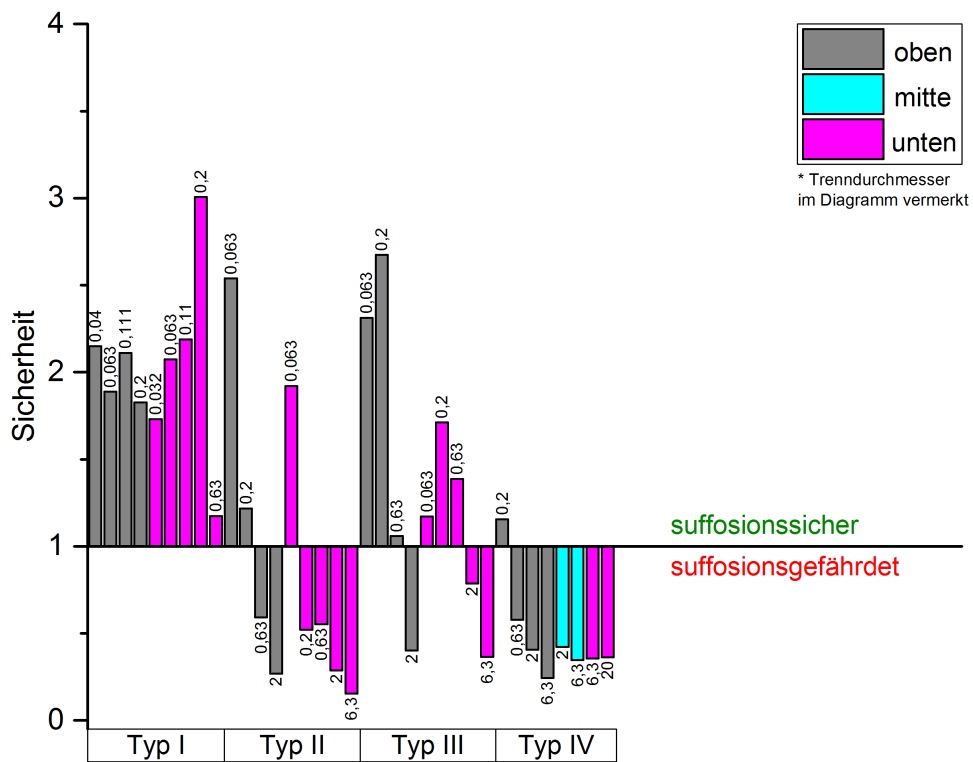


Abbildung 5.14: Zusammenstellung Bodenaufschluss E14



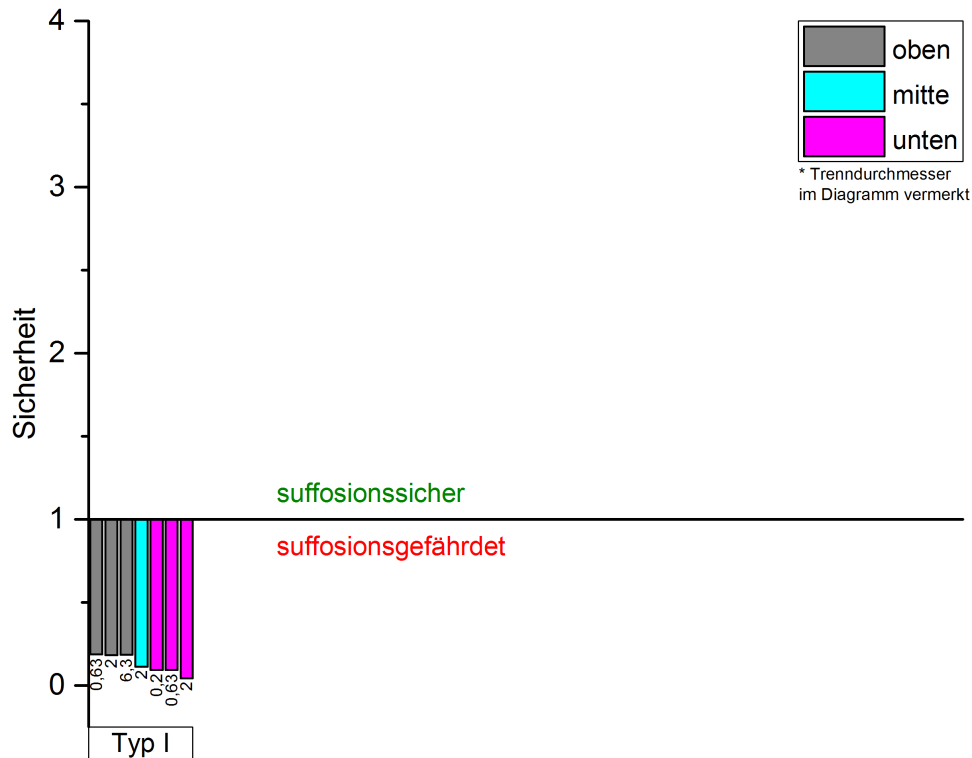


Abbildung 5.15: Zusammenstellung Bodenaufschluss SE13

#### 5.2.4 Kriterium nach *Burenkova* für Materialien mit gleichmäßiger Kornverteilung und höherem Feinanteil

Die Auswertung des Kriteriums nach *Burenkova* erfolgt für die Sieblinien mit höherem Feinkornanteil. Für gröbere Kornverteilungen ist dieses Kriterium laut der in Kapitel 3.3.1 angegebenen Bedingungen nicht anwendbar.

Das Kriterium trifft daher vorwiegend auf die Bodentypen *I* und *IV* zu. Die restlichen Kornverteilungslinien sind überwiegend zu grob. Die Auswertung des Kriteriums ist grafisch in Abbildung 5.16 dargestellt. Als suffosionssicher nach diesem Kriterium gelten lediglich die im Bereich **II** liegenden Korngrößenverteilungen.

Die Suffosionssicherheit nach *Burenkova* bzw. die Zuordnung der Korngrößenverteilungen zu den einzelnen Bereichen wird in Tabelle 5.4 dargestellt. Dabei werden die Bereiche in denen das Kriterium nicht erfüllt und der Boden somit suffosionsgefährdet ist, rot dargestellt.

## 5. Auswertung Suffosion- und Erosionskriterien

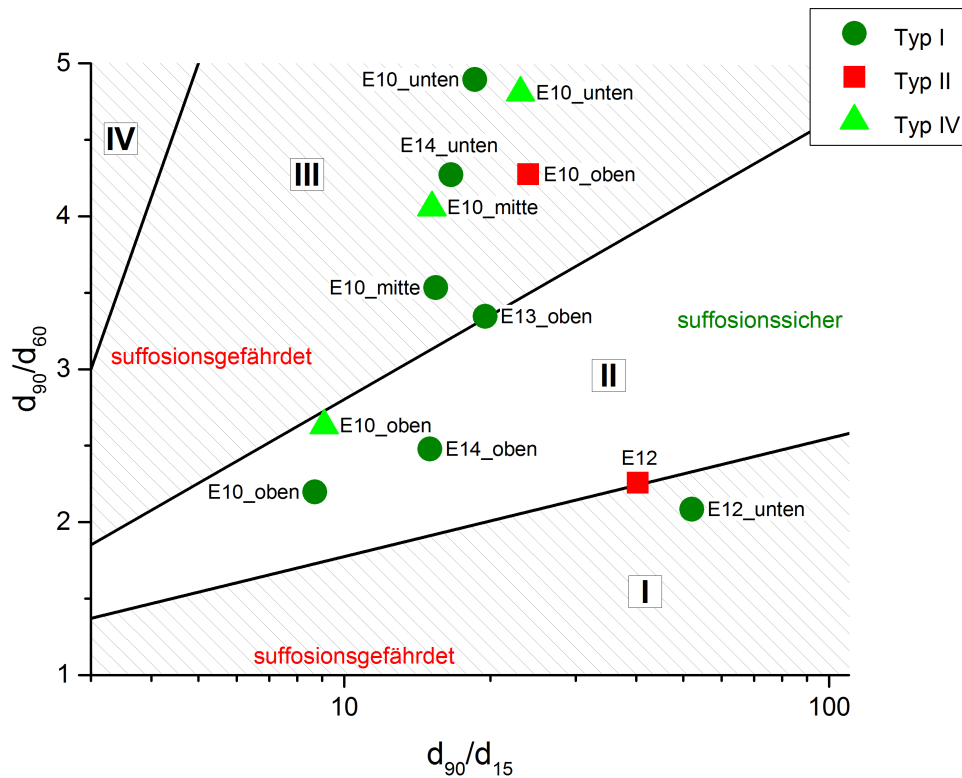


Abbildung 5.16: Übersicht Auswertung *Burenkova*

Tabelle 5.4: Auswertung Suffosionskriterium nach Burenkova

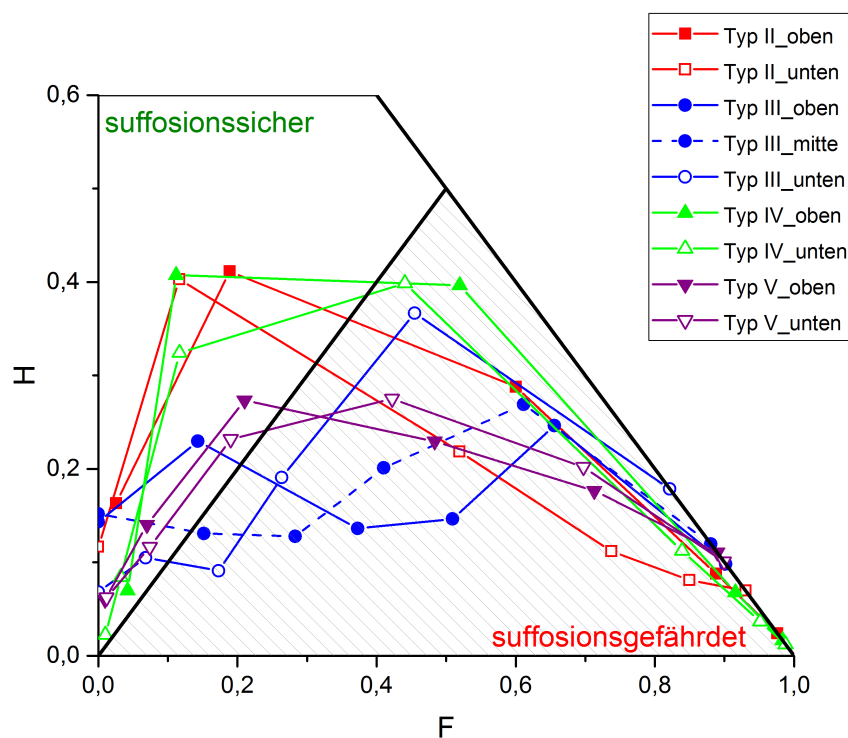
	Kurve	E10	E12	E13	E14	SE13
Typ I	oben	II	*	II	II	*
	mitte	III	*	*	-	*
	unten	III	I	*	III	*
Typ II	oben	III			*	-
	mitte	*	II	*	-	-
	unten	*			*	-
Typ III	oben	*	-	*	*	-
	mitte	*	-	*	-	-
	unten	*	-	*	*	-
Typ IV	oben	II	-	-	*	-
	mitte	III	-	-	*	-
	unten	III	-	-	*	-
Typ V	oben	*	-	-	-	-
	mitte	*	-	-	-	-
	unten	*	-	-	-	-

\* Kriterium nicht zutreffend

### 5.2.5 Kriterium nach *Kenney/Lau*

Für das Kriterium nach *Kenney und Lau* werden alle Kornverteilungslinien wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben ausgewertet. Dazu werden die einzelnen Kornverteilungslinien in Bereiche  $D$  bis  $4 \cdot D$  eingeteilt und die zugehörigen Faktoren  $F$  und  $H$  bestimmt (vergleiche Abbildung 3.6 auf Seite 21).

Die Auswertung der einzelnen Bodenaufschlüsse findet sich in den Abbildungen 5.17 bis 5.21. In den Grafiken ist der suffosionsgefährdete Bereich schraffiert dargestellt. Feinkörnige Kornverteilungslinien sind auch nach *Kenney und Lau* stabiler gegen Suffosion als grobkörnige. Generell zeigt sich bei der Auswertung, dass je größer  $D$  wird, die Materialien in den suffosionsgefährdeten Bereich gleiten.



**Abbildung 5.17:** Zusammenstellung der Ergebnisse, Kriterium nach *Kenney/Lau* im Bodenaufschluss E10

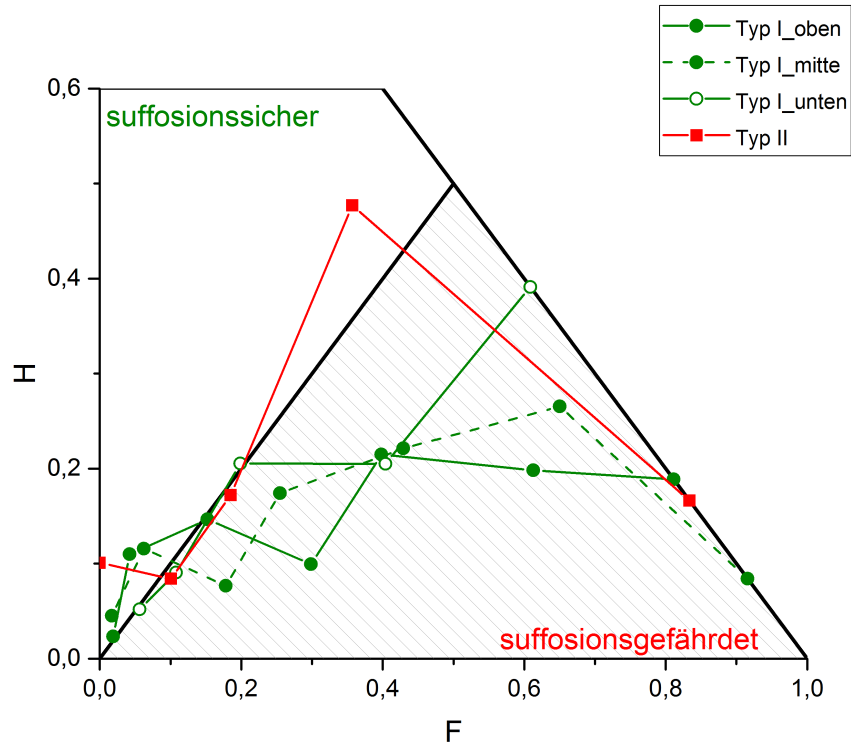


Abbildung 5.18: Zusammenstellung der Ergebnisse, Kriterium nach *Kenney/Lau* im Bodenaufschluss E12

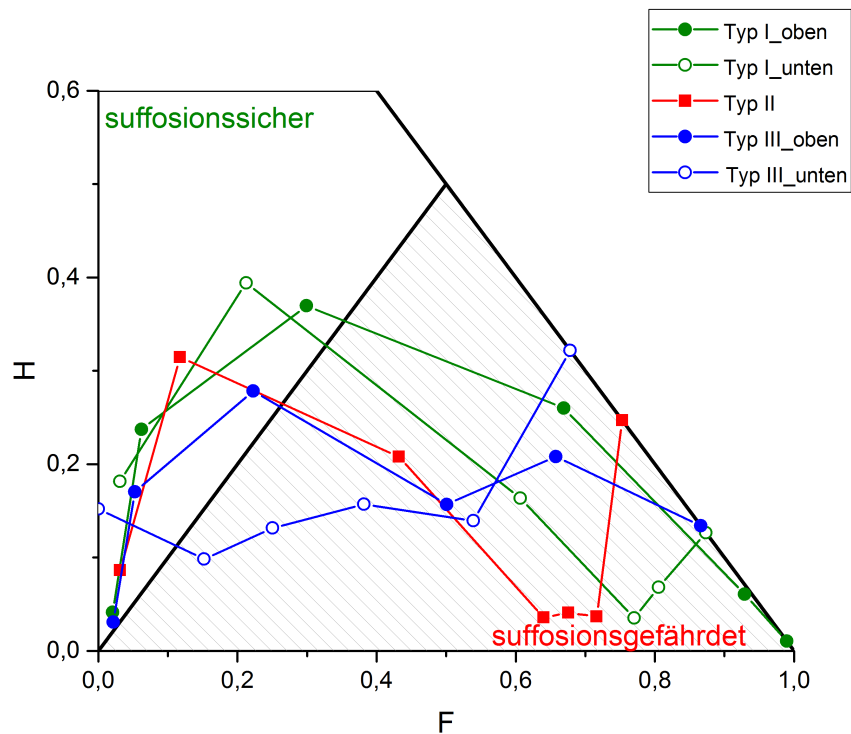


Abbildung 5.19: Zusammenstellung der Ergebnisse, Kriterium nach *Kenney/Lau* im Bodenaufschluss E13

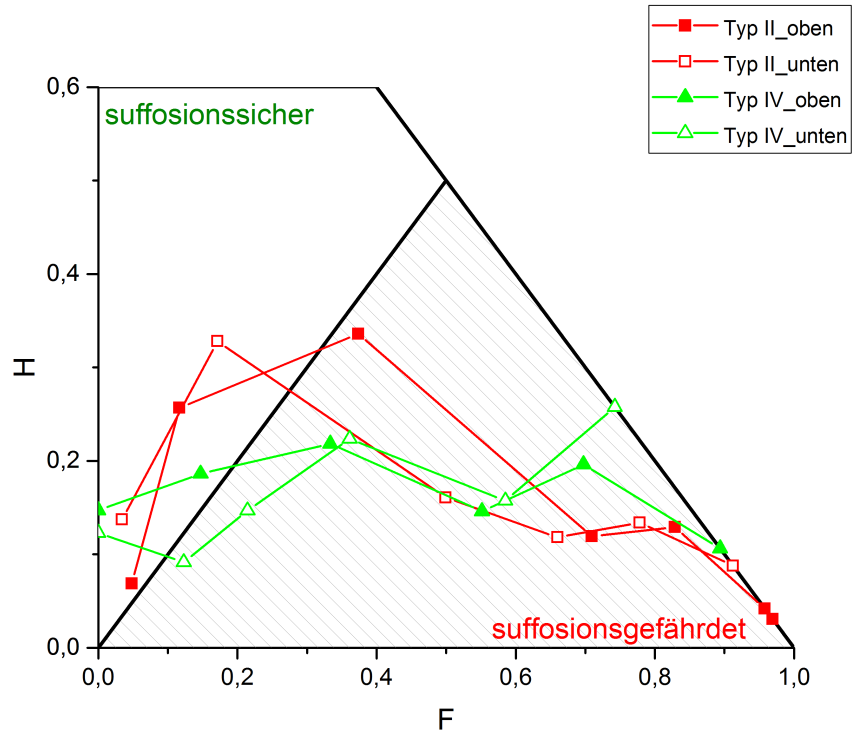


Abbildung 5.20: Zusammenstellung der Ergebnisse, Kriterium nach Kenney/Lau im Bodenaufschluss E14

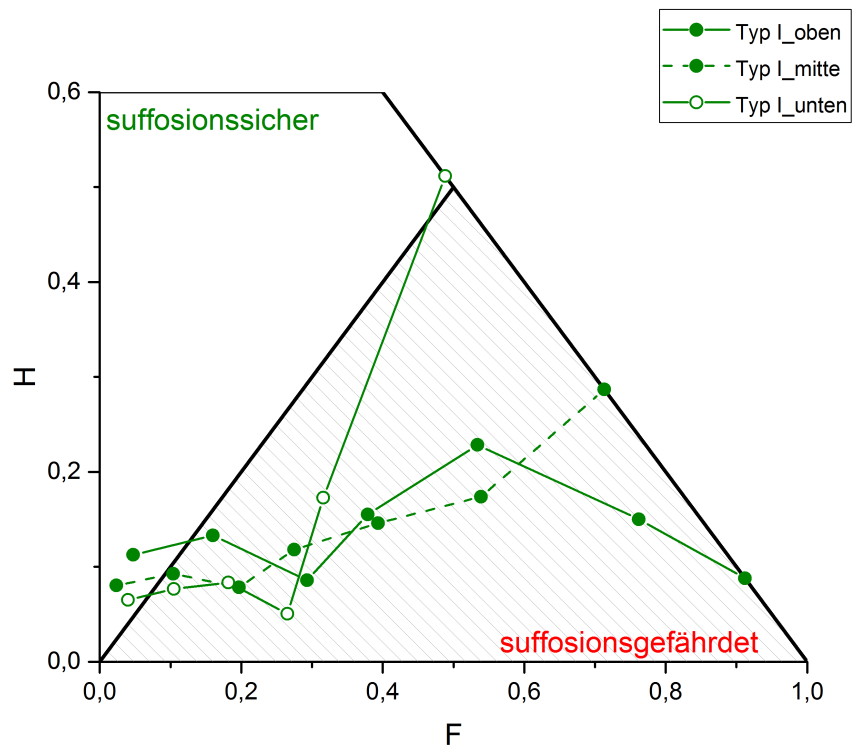


Abbildung 5.21: Zusammenstellung der Ergebnisse, Kriterium nach Kenney/Lau im Bodenaufschluss SE13

## 5.3 Hydraulische Suffosion

### 5.3.1 Kriterium für Erdstoffe mit stetiger Korngrößenverteilung nach *Busch et al.*

Die hydraulische Suffosionssicherheit wird nach der in 3.3.2 angegebenen Bedingung für die anzutreffenden Schichten ausgewertet. Da die Richtung der Strömung von entscheidender Bedeutung bei der Anwendung dieses Kriteriums ist, erfolgt die Auswertung richtungsbezogen. Es werden je Richtung die zulässigen hydraulischen Gradienten im Bodenaufschluss E10 bestimmt.

**Strömung vertikal nach unten  $\alpha = 0^\circ$**

Die Auswertung für diesen Fall erfolgt hier nicht, da im betreffenden Bohrloch die Strömung vorwiegend nach oben gerichtet bzw. horizontal verläuft.

**Strömung horizontal  $\alpha = 90^\circ$**

Die Ermittlung der hydraulischen Suffosionssicherheit nach diesem Kriterium wird hier beispielhaft an der Schicht Typ  $I_{oben}$  gezeigt. Für die Berechnung werden die Gleichungen 3.15 und 3.14 herangezogen. Das vorhandene hydraulische Gefälle berechnet sich dabei aus der richtungsbezogenen Strömungsgeschwindigkeit (vergleiche Tabelle 4.4 auf Seite 56) geteilt durch die Durchlässigkeit  $k_f$  der entsprechenden Schicht.

$$i_{krit} = 0,6 \cdot \left( \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1 \right) \cdot [0,82 - 1,8 \cdot n + 0,0062 \cdot (U - 5)] \\ \cdot \sin\left(30^\circ + \frac{\alpha}{8}\right) \cdot \sqrt{\frac{n \cdot g \cdot d_s^2}{v_v \cdot k}}$$

$$i_{krit} = 0,6 \cdot \left( \frac{1,79}{1,00} - 1 \right) \cdot [0,82 - 1,8 \cdot 0,35 + 0,0062 \cdot (4,55 - 5)] \\ \cdot \sin\left(30 + \frac{90}{8}\right) \cdot \sqrt{\frac{0,35 \cdot 9,81 \cdot (4,67 \cdot 10^{-6})^2}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5,0 \cdot 10^{-6}}} = 0,207$$

$$i_{krit} = \frac{v_{Schicht}}{k_{f,Schicht}} = \frac{2,83 \cdot 10^{-7}}{5,0 \cdot 10^{-6}} = 0,057$$

$$\eta_{S,H} = \frac{i_{S,krit}}{i_{vorh}} \geq 2,0 = \frac{0,057}{0,207} = 3,65 \text{ Kriterium erfüllt}$$

Dieser Systematik wird bei allen Bodenschichten gefolgt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 5.5 wiedergegebenen Sicherheiten.

**Tabelle 5.5:** Auswertung nach *Busch et al.*, Strömung horizontal

	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	Schluff	0,207	0,057	3,65
	mitte	Sand	0,036	0,056	<b>0,65</b>
	unten	Sand	0,069	0,056	<b>1,22</b>
Typ II	oben	Sand	0,085	0,056	<b>1,51</b>
	mitte	Sand	0,122	0,056	2,18
	unten	Sand	0,176	0,056	3,13
Typ III	oben	Kies	0,738	0,276	2,68
	mitte	Kies	1,619	0,276	5,87
	unten	Kies	15,534	0,276	56,30
Typ IV	oben	Schluff	0,114	0,057	2,01
	mitte	Schluff	0,180	0,057	3,18
	unten	Sand	0,053	0,056	<b>0,95</b>
Typ V	oben	Sand	0,119	0,056	2,12
	mitte	Sand	0,207	0,056	3,69
	unten	Sand	0,439	0,056	7,81

**Tabelle 5.6:** Auswertung nach *Busch et al.*, Strömung vertikal nach oben

	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	Schluff	0,249	0,385	<b>0,65</b>
	mitte	Sand	0,044	0,004	10,08
	unten	Sand	0,083	0,004	19,02
Typ II	oben	Sand	0,102	0,004	23,46
	mitte	Sand	0,147	0,004	33,84
	unten	Sand	0,212	0,004	48,71
Typ III	oben	Kies	0,889	0,019	47,78
	mitte	Kies	1,948	0,019	104,73
	unten	Kies	18,692	0,019	1005,05
Typ IV	oben	Schluff	0,137	0,385	<b>0,36</b>
	mitte	Schluff	0,216	0,385	<b>0,56</b>
	unten	Sand	0,064	0,004	14,75
Typ V	oben	Sand	0,144	0,004	33,02
	mitte	Sand	0,249	0,004	57,33
	unten	Sand	0,528	0,004	121,48

**Strömung vertikal nach oben  $\alpha = 180^\circ$**

Die Auswertung bei Strömung vertikal nach oben erfolgt analog jener bei horizontaler Strömung. Zu beachten ist hier, dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten in Tabelle 4.4 ändern. Bei der Auswertung wird ersichtlich, dass der Schluff nach diesem Kriterium ein hydraulisches Suffosionsrisiko birgt. Die vorhergehenden geometrischen Auswertungen legen aber nahe, dass die tatsächliche Suffosionsgefahr im Schluff sehr klein bzw. auf sehr feine Kornfraktionen beschränkt ist.

**5.3.2 Kriterium für Erdstoffe mit un stetiger Korngrößenverteilung nach *Istomina***

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben, gibt *Striegler* dieses Kriterium ohne Rücksichtnahme auf die Strömungsrichtung an. Die Auswertung erfolgt hier daher auf die in Tabelle 4.4 angegebenen Maximalgeschwindigkeiten. Zu bemerken ist bei diesem Kriterium, dass ausschließlich die Ungleichförmigkeit der Kornverteilungslinien eingeht. Nach diesem Kriterium ist Sand nicht suffosionsgefährdet, Schluff und Kies hingegen schon. Einen Überblick über die ermittelten Sicherheiten gibt Tabelle 5.7.

**Tabelle 5.7:** Auswertung nach *Istomina*

	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	<b>Schluff</b>	0,400	0,385	<b>1,04</b>
	mitte	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
	unten	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
Typ II	oben	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
	mitte	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
	unten	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
Typ III	oben	<b>Kies</b>	0,100	0,276	<b>0,36</b>
	mitte	<b>Kies</b>	0,100	0,276	<b>0,36</b>
	unten	<b>Kies</b>	0,100	0,276	<b>0,36</b>
Typ IV	oben	<b>Schluff</b>	0,400	0,385	<b>1,04</b>
	mitte	<b>Schluff</b>	0,400	0,385	<b>1,04</b>
	unten	<b>Sand</b>	0,400	0,056	7,12
Typ V	oben	<b>Sand</b>	0,100	0,056	<b>1,78</b>
	mitte	<b>Sand</b>	0,100	0,056	<b>1,78</b>
	unten	<b>Sand</b>	0,100	0,056	<b>1,78</b>



## 5.4 Geometrische Erosion

### 5.4.1 Kriterium nach *Terzaghi/Peck*

Die Auswertung nach *Terzaghi und Peck* erfolgt nach der in Kapitel 3.4.1 angegebene Formel. Die Auswertung bezieht sich auf den Bodenaufschluss E10. Hier werden die Schichten des Typ *III* als Filter herangezogen. Alle anderen Schichten stellen den Basiserdstoff dar, mit dem die Filterschichten verglichen werden.

In Tabelle 5.8 ist ersichtlich, dass das Kontakterosionskriterium größtenteils erfüllt wird. Bei der Durchlässigkeitsregel (Tabelle 5.9) hingegen wird die Bedingung zumeist nicht erfüllt. Das lässt sich dadurch begründen, dass es sich hier um ein Kriterium zum Bemessen von Filtern handelt. Im vorliegenden Fall wird damit eine natürliche Schichtenabfolge bewertet. Es ist davon auszugehen, dass die natürlichen Verhältnisse, speziell im Bereich des Sandes, hinreichend durchlässig sind, um eine ausreichende Entwässerung zu gewährleisten. Auch wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass das Kriterium nach *Terzaghi und Peck* mit einer Sicherheit von  $\approx 2$  bemisst.

**Tabelle 5.8:** Kontakterosionskriterium zur Bemessung nach *Terzaghi/Peck*

		Typ III		
		oben	mitte	unten
Filter	$d_{15,F}$ [mm]	0,103	0,215	0,958
Basiserdstoff	$d_{85,B}$ [mm]			
Typ I	<b>oben</b>	0,173	0,595	1,243
	<b>mitte</b>	0,332	0,310	0,648
	<b>unten</b>	0,583	0,177	0,369
Typ II	<b>oben</b>	1,067	0,097	0,201
	<b>mitte</b>	2,000	0,052	0,108
	<b>unten</b>	7,209	0,014	0,030
Typ IV	<b>oben</b>	0,072	1,431	2,986
	<b>mitte</b>	0,174	0,592	1,236
	<b>unten</b>	0,544	0,189	0,395
Typ V	<b>oben</b>	4,066	0,025	0,053
	<b>mitte</b>	7,644	0,013	0,028
	<b>unten</b>	13,929	0,007	0,015

**Tabelle 5.9:** Durchlässigkeitsregel nach *Terzaghi/Peck*

		Typ III			
			<b>oben</b>	<b>mitte</b>	<b>unten</b>
Filter	$d_{15,F}$ [mm]	0,103	0,215	0,958	
Basiserdstoff	$d_{15,B}$ [mm]				
Typ I	<b>oben</b>	0,023	4,478	9,348	41,652
	<b>mitte</b>	0,030	<b>3,433</b>	7,167	31,933
	<b>unten</b>	0,055	<b>1,873</b>	<b>3,909</b>	17,418
Typ II	<b>oben</b>	0,063	<b>1,635</b>	<b>3,413</b>	15,206
	<b>mitte</b>	0,088	<b>1,170</b>	<b>2,443</b>	10,886
	<b>unten</b>	0,140	<b>0,736</b>	<b>1,536</b>	6,843
Typ IV	<b>oben</b>	0,011	9,364	19,545	87,091
	<b>mitte</b>	0,019	5,421	11,316	50,421
	<b>unten</b>	0,041	<b>2,512</b>	5,244	23,366
Typ V	<b>oben</b>	0,056	<b>1,839</b>	<b>3,839</b>	17,107
	<b>mitte</b>	0,085	<b>1,212</b>	<b>2,529</b>	11,271
	<b>unten</b>	0,181	<b>0,569</b>	<b>1,188</b>	5,293

**Tabelle 5.10:** Gruppeneinteilung nach *Sherard/Dunnigan* bzw. *Fell et al.*

		Kurve	Art	Sherard	Fell
Typ I	<b>oben</b>	<b>Basis</b>	2	2	
	<b>mitte</b>	<b>Basis</b>	4	2	
	<b>unten</b>	<b>Basis</b>	4	4	
Typ II	<b>oben</b>	<b>Basis</b>	4	4	
	<b>mitte</b>	<b>Basis</b>	3	3	
	<b>unten</b>	<b>Basis</b>	3	3	
Typ III	<b>oben</b>	<b>Basis</b>	3	4	
	<b>mitte</b>	<b>Filter</b>	-		
	<b>unten</b>	<b>Filter</b>	-		
Typ IV	<b>oben</b>	<b>Basis</b>	1	1	
	<b>mitte</b>	<b>Basis</b>	2	2	
	<b>unten</b>	<b>Basis</b>	4	4	
Typ V	<b>oben</b>	<b>Basis</b>	4	4	
	<b>mitte</b>	<b>Basis</b>	3	4	
	<b>unten</b>	<b>Basis</b>	3	3	

### 5.4.2 Kriterium nach *Sherard/Dunnigan*

Für die Auswertung der Erosionsstabilität nach *Sherard und Dunnigan* werden die Kornverteilungen des Bodenaufschlusses E10 herangezogen, die in den Abbildungen 5.2 und 5.3 dargestellt sind. Die Bodentypen *III<sub>mitte</sub>* und *III<sub>unten</sub>* entsprechen hier den Filtererdstoffen, mit welchen die Basiserdstoffe verglichen werden. Die Grundlagen und die Anwendung des Kriteriums sind im Kapitel 3.4.1 beschrieben.

*Sherard und Dunnigan* teilen die Kornverteilungslinie in vier Bodengruppen ein. Diese Einteilung ist Tabelle 5.10 zu entnehmen.

Obwohl - wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben - bei Bodengruppe drei keine Umstufung notwendig wäre, wird diese hier trotzdem durchgeführt, da das Kriterium dadurch strenger wird. In den Tabellen 5.11 bis 5.14 erfolgt die Auswertung der geometrischen Erosionsstabilität nach diesem Kriterium. Bei dieser Auswertung und in weiterer Folge bedeutet der Buchstabe *j*, dass das Kriterium erfüllt ist - *n* deutet darauf hin, dass das Kriterium nicht erfüllt ist.

**Tabelle 5.11:** Auswertung 1. Bodengruppe nach *Sherard/Dunnigan*

Basis	Typ IV_oben		$d_{85,B}$ [mm]	Kriterium
			0,07	0,65
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n

**Tabelle 5.12:** Auswertung 2. Bodengruppe nach *Sherard/Dunnigan*

Basis	Typ I_oben			Kriterium
				0,70
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n
Basis	Typ IV_mitte			0,70
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n

**Tabelle 5.13:** Auswertung 3. Bodengruppe nach *Sherard/Dunnigan*

Basis	Typ II_mitte		$d_{85,B}$ [mm]	Kriterium
			1,03	4,13
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ II_unten		1,03	4,11
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ III_oben		1,91	7,62
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ V_mitte		1,76	7,05
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ V_unten		2,23	8,90
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j

**Tabelle 5.14:** Auswertung 4. Bodengruppe nach *Sherard/Dunnigan*

Basis	Typ I_mitte		$d_{85,B}$ [mm]	Kriterium
			0,29	0,80
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n
Basis	Typ I_unten		0,50	1,64
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ II_oben		0,79	2,83
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ IV_unten		0,45	1,16
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j
Basis	Typ V_oben		1,49	4,72
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	j

### 5.4.3 Kriterium nach *Fell et al.*

Wie in Tabelle 5.10 ersichtlich, unterscheidet sich die Gruppeneinteilung nach *Fell et al.* von jener nach *Sherard und Dunnigan* nur bei den Bodentypen  $I_{mitte}$ ,  $III_{oben}$  und  $V_{mitte}$ . Trotzdem ist die Auswertung für alle geänderten Kategorien nochmals durchzuführen (vergleiche schrittweise Vorgehensweise im Kapitel 3.4.1). Nur Bodengruppe eins bleibt somit unverändert. Die restlichen Auswertungen sind in den nachstehenden Tabellen aufgeführt.

**Tabelle 5.15:** Auswertung 2. Bodengruppe nach *Fell et al.*

Basis	Typ I_oben			Kriterium
				0,70
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n
Basis	Typ I_mitte			0,70
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n
Basis	Typ IV_mitte			0,70
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n

**Tabelle 5.16:** Hydraulische Filterwirksamkeit nach *Fell et al.*

Filter		$d_{15,F}$ [mm]	Typ III_mitte	Typ III_unten
			0,18	0,32
		$d_{15,B}$ [mm]		
		$4 * d_{15,B}$ [mm]		
Basis	Typ I_oben	0,03	0,11	j
Basis	Typ I_mitte	0,04	0,16	j
Basis	Typ I_unten	0,06	0,22	n
Basis	Typ II_oben	0,06	0,25	n
Basis	Typ II_mitte	0,09	0,35	n
Basis	Typ II_unten	0,14	0,56	n
Basis	Typ III_oben	0,10	0,41	n
Basis	Typ IV_oben	0,11	0,44	n
Basis	Typ IV_mitte	0,02	0,08	j
Basis	Typ IV_unten	0,04	0,16	j
Basis	Typ V_oben	0,06	0,22	n
Basis	Typ V_mitte	0,09	0,34	n
Basis	Typ IV_unten	0,18	0,72	n

**Tabelle 5.17:** Auswertung 3. Bodengruppe nach *Fell et al.*

Basis	Typ II_mitte		$d_{85,B} [mm]$	Kriterium
			1,03	7,23
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ II_unten		1,03	7,19
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ V_unten		2,23	15,58
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j

**Tabelle 5.18:** Auswertung 4. Bodengruppe nach *Fell et al.*

Basis	Typ I_unten		$d_{85,B} [mm]$	Kriterium
			0,50	2,49
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ II_oben		0,79	4,39
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ III_oben		1,91	12,11
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ IV_unten		0,45	1,59
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ V_oben		1,49	7,06
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j
Basis	Typ V_mitte		1,76	10,17
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F} [mm]$	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F} [mm]$	0,96	j

In Schritt sechs wird die hydraulische Filterwirksamkeit geprüft. Dabei wird der Basiserdstoff in der ursprünglichen Form herangezogen, eine eventuell vorgenommene Umstufung wird hier nicht berücksichtigt. Um das Kriterium für den vorliegenden Fall so streng wie möglich zu gestalten, wird beim Filter allerdings schon eine Umstufung berücksichtigt (Begrenzung des Maximalkorns mit  $d_{100,F} = 50 \text{ mm}$ ). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.16 zusammengestellt.

#### 5.4.4 Kriterium nach *Kenney/Lau*

Die Auswertung nach *Kenney und Lau* erfolgt nach den im Kapitel 3.4.1 beschriebenen Grundsätzen. In Tabelle 5.19 sind die Ergebnisse zusammengestellt, wobei alle Werte in *mm* angegeben sind. Es zeigt sich, dass die Bodentypen *I* und *IV* geometrisch nicht erosionsstabil gegenüber den als Filter angenommenen Kornverteilungslinien sind.

**Tabelle 5.19:** Auswertung nach *Kenney/Lau*

Filter					Typ III_mitte		Typ III_unten	
		$d_{50,B}$	$4 * d_{50,B}$	$5 * d_{50,B}$	$d_{5,F}$	$d_{15,F}$	$d_{5,F}$	$d_{15,F}$
					0,10	0,22	0,22	0,96
Basis	Typ I_oben	0,07	0,28	0,35	j	j	j	n
Basis	Typ I_mitte	0,10	0,41	0,51	j	j	j	n
Basis	Typ I_unten	0,16	0,63	0,78	j	j	j	n
Basis	Typ II_oben	0,24	0,97	1,21	j	j	j	j
Basis	Typ II_mitte	0,33	1,30	1,63	j	j	j	j
Basis	Typ II_unten	0,40	1,60	2,00	j	j	j	j
Basis	Typ III_oben	1,41	5,63	7,04	j	j	j	j
Basis	Typ IV_oben	0,03	0,12	0,15	j	n	n	n
Basis	Typ IV_mitte	0,06	0,22	0,28	j	j	n	n
Basis	Typ IV_unten	0,14	0,58	0,72	j	j	j	n
Basis	Typ V_oben	0,40	1,61	2,02	j	j	j	j
Basis	Typ V_mitte	0,84	3,35	4,19	j	j	j	j
Basis	Typ IV_unten	1,58	6,34	7,92	j	j	j	j

### 5.4.5 Kriterium nach *Locke/Indraratna*

Die Auswertung nach *Sherard und Dunnigan* zeigt, dass im vorhandenen Beispiel drei Böden in die Gruppen 1 und 2 fallen. Es handelt sich hier um die Sieblinien:

1. Bodengruppe Typ  $IV_{oben}$
2. Bodengruppe Typ  $I_{oben}$  und Typ  $IV_{mitte}$

Es werden je Sieblinie die Masseprozentage errechnet, bei denen die Bedingung in Gleichung 3.23 gerade noch erfüllt ist. Bei Bodengruppe 2 wird die Gleichung für  $I_P < 10$  verwendet, da das Kriterium dadurch strenger wird.

**Tabelle 5.20:** Auswertung 1. Bodengruppe nach *Locke/Indraratna*

Basis	Typ IV_oben	n=45,8%	$d_{85,reduziert}$ [mm]	Kriterium
			0,02	0,28
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	j
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n

**Tabelle 5.21:** Auswertung 2. Bodengruppe nach *Locke/Indraratna*

Basis	Typ I_oben	n=22,7%	$d_{85,reduziert}$ [mm]	Kriterium
			0,03	0,12
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	n
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n
Basis	Typ IV_mitte	n=53,8%	0,05	0,20
Filter	Typ III_mitte	$d_{15,F}$ [mm]	0,22	n
Filter	Typ III_unten	$d_{15,F}$ [mm]	0,96	n

## 5.5 Hydraulische Erosion

### 5.5.1 Typ 2/2

#### 5.5.1.1 Kriterium nach *Ovodov*

Das kritische hydraulische Gefälle ergibt sich hier durch Einsetzen der Bodenkennwerte in Gleichung 3.30 auf Seite 37. Der Faktor für die Strömungskonzentration wird mit  $\chi = 0,7$  angenommen, da so das Kriterium am strengsten ist. Der vorhandene hydraulische Gradient berechnet sich aus der maximalen Geschwindigkeit der Strömung in y-Richtung.



Die Auswertung auf der sicheren Seite zeigt, dass alle Böden dem hydraulischen Erosionskriterium genügen (vergleiche Tabelle 5.22).

**Tabelle 5.22:** Auswertung nach *Ovodan*

	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	<b>Schluff</b>	0,796	0,385	2,07
	mitte	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
	unten	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
Typ II	oben	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
	mitte	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
	unten	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
Typ III	oben	<b>Kies</b>	0,866	0,019	46,58
	mitte	<b>Kies</b>	0,866	0,019	46,58
	unten	<b>Kies</b>	0,866	0,019	46,58
Typ IV	oben	<b>Schluff</b>	0,796	0,385	2,07
	mitte	<b>Schluff</b>	0,796	0,385	2,07
	unten	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
Typ V	oben	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
	mitte	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56
	unten	<b>Sand</b>	0,833	0,004	191,56

### 5.5.1.2 Kriterium nach *Davidenkoff*

Das Kriterium trifft nur eingeschränkt auf die Kornverteilungslinien im Bohrloch E10 zu. In dieser Arbeit wird es zu Vergleichszwecken ausgewertet. Als Basiserdstoff werden jene Sieblinien definiert, die eine Ungleichförmigkeit von  $U < 10$  aufweisen. Als Filter dienen wiederum die Kornverteilungslinien Typ  $III_{mitte}$  und  $III_{unten}$ .

Auch hier stellt sich der Schluff als einziger nicht erosionsstabiler Boden im Verhältnis zu den gewählten Filtern heraus.

**Tabelle 5.23:** Auswertung nach *Davidenkoff*

		Typ III_mitte				Typ III_unten		
	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	Schluff	0,273	0,385	0,71	0,261	0,385	0,68
	mitte	Sand	0,287	0,004	66,05	0,261	0,004	60,13
	unten	Sand	0,329	0,004	75,71	0,264	0,004	60,65
Typ II	oben	Sand	0,458	0,004	105,21	0,264	0,004	60,65
	mitte	Sand	0,581	0,004	133,61	0,264	0,004	60,65
	unten	Sand	0,889	0,004	204,47	0,264	0,004	60,65
Typ IV	oben	Schluff	0,262	0,385	0,68	0,260	0,385	0,68
	mitte	Schluff	0,268	0,385	0,70	0,260	0,385	0,68
	unten	Sand	0,322	0,004	73,94	0,260	0,004	59,89

### 5.5.1.3 Kriterium nach *Ziems*

Das kritische hydraulische Gefälle wird hier nach Gleichung 3.31 aus Seite 37 bestimmt. Die Definition der Bodenschichten ändert sich zu dem Kriterium nach *Davidenkoff* nicht. Es fällt auf, dass das kritische hydraulische Gefälle sehr hoch ist bzw. überschätzt wird. Das Kriterium ist daher für alle ausgewerteten Kornverteilungslinien mit großen bzw. sehr großen Sicherheiten erfüllt.

**Tabelle 5.24:** Auswertung nach *Ziems*

		Typ III_mitte				Typ III_unten		
	Kurve	Boden	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$	$i_{krit}$	$i_{vorh}$	$\eta$
Typ I	oben	Schluff	2,329	0,385	6,05	0,742	0,385	1,93
	mitte	Sand	3,169	0,004	728,69	0,783	0,004	180,01
	unten	Sand	3,251	0,004	747,52	0,787	0,004	180,93
Typ II	oben	Sand	6,109	0,004	1404,87	0,927	0,004	213,11
	mitte	Sand	4,793	0,004	1102,22	0,862	0,004	198,29
	unten	Sand	3,075	0,004	707,08	0,778	0,004	178,95
Typ IV	oben	Schluff	3,162	0,385	8,22	0,782	0,385	2,03
	mitte	Schluff	2,762	0,385	7,18	0,763	0,385	1,98
	unten	Sand	4,896	0,004	1125,98	0,867	0,004	199,46

## 5.5.2 Typ 3/2

### 5.5.2.1 Kriterium nach *Istomina*

Durch die gegebenen Randbedingungen dieses Kriteriums - die Ungleichförmigkeiten des Basiserdstoffes und des Filters müssen  $U < 10$  genügen - kann die Auswertung nicht für die kiesigen und sandigen Schichten von Typ *III* und *V* erfolgen. Es werden daher Bodentyp  $II_{mitte}$  und  $II_{unten}$  als Filter definiert. Die Auswertung erfolgt für alle übrigen Basiserdstoffe.

Das Kriterium ist mit Ausnahme des in Abbildung 5.23 dargestellten Falles ( $II_{unten}$  als Filter für  $IV_{oben}$ ) erfüllt.

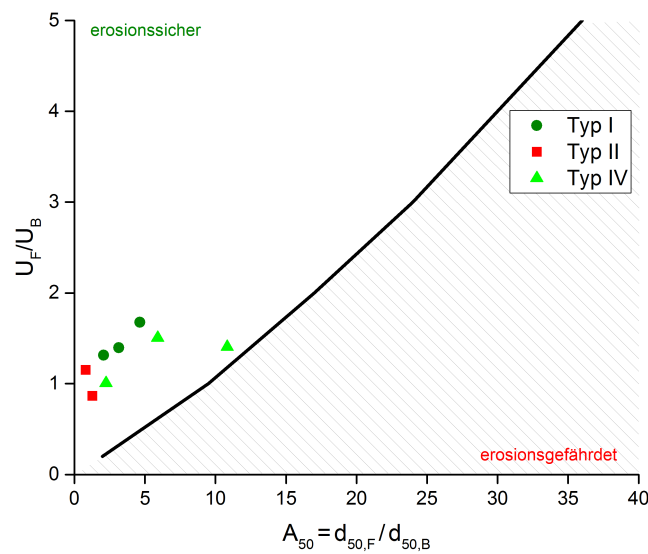


Abbildung 5.22: Auswertung *Istomina*, Typ  $II_{mitte}$  als Filter

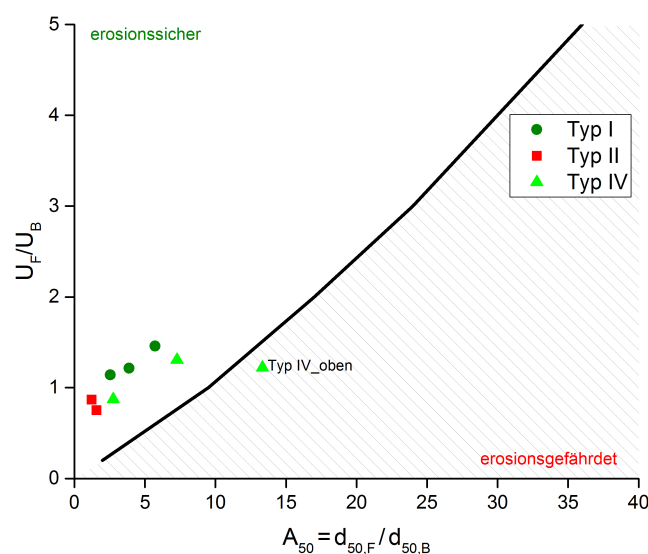


Abbildung 5.23: Auswertung *Istomina*, Typ  $II_{unten}$  als Filter

### 5.5.2.2 Kriterium nach *Brauns*

Nach *Brauns* werden wie in Kapitel 3.4.2.3 beschrieben drei Fälle unterschieden. Diese Unterscheidung wird mit der Abstandskennzahl  $\kappa$  nach Gleichung 3.32 vorgenommen. Wiederum werden die Bodentypen  $III_{mitte}$  und  $III_{unten}$  als Filter für alle anderen definiert und die Abstandskennzahl berechnet.

In Tabelle 5.25 ist ersichtlich, dass sich  $\kappa$  durchwegs in einem Bereich bewegt, in dem die geometrischen Randbedingungen ausschlaggebend sind. Eine genauere Auswertung dieses Kriterium scheint daher nicht erforderlich.

**Tabelle 5.25:** Auswertung nach *Brauns*

				Typ III_mitte	Typ III_unten
		$d_{15,F} [mm]$		0,215	0,915
		Kurve	Boden	$d_{85,B} [mm]$	$\kappa$
Typ I	<b>oben</b>	Schluff	0,173	0,311	1,322
	<b>mitte</b>	Sand	0,332	0,162	0,689
	<b>unten</b>	Sand	0,583	0,092	0,392
Typ II	<b>oben</b>	Sand	1,067	0,050	0,214
	<b>mitte</b>	Sand	2,000	0,027	0,114
	<b>unten</b>	Sand	7,209	0,007	0,032
Typ III	<b>oben</b>	Kies	20,000	0,003	0,011
Typ IV	<b>oben</b>	Schluff	0,072	0,747	3,177
	<b>mitte</b>	Schluff	0,174	0,309	1,315
	<b>unten</b>	Sand	0,544	0,099	0,420
Typ V	<b>oben</b>	Sand	4,066	0,013	0,056
	<b>mitte</b>	Sand	7,644	0,007	0,030
	<b>unten</b>	Sand	13,929	0,004	0,016

## 5.6 Zusammenfassung der Auswertung

Die vorangegangene Auswertung der unterschiedlichen Suffosions- und Erosionskriterien am Beispiel des Dammes Eberlaste zeigt, dass die Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf das jeweilige Kriterium kritisch betrachtet werden muss. Im Folgenden werden daher die Ergebnisse der ausgewerteten Kriterien zusammengefasst. Dabei werden Aussagen über die Eignung und die Anwendungsgrenzen der Kriterien getroffen.

In Tabelle 5.26 sind die Ergebnisse der Auswertung der geometrischen Suffosionskriterien für den im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Bodenaufschluss E10 des Dammes Eberlaste dargestellt.

Das Kriterium nach *Ziems* eignet sich nur für nichtbindige Erdstoffe, was eine Auswertung von Böden im Bereich von Schluffen und schluffigen Sanden ausschließt. Die Anwendung des Kriteriums im Bereich des feinkörnigen Sandes und der Kiese zeigt, dass mit keiner geometrischen Suffosionsgefahr gerechnet werden muss. Im Bereich des grobkörnigen Sandes und Kiese hat sich gezeigt, dass die Suffosionsstabilität bei diesem Kriterium nicht gegeben ist.

Bei der Auswertung des Kriteriums für die Kontaktsuffosion nach *Ziems* werden die Bodentypen  $V_{mitte}$  und  $V_{unten}$  als Filtererdstoffe definiert und mit den Basiserdstoffen verglichen. Es zeigt sich, dass ausschließlich dann Stabilität gegen geometrische Kontaktsuffosion gegeben ist, wenn Kiese auf den Filtern zu liegen kommen.

Das Kriterium nach *Sherard* gilt nur für Materialien mit Ausfallkörnungen. Da im ausgewerteten Bodenaufschluss E10 keine Ausfallkörnungen vorliegen, konnte dieses Kriterium nicht angewendet werden.

Das Kriterium nach *BAW-MAK* wird für die Auswertung aller Bodentypen im Bodenaufschluss E10 herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die schluffigen Schichten dieses Kriterium gänzlich erfüllen und der Sand es teilweise erfüllt. Beim Sand ist speziell die Sensibilität des Kriteriums im Hinblick auf die korrekte Wahl des Trenndurchmessers hervorzuheben. Werden diese zu klein oder zu groß gewählt, wird das Kriterium nicht erfüllt. Der mittlere Teil der Kornverteilungslinie ist aber dennoch suffosionsstabil. Trotz der Problematik bei der Wahl des Trenndurchmessers weist das Kriterium darauf hin, dass die sandigen Schichten in feinkörnigen Bereich ein gewisses Suffosionspotenzial in sich bergen.

Nach *Burenkova* ist eine Auswertung gleichmäßiger Kornverteilungslinien mit höherem Feinanteil möglich. Die gröberen Sande und Kiese werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgewertet, da das Kriterium für diese Böden ungeeignet ist. Der Schluff erfüllt das Kriterium und weist keine Suffosionsgefahr auf. Im sandigen Bereich ist nach den zugrunde gelegten Annahmen die geometrische Suffosionsicherheit nicht erfüllt.

Das Kriterium nach *Kenney und Lau* wird jeweils für die Grenzkurven der Bodentypen II bis V ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Schluffe und Sande im feinkörnigen Bereich suffosionsstabil sind. Bei Böden mit höherem Grobkornanteil kommt es nach diesem Kriterium zu einer Suffosionsgefährdung.

Die durchgeführten Auswertungen zeigen, dass die geometrischen Randbedingungen für Suffusion in einzelnen Böden gegeben sind. Für das tatsächliche Auftreten von Suffusion müssen jedoch die hydraulischen Voraussetzungen gegeben sein. Aus diesem Grund wurden die betroffenen Bodenarten im Hinblick auf die hydraulischen Suffosionskriterien ausgewertet.

Die Auswertung der hydraulischen Suffosionskriterien basiert auf den Ergebnissen der numerischen Berechnungen im Kapitel 4.3.1. Die dabei im Bodenaufschluss E 10 ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen wurden für die Auswertung herangezogen. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Tabelle 5.27 zusammengefasst.

Die Auswertung nach *Busch et al.* zeigt, dass die Strömungsrichtung entscheidenden Einfluss darauf hat, welche Schichten Suffosionsgefahr in sich bergen. Während bei horizontaler Strömung der Sand gefährdet ist, birgt bei vertikal nach oben gerichteter Strömung der Schluff Suffosionspotenzial. Die beschriebenen geometrischen Kriterien stufen den Schluff jedoch als geometrisch stabil ein (einzige Ausnahme bildet hier Bodentyp  $IV_{oben}$  beim Kriterium nach *Burenkova*). Es ist daher von geringer bis keiner Suffosionsgefährdung bei vertikal nach oben gerichteter Strömung auszugehen. In den sandigen Schichten zeigen die geometrischen Kriterien in gewissen Bereichen Suffosionsgefahr. Bei horizontal gerichteter Strömung kann nach *Busch et al.* Suffosion in diesen Schichten nicht ausgeschlossen werden.

Das Kriterium nach *Istomina* kann nur für grobe Abschätzungen herangezogen werden, da sich das hydraulische Gefälle ausschließlich aus der Ungleichförmigkeit der Kornverteilungslinie ergibt. Hervorzuheben ist dabei, dass die nach *Busch et al.* gefährdeten Sandschichten bei diesem Kriterium suffosionsstabil sind, was auf die gute Stufung der Kornverteilungslinien und die geringen hydraulischen Gradienten zurückzuführen ist.

In der Tabelle 5.28 sind die Ergebnisse der Auswertung der geometrischen Erosionskriterien für den im Rahmen dieser Arbeit gewählten Bodenaufschluss E10 dargestellt.

Die Auswertung nach *Terzaghi und Peck* erfolgte für drei verschiedene Filterschichten, welche mit den Basiserdstoffen verglichen wurden. Dabei zeigt sich, dass das Kontaktersionskriterium in den meisten Fällen erfüllt wird, die Durchlässigkeitsregel jedoch nicht. In Tabelle 5.28 wurden diese Böden bei der Auswertung mit *teilweise erfüllt* beurteilt. Es ist davon auszugehen, dass die natürlich vorkommenden Schichten aufgrund der geologischen Entstehung im Bereich des Sandes ausreichend durchlässig sind, um die hydraulische Filterwirksamkeit zu gewährleisten.

Die Auswertung und die Ergebnisse nach *Sherard/Dunnigan* bzw. nach *Fell et al.* sind größtenteils ähnlich. Das liegt daran, dass es sich bei dem Kriterium nach *Fell et al.* um eine Weiterentwicklung der Kriteriums nach *Sherard und Dunnigan* handelt. Bei beiden Auswertungen wird ersichtlich, dass die feinen schluffigen und sandigen Schichten nicht auf den grobkörnigen Kiesen zu liegen kommen dürfen, um die geometrische Erosionsstabilität zu gewährleisten.

Das Kriterium nach *Kenney und Lau* zeigt ähnliches. Es stellt sich in der Anwendung etwas konservativer als *Sherard/Dunnigan* und *Fell et al.* dar. Das ist wahrscheinlich auf den Umstand zurückzuführen, dass im Kriterium nach *Fell et al.* keine Sicherheiten berücksichtigt werden.

Die Anwendung von *Locke und Indraratna* beschränkt sich auf die nach *Fell et al.* definierten Bodengruppen eins und zwei. Es ist daher für die meisten der vorliegenden Kornverteilungslinien ungeeignet. Für die ausgewerteten Kornverteilungslinien verhält sich dieses Kriterium strenger ist als jenes nach *Fell et al.*.

**Tabelle 5.26:** Zusammenstellung der geometrischen Suffosionskriterien

		Ziems	Kontaktsuffosion nach Ziems			Sherard	BAW-MAK	Burenkova	Kenney/Lau
Kurve	Boden	$T_{yp}$	$V_{mitte}$ als Filter	$T_{yp}$	$V_{unten}$ als Filter				
Typ I	oben	u	n	n	n	u	j	j	*
	mitte	j	n	n	n	u	t	t	*
	unten	j	n	n	n	u	t	t	*
Typ II	oben	j	n	n	n	u	t	t	t
	mitte	j	n	n	n	u	t	t	*
	unten	j	j	n	n	u	t	t	t
Typ III	oben	j	j	n	n	u	n	n	n
	mitte	j	j	n	n	u	n	n	*
	unten	n	j	j	n	u	n	n	n
Typ IV	oben	u	n	n	n	u	j	j	t
	mitte	u	n	n	n	u	j	j	*
	unten	u	n	n	n	u	t	t	t
Typ V	oben	n	n	n	n	u	t	t	n
	mitte	n	-	-	-	u	t	t	*
	unten	n	-	-	-	u	t	t	n

j = Kriterium erfüllt; n = Kriterium nicht erfüllt; t = Kriterium ist teilweise erfüllt; u = Kriterium ist zur Auswertung ungeeignet; \* = Kriterium wurde nicht ausgewertet; - = Schicht als Filter herangezogen

**Tabelle 5.27:** Zusammenstellung der hydraulischen Suffosionskriterien

			Busch et al.	Busch et al.	Istomina
	Kurve	Boden	Strömung horizontal	Strömung vertikal nach oben	
Typ I	<b>oben</b>	Schluff	j	n	n
	<b>mitte</b>	Sand	n	j	j
	<b>unten</b>	Sand	n	j	j
Typ II	<b>oben</b>	Sand	n	j	j
	<b>mitte</b>	Sand	j	j	j
	<b>unten</b>	Sand	j	j	j
Typ III	<b>oben</b>	Kies	j	j	n
	<b>mitte</b>	Kies	j	j	n
	<b>unten</b>	Kies	j	j	n
Typ IV	<b>oben</b>	Schluff	j	n	n
	<b>mitte</b>	Schluff	j	n	n
	<b>unten</b>	Sand	n	j	j
Typ V	<b>oben</b>	Sand	j	j	n
	<b>mitte</b>	Sand	j	j	n
	<b>unten</b>	Sand	j	j	n

j = Kriterium erfüllt; n = Kriterium nicht erfüllt

Auch bei der Erosion gilt, dass erst tatsächlich Erosionserscheinungen auftreten, wenn die hydraulischen Voraussetzungen dafür erfüllt sind. Tabelle 5.29 liefert eine Zusammenstellung der durchgeführten Auswertungen.

Typ 2/2 bezeichnet dabei die vertikal nach oben gerichtete Strömung normal auf die Schichtgrenze (vergleiche Abbildung 3.12 auf Seite 35). Das Kriterium nach *Ovodov* ist dabei für alle behandelten Bodentypen erfüllt. Das ist vorwiegend auf die kleinen hydraulischen Gradienten im betrachteten Schnitt zurückzuführen.

*Davidenkoff* setzt in seinem Kriterium gleichförmige Erdstoffe voraus. Das ist bei den vorhandenen Kornverteilungen nur teilweise erfüllt, die Ergebnisse der Auswertung dienen daher nur als Vergleichswerte. Nach dem Kriterium nach *Davidenkoff* kommt es zu Erosionserscheinungen, wenn schluffige Schichten auf den kiesigen Filterschichten zu liegen kommen.

Die Auswertung nach *Ziems* zeigt, dass die hydraulische Erosionsstabilität bei vertikal nach oben gerichteter Strömung erfüllt ist. Das kritische hydraulische Gefälle erscheint hier aber im Vergleich zu den anderen ausgewerteten Kriterien als zu hoch.

Bei der Auswertung der Kriterien zu Typ 2/2 wird deutlich, dass die kritischen hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit vom gewählten Kriterium stark variieren. Die Berück-



sichtigung der in der Literatur angegebenen Anwendungsgrenzen erscheint hier besonders wichtig. Auch sind diese Kriterien im Zusammenhang mit den geometrischen Voraussetzungen zu sehen. Im vorliegenden Beispiel bedeutet das, dass aufgrund der geometrischen Randbedingungen Erosion zwischen den Schluffen und Kiesen nicht ausgeschlossen werden kann.

Mit Typ 3/2 werden hydraulische Erosionskriterien bezeichnet, bei denen die Strömung parallel zur Schichtgrenze erfolgt (vergleiche Abbildung 3.14 auf Seite 38). Eine Zusammenstellung der Auswertung ist ebenfalls in Tabelle 5.29 enthalten.

Nach *Istomina* müssen die Ungleichförmigkeiten des Basis- und Filtererdstoffs gewissen Randbedingungen genügen. Eine Auswertung ist daher nicht für alle Kornverteilungen möglich. Im Grenzbereich zur Erosionsgefährdung befindet sich die Kombination feiner Schluff, der auf den als Filter definierten Kiesen liegt.

Das Kriterium nach *Brauns* gibt Rückschluss darauf, dass bei den vorliegenden Kornverteilungen die geometrischen Randbedingungen ausschlaggebend sind.

**Tabelle 5.28:** Zusammenstellung der geometrischen Erosionskriterien

Kurve	Boden	Terzaghi/Peck			Sherard/Dunnigan			Fell et al.			Kenney/Lau			Locke/Indraratna		
		<i>III<sub>oben</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>
Typ I	oben	j	j	n	j	n	j	n	j	n	j	n	j	n	n	n
	mitte	t	j	j	j	n	j	n	j	n	j	n	j	n	u	u
	unten	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	n	j	u	u	u
Typ II	oben	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
	mitte	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
	unten	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
Typ III	oben	-	-	-	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
	mitte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	u	u	u
	unten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	u	u	u
Typ IV	oben	j	j	n	j	n	j	n	j	n	n	n	j	j	n	n
	mitte	j	j	n	j	n	j	n	j	n	j	n	j	n	n	n
	unten	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	n	j	u	u	u
Typ V	oben	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
	mitte	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u
	unten	t	t	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	u	u	u

j = Kriterium erfüllt; n = Kriterium nicht erfüllt; t = Kriterium ist teilweise erfüllt; u = Kriterium ist zur Auswertung ungeeignet; \* = Kriterium wurde nicht ausgewertet; - = Schicht als Filter herangezogen

**Tabelle 5.29:** Zusammenstellung der hydraulischen Erosionskriterien

		Typ 2/2			Typ 3/2					
	Ovodov	Davidenkoff	Ziems	Istomina	Brauns					
Kurve	Boden	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>III<sub>mitte</sub></i>	<i>III<sub>unten</sub></i>	<i>II<sub>mitte</sub></i>	<i>II<sub>unten</sub></i>			
Typ I	oben	Schluff	j	n	j	j	j	j	g	g
	mitte	Sand	j	j	j	j	j	j	g	g
	unten	Sand	j	j	j	j	j	j	g	g
Typ II	oben	Sand	j	j	j	j	j	j	g	g
	mitte	Sand	j	j	j	-	j	j	g	g
	unten	Sand	j	j	j	j	-	j	g	g
Typ III	oben	Kies	j	u	u	u	u	u	u	u
	mitte	Kies	j	-	u	u	u	u	-	u
	unten	Kies	j	u	-	u	u	u	u	-
Typ IV	oben	Schluff	j	n	j	j	j	n	g	g
	mitte	Schluff	j	n	j	j	j	j	g	g
	unten	Sand	j	j	j	j	j	j	g	g
Typ V	oben	Sand	j	u	u	u	u	u	g	g
	mitte	Sand	j	u	u	u	u	u	g	g
	unten	Sand	j	u	u	u	u	u	g	g

j = Kriterium erfüllt; n = Kriterium nicht erfüllt; t = Kriterium ist teilweise erfüllt; u = Kriterium ist zur Auswertung ungeeignet; \* = Kriterium wurde nicht ausgewertet; - = Schicht als Filter herangezogen; g = geometrische Kriterien sind ausschlaggebend

# Kapitel 6

## Schlussfolgerungen

Staudämme sind Bauwerke, an die im Hinblick auf die Sicherheit hohe Anforderungen gestellt werden. Insbesondere bei unterströmten Dämmen kommt der Kenntnis des Strömungsverhaltens große Bedeutung zu, um in weiterer Folge die Erosionsgefährdung abschätzen zu können. In der Literatur existiert dazu eine Vielzahl an Kriterien für unterschiedliche Anwendungsbereiche und Bodenarten.

Ziel dieser Arbeit war es daher, Suffosions- und Erosionskriterien an einem konkreten Beispiel anzuwenden, um deren Brauchbarkeit im Dammbau zu überprüfen.

Dazu wurde ein numerisches Modell für den Damm Eberlaste erstellt, um das Unterströmungsverhalten darzustellen. Der Schnitt durch den Damm wurde dabei so gewählt, dass möglichst viele Informationen zu Geologie und Unterströmung vorlagen. Das erwies sich für die Erstellung und Kalibrierung des zweidimensionalen numerischen Modells als entscheidend. Anhand von Messdaten konnten die Ergebnisse der numerischen Berechnung mit den Piezometern im Damm verglichen und das numerische Modell kalibriert werden. Dabei erfolgte keine Berücksichtigung räumlicher Randbedingungen.

Bei der numerischen Simulation hat sich gezeigt, dass die gewählten Randbedingungen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Hier sind speziell die Anströmungsverhältnisse und die Modellgröße hervorzuheben. Bei der Wahl der Randbedingungen sind Überlegungen bezüglich der vorherrschenden Grundwasserverhältnisse unumgänglich. Ebenso muss die Größe des zu modellierenden Bereiches richtig eingeschätzt werden, um die Einflüsse aus dem Reservoir berücksichtigen zu können.

Des Weiteren hat sich bei der Modellierung gezeigt, dass die Wahl der Durchlässigkeitsbeiwerte bei der Durchströmungsberechnung von entscheidender Bedeutung ist. Diese sollten durch geologische Untersuchungen vor Beginn der Simulation so genau wie möglich festgestellt werden. Im vorliegenden Beispiel konnten die aus der Literatur abgeleiteten Annahmen durch den Vergleich mit vorliegenden Messergebnissen größenordnungsmäßig bestätigt werden. Die zweidimensionale Auswertung der Potenzialhöhen im Damm zeigt dabei eine ausreichend gute Übereinstimmung der Rechen- mit den Messerwerten. Anzumerken ist dabei, dass die Ergebnisse der Berechnung durchwegs auf der sicheren Seite liegen und es eher zu einer Überschätzung der tatsächlichen Strömungsverhältnisse durch

die numerische Berechnung kommt.

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Berechnung und den vorliegenden Bodenaufschlüssen wurden ausgewählte Suffosions- und Erosionskriterien ausgewertet. Die Bodenaufschlüsse wurden dabei für die Auswertung anhand der Sieblinie zu charakteristischen Bodengruppen zusammengefasst, welche durch Grenzkurven definiert sind. Diese Vorgangsweise hat sich im Laufe der Auswertung als praktikabel und zielführend erwiesen. Die Auswertung der Kriterien erfolgte dabei systematisch nach geometrischen und hydraulischen Grundsätzen.

Bei der Anwendung der geometrischen Suffosionskriterien wurde festgestellt, dass die in verschiedenen Aufschlüssen angetroffenen Bodengruppen vergleichbar sind. Die Auswertung konzentriert sich daher auf das Bohrloch E10, da hier alle Bodenarten (Schluff, Sand und Kies) vertreten sind.

Bei der Auswertung hat sich gezeigt, dass Böden mit einem höheren Feinkornanteil nach dem Kriterium nach *Ziems* nicht suffosionsgefährdet sind. Grobkörnige weitgestufte Sande und Kiese können das Kriterium jedoch nicht erfüllen. Bei der Kontaktsuffosion zeigt sich, dass das Kriterium nach *Ziems* nur erfüllt wird, wenn als Basiserdstoff Schichten gewählt werden, die dem Filter ähneln. Bei großen Unterschieden zwischen Basis- und Filterschicht wird das Kriterium nicht erfüllt. Die Auswertung nach *BAW-MAK* zeichnet ein ähnliches Bild. Die feinkörnigen Kornverteilungslinien erweisen sich als weitgehend suffosionsstabil, was auch durch *Burenkova* bestätigt wird. Das Kriterium nach *Kenney und Lau* zeigt, dass die grobkörnigen Sande und Kiese eine Suffosionsgefährdung aufweisen.

Für die Auswertung der hydraulischen Suffosionskriterien wurden die Ergebnisse der numerischen Berechnung herangezogen. Bei der Anwendung ist speziell auf die Definition der Kriterien bezüglich der Strömungsrichtung zu achten. Nach *Busch et al.* bergen die feinkörnigen Sande bei horizontaler, schichtenparalleler Strömung ein gewisses Suffosionspotenzial. Bei vertikal nach oben gerichteter Strömung normal zur Schichtgrenze verändern sich die Bedingungen, und der Schluff wird suffosionsgefährdet. Die Auswertung nach *Istomina* liefert in diesem Zusammenhang wenig brauchbare Ergebnisse, da hier die Richtungsbezogenheit der Strömung nicht berücksichtigt wird. Die zulässigen hydraulischen Gradienten sind hier ausschließlich von der Ungleichförmigkeit abhängig und erscheinen - vor allem bei gut gestuften gleichmäßigen Sieblinien - als zu gering. Das Kriterium kann daher lediglich als Näherung betrachtet werden.

Zur Auswertung der geometrischen Erosionskriterien ist anzumerken, dass hier Filterregeln zur Anwendung kommen, die ursprünglich für die Bemessung von Filtern entwickelt wurden. Die Anwendung an einer natürlichen Schichtenfolge wird in diesen Kriterien nicht berücksichtigt. Der Schichtenaufbau ist in der Natur meist nicht klar definiert respektive lassen sich die natürlichen Schichten nicht immer eindeutig in Filter- und Basiserdstoffe einteilen. Zudem zeigt sich bei der Auswertung, dass die Durchlässigkeitsregeln der Filterkriterien nur schwer zu erfüllen sind. Die Auswertung zeigt, dass bei einem direkten Übergang von schluffigen Schichten auf Kies, die Erosion geometrisch nicht ausgeschlossen

werden kann. Das bestätigt auch die Auswertung der hydraulischen Erosionskriterien.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Beurteilung von Suffosions- bzw. Erosionsgefahr bei unterströmten Dämmen durch die Zuhilfenahme eines numerischen Modells, wie im Rahmen dieser Arbeit ausgeführt wurde, gut unterstützt werden kann. Voraussetzungen dafür sind die genaue Kenntnis der sich einstellenden Strömungsverhältnisse und der Bodenkennwerte. Die Anwendung der Suffosions- und Erosionskriterien erfordert dabei eine spezifische und ingenieurmäßige Betrachtung der einzelnen Kriterien mit speziellem Fokus auf deren Anwendungsbereiche und Grenzen.

# Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D. (2010). *Grundbau und Bodenmechanik - Studienunterlagen zur Vorlesung SS2010*. Wien: Institut für Geotechnik.
- [2] BAW MAK (1989). *Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK)*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- [3] BAW MSD (2011). *Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- [4] BRAUNS, J. (1985). *Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung*. Wasserwirtschaft 75, Nr. 10.
- [5] BRINKGREVE, R.B.J.; KUMARSWAMY, S.; SWOLFS, W.M. (2015). *Plaxis Benutzer-Handbuch*. Niederlande.
- [6] BUSCH, K.F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K.; (1993). *Geohydraulik*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- [7] DROBIR, D. (2010). *Vorlesungsskriptum Talsperren*. Wien: Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.
- [8] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D; BELL, G.; (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. London.
- [9] HENZINGER, C. (2009). *Innere Erosion bei Dämmen*. Wien: Diplomarbeit Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.
- [10] ICOLD. (1988). *Dam design criteria - Philosophy of choice - Bulletin 61*. International Commission on Large Damms, Paris.
- [11] ICOLD. (1994). *Embankment Dams Granular Filters and Drains - Bulletin 95*. International Commission on Large Damms, Paris.
- [12] ICOLD. (2015). *Internal Erosion of existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundation - Bulletin 164, Volume 1: Internal Erosion Processes and Engineering Assessment*. International Commission on Large Damms, Paris.
- [13] KOLYMBAS, D. (2011). *Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York.

- [14] KROPATSCHEK, H. (1969). *Der Bau der Zemmkraftwerke*. Österreichische Wasserwirtschaft, 21. Jahrgang, Springer Verlag, Wien, New York.
- [15] KROPATSCHEK, H.; RIENÖSSL, K. (1970). *Die Innendichtung des Erddammes Eberlaste der Zemmkraftwerke mit einem vertikalen Asphaltbetonkern*. Die Talsperren Österreichs, Heft 18, Montreal.
- [16] KUTZNER, Ch. (1996). *Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [17] LANG, H.-J.; HUDER, J.; AMANN, P.; PUZRIN, A. (2007). *Bodenmechanik und Grundbau*. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [18] LOCKE, M.; INDRARATNA, B. (2002). *Filtration of broadly graded soils: the reduced PSD method*. Géotechnique 52, No. 4.
- [19] HOMEPAGE VERBUND. (2016). *www.verbund.com*. Jänner 2016.
- [20] MUCKENTHALER, P. (1989). *Hydraulische Sicherheit von Staudämmen*. Bericht des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 61.
- [21] PERZLMAIER, S. (2007). *Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen*. Bericht des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt. Heft 109.
- [22] RIENÖSSL, K. (1973). *Schüttdämme mit Asphaltbetonkerdichtung - Erfahrungen und neue Versuchsergebnisse*. Die Talsperren Österreichs, Heft 21, Madrid.
- [23] RIENÖSSL, K.; SCHLOSSER, J. (1972). *Erddamm Eberlaste - Entwurf und Ausführung*. ÖZE: Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft, 25. Jahrgang, Heft 10.
- [24] RIENÖSSL, K.; SCHNELLE, P. (1976). *Schüttdämme Durchlassboden und Eberlaste, Große Setzungen und Unterströmungen in der Überlagerung*. Die Talsperren Österreichs, Heft 22, Mexiko.
- [25] SAUCKE, U. (2006). *Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe*. geotechnik 29, Nr. 1.
- [26] SHERARD, J.L.; DUNNINGAN, L.P.; (1989). *Critical Filters for impervious Soils*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 115, Nr. 7.
- [27] SHERARD, J.L.; DUNNINGAN, L.P.; TALBOT, J.R. (1984). *Basic Properties of Sand and Gravel Filters*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 110, Nr. 6.
- [28] SHERARD, J.L.; DUNNINGAN, L.P.; TALBOT, J.R. (1984). *Filters for Silts and Clays*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 110, Nr. 6.



- [29] STRIEGLER, W. (1998). *Dammbau in Theorie und Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [30] TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1961). *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Springer Verlag, Berlin.
- [31] TSCHERNUTTER, P. (2010). *Vorlesungsskriptum Dammbau*. Wien: Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.
- [32] VERBUND. (2015) *Besichtigung Damm Eberlaste und Besucherzentrum Mayrhofen*. August 2015.
- [33] WITT, K.J. (2010). *Grundbau-Taschenbuch: Teil 2: Geotechnische Verfahren*. 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.
- [34] WITTMANN, L. (1980). *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien*. Karlsruhe: Institut für Felsmechanik.

# Anhang A

## Auswertungspunkte

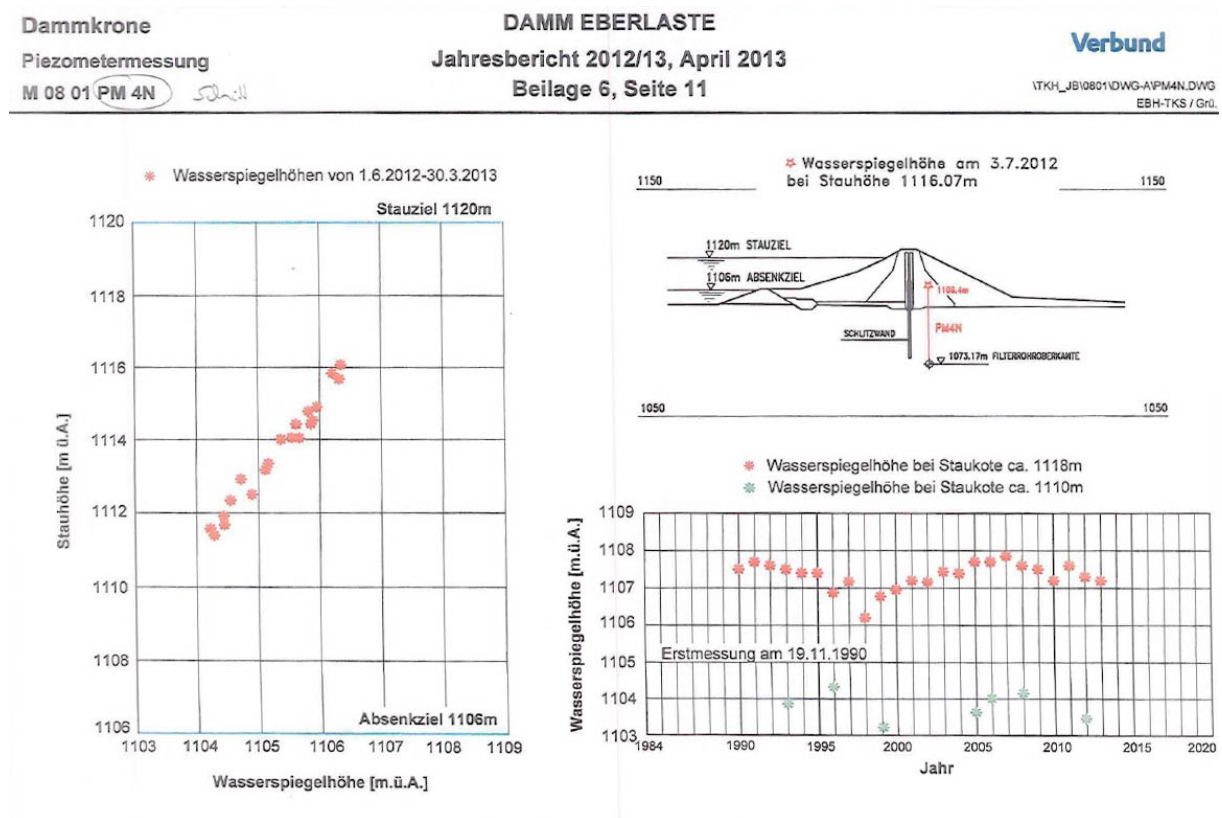


Abbildung A.1: Piezometer PM 4N

# A. Auswertungspunkte

Dammkrone  
Piezometermessung  
M 08 01 PM 13N *sdn*

DAMM EBERLASTE  
Jahresbericht 2012/13, April 2013  
Beilage 6, Seite 5

Verbund  
VTKH\_JB10801DWG-APM13N.DWG  
EBH-TKS / Grö.

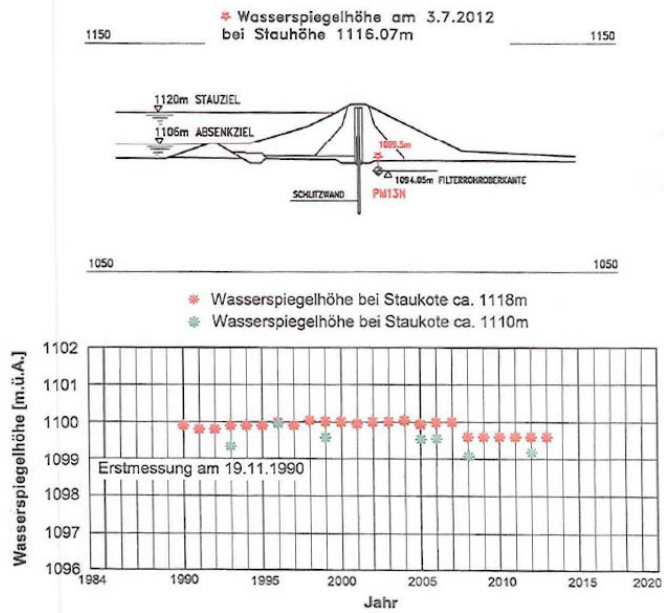
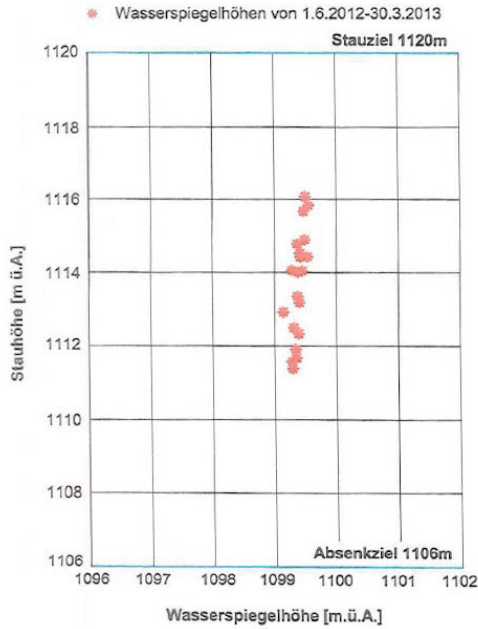


Abbildung A.2: Piezometer PM 13N

Dammkrone  
Piezometermessung  
F 08 01 PM 14 *sdn*

DAMM EBERLASTE  
Jahresbericht 2012/13, April 2013  
Beilage 6, Seite 10

Verbund  
VTKH\_JB10801DWG-APM14.DWG  
EBH-TKS / Grö.

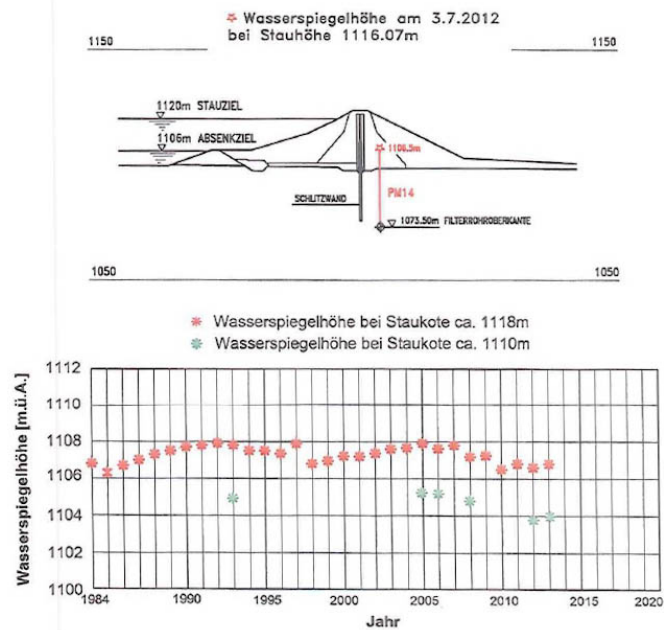
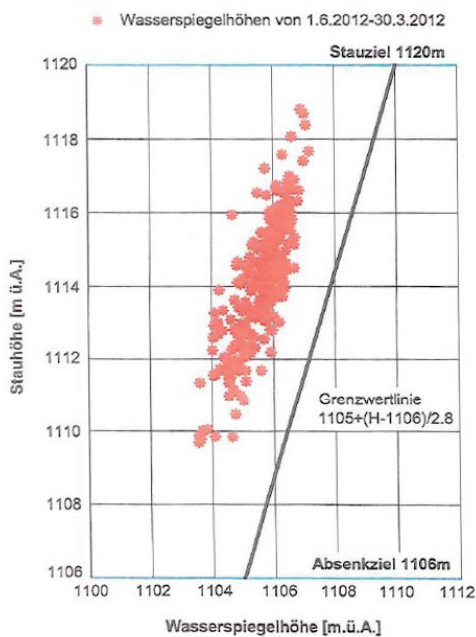


Abbildung A.3: Piezometer PM 14

# A. Auswertungspunkte

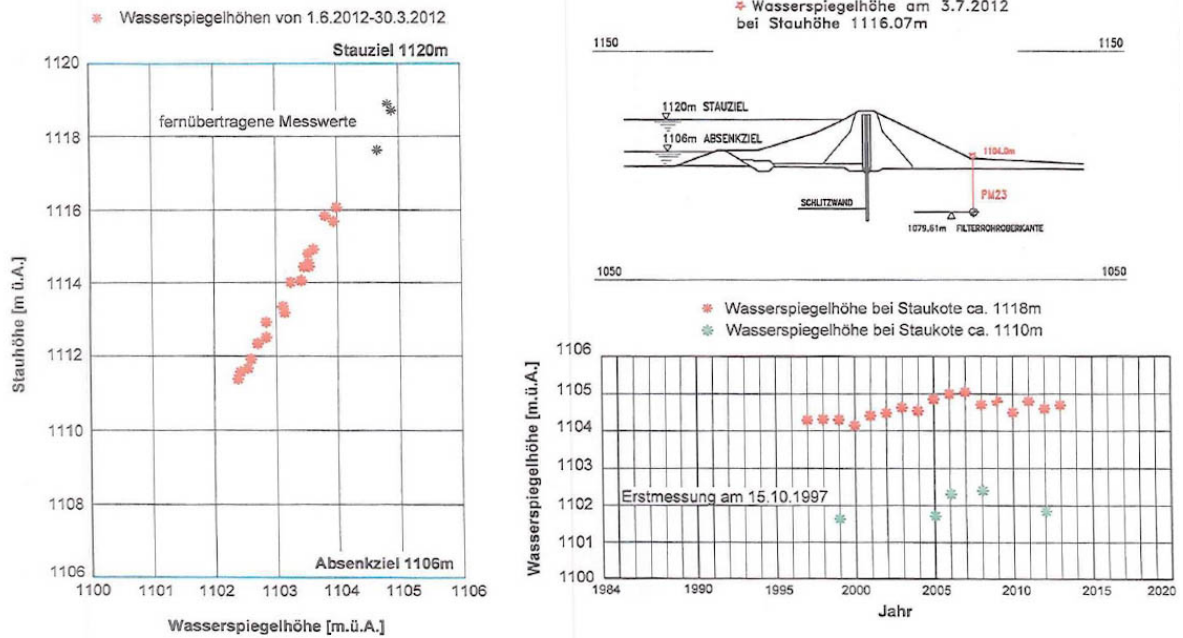


Abbildung A.4: Piezometer PM 23

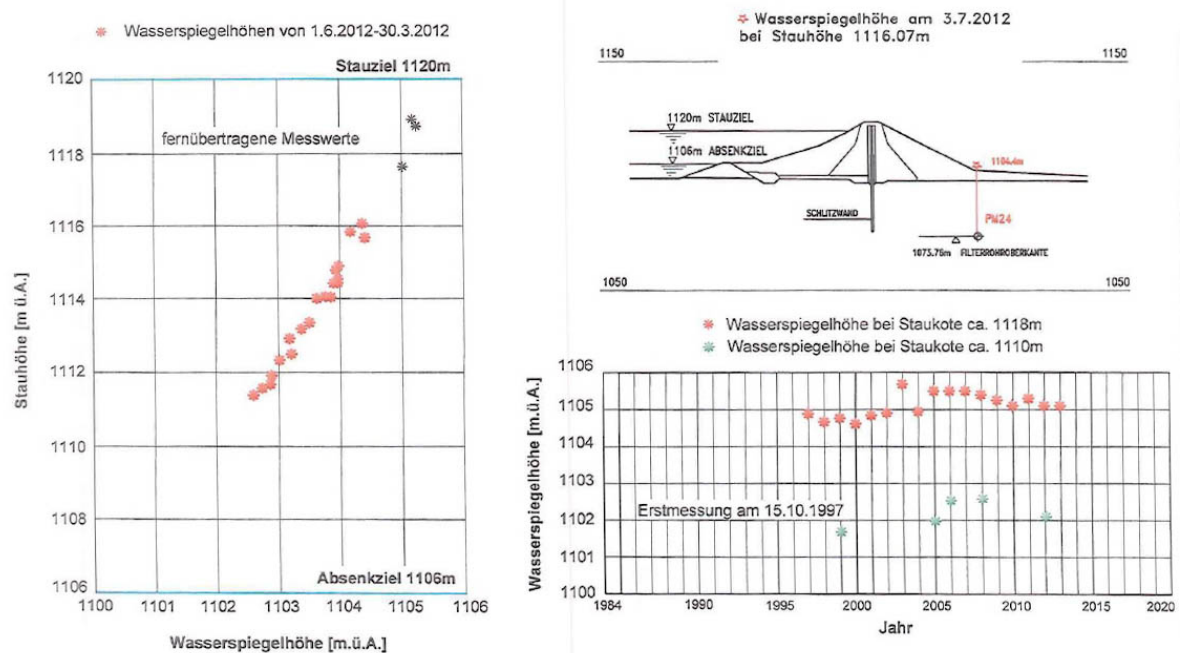


Abbildung A.5: Piezometer PM 24

# A. Auswertungspunkte

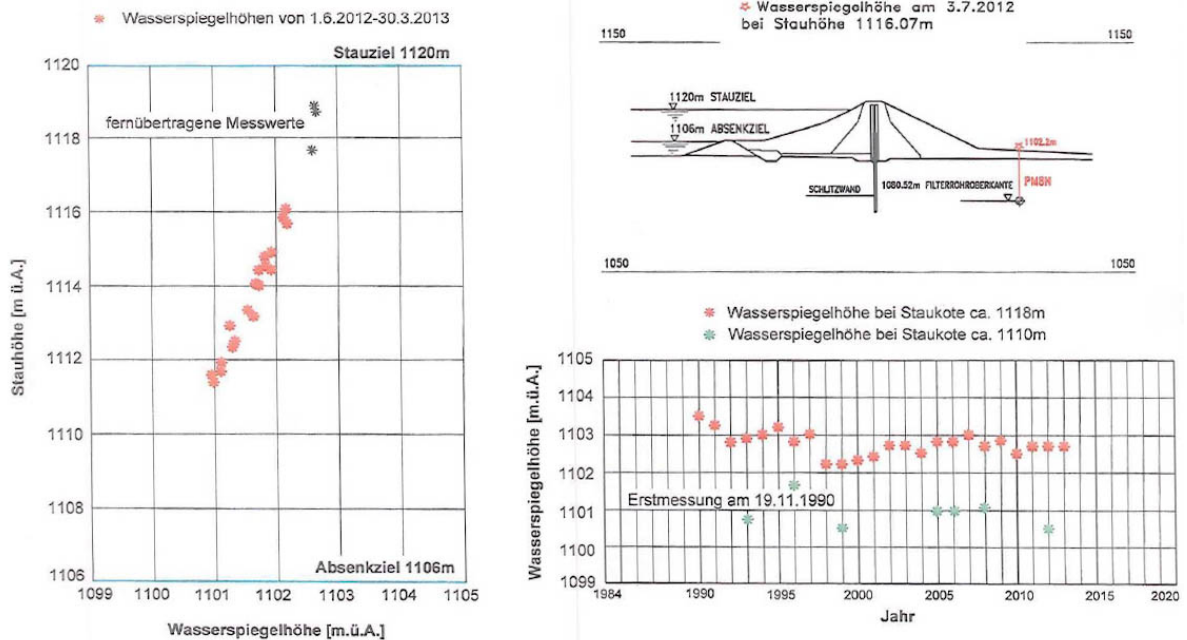


Abbildung A.6: Piezometer PM 8N

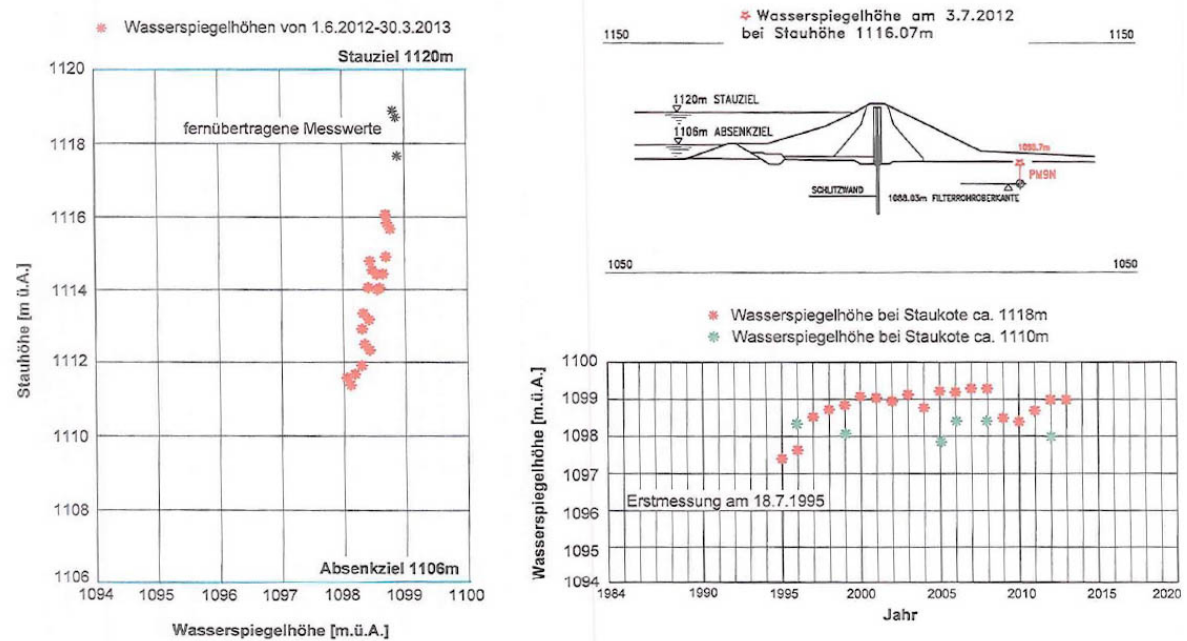


Abbildung A.7: Piezometer PM 9N

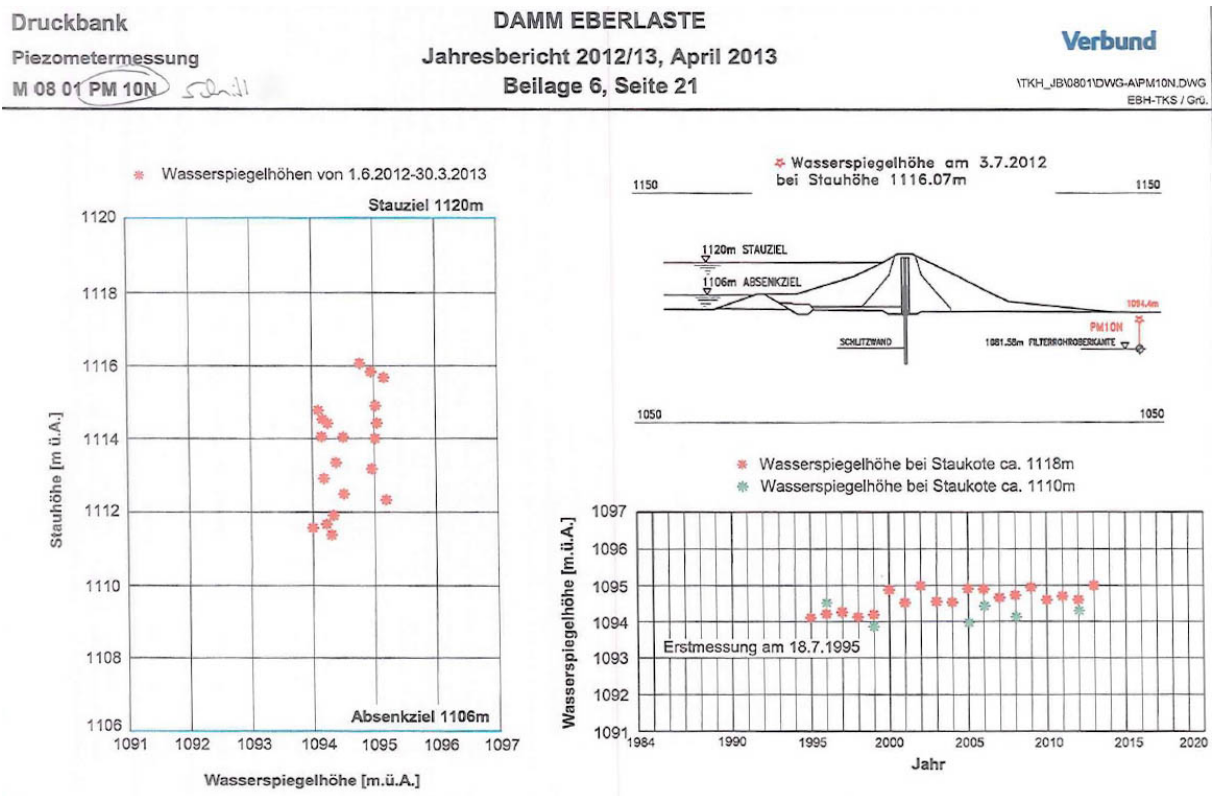


Abbildung A.8: Piezometer PM 10N

# Anhang B

## Sieblinien und Korndurchmesser

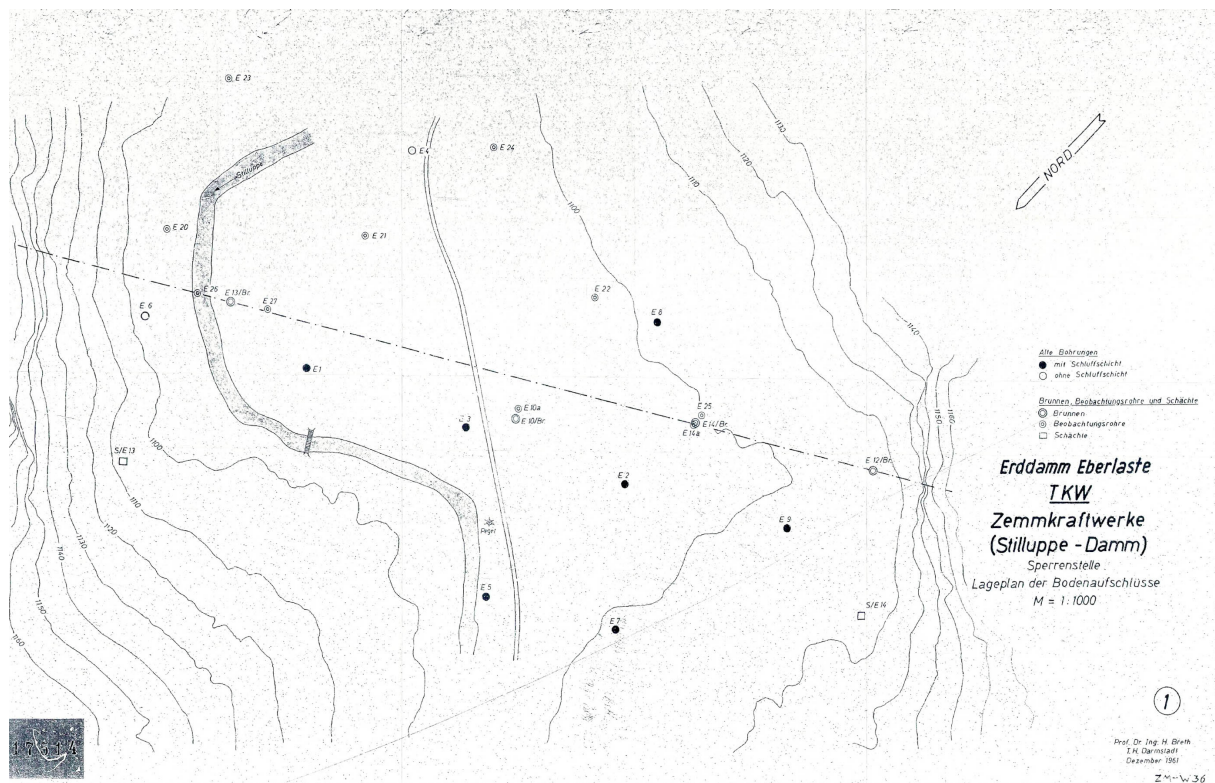


Abbildung B.1: Lageplan Bodenaufschlüsse

B. Sieblinien und Korndurchmesser

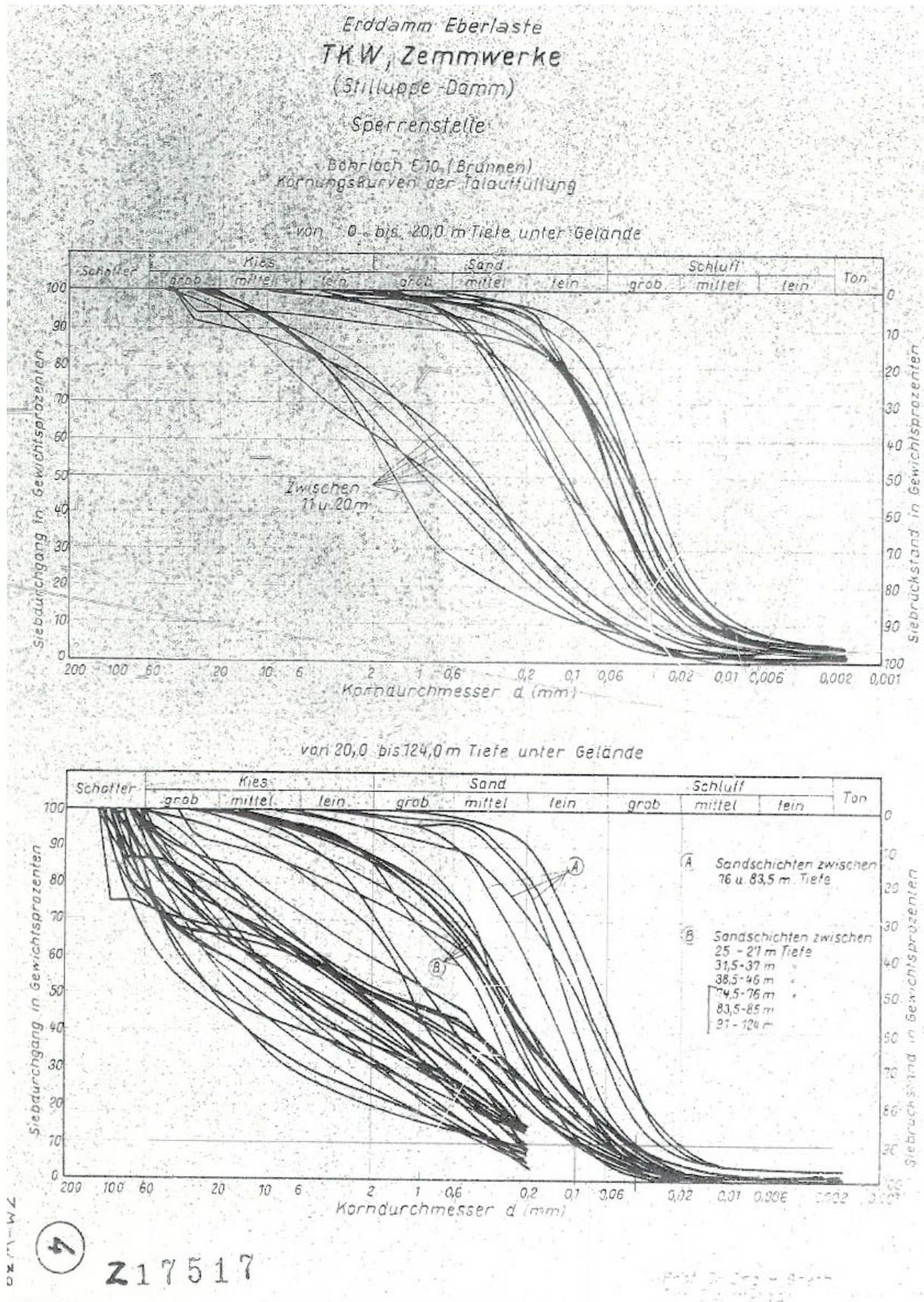


Abbildung B.2: Sieblinien Bohrloch E10



B. Sieblinien und Korndurchmesser

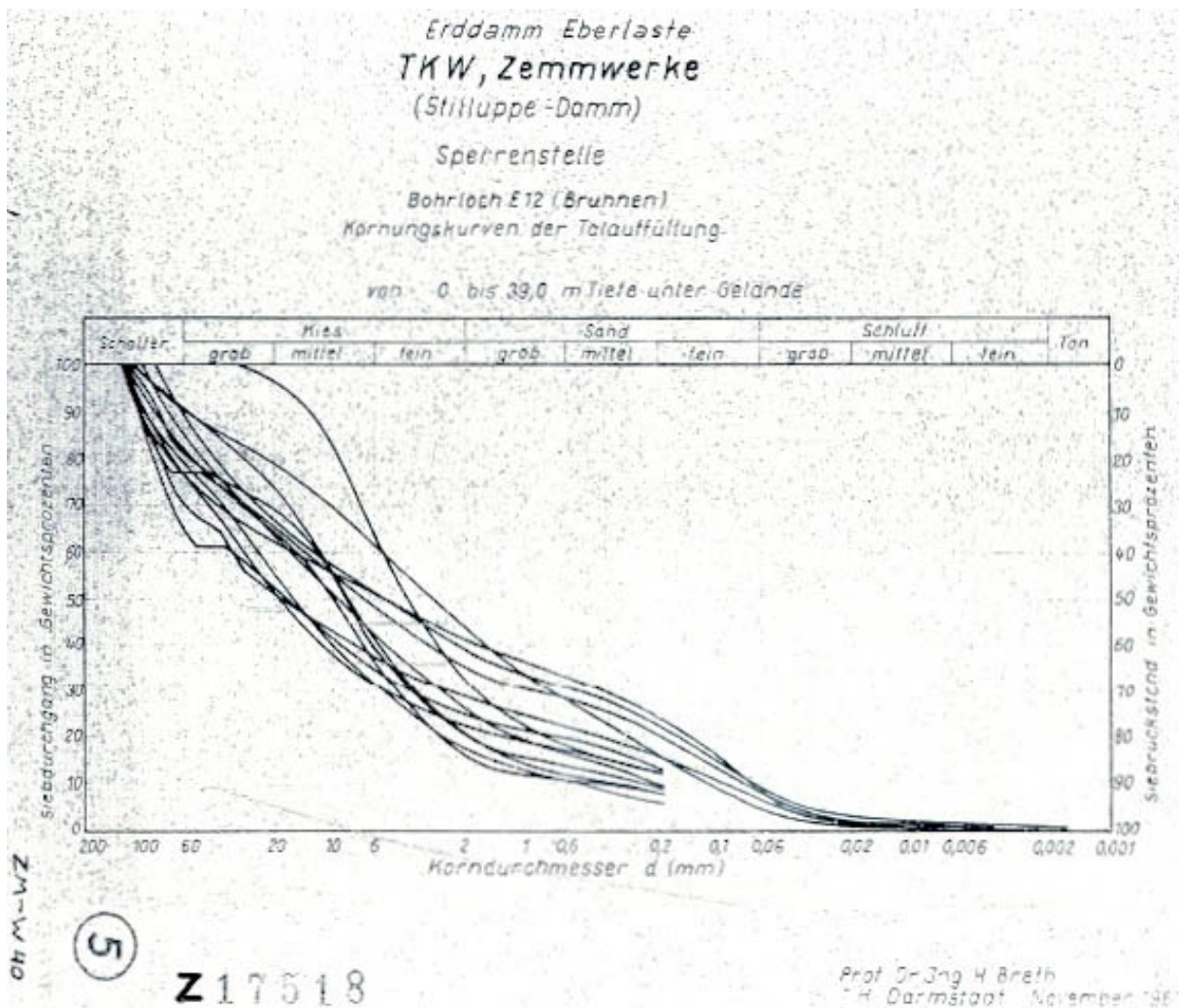


Abbildung B.3: Sieblinien Bohrloch E12

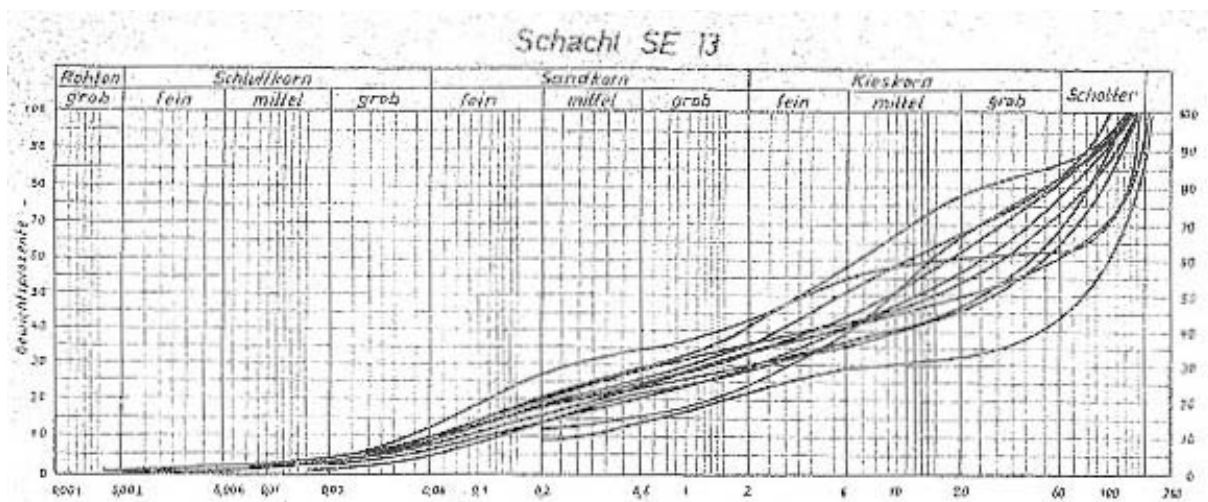


Abbildung B.4: Sieblinien Schacht SE13

B. Sieblinien und Korndurchmesser

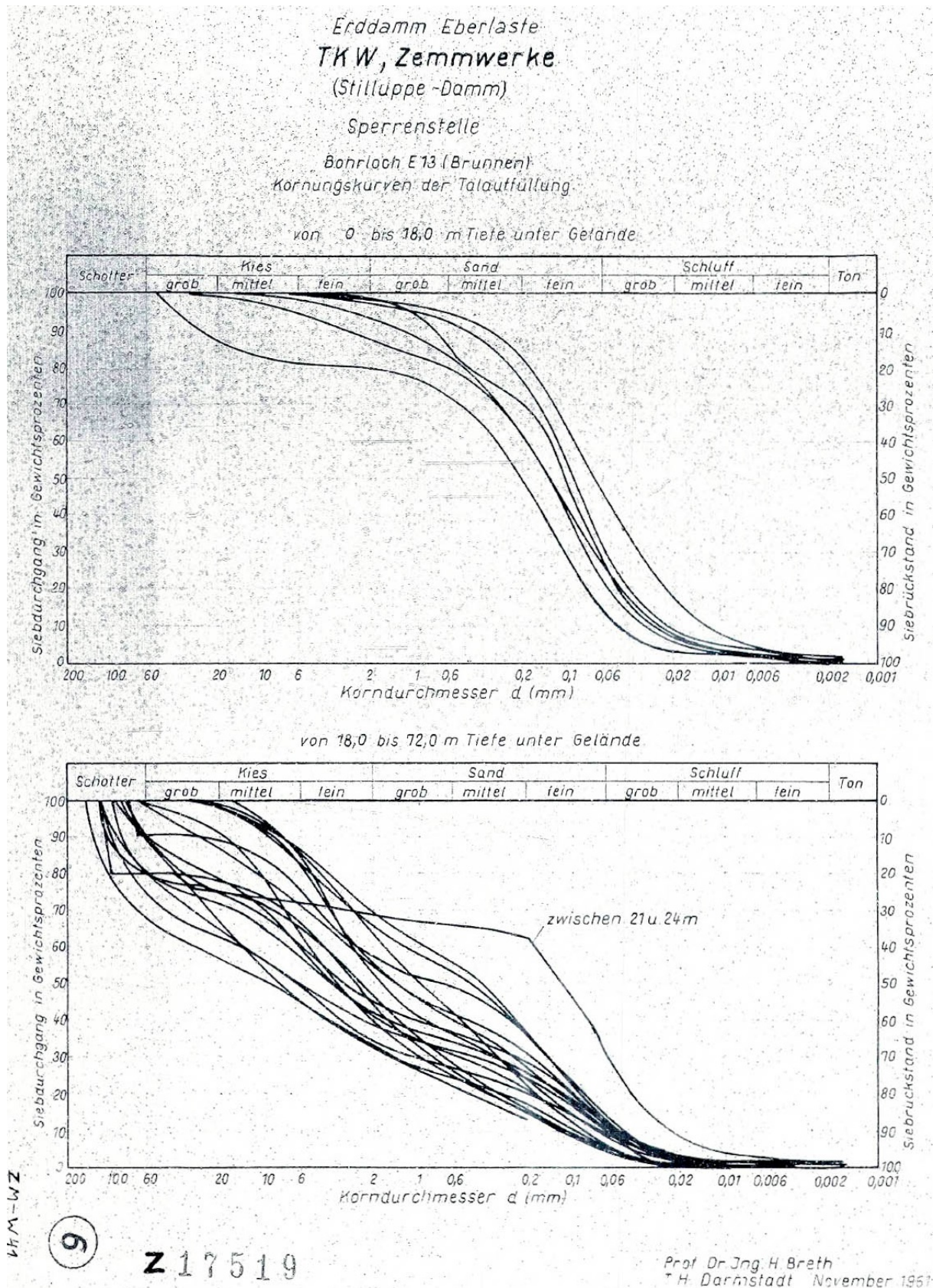


Abbildung B.5: Sieblinien Bohrloch E13

B. Sieblinien und Korndurchmesser

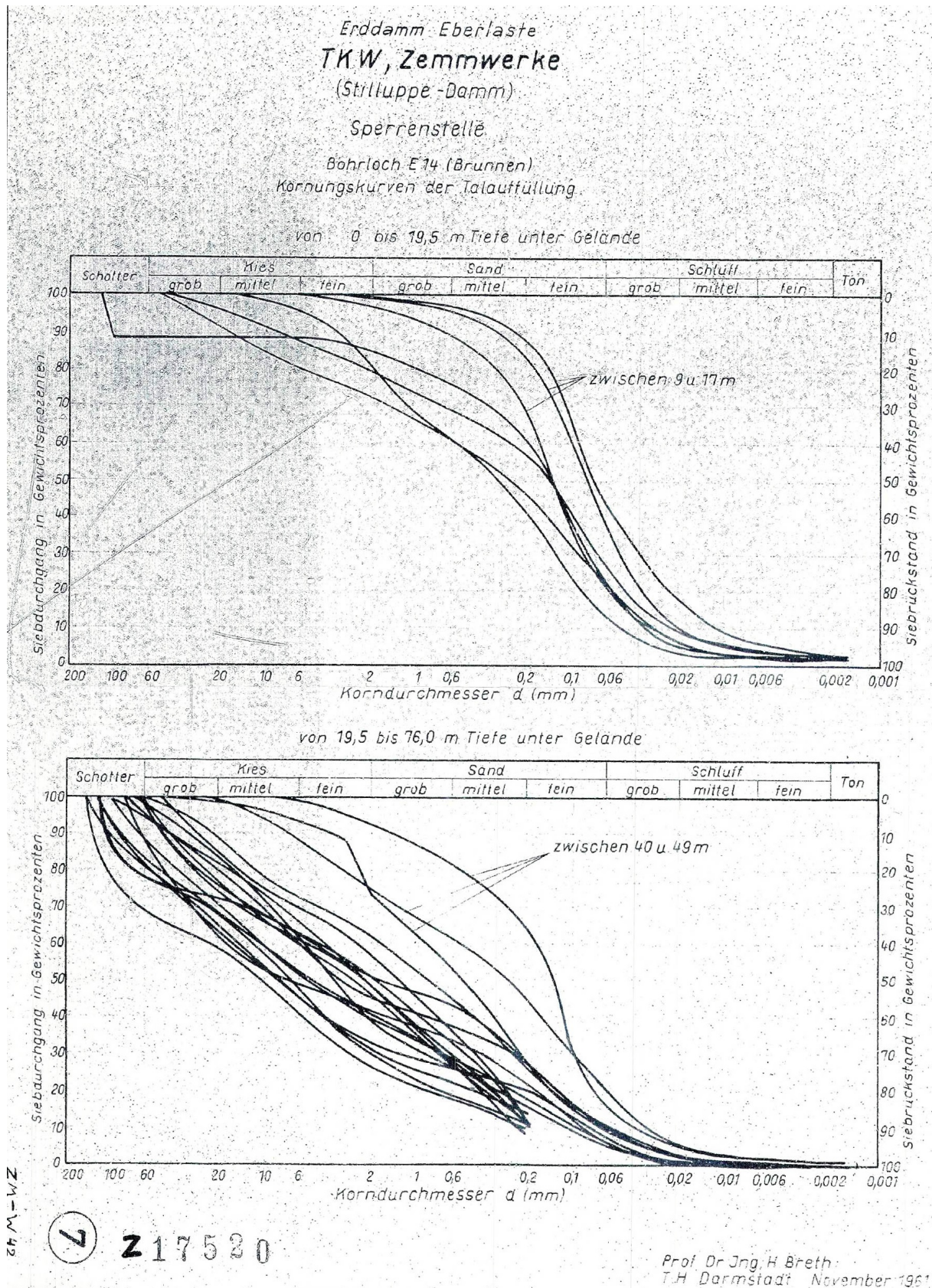


Abbildung B.6: Sieblinien Bohrloch E14

**Tabelle B.1:** Korndurchmesser E10

Kurve	$d_0$	$d_3$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{17}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	$d_{90}$	U [-]	C [-]
I Typ I	oben	0,001	0,002	0,020	0,023	0,025	0,042	0,091	0,173	0,200	4,55	0,96
	mitte	0,002	0,009	0,024	0,030	0,034	0,063	0,103	0,332	0,463	5,46	1,26
	unten	0,010	0,020	0,036	0,055	0,063	0,091	0,157	0,583	1,023	5,81	1,10
II Typ II	oben	0,010	0,021	0,040	0,063	0,068	0,123	0,253	1,067	1,509	8,83	1,08
	mitte	0,020	0,028	0,059	0,088	0,103	0,173	0,325	2,000	3,859	7,63	1,13
	unten	0,028	0,047	0,095	0,140	0,155	0,243	0,400	7,209	20,000	6,63	0,99
III Typ III	oben	0,025	0,045	0,077	0,103	0,115	0,246	1,407	20,000	25,000	51,95	0,20
	mitte	0,055	0,088	0,268	0,215	0,266	1,004	6,637	50,000	63,000	47,79	0,29
	unten	0,085	0,150	0,459	0,958	1,286	7,116	30,000	90,802	100,000	119,83	2,01
IV Typ IV	oben	0,001	0,002	0,007	0,011	0,013	0,019	0,030	0,072	0,100	5,43	1,30
	mitte	0,001	0,002	0,014	0,019	0,021	0,035	0,055	0,174	0,288	5,07	1,23
	unten	0,002	0,007	0,026	0,041	0,045	0,078	0,145	0,544	0,947	7,58	1,17
V Typ V	oben	0,002	0,010	0,032	0,056	0,067	0,145	0,404	4,066	6,822	20,59	1,00
	mitte	0,006	0,016	0,050	0,085	0,101	0,274	0,838	7,644	12,360	26,80	1,12
	unten	0,012	0,031	0,102	0,181	0,224	0,719	1,584	13,929	20,637	24,70	2,01

alle Durchmesser in [mm]

**Tabelle B.2:** Korndurchmesser E12

Kurve	$d_0$	$d_3$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{17}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	$d_{90}$	U [-]	C [-]
<b>oben</b>	0,001	0,014	0,064	0,094	0,110	0,389	2,934	5,641	34,911	56,664	87,59	0,42
<b>mitte</b>	0,001	0,032	0,112	0,195	0,269	2,014	7,910	14,774	72,494	79,331	132,31	2,46
<b>unten</b>	0,040	0,094	0,576	1,873	2,211	5,837	19,602	46,835	90,539	97,588	81,27	1,26
Typ II	0,020	0,037	0,133	0,322	0,477	1,768	4,500	5,761	10,817	13,000	43,42	4,09

**Tabelle B.3:** Korndurchmesser SE13

Kurve	$d_0$	$d_3$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{17}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	$d_{90}$	U [-]	C [-]
<b>oben</b>	0,001	0,006	0,041	0,073	0,086	0,302	3,745	7,748	63,000	80,000	188,02	0,29
<b>mitte</b>	0,001	0,022	0,074	0,136	0,173	1,501	13,556	41,190	100,000	110,521	556,55	0,74
<b>unten</b>	0,025	0,060	0,262	0,764	1,015	11,174	85,000	110,000	171,175	174,068	419,34	4,33

alle Durchmesser in [mm]

**Tabelle B.4:** Korndurchmesser E13

Kurve	$d_0$	$d_3$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{17}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	$d_{90}$	U [-]	C [-]
Typ I	oben	0,001	0,003	0,012	0,016	0,019	0,032	0,096	0,228	0,320	7,97	0,90
	mitte	0,001	0,005	0,018	0,029	0,034	0,060	0,161	0,781	1,608	8,97	1,25
	unten	0,001	0,018	0,044	0,062	0,067	0,103	0,300	16,000	26,000	6,89	0,81
Typ II	0,001	0,005	0,021	0,029	0,033	0,055	0,115	0,165	50,360	64,961	7,96	0,88
Typ III	oben	0,001	0,010	0,043	0,059	0,066	0,129	0,380	5,507	7,816	19,71	0,45
	mitte	0,001	0,023	0,061	0,090	0,104	0,280	2,000	30,430	46,298	66,33	0,31
	unten	0,035	0,052	0,129	0,245	0,314	1,455	10,231	112,250	126,000	223,25	0,57

**Tabelle B.5:** Korndurchmesser E14

Kurve	$d_0$	$d_3$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{17}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	$d_{90}$	U [-]	C [-]
Typ I	oben	0,001	0,002	0,010	0,015	0,017	0,032	0,071	0,165	0,220	8,87	1,19
	unten	0,001	0,006	0,032	0,042	0,047	0,080	0,164	0,430	0,700	5,12	1,23
Typ II	oben	0,001	0,002	0,020	0,030	0,036	0,066	0,185	1,826	3,207	9,27	1,19
	unten	0,001	0,013	0,050	0,069	0,079	0,127	0,321	10,547	17,824	11,91	0,54
Typ III	oben	0,001	0,007	0,028	0,045	0,050	0,095	0,177	0,800	1,483	6,28	1,82
	unten	0,006	0,022	0,067	0,101	0,120	0,221	0,541	5,061	8,028	14,00	0,78
Typ IV	oben	0,002	0,020	0,055	0,081	0,092	0,208	0,831	14,999	21,574	30,30	0,47
	mitte	0,025	0,042	0,120	0,173	0,200	0,655	2,438	49,000	58,965	55,18	0,54
	unten	0,063	0,095	0,237	0,400	0,552	2,679	11,000	111,803	125,000	101,85	1,25

alle Durchmesser in [mm]