



Florian Walter Bader, BSc

**Die Bauwerksüberwachung
als eine der grundlegenden Säulen
für den sicheren Betrieb von Staudämmen**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium – Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Edwin Staudacher, BSc

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Graz, 1. Juni 2021

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

Mitbetreuender Assistent: Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Edwin Staudacher, BSc
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 1. Juni 2021

.....

Florian Walter Bader, BSc

* Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit auf die gleichzeitige Nennung der männlichen und weiblichen Form verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten selbstverständlich gleichermaßen für alle Geschlechter.

Dank

Das nun zu Ende gehende Studium lässt mich auf eine unglaubliche Zeit zurückblicken. Eine Zeit, in der man das geistige Rüstzeug erhält, das man sich gleichzeitig auch erarbeiten muss. Eine Zeit, voller einmaliger Erfahrungen und Erlebnisse. Eine Zeit, in der ich die verschiedensten Menschen kennen lernen durfte und die mich begleitet haben.

Aber nun ist es an der Zeit, all denen Danke zu sagen.

Dazu gehören in erster Linie meine Eltern und meine gesamte Familie, die mich immer liebevoll unterstützt und motiviert haben. Ein herzliches Dankeschön dafür.

Mein Dank richtet sich auch insbesondere an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz, der mir Möglichkeit gab, mich auf dem Gebiet des Wasserbaus zu vertiefen und schließlich diese Arbeit zu schreiben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Edwin Staudacher, der mir stets in zahlreichen Gesprächen unterstützend und beratend zur Seite gestanden ist.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen weiteren Lehrenden des Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft für ihre herausragende Lehre, der ich im Laufe des Studiums in verschiedensten Lehrveranstaltungen beiwohnen konnte.

Sämtlichen Lehrenden der Universität Innsbruck und der Technischen Universität Graz gebührt ein Dank für die fundierte Lehre die mir während meines Studiums geboten wurde.

Ein Dank gilt auch meinen Arbeitgebern und Arbeitskollegen, bei denen ich neben meinem Studium viel Erfahrung sammeln durfte.

Was wäre ein Studium ohne Kommilitonen? Ein herzliches Dankeschön an alle Studienkollegen, die mir während dieser Zeit begegnet und beiseite gestanden sind. Besonderen Dank auch an meine ehemaligen Mitbewohner im Südtiroler Studentenheim in Innsbruck.

Bedanken möchte ich mich schließlich auch noch bei allen lieben Freunden abseits der Universität für ihre Unterstützung, Beistand und Motivation.

Florian

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Sicherheit von Talsperren behandelt. Der Schwerpunkt liegt bei Schüttdämmen und deren Durchsickerung. Um sowohl die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten, als auch eine hohe Lebenserwartung dieser Bauwerke zu erzielen, ist eine umfangreiche Bauwerksüberwachung von Talsperren essentiell.

Zu Beginn wird versucht, ein Überblick über verschiedene Bauweisen von Talsperren zu geben. Im Anschluss wird die Durchsickerung betrachtet. Mittels Dichtungen im Damm und Untergrund soll dieser Vorgang weitestgehend reduziert werden. In Hinblick auf Versagensfälle werden Mechanismen vorgestellt, die zu einem Dambruch führen können. Dies kann etwa durch Böschungsversagen, Überströmen oder aufgrund Durchsickerung (z.B. innere Erosion bzw. „Piping“) geschehen.

Dazu werden einige Statistiken vorgestellt. Darin wird zwischen dem Versagen (Bruch) eines Dammes oder der Entstehung eines reparablen Schadens unterschieden. Auch wenn diese Statistiken auf unterschiedlichen Rahmenbedingungen beruhen, zeigen sie, dass derartige Ereignisse vor allem zufolge Überströmung, Piping und Böschungsversagen aufgetreten sind. Anhand von Beispielen werden Versagens- und Schadensfälle betrachtet. Sowohl der Vorgang des Bruchs, als auch die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden beschrieben. Statistische Methoden (z.B. Regressionsanalyse, künstliche Intelligenz) zur Analyse und zur Prognose eines künftigen Dammverhaltens werden vorgestellt.

Die bei einer Talsperrenüberwachung involvierten Personen oder Organisationen werden dargestellt. Es werden verschiedene Methoden zur Erfassung des Sickerwasserströmung behandelt. Diese können jedoch eine visuelle Inspektion der Anlage nicht ersetzen.

Abstract

This work deals with the safety of dams. The focus is on embankments and their seepage. In order to guarantee both the required safety and a long life expectancy for these structures, extensive dam monitoring is essential.

At the beginning an attempt is made to give an overview of the different construction methods of dams. The seepage is then examined. This process should be reduced as far as possible by means of seals in the dam and the subsoil. With regard to failure cases, mechanisms are presented that can lead to a dam break. This can happen due to slope failure, overtopping or due to seepage (e.g. internal erosion or piping).

Some statistics are presented for this purpose. A distinction is made between the failure (rupture) of a dam and the occurrence of repairable damage. Even if these statistics are based on different framework conditions, they show that such events occurred mainly as a result of overtopping, piping and slope failure. Failure and damage cases are examined using examples. Both the process of breaking and the knowledge gained from it are described. Statistical methods (e.g. regression analysis, artificial intelligence) for the analysis and prognosis of future dam behavior are presented.

The people or organizations involved in dam monitoring are shown. Different methods for recording the seepage are dealt with. However, these cannot replace a visual inspection of the system.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Arten von Talsperren	3
2.1	Staumauern	4
2.1.1	Gewichtsmauern	4
2.1.2	Bogenmauern	5
2.2	Schüttdämme	6
2.2.1	Erdschüttdämme (earthfill embankment)	7
2.2.2	Steinschüttdämme (rockfill embankment)	10
2.2.3	Tailings-Dämme	10
2.3	Nebenanlagen von Talsperren	12
3	Dichtungskonzepte von Staudämmen	15
3.1	Wasserdurchlässigkeit	15
3.1.1	Sickerströmung	15
3.1.2	Potentialnetz	17
3.1.3	Auswirkung der Sickerwasserströmung	18
3.1.4	Durchlässigkeit von Steinschüttdämmen	20
3.1.5	Durchlässigkeit von Erdschüttdämmen	21
3.2	Filter	21
3.2.1	Filterregeln	22
3.3	Untergrundabdichtung	24
3.4	Dammdichtung	27
3.4.1	Innendichtung	27
3.4.2	Außen- bzw. Oberflächendichtung	27
3.4.3	Dichtungsbahnen aus Geokunststoffen	28
4	Dammbruch und Versagensmechanismen	30
4.1	Geotechnisches Versagen (Verlust der Standsicherheit)	30
4.2	Versagen durch Überströmen (overtopping)	31

4.3	Versagen aufgrund Durchsickerung	32
4.3.1	Suffosion	32
4.3.2	Erosion	34
4.4	Versagen durch Erdbeben (Dynamische Last)	41
4.5	Weitere Versagensursachen	41
5	Versagensstatistik	42
5.1	Statistische Untersuchungen von Dammversagen	45
5.1.1	Untersuchung von Foster	45
5.1.2	Untersuchung von Lammerer	50
5.1.3	Untersuchung von ICOLD - Bulletin 121	54
6	Beispiele von Dammversagen und Vorfällen	58
6.1	Taum Sauk Damm - Missouri (Dammbruch durch Überströmen zu- folge Überpumpen)	58
6.1.1	Allgemein	58
6.1.2	Versagen	60
6.2	Teton Damm - Idaho (Dammbruch durch innere Erosion)	66
6.2.1	Allgemein	66
6.2.2	Versagen	68
6.3	Bennett Damm - Kanada	76
6.3.1	Allgemein	76
6.3.2	Dolinen-Vorfall	79
7	Talsperrenüberwachung	83
7.1	Überwachung	83
7.2	Sicherheitskonzept	83
7.3	Sicherheitsanforderungen	85
7.3.1	Hochwassersicherheit	85
7.3.2	Hochwasserschutz	86
7.4	Talsperrenüberwachung in Österreich	86
7.4.1	Wasserrechtsgesetz	87
7.4.2	Staubekkenkommission	88
7.4.3	Talsperrenverantwortliche	89
7.4.4	Talsperrenwärter	91
7.4.5	Kleinere Stauanlagen	92
7.4.6	Vereinigungen und Verbände (ATCOLD, ÖWAV)	94
7.4.7	Die „12 Thesen“ zur Sicherheit der großen Talsperren Österreichs	95

7.5	Talsperrenüberwachung in der Schweiz	97
7.6	Talsperrenüberwachung in Bayern	98
7.7	Festlegung der Grenzwerte	100
7.8	Frühwarnsysteme	102
7.9	Alarm	103
7.9.1	Information der Bevölkerung	103
7.9.2	Alarmierung der Bevölkerung	104
8	Sickerwassermessung	105
8.1	Sickerwassermenge	105
8.1.1	Volumetrische Messung	105
8.1.2	Messwehr	107
8.1.3	Durchflussmessung in Druckrohren	110
8.2	Temperaturmessungen zur Ortung von Leckagen	112
8.2.1	Temperatursondierung	112
8.2.2	Verteilte faseroptische Temperaturmessungen (VFTM)	115
8.2.3	Kombination von Temperatursondierung und VFTM	120
8.3	Magnetometrischer Widerstand zur Ortung von Sickerwasser	122
8.3.1	2D - Pläne und 3D - Modelle	126
9	Statistische Datenanalyse von Messwerten	128
9.1	Regressionsanalyse	128
9.1.1	Grundlagen	128
9.1.2	Einfache Regressionsanalyse	130
9.1.3	Multiple Regressionsanalyse	134
9.1.4	Linearer und Nichtlinearer Zusammenhang	134
9.2	Zeitreihenanalyse	135
9.2.1	Autoregressive Prozesse (AR-Prozesse)	136
9.3	Künstliche Intelligenz (KI)	137
9.3.1	Maschinelles Lernen (Machine Learning)	137
9.3.2	Neuronale Netze	138
10	Zusammenfassung und Ausblick	141
10.1	Herausforderungen der Zukunft	141
10.1.1	Alterung	142
10.1.2	Veränderungen am Energiemarkt	142
10.1.3	Digitalisierung in der Stauanlagenüberwachung	143
Literaturverzeichnis		a

Abbildungsverzeichnis	k
Tabellenverzeichnis	q
A Anhang	r
A.1 Tabellen von Foster	r
A.1.1 Gleiten an der Luftseite	r
A.1.2 Gleiten an der Wasserseite	s
A.1.3 Piping durch den Dammkörper	t
A.1.4 Piping durch das Fundament	u
A.2 Gliederungsbeispiel von Overhoff	w
A.2.1 Prüfbericht	w
A.2.2 Einzelberichte	x
A.3 Beispiel eines Störfallinformationsblattes	y

1 Einleitung

Ein Blick in die täglichen Nachrichten ist kaum möglich, ohne in irgendeiner Form mit den Auswirkungen des Klimawandels oder gar der Klimakrise konfrontiert zu werden. Neben dem Wachstum unserer Gesellschaft lässt auch eine fortschreitende Technisierung und Digitalisierung den Energiebedarf weiterhin ansteigen. Daher wird der Fokus auf klima- bzw. CO₂-neutrale und ressourcenschonende Formen der Energieerzeugung gerichtet. Gerade ein Land wie Österreich, das in weiten Teilen von seiner alpinen Landschaft geprägt ist, bietet die Möglichkeit der Nutzung von Energie aus erneuerbarer Quelle.

Neben der Energieerzeugung mittels Wasserkraft spielt in Österreich auch die Energiespeicherung eine zentrale Rolle. Dabei kann in Pumpspeicherkraftwerken elektrische Energie in potentielle Energie umgewandelt werden. Talsperren zur Rückhaltung des gespeicherten Wassers sind ein wesentlicher Bestandteil dieser Anlagen. Um bei Bedarf elektrischen Strom zu produzieren, kann das Wasser jederzeit abgegeben werden.

Der Betrieb solcher Anlagen zur Stromerzeugung und -speicherung sowie Speicherung von Wasser zur Bewässerung hat im Laufe der Jahre auch einen wirtschaftlichen Aufschwung mit sich gebracht. Es ist daher sinnvoll, auch zukünftig in derartige Formen der Energieerzeugung zu investieren.

In Österreich wurde ein Großteil der Hochdruckanlagen zwischen 1945 bis 1990 gebaut. Seitdem erfolgte vor allem eine Erweiterung der Ausbauwassermenge und Leistung der bestehenden Anlagen (z.B. Limberg 2, Obervermunt 2, Reißbeck 2, usw.). Eine ursprünglich als Jahresspeicher konzipierte Anlage kann dadurch mittels geänderter Betriebsführung nun auch als Tages-, Wochen- oder Monatsspeicher genutzt werden. Dies stellt für den Betrieb der Anlage eine zusätzliche Herausforderung dar. Eine ständige Überwachung der Talsperren ist von übergeordnetem Interesse und obliegt den Betreibern bzw. Eigentümern der Kraftwerksanlagen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Sicherheit von Talsperren. Der Schwerpunkt wird dabei auf Schüttdämme sowie dem Einfluss der Durchsickerung auf die Sicherheit gelegt. Es werden zuerst verschiedene Bauarten von Talsperren und auch Dichtungskonzepte von Staudämmen vorgestellt. Im Anschluss daran wird sowohl theoretisch auf die Sicherheit als auch anhand einiger Fallbeispiele auf das Versagen solcher Bauwerke eingegangen. Es folgt die Behandlung der Talsperrenüberwachung, die Einrichtungen zur Messung des Bauwerksverhaltens im Zusammenhang mit dem Sickerwasser sowie Verfahren zur statistischen Analyse von Messwerten.

2 Arten von Talsperren

Durch Talsperren werden ganze Talquerschnitte bis zur Höhenkote der Dammkrone abgeriegelt und das Wasser wird bishin zu den Talflanken aufgestaut. Daraus ergibt sich in der Regel ein besonders großer Stauraum, der die Unterschiede von Zu- und Abfluss bzw. Wasserentnahme über einen längeren Zeitraum ausgleichen kann. Neben den Talsperren zur Nutzung der Wasserkraft dienen Talsperren auch bei Trinkwasserspeichern oder zum Hochwasserrückhalt. [1]

Bei Talsperren wird in erster Linie zwischen Staumauern und Staudämmen (Schüttdämme) unterschieden. [2]

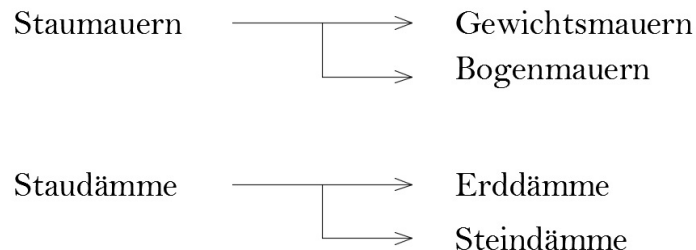


Abbildung 2.1: Talsperrentypen (vgl.[2])

Die Entscheidung, welchen Sperrentyp man verwendet, hängt nicht unwesentlich vom Untergrund bzw. von der Fundierung ab. Staumauern erfordern eine Fundierung auf Fels wegen der spezifisch höheren Beanspruchung, geringeren erlaubten Verformungen und höherem hydraulischen Gradienten. Können im Untergrund die vorgenannten Bedingungen nicht erfüllt werden, ist als Sperrentyp die Ausführung als Damm möglich. [2]

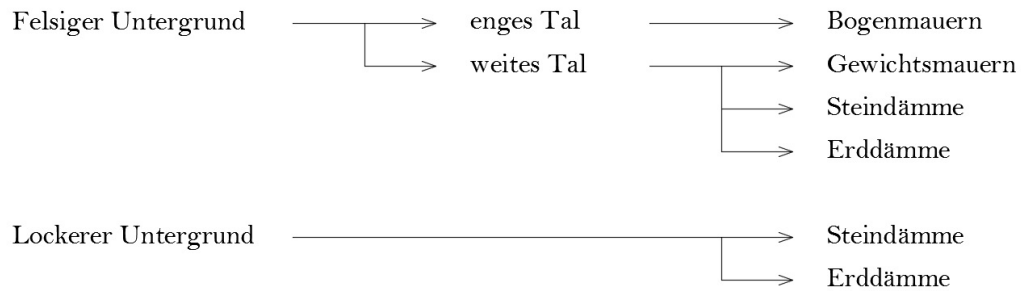


Abbildung 2.2: Wahl des Talsperrentyps (vgl.[2])

Gerade bei Erd- und Steinschüttdämmen mit einem hohen Materialbedarf muss auch die Verfügbarkeit des Baumaterials an der Sperrenstelle beachtet werden. [1]

Nachfolgend wird auf die Besonderheiten der bereits erwähnten Talsperrentypen eingegangen.

2.1 Staumauern [2]

2.1.1 Gewichtsmauern

Gewichtsmauern aus Beton sind im Grundriss geradlinig bis leicht gekrümmt. Sie besitzen in der Regel eine senkrechte Wasserseite und eine um ca. 1:0,7 bis 1:0,8¹ geneigte Luftseite.

Bei der Herstellung der Beton-Staumauern werden einzelne, in der Regel etwa 12 bis 20 m breite Betonblöcke durch Blockfugen getrennt, um Temperaturrisse infolge der Hydratationswärme zu verhindern.

Dabei wird hauptsächlich unbewehrter Beton, sogenannter Massenbeton, mit groben Zuschlagstoffen verwendet. Zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen

¹Neigung ... vertikal : horizontal

Frostschäden und Wassereinwirkung haben die äußeren 2 - 3 m Vorsatzbeton einen höheren Zementgehalt (z. B. 250 kg Zement pro m^3) als der Kern (z. B. 140 bis 180 kg Zement pro m^3). Wie auch bei allen anderen Talsperrenarten wird im Regelfall mit Hilfe eines Dichtungsschirmes die Unterströmung der Talsperre durch den anstehenden Fels reduziert. Der Einsatz eines Drainageschirms trägt zur Entspannung der Kluftwasserdrücke bei und vermindert somit den Auftrieb in der Sohlfuge.

Als maßgebende Lasten in statischen Lastfallkombinationen sind Eigengewicht, hydrostatische Wasserlasten sowie der Auftrieb in der Bemessung zu berücksichtigen. Die Lastabtragung erfolgt über die Aufstandsfläche (Sohlfuge) über den durch das Eigengewicht aktivierten Schwerwiderstand aus Reibung und gegebenenfalls Kohäsion.

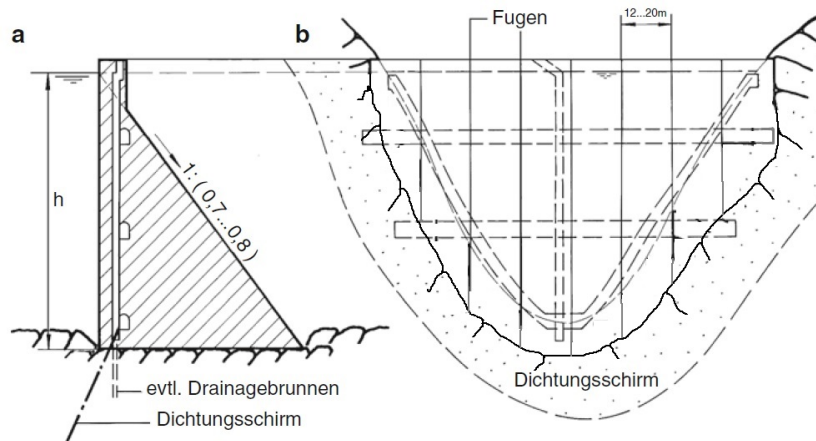


Abbildung 2.3: Gewichtsmauer - a) Querschnitt, b) Längsschnitt (teilweise modifiziert nach [3])

2.1.2 Bogenmauern

Gekrümmte Staumauern (oder Gewölbemauern) eignen sich vor allem bei engen Tälern mit felsigem Untergrund durch ihre ideale Lastabtragung. Sie werden ähnlich den Gewichtsmauern blockweise betoniert. Infolge der Krümmung erfolgt die Lastabtragung über die Bogenwirkung in die Talflanken, indem alle Blöcke als Ganzes im Gewölbe wirken. Da dabei keine bzw. nur geringe Zugspannungen auftreten, werden Bogenmauern nicht bewehrt.

Die zulässigen Spannungen des Betons sind die maßgebenden Randbedingungen in der Bemessung und beeinflussen somit die Form der Mauer. Als wesentlichste Belastung wirkt hier der Oberwasserdruck. Durch die geringe Aufstandsfläche wirkt eine geringere Auftriebskraft im Vergleich zu den Gewichtsmauern. Lasten aus Zwängen zufolge Temperatureinwirkung müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

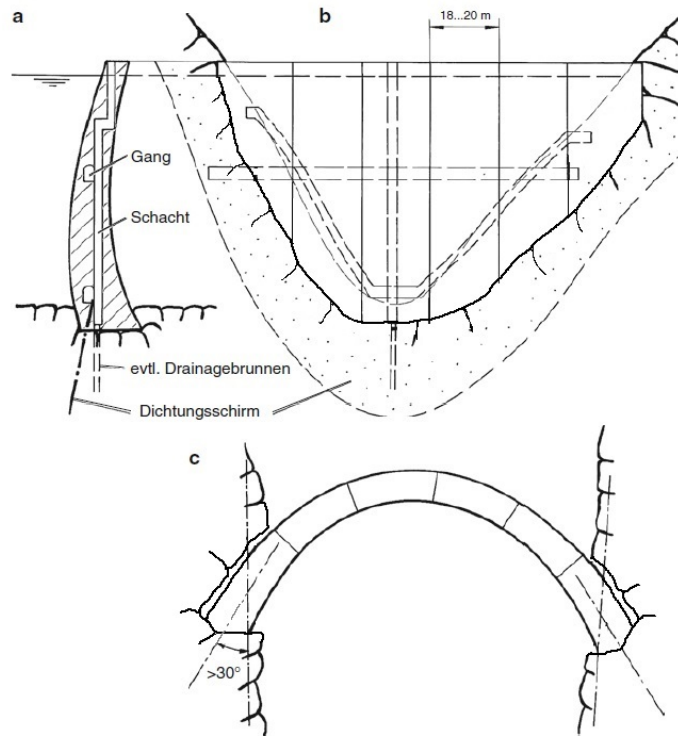


Abbildung 2.4: Bogenmauer - a) Querschnitt, b) Längsschnitt, c) Horizontalschnitt (teilweise modifiziert nach [3])

2.2 Schüttdämme

Staudämme haben die Aufgabe den Staudruck des Wassers aufzunehmen und durch das Gewicht des Dammkörpers auf den Baugrund zu übertragen. Schüttdämme können auch auf Bodenschichten mit geringerem Verformungsmodul gegründet werden, da der Dammkörper auch größere Verformungen (Meterbereich) aufnehmen kann. Die Dichtung von Dammkörper und Untergrund hat die Aufgabe, die Durchsickerung weitestgehend zu reduzieren. Zur Gewährleistung der Standsicherheit soll eine Austragung von Feinmaterial (innere Suffosion bzw. innere Erosion, siehe Kapi-

tel 4.3) infolge einer Sickerwasserströmung sowohl im Damm als auch im Untergrund (insbesondere bei Sedimenten, die nicht stabil gegen innere Erosion sind) verhindert werden. [4]

Ein wichtiges Augenmerk liegt bei der Gestaltung des Dammquerschnitts auf der Auswahl der entsprechenden Materialien. [4] Wesentliche Parameter die von den Materialien bekannt sein müssen, sind Verformbarkeit, Durchlässigkeit, Kornverteilung bzw. Sieblinie sowie die Scherfestigkeit. Die mögliche Verdichtung des Schüttmaterials kann in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Labor mittels Proctorversuchs ermittelt werden.[1]

2.2.1 Erdschüttdämme (earthfill embankment)

Erddämme können einen unterschiedlichen Querschnittsaufbau aufweisen: [5] [2]

- **homogener Querschnitt:** Material ist zugleich Dichtung und Stützkörper (relativ undurchlässiger Erdstoff mit hohem Schluff- und Tongehalt); Sickerwässer werden über Drainagen² gefasst und abgeleitet, ohne den Damm zu gefährden; das Material erfordert flache Böschungen und große Kubaturen
- **gegliederter Damm mit wasserseitiger Dichthaut:** aus bituminösem Material, Beton oder Folien
- **gegliederter Damm mit Kern:** Dichtungs- und Stützfunktion wird getrennt: der Kern (aus dichtem und bindigem Material) zum Abbau des hydraulischen Gradienten wirkt dem Wasserverlust entgegen; der Stützkörper besteht aus einer Anschüttung von größerem, scherfestem Material, Filter sind wesentlich

²Filterkriterien müssen erfüllt werden

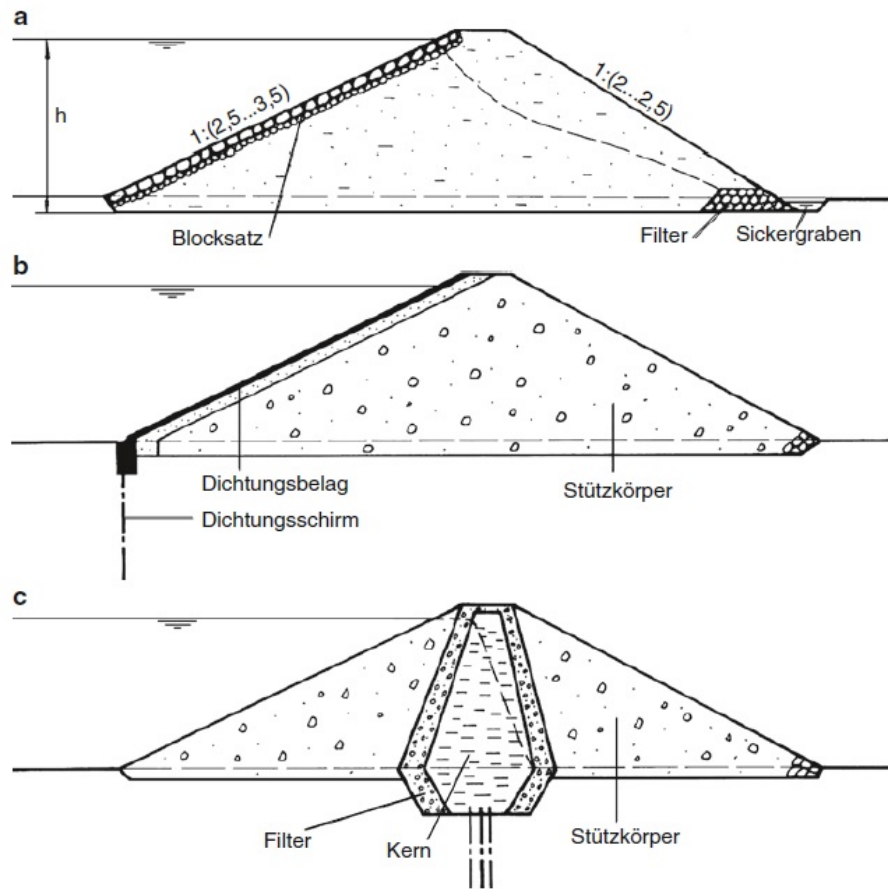


Abbildung 2.5: Erddamm - a) homogen mit wasserseitigem Erosionsschutz, b) inhomogen mit wasserseitiger Dichtungshaut, c) inhomogen mit Kern aus bindigem Lockergestein [3]

Der Damm mit einer Böschungsneigung zwischen 1:1,5 (nichtbindige Böden) und 1:4 (bindige Böden) wird lagenweise eingebaut und verdichtet. [5]

Aufgrund der Erosionsgefahr kann bei Erd- und Steinschüttdämmen die Dammkrone nicht als frei überstömbarer Überlauf ausgebildet werden. Es ist daher ein separates Bauwerk für den eventuellen Hochwasserüberlauf erforderlich oder eine erosions sichere Ausbildung der Hochwasserentlastung über den Damm. [5]

Wie auch bei allen anderen Talsperrentypen ist zusätzlich zum Höchststau (Stauziel + zulässiger Überstau) ein Sicherheitsfreibord erforderlich. Aufgrund der im Vergleich zu Staumauern viel flacheren Böschungsneigung auf der Oberwasserseite von Schüttdämmen, ist hier ein höherer Wellenauflauf zu berücksichtigen. Aus dem

Überstau plus der Höhe des Sicherheitsfreibords ergibt sich die Kronenhöhe. [4]. Näheres dazu wird in Kapitel 7.3.1 erläutert und in Abbildung 7.2 dargestellt.

Ein weiterer Umstand, der das Ausmaß des Freibords erhöht, ist die größere Setzung des Dammkörpers. Eine Überhöhung ist deshalb einzuplanen, um die Setzungen über einen bestimmten Zeitraum zu kompensieren. [1]

Erddämme werden in erster Linie auf Gleitsicherheit bemessen. [2] Die Gleitflächen können sowohl unterhalb des gesamten Dammes als auch auf der ober- und unterwasserseitigen Böschung entstehen. [1] In Kapitel 4.1 wird genauer darauf eingegangen.

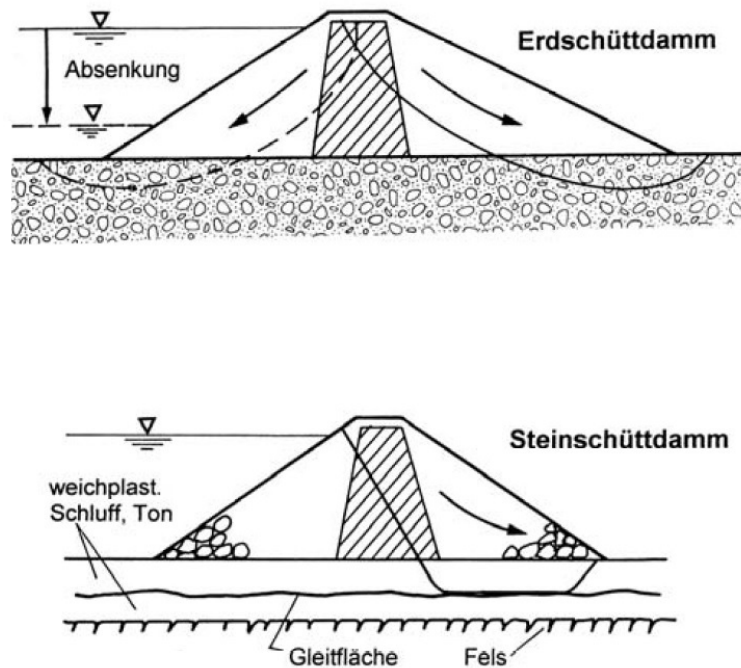


Abbildung 2.6: Gleitflächen bzw. Gleitkreise bei Schüttdämmen [1]

Eigengewicht und Wasserdruck führen zu Deformationen. Diese müssen schadlos aufgenommen werden können. Hauptschadensursachen sind Überströmung und innere Erosion infolge Durchsickerung. Die dynamische Anregung durch Erdbeben kann bei feinkörnigen Dämmen zur Verflüssigung und somit zu großen Verformungen bzw. zum Versagen führen. [5]

2.2.2 Steinschüttdämme (rockfill embankment)

Sie unterscheiden sich von den Erddämmen im wesentlichen durch grobblöckigeres Material ihres Stützkörpers. Die Dichtung ist zumeist wasserseitig angeordnet. [2] Die Dammböschungen können bis 1:1,3 reichen. [5]

Die Schüttung wird lageweise eingebaut und verdichtet. Durch gute Verdichtung mit schweren Geräten können die Setzungen nach der Dammerstellung reduziert werden. [5]

2.2.3 Tailings-Dämme

Im Gegensatz zu den soeben erwähnten Dämmen, die dem Aufstau und der Speicherung von Wasser dienen, kommen sogenannte „Tailings-Dämme“ zur Deponierung von verschiedensten, teilweise auch giftigen Abwässern und Schlacken aus Industrie und Bergbau zum Einsatz. Die Hauptaufgabe dieser Dämme ist es, den Speicherinhalt von Gewässern und Umgebung fernzuhalten. Dies stellt hohe Anforderungen an die Dichtung dieser Dämme. [6]

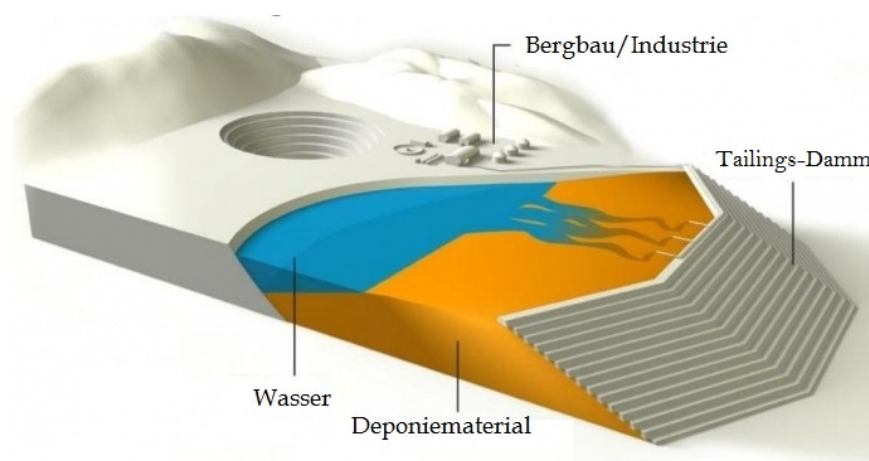


Abbildung 2.7: Tailings-Dämme (teilweise modifiziert nach [7])

Der ursprüngliche Damm wird kontinuierlich mit wachsendem Speicherinhalt vergrößert.

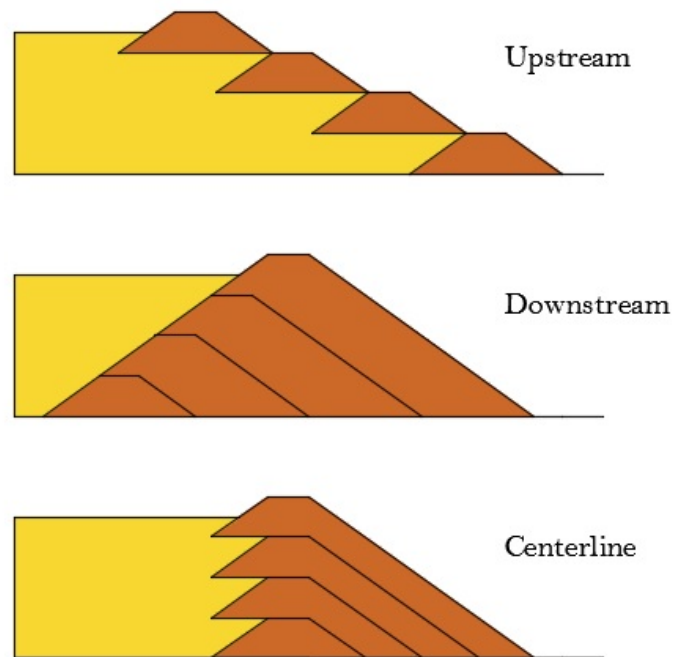


Abbildung 2.8: Verschiedene Herstellungsverfahren (Typen) von Tailing-Dämmen (vgl.[8])

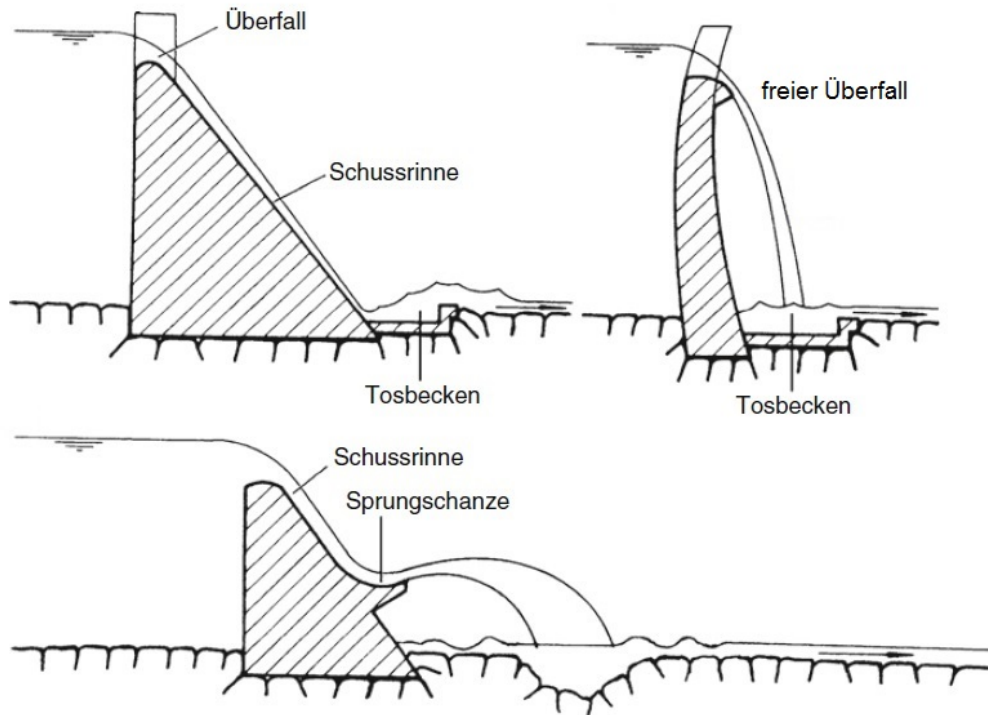


Abbildung 2.9: Abfälle einer Uran-Mine, Olympic Dam, Australien [9]

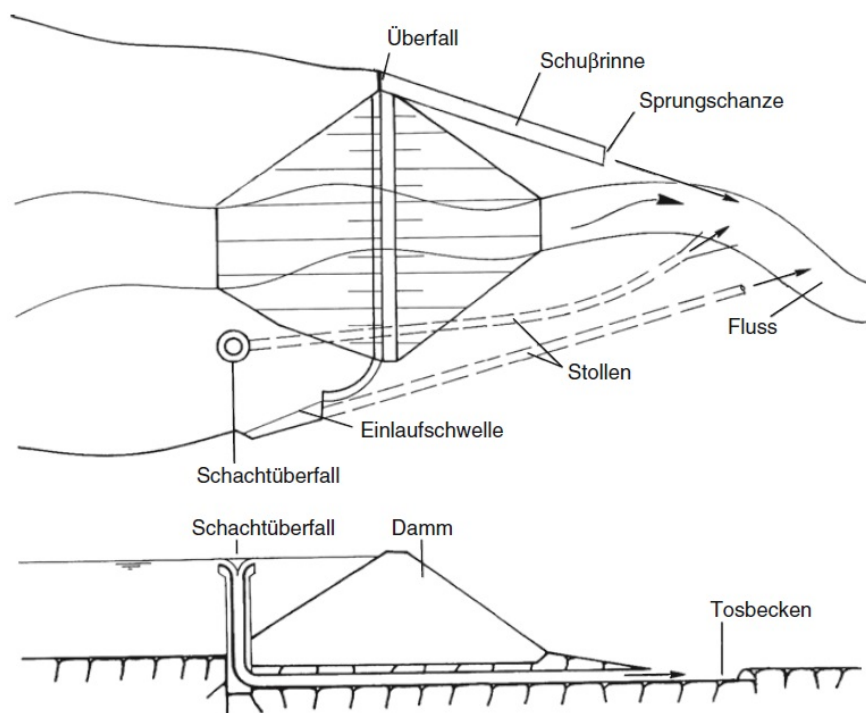
2.3 Nebenanlagen von Talsperren

Neben dem Sperrkörper und dem Staauraum gibt es zusätzlich noch Anlagenteile, die für den sicheren Betrieb der Stauanlage erforderlich sind: [2] [10]

- **Grundablaß:** Zur kontrollierten Erstfüllung des Sees, zur Entleerung des Sees, zur Spülung (um Sedimente zu entlanden), für Kontrollen der Sperre und des Stauraums oder zur Entlastung der Sperre bei drohendem Versagen.
- **Entnahme:** Für den planmäßigen Abfluss aus dem See zur Nutzung des Wassers. Sie liegt kotenmäßig über den Grundablass.
- **Hochwasserentlastung:** Zur Dimensionierung der Hochwasserentlastung ist das Bemessungshochwasser (BHQ) als ein 5000-jähriges Hochwasserereignis (HQ_{5000}) definiert. Als Sicherheitshochwasser wird das SHQ als maximal mögliches Ereignis für die robuste Dimensionierung angesetzt (siehe Kapitel 7.3.1). [22] Bei Stau-mauern und Schüttdämmen soll die Krone durch entsprechende Auslegung der Hochwasserentlastung nicht überströmt werden.
- **Umleitstollen:** Dient dem Abfluss bzw. der Umleitung des Gewässers (Hochwasser) in der Bauphase der Sperre; mittels eines Fangdamms oberwasserseitig und unter Umständen auch unterwasserseitig kann die Baustelle der eigentlichen Sperre trockengelegt werden.
- **Messeinrichtungen:** In Kapitel 8 wird näher darauf eingegangen.



(a) bei einer Staumauer



(b) bei einem Staudamm

Abbildung 2.10: Hochwasserentlastung (teilweise modifiziert nach [3])

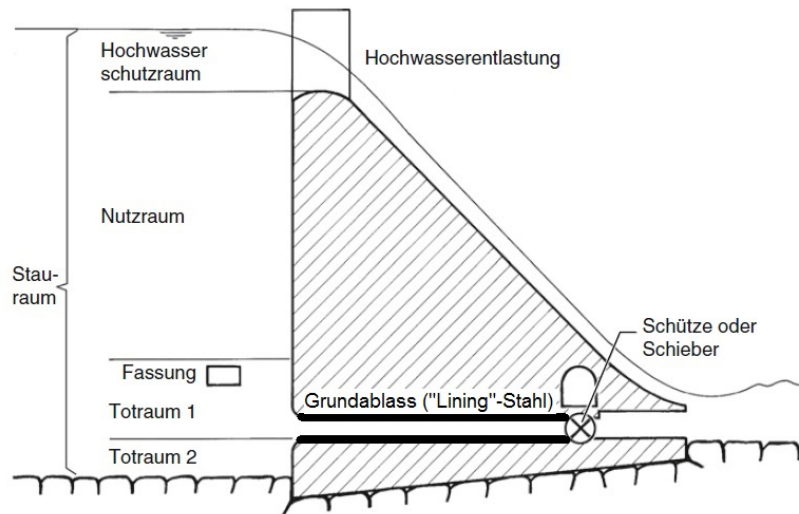


Abbildung 2.11: Nebenanlagen (teilweise modifiziert nach [3])

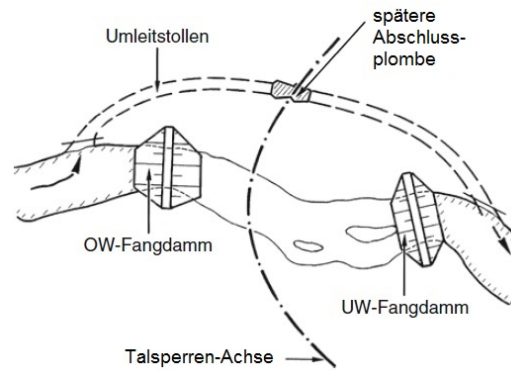


Abbildung 2.12: Umleitstollen mit Fangdämmen (teilweise modifiziert nach [3])

3 Dichtungskonzepte von Staudämmen

In diesem Kapitel wird die Durchsickerung von Staudämmen sowie Möglichkeiten der Dichtung von Damm und Untergrund behandelt. Die Basis der Planung des Dichtkonzepts ist die Sickerströmung, welche nach Darcy berechnet wird.

3.1 Wasserdurchlässigkeit

Ein unregelmäßiges Netz aus Porenräumen und -kanälen zwischen den festen Erdstoffen kann vom Wasser sowohl laminar als auch turbulent durchströmt werden. In feinkörnigen Erdstoffen verläuft die Strömung dabei stets laminar. [4]

3.1.1 Sickerströmung

Mit Hilfe der Formel von Darcy kann die Sickerströmung berechnet werden: [5]

$$v = k \frac{\Delta h}{\Delta l} = k \cdot i \quad (3.1)$$

$$Q = v \cdot A \quad (3.2)$$

- v ... Geschwindigkeit
- k ... Durchlässigkeit
- Δh ... Energiehöhe
- Δl ... Länge
- i ... hydraulisches Gefälle bzw. hydr. Gradient
- Q ... Durchfluss
- A ... Querschnittsfläche

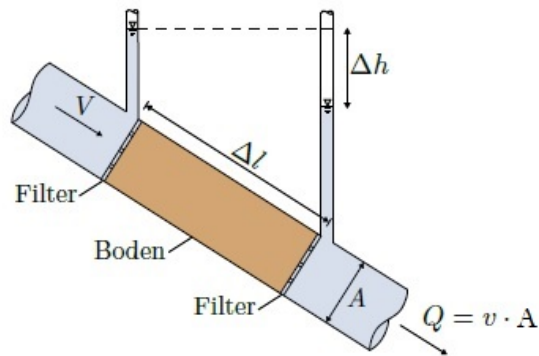


Abbildung 3.1: Sickerströmung nach Darcy (teilweise modifiziert nach [11])

Übliche Werte für die Durchlässigkeit k sind: [12]

Bodenart	k in [m/s]	Bereich
Ton, Lehm	$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig
Schluff; Sand lehmig, schluffig	$10^{-8} \dots 10^{-6}$	schwach durchlässig
Feinsand, Mittelsand	$10^{-6} \dots 10^{-4}$	durchlässig
Grobsand, Feinkies, Mittelkies	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	stark durchlässig
Grobkies	$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Tabelle 3.1: Übliche Werte für die Durchlässigkeit k [12]

3.1.2 Potentialnetz [13]

In einer zweidimensionalen Darstellung des Potential- bzw. Strömungsnetzes (siehe Abbildung 3.2) kann sowohl der Verlauf der Stromlinien einer Sickerwasserströmung als auch jener der Äquipotentiallinien dargestellt werden. Unter Potential wird dabei die Summe aus der geodätischen Höhe eines Punktes ab einem Bezugshorizont plus des Porenwasserdrucks an dieser Stelle bei einer laminaren Strömung verstanden. Diese Höhe wird auch als Piezometerhöhe bezeichnet. Dies zeigt sich in Abbildung 3.2 anhand der gleichen Wasserspiegelhöhen in den Standrohren 1 und 2, die auf der selben Äquipotentiallinie liegen.

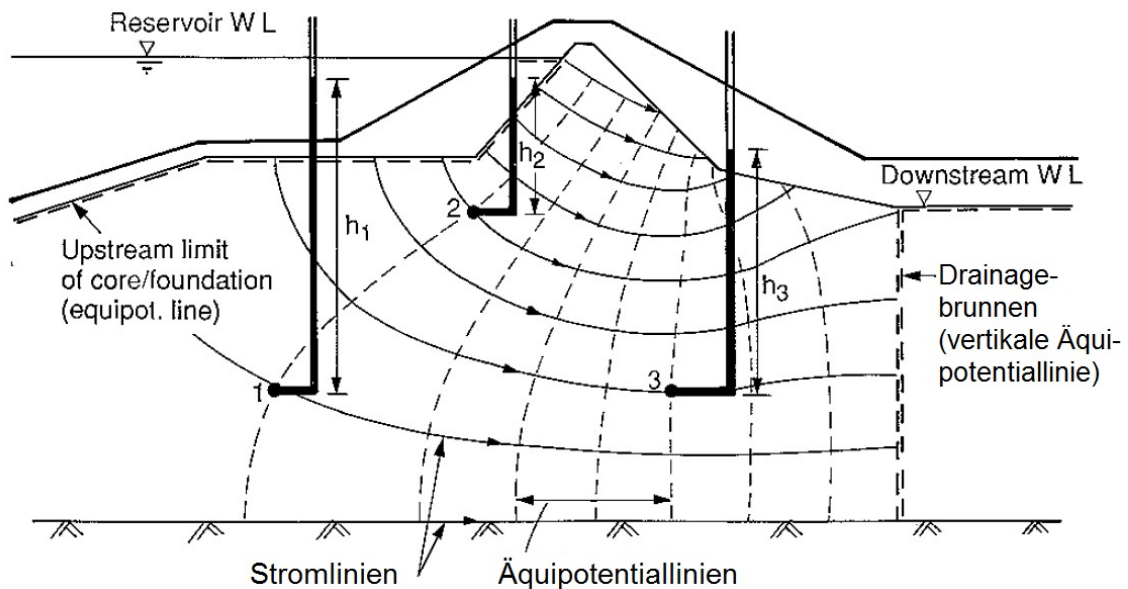


Abbildung 3.2: Potentialnetz eines Schüttdamms (teilweise modifiziert nach [13])

Obwohl solche Potentialnetze mittels FEM-Software (finite element method) viel genauer berechnet werden können, kann auch in erster Näherung eine einfache Skizze gute Ergebnisse über die Verteilung des Porenwasserdrucks liefern.

Die Stromlinien und die Potentiallinien stehen immer im rechten Winkel zueinander. Der Drainagebrunnen auf der Unterwasserseite in Abbildung 3.2 steht unter hydrostatischem Druck und repräsentiert dadurch eine vertikale Äquipotentiallinie.

3.1.3 Auswirkung der Sickerwasserströmung [13]

Im Zuge des Sickervorgangs entlang der Stromlinien kommt es aufgrund der Reibung zu einer Abnahme der Energie bzw. des Potentials der Sickerströmung. Diese Energie wird auf das Korngerüst des Bodens übertragen. Die Wirkung des Sickerströmungsdrucks auf das Korngerüst erfolgt in Strömungsrichtung.

$$j = i \cdot \gamma_w \quad (3.3)$$

- j ... Sickerströmungsdruck
- i ... hydraulischer Gradient (dimensionslos)
- γ_w ... spezifisches Gewicht des Wassers ($\gamma_w = 10kN/m^3$)

Dieser Sickerströmungsdruck übt einen zusätzlichen Druck in Strömungsrichtung auf die bereits bestehende effektive Spannung des Korngerüsts aus.

Dieser Effekt lässt sich anhand eines Beispiels in Abbildung 3.3 verdeutlichen. Am unterwasserseitigen Dammfuß eines Schüttdamms tritt die Sickerströmung entlang vertikaler Stromlinien nach oben hin zutage. Der freie Wasserspiegel liegt hier in Höhe der horizontalen Geländeoberfläche.

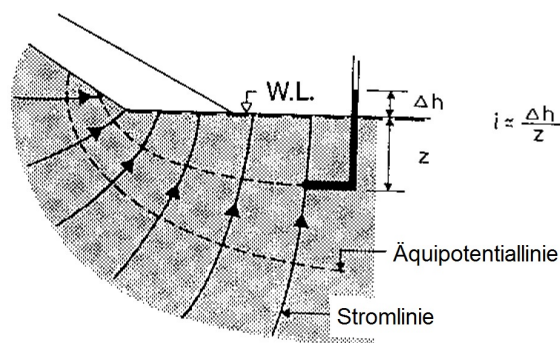


Abbildung 3.3: Potentialnetz eines Schüttdamms am unterwasserseitigen Dammfuß (teilweise modifiziert nach [13])

Mittels eines Standrohrs ist in Abbildung 3.3 erkennbar, dass in der Tiefe z folgender

Porenwasserdruck u vorhanden ist:

$$u = \gamma_w(z + \Delta h) \quad (3.4)$$

- u ... Porenwasserdruck
- z ... Tiefe
- Δh ... Höhenunterschied der Wasserspiegel

Die Abnahme des Potentials von diesem Punkt in der Tiefe z bis zur Geländeoberfläche hin beträgt demzufolge Δh . Gemäß Darcy (Formel 3.1 bzw. Abbildung 3.1) ergibt sich hier der hydraulische Gradient i zu:

$$i = \frac{\Delta h}{z} \quad (3.5)$$

Die effektive vertikale Spannung σ' würde in einem hydrostatischen Zustand (für den Fall, dass keine Sickerwasserströmung vorhanden wäre) folgende Größe annehmen:

$$\sigma' = \gamma' z \quad (3.6)$$

- σ' ... effektive vertikale Spannung (Korn-zu-Korn-Druck)
- γ' ... Raumgewicht des Bodens unter Auftrieb

Da in diesem Beispiel jedoch ein Sickerströmungsdruck nach obenhin wirkt, und somit entgegen der Gewichtskraft des Bodens, reduziert sich die effektive vertikale Spannung σ' . Der Sickerströmungsdruck muss hier also noch abgezogen werden. Damit ergibt sich die effektive vertikale Spannung σ' zu:

$$\sigma' = \gamma' z - i\gamma_w z = \gamma' z - \gamma_w \Delta h \quad (3.7)$$

Als alternativer Ansatz kann von der effektiven vertikalen Spannung σ' als Differenz von der totalen vertikalen Spannung σ und des Porenwasserdrucks u ausgegangen werden. Dies führt zum selben Ergebnis:

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma z - \gamma_w(z + \Delta h) = \gamma'z - \gamma_w \Delta h \quad (3.8)$$

- σ ... totale vertikale Spannung
- u ... Porenwasserdruck
- γ ... gesättigtes Raumbgewicht des Bodens

Der sogenannte kritische vertikale Gradient i_c ergibt sich für den Fall, dass in Gleichung 3.7 die effektive vertikale Spannung σ' zu Null wird. Daraus ergibt sich:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (3.9)$$

- i_c ... kritischer vertikale Gradient

Solch ein instabiler Zustand muss verhindert werden, da sonst Erosion bzw. Piping entstehen kann. Dieser Effekt, sowie dem vorgebeugt werden kann, wird in Kapitel 4.3.2 behandelt.

3.1.4 Durchlässigkeit von Steinschüttdämmen [4]

Die Größe der Wasserdurchlässigkeit eines durchströmten Steinschüttdammes ist zur Berechnung der Sickerlinie, Sickerwassermenge und der Standsicherheit erforderlich. Die Durchströmung kann sowohl horizontal als auch vertikal erfolgen.

Bei grobkörnigem Schüttmaterial besteht jedoch keine lineare Abhängigkeit mehr zwischen Filtergeschwindigkeit und dem hydraulischen Gefälle. Normale Durchlässigkeitswerte sind daher nicht mehr anwendbar. Zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit werden großformatige Durchströmversuche durchgeführt.

Bei Steindämmen wird die größte Durchlässigkeit bis zu einem Bereich von $k = 1 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben.

3.1.5 Durchlässigkeit von Erdschüttdämmen [4]

Die Durchlässigkeit k des Erdmaterials hängt ab von:

- Korngröße
- Kornverteilung
- Kornform
- Rauigkeit der Körner
- Porenanteil

3.2 Filter

Eine Grundvoraussetzung für den sicheren Betrieb von Schüttdämmen ist ein mit der Sieblinie des Stützkörpers gut abgestimmter und sorgfältig eingebauter Filter.

Materialschichten aus körnigem Material werden als Filter bezeichnet, wenn sie das Ausspülen und die Deformation des Ausgangsmaterials infolge Grund- oder Sickerwasser verhindern können. Folgende Anforderungen werden an das Filtermaterial gestellt: [4]

- ausreichend wasserdurchlässig
- schnelle Abführung des Wassers
- beständig gegen Suffosion und Erosion (vgl. dazu Kapitel 4.3)
- Zurückhaltung der Erdmaterials

Neben dem Filtern aus Bodenmaterial gibt es auch Filtergewebe, Matten oder Geomembrane.

3.2.1 Filterregeln

Um die Erosions- und Suffosionssicherheit zu überprüfen und sicherzustellen, kommen bei nichtbindigem Dammmaterial verschiedene Filterkriterien zur Anwendung. [4]

Filterregel nach Terzaghi [4]

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} \quad (3.10)$$

D	...	Korndurchmesser des Filtermaterials
D_{15}	...	— — der von 15 Gew.% des Materials unterschritten wird
d	...	Korndurchmesser des zu entwässernden Materials
d_{85}	...	— — der von 85 Gew.% des Materials unterschritten wird
d_{15}	...	— — der von 15 Gew.% des Materials unterschritten wird

Die Indexzahl gibt dabei die Gewichts-% des Siebdurchgangs des entsprechenden Korndurchmessers an.

Bei einem Ungleichförmigkeitsgrad $U \leq 2$ sowie in etwa parallel verlaufende Kornverteilungslinien der beiden Erdmaterialien liefert die Regel nach Terzaghi brauchbare Werte.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{nach [5]} \quad (3.11)$$

U ... Ungleichförmigkeitsgrad

Filterregel nach Sichert [4]

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} \leq 4,5 \quad (3.12)$$

Filterregeln nach Kjærnsli [13]

Filtermaterial	enggestuftes Bodenmaterial $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 1,5$	weitgestuftes Bodenmaterial $\frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$
enggestufter Filter $\frac{D_{60}}{D_{10}} < 1,5$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 10$	$5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 15$ $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$
weitgestufter Filter $\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 6$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$	$4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} < 40$ $\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25$ $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$

Tabelle 3.2: Filterregeln nach Kjærnsli [13]

Filterregeln nach Sherard and Dunnigan [13]

Bodenmaterial (% Feinteile < 0,075mm)	Filtermaterial (empfohlene Bemessungskriterien incl. Sicherheit)
85 – 100%	$D_{15} < 9d_{85}$ aber $< 0,2mm$
40 – 85%	$D_{15} \leq 0,7mm$
15 – 40%	$D_{15} < 0,7mm + (4d_{85} - 0,7mm)(40 - A)/(40 - 15)$
0 – 15%	$D_{15} \leq 4d_{85}$

Tabelle 3.3: Filterregeln nach Sherard and Dunnigan [13]

Der A-Wert in Tabelle 3.3 gibt den Prozentsatz des Bodenmaterials mit einem Durchmesser kleiner 0,075 mm an.

Die Kriterien von Sherard and Dunnigan (Tabelle 3.3) sind konservativer als jene von Kjaernsli (3.2)

Weitere Filterregeln

In Striegler [4] sind noch weitere Filterregeln nach Bertram, Zweck und Davidenkoff angeführt.

3.3 Untergrundabdichtung

Neben der ausreichenden Tragfähigkeit des Baugrundes ist zu berücksichtigen, dass eine stark reduzierte Durchlässigkeit im Untergrund erforderlich ist, um ein ungewünschtes Unterströmen des Damms zu reduzieren. Daher ist besonders vor Baubeginn auf gründliche Baugrunduntersuchungen Wert zu legen. Darauf aufbauend können die Abdichtungsmaßnahmen im Untergrund festgelegt werden. Ein eventuell bestehender wasserundurchlässiger Horizont in einer nicht allzu großen Tiefe könnte vorteilhaft genutzt werden, indem darin eine Untergrundabdichtung dicht einbindet. [4]

Der Damm kann unmittelbar auf dem dichten Horizont gegründet werden, wenn er nicht zu tief liegt. Ist dies nicht der Fall, wird eine Untergrundabdichtung mittels Dichtungswände oder -schleier hergestellt. Kann dadurch die undurchlässige Schicht trotzdem nicht erreicht werden, können Teilsicherungen nach der Tiefe oder horizontale Abdichtungen, sogenannte Dichtungsteppiche ausgeführt werden. [4]

Weiters besteht die Möglichkeit, dass das Sperrbauwerk planmäßig unterströmt wird. Durch eine „schwebende“ Untergrundabdichtung kann in diesem Fall der Sickerweg verlängert, und somit die Sickerwassermenge reduziert werden.

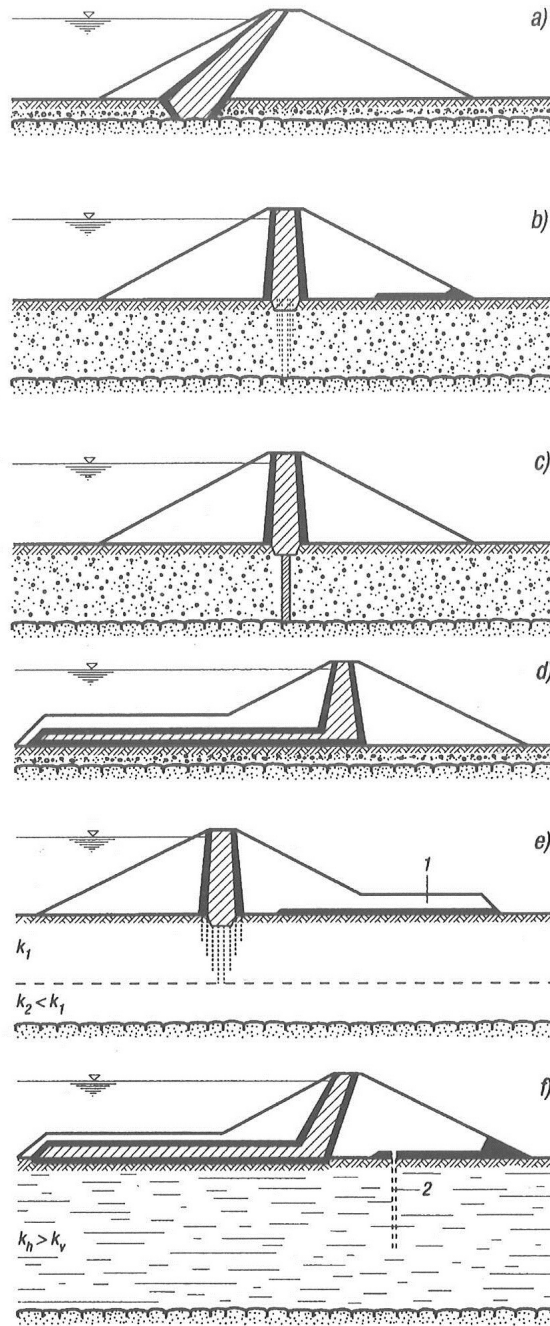


Abbildung 3.4: Dammgründungen - a) direkter Anschluss an dichten Untergrund, b) Dichtungsschleier (ein- od. mehrreihiger Injektionsschirm), c) Schlitzwand, d) Dichtungsteppich, e) Dichtungsschleier mit Druckbank, f) Dichtungsteppich mit luftseitigen Entwässerungsanlagen, 1 Druckbank, 2 Dichtungswand [4]

3.4 Dammdichtung

3.4.1 Innendichtung

Zur Innendichtung von Dämmen werden Materialien aus Asphalt, hydraulisch gebundene Dichtwandmassen (selbsterhärtende Suspensionen, Erd- oder Tonbeton) verwendet. Bei Schlitz- bzw. Bohrpfahlwänden wird bewehrter oder unbewehrter Beton verwendet. Daneben werden auch natürliche bzw. mineralische Materialien eingesetzt. Der Einsatz von Stahlspundwänden ist aufgrund ihrer Länge nur begrenzt möglich. [14]

3.4.2 Außen- bzw. Oberflächendichtung

Bei der Außen- bzw. Oberflächendichtung (vgl. Abbildung 2.5-b) werden Materialien wie Asphalt, Beton aber auch Dichtungsbahnen aus Kunststoff oder geosynthetische Tondichtungsbahnen verwendet. [14]



Abbildung 3.5: Dichtungsbahnen als Außendichtung [15]

3.4.3 Dichtungsbahnen aus Geokunststoffen

Kunststoffdichtungsbahnen [16]

Wasserundurchlässige Dichtungsbahnen können ein- oder mehrlagig hergestellt werden. Zur Verbindung untereinander können sie abhängig vom jeweiligen Material geschweißt, geklebt oder vulkanisiert werden. Die Überlappung hat im Zuge der Zulassung verifiziert zu werden.

Als Materialien kommen verschiedene Kunststoffe infrage die mit Trägereinlagen verstärkt sein können. Aber auch Bitumenbahnen mit Kunststoffeinlagen können zum Einsatz kommen.

Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Robustheit dieser Bahnen gelegt werden.

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD)

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (bzw. Bentonitmatten) werden im Gegensatz zu Kunststoffdichtungsbahnen erst im Verbund mit einer darüberliegenden Überdeckung zu einer dichten Schicht. Die GTD-Bahnen sollten weder austrocknen noch gefrieren, da sonst ihre Dichtigkeit nachlassen kann. Mit einer Überdeckung von einem Meter kann eine Austrocknung der GTD-Bahn verhindert werden. Eine höhere Überdeckung kann bei entsprechender Frosteindringtiefe notwendig werden. [17]

Zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen sollten Tondichtungsbahnen mit ihren geringen Schichtdicken beidseitig von einer Sandschicht umgeben sein. [18]

Eine positive Eigenschaft der GTD-Bahnen ist ihr Selbstheilungsvermögen. Durch Trockenheit entstandene Risse können sich nach erneuter Aufnahme von Wasser wieder schließen. Trotzdem sollte ein Austrocknen verhindert werden. [17]

GTD-Bahnen sind nicht resistent gegen Durchwurzelung. Bei einem Grasbewuchs sollten 80 cm Überdeckung ausreichen. Bei Bewuchs mit tieferreichenden Wurzeln sind jedoch weitere Schutzmaßnahmen zu treffen. [18]

Bei Kontakt mit Wasser kommt es zu einem Aufquellen des Bentonits. [18]



(a) BENTOFIX®



(b) BENTOFIX® X

Abbildung 3.6: Verschiedene GTD-Bahnen (Fa. Naue (Deutschland)) [19]

Damit erreichbare Böschungswinkel hängen neben der Scherfestigkeit der GTD-Bahnen auch von dem Reibungswinkel der Überschüttung und den Reibungswinkeln der GTD-Bahn zu Untergrund und Überschüttung ab. Die GTD-Bahnen mit einem Gewicht von ca. 5 - 6 kg/m² werden in Rollen geliefert und mit Hilfe eines Baggers verlegt. [17]

Beim Verlegen sollte auf eine entsprechende Überlappung der einzelnen Bahnen geachtet werden. [18]

Die Durchlässigkeit k (vgl. Kapitel 3.1.1) wird von [18] mit etwa $5 \cdot 10^{-11}$ m/s angegeben. Versuche zeigten eine nur geringe Zunahme der Durchlässigkeit infolge der Alterung. [18]

4 Dambruch und Versagensmechanismen

Ein Versagen (Bruch) von Stauanlagen kann mehrere Gründe haben wie z.B.:

- Geotechnisches Versagen (Verlust der Standsicherheit)
- Versagen durch Überströmen (topping)
- Versagen durch Suffosion und Erosion
- Versagen durch Erbeben
- Weitere Ursachen (z.B. Wellenschlag und Anprall, Verflüssigung, Wurzelbewuchs)

Diese Versagensmechanismen werden in den folgenden Kapiteln 4.1 bis 4.5 genauer erläutert.

4.1 Geotechnisches Versagen (Verlust der Standsicherheit)

Sind die treibenden Kräfte (Eigengewicht, Wasserdruck, dynamische Einwirkungen usw.) größer als die haltenden Kräfte, kommt es zu einem geotechnischen Versagen. Dies kann zu einem Abgleiten des Dammkörpers entlang der Aufstandsfläche oder einer Gleitfläche führen. [11]

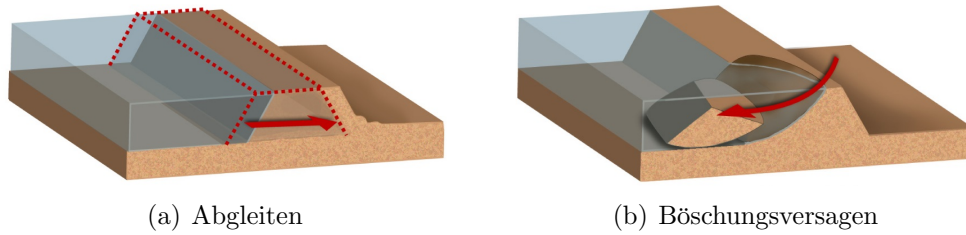


Abbildung 4.1: Geotechnisches Versagen [20]

Infolgedessen ist ein Überströmen der Dammkrone möglich (vgl. Kapitel 4.2) und führt durch Erosion zum unkontrollierten Wasseraustritt. [11]

Ein sinnvoller Ansatz zur Berechnung des Böschungsbruchs liefert das Gleitkreisverfahren für kreiszylindrische Bruchflächen. Der Mittelpunkt des Gleitkreises sowie dessen Radius wird dabei variiert, bis eine Geometrie mit der geringsten Sicherheit gefunden wird. [11]

Eine Setzung von Dammkörper und Untergrund kann zu einer Verminderung der Standsicherheit führen. Besonders bei einer ungleichmäßigen Setzung ist eine Rissbildung leicht möglich. Dies kann die innere Erosion (Piping) fördern. Eine ähnliche Gefahr stellt der Wurzelbewuchs dar. [11]

Entwurf, Bemessung und Berechnung sind im „Eurocode 7“ sowie in der „Richtlinie zum Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen“ [22] der Staubeckenkommission geregelt.

4.2 Versagen durch Überströmen (overtopping)

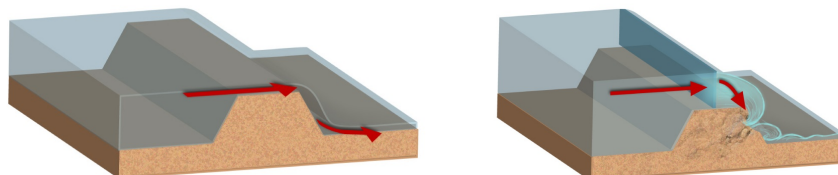


Abbildung 4.2: Überströmen [20]

Ereignisse, die zu einem Überströmen des Dammes führen, können z.B. folgende sein: [11]

- Absenkung der Dammkrone durch geotechnisches Versagen (vgl. Kapitel 4.1)
- extreme hydrologische Ereignisse
- unterdimensionierte bzw. defekte Hochwasserentlastungsanlage
- Wellen infolge Massenbewegungen in den Stauraum
- Versagen einer oberliegenden Stauanlage

Ein Überströmen des Damms kann in weiterer Folge zu einer progressiven Erosion des Dammkörpers führen (äußere Erosion). [11]

Näheres dazu wurde von Saberi [21] untersucht.

4.3 Versagen aufgrund Durchsickerung

Besonders erosionsgefährdet sind folgende Bereiche eines Damms: [11]

- wasserseitige Dammböschung
- Dammkrone
- Übergangsbereich zwischen Damm und Untergrundabdichtung
- Unterströmungsbereich der Untergrundabdichtung
- Eintrittsbereich in die luftseitige Drainage
- Kontaktfläche des Dichtkerns zur Filterschicht

Im BAW-Merkblatt „Materialtransport im Boden“ [23] werden dazu mehrere Verfahren zur Nachweisführung und deren Grenzen der Anwendung dargestellt.

4.3.1 Suffosion

Darunter versteht man die Umlagerung bzw. Austragung von feinkörnigen Bodenteilchen bei nichtbindigen Böden infolge der Sickerwasserströmung. Die Tragstruktur wird dabei erhalten aber es verändert sich die Kornverteilung. Die Dichte, der

Ungleichförmigkeitsgrad und das Sickerwassergefälle wird reduziert und das Porenvolumen erhöht. Dadurch steigt die Wasserdurchlässigkeit. Die Suffusion kann als Vorstufe zur Erosion gesehen werden. [4] [11]

Die Suffusion kann auf verschiedene Arten auftreten: [11]

- **Innere Suffosion:** Feinteile werden im inneren des Bodens umgelagert (Abbildung 4.3 a). Oft dauert dieser Vorgang aufgrund der kurzen Transportwege nicht besonders lange. Er kann aber durch äußere Suffosion oder Kontakterosion aufrecht erhalten werden.
- **Äußere Suffosion:** Feinteile werden in die freie Wasseroberfläche ausgetragen (Abbildung 4.3 b). Dadurch kann die Innere Erosion eingeleitet und beschleunigt werden.
- **Kontaktsuffosion:** Hier findet die Suffosion im Übergangsbereich von zwei verschiedenen Erdmaterialien (z.B. im Filterbereich) statt. (Abbildung 4.3 c)

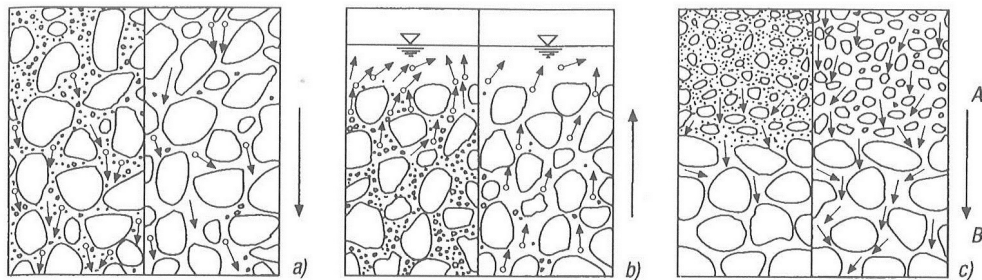


Abbildung 4.3: Suffosion: a) innere Suffosion, b) äußere Suffosion, c) Kontaktsuffosion [4]

Dagegen wird bei der sogenannten Kolmation das feine Material des Sickerwassers in den Hohlräumen abgelagert. [4]

4.3.2 Erosion

Im Gegensatz zur Suffosion betrifft die Umlagerung des Erdmaterials praktisch alle Korngrößenbereiche, also nicht ausschließlich Feinteile. Eine Erosion kann letztlich zu einem Erosionsbruch führen. [11]

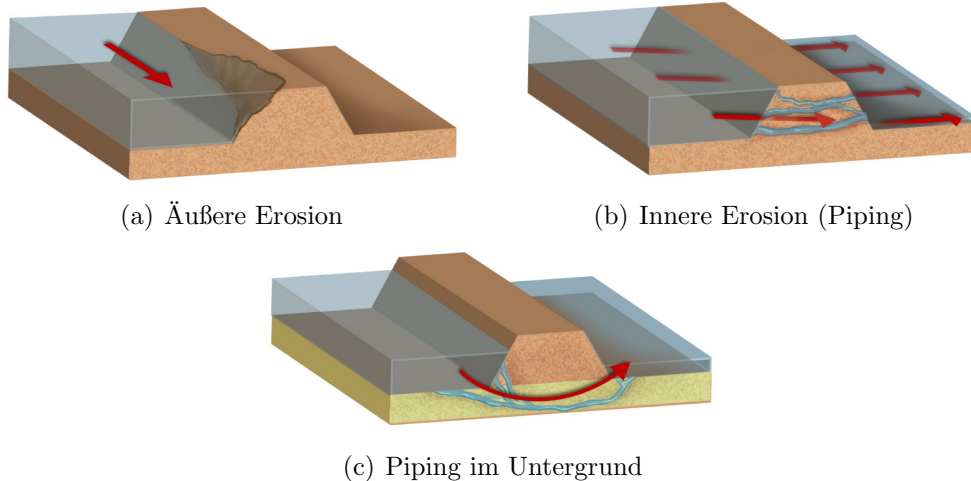


Abbildung 4.4: Erosion [20]

Auch die Erosion kann auf verschiedene Arten auftreten: [11]

- **Äußere Erosion:** Sie tritt an der Schichtgrenze des Erdmaterials zum Wasser auf. Dabei kommt es zu einer Umlagerung bzw. Ausspülung des Materials durch das Wasser (Abbildung 4.8 a). Diese Form der Erosion kennt man bei Fließgewässern auch als Ufer- oder Sohlerosion. Bei Dämmen kann ein Überströmen des Damms zur Äußeren Erosion führen.
- **Innere Erosion:** Sie tritt innerhalb des Erdkörpers auf. In röhrenförmigen Hohlräumen können sich Kanäle bilden, die durch die Schleppspannung fortlaufend aufgeweitet werden (Abbildung 4.8 b). Dieser Vorgang wird auch als „Piping“ bezeichnet.

Der Prozess der Inneren Erosion beginnt an der unterwasserseitigen Dammoberfläche oder im Vorland, wenn Bodenteilchen infolge eines großen hydraulischen Gradienten (vgl.

Kapitel 3.1.1) herausgelöst werden. Dieser Vorgang, die sogenannte „rückschreitende Erosion“, setzt sich entgegen der Strömungsrichtung des Grundwassers entlang der Stromlinie fort. Dieser Prozess kündigt sich an der unterwasserseitigen Dammoberfläche durch Quellbildung an. In einem frühen Stadium kann der Prozess noch durch das Aufbringen von Filtermaterial verhindert werden. Ist die Innere Erosion jedoch schon in einem fortgeschrittenen Stadium, muss der Wasserspiegel abgesenkt werden um weitere Sanierungsmaßnahmen einzuleiten. [24]

Im Extremfall würde sich der Kanal bis zum Wasserkörper hin ausbilden [24], was bis hin zu einem Bruch des gesamten Schüttkörpers führen kann. [11]

Von Piping gefährdet sind insbesondere locker gelagerte und feinkörnige Sande. Für bindige Böden stellt Piping kaum eine Gefahr dar. [24]

Um Piping vorzubeugen gibt es verschiedene Methoden: [25]

- Traditionelle Maßnahmen: Sie setzen darauf, den hydraulischen Gradienten möglichst gering zu halten. [24] Dies kann durch eine Verlängerung des Sickerweges erzielt werden. Dazu kann ein vertikaler Schirm (Spundwand oder Schlitzwand) oder wasser- bzw. luftseitig horizontale Bermen errichtet werden. Diese Maßnahmen sind vor allem bei Dämmen mit geringeren Druckhöhendifferenzen geeignet.
- Drainagen: Diese werden im Bereich des talseitigen Dammfußes erstellt und können sowohl horizontal als auch vertikal ausgeführt werden. Sie bewirken eine Entlastung des Porenwasserdrucks.



Abbildung 4.5: Verhinderung von Piping durch Drainage (vgl.[25])

- vertikales Geotextil: Bei dieser Maßnahme wird die Entstehung eines Pipingkanals im Bereich des talseitigen Dammfußes zwar in Kauf genommen, aber der Kanal wird mittels eines vertikalen Geotextils an der Weiterentwicklung entgegen der Strömungsrichtung gehindert. Das Geotextil muss also einerseits eine hohe Wasserdurchlässigkeit gewährleisten und andererseits den Sandtransport verhindern.

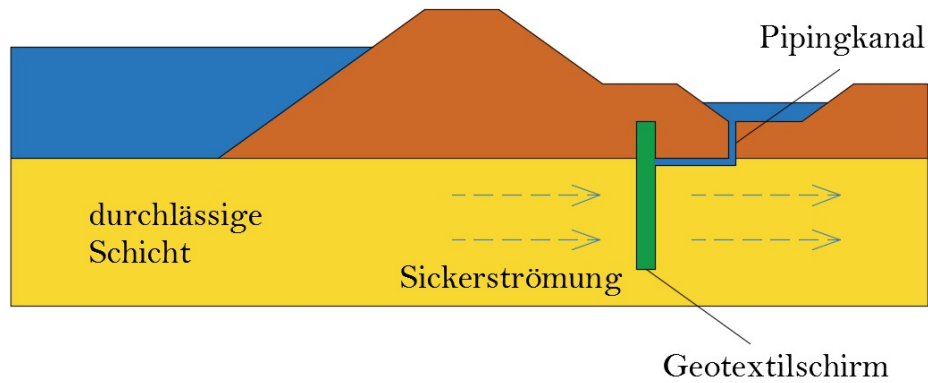


Abbildung 4.6: Verhinderung von Piping durch ein Geotextil (vgl.[25])

- Grobsandbarriere: Diese Maßnahme funktioniert ähnlich der vertikalen Geotextilien. Eine Weiterentwicklung des Pipingkanals wird hier an der Grobsandbarriere verhindert. Aufgrund der Korngröße des Grobsandes ist dieser widerstandsfähiger auf Erosion als das umgebende Material mit geringerer Korngröße.

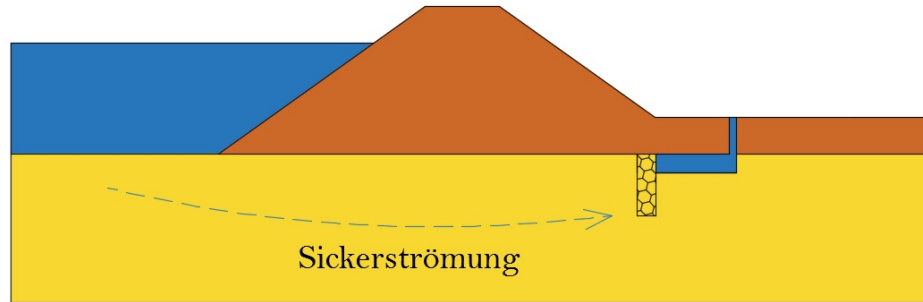


Abbildung 4.7: Verhinderung von Piping durch eine Grobsandbarriere (vgl.[25])

- **Kontakterosion:** Dieser Prozess findet im Übergangsbereich von zwei verschiedenen Erdmaterialien bzw. Korngrößenbereichen statt, indem das feinere Material erodiert. Eine großflächige Kontakterosion kann zu Setzungen des Dammkörpers führen. Entsprechend abgestufte Filter gemäß diverser Filterkriterien sollten diesen Vorgang verhindern.
- **Fugenerosion:** Diese Art der Erosion kommt im Kontaktbereich vom Erdmaterial zu einem angrenzenden massiven Bauteil vor.
- **Risserosion:** Erosion entlang eines Risses.

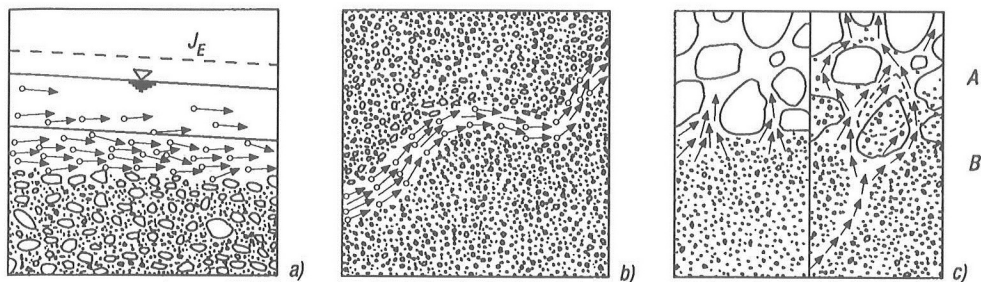


Abbildung 4.8: Erosion - a) äußere Erosion, b) innere Erosion, c) Kontakterosion [4]

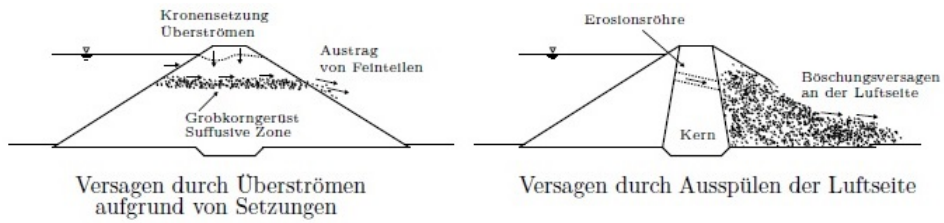


Abbildung 4.9: Suffosion in einem Homogendamm (links); Erosionsröhre im Dichtkern und Versagen zufolge Ausspülen des luftseitigen Dammkörpers (rechts) [11]

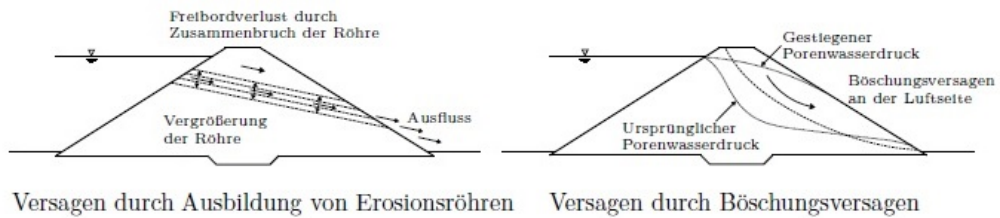


Abbildung 4.10: Innere Erosion (Piping) in einem Homogendamm (links); Böschungsbruch infolge gestiegener Durchlässigkeit innerhalb des Schüttkörpers (rechts) [11]

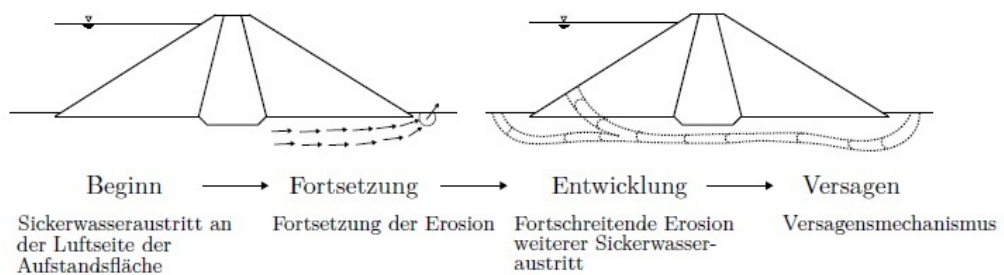


Abbildung 4.11: Innere Erosion (Piping) im Untergrund [11]

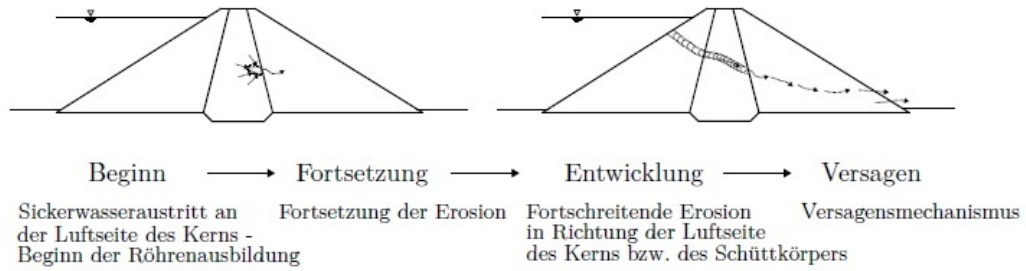


Abbildung 4.12: Kontaktion Dichtkern/Filter mit Ausbildung einer Stömungsröhre [11]

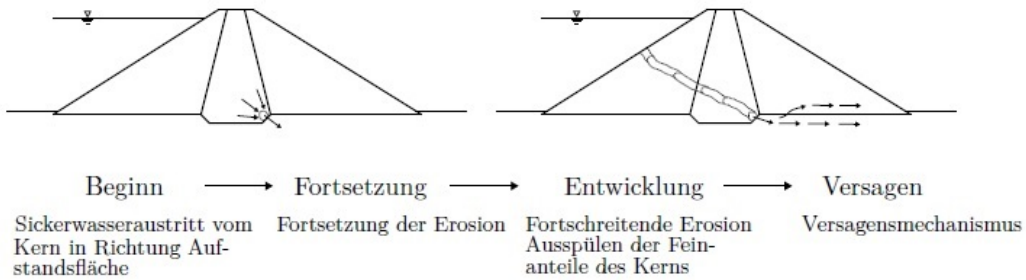


Abbildung 4.13: Kontaktion Dichtkern/Untergrund (Aufstandsfläche): Austragung von Feinteilen des Kerns und Bildung einer Erosionsröhre [11]

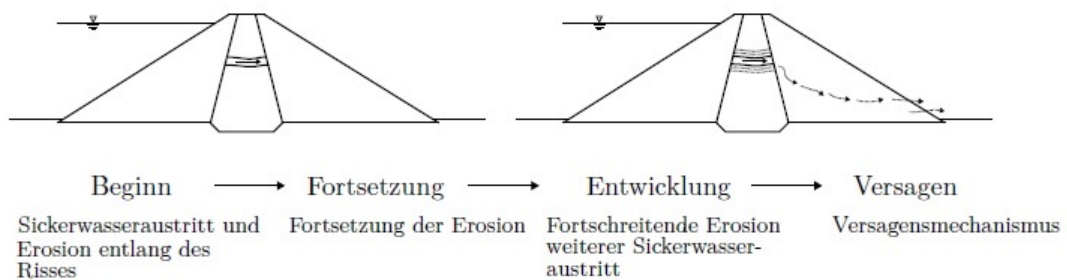


Abbildung 4.14: Rission im Dichtkern mit anschließender Bildung einer Erosionsröhre [11]

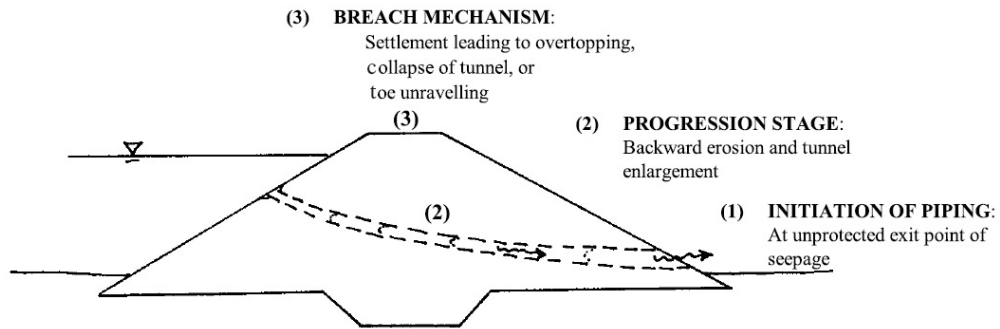


Abbildung 4.15: Entwicklungsstadien von Piping [26]

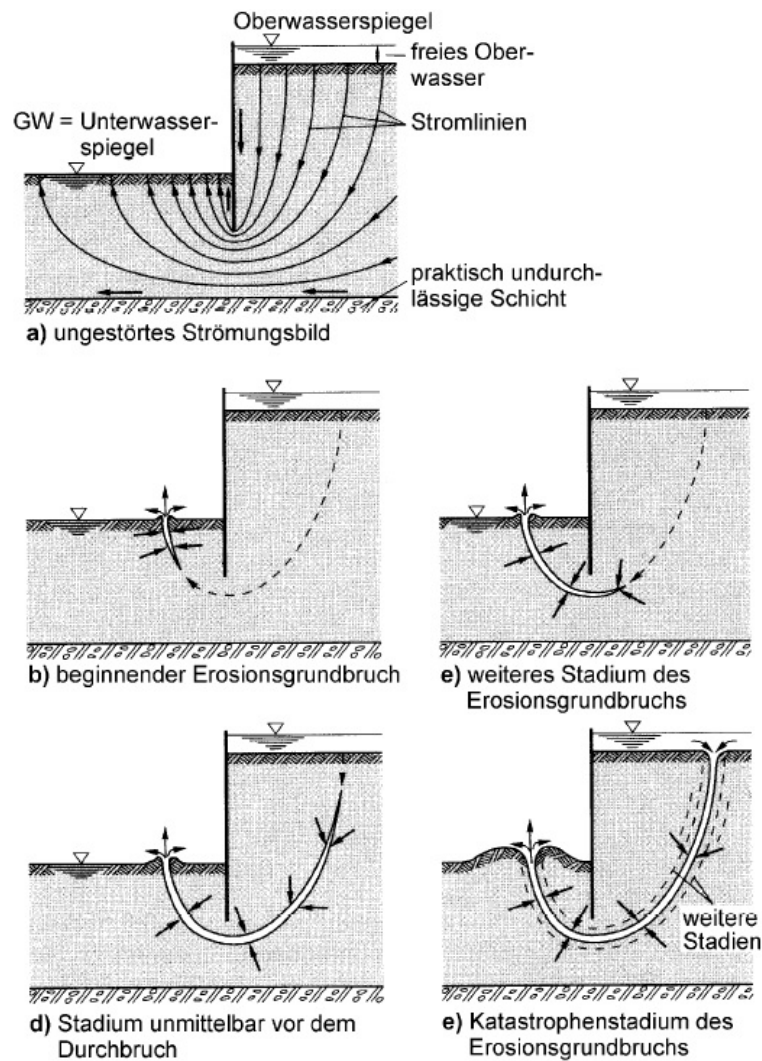


Abbildung 4.16: Entwicklungsstadien von Piping anhand einer Spundwand dargestellt [27]

4.4 Versagen durch Erdbeben (Dynamische Last)

Auf Schüttdämme kann sich ein seismisches Ereignis folgendermaßen auswirken: [11]

- große Verschiebungen
- Abgleiten des Dammkörpers entlang einer Gleitfläche (bzw. eines Gleitkreises)
- Bodenverflüssigung (Liquifikation)
- daraus resultierende Setzungen
- Ausbildung einer Diskontinuität (Bruchlinie)

In Österreich werden derartige Ereignisse berücksichtigt, obwohl eine nur geringe bis mittlere Seismizität vorherrscht. [11]

Nachweisverfahren sind in der „Erdbebenberechnung von Talsperren“ [28] des BMLRT angeführt.

4.5 Weitere Versagensursachen

Neben den bereits erwähnten Versagensursachen sind noch weitere Ursachen zu betrachten und werden in der folgenden Abbildung 4.17 dargestellt.

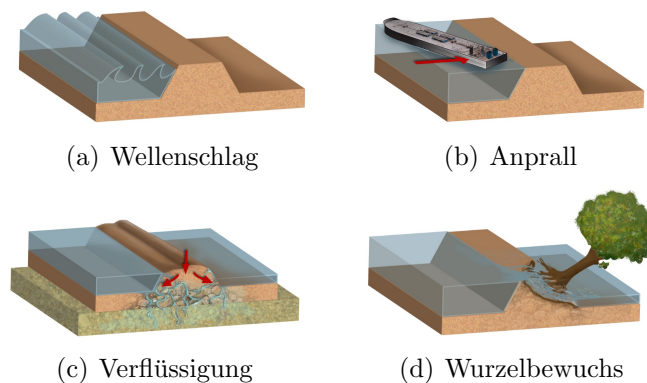


Abbildung 4.17: Weitere Versagensursachen [20]

5 Versagensstatistik

Außerplanmäßige Verformungen an Bauwerken können selbst bei einer konservativen Bemessung auftreten. Tritt kein Versagen auf, bedeutet es, dass der Grenzzustand nicht erreicht wird. Dabei bleibt das noch vorhandene Sicherheitsmaß unscharf. [29]

Erst wenn die Gefahren, die Kombination von Einwirkung und Widerstand sowie deren Unsicherheiten zutreffend ermittelt werden, können empirische und deterministische Modelle zufriedenstellende Bemessungsergebnisse liefern. [29]

- **probabilistisch:** Verteilung von einzelnen Zufallsvariablen
- **stochastisch:** Ergebnis hängt von mehreren zeitlichen od. räumlichen Funktionen ab

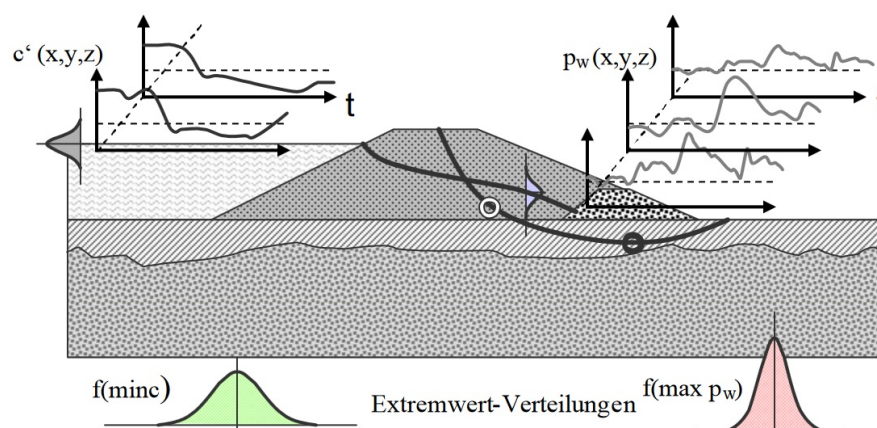


Abbildung 5.1: Vergleich einer probabilistischen (unten) bzw. einer stochastischen (oben) Standsicherheitsbetrachtung (Kohäsion c , Porenwasserdruck p_w) [29]

- **deterministisch:** z.B. Gewichtskräfte eines Bodens: sie streuen zeitlich nicht und nur eingeschränkt räumlich
- **unsichere Zufallsgrößen:** z.B. Kohäsion c und Porenwasserdruck p_W
- **Zeitfunktion:** z.B. Flusswasserstand, Kohäsion c und Porenwasserdruck p_W
- **Räumliche Streuung:** z.B. Baugrundeigenschaften

Eine Beurteilung, ob ein Ereignis zu einem

- Versagen V (Dammbruch),
- Schaden S (reparabel) oder
- weiteren Betrieb B (unkritisches Ereignis)

führt, kann mit Hilfe eines Ereignisbaums durchgeführt werden. Als Beispiel führt Witt [29] eine Analyse für das Ereignis an, dass versehentlich eine LKW-Ladung des groben Stützkörpermaterials S in den Kern K eingebaut wird. Je nach Bewertung der einzelnen Entscheidungsmöglichkeiten kann eine abschließende Beurteilung getroffen werden. [29]

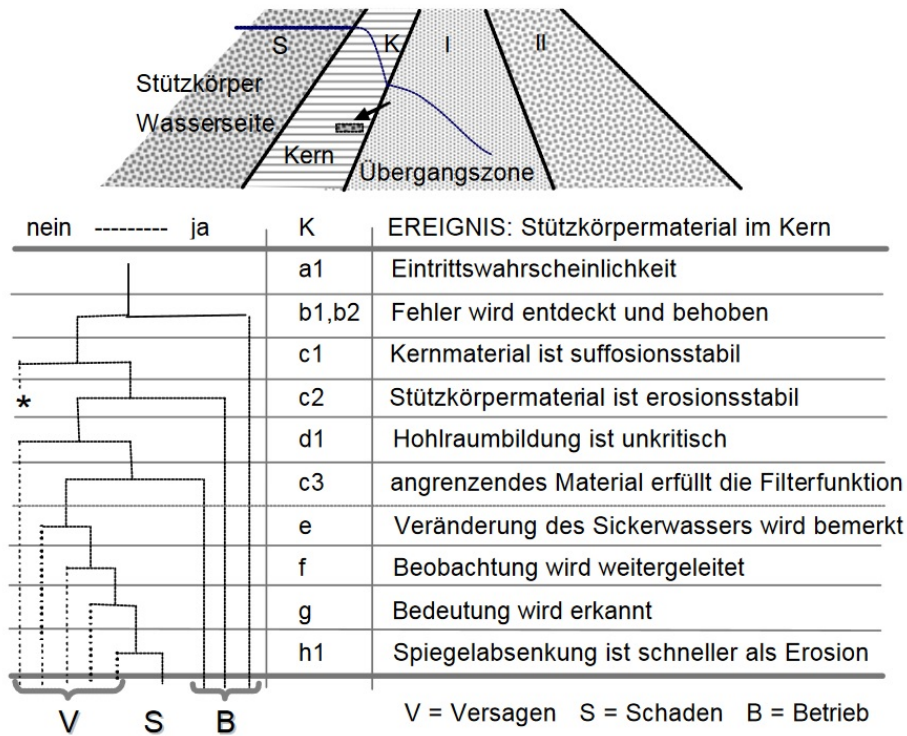


Abbildung 5.2: Ereignisbaumanalyse für Staudamm-Schadensfall [29]

Wird eine Entscheidungsmöglichkeit mit einer Einzelwahrscheinlichkeit belegt, kann daraus eine Systemwahrscheinlichkeit berechnet werden. [29]

Bei einer Ereignisbaumanalyse steht zu Beginn ein Initialereignis, was sich anschließend zu mehreren Folgen entwickeln kann. Im Gegensatz dazu wird bei einem Fehler oder Versagensbaum in umgekehrter Richtung gearbeitet: hier führen mehrere Ursachen zu einer Folge. [29]

Bei dieser Analyse ist interessant zu sehen, wie bei einer funktionierenden Talsperrenüberwachung und richtigem Reagieren durch den Talsperrenverantwortlichen bzw. -wärter bei den Punkten e bis g ein Versagen abgewendet werden kann, und es „nur“ zu einem Schaden kommt.

Eine unkritische Hohlraumbildung würde laut dieser Darstellung nur dann zu keinem Versagen führen, wenn auch gleichzeitig sämtliche darauffolgenden Kriterien zutreffen würden.

5.1 Statistische Untersuchungen von Dammversagen

5.1.1 Untersuchung von Foster [26]

Foster untersucht große Schüttdämme (höher als 15 m Dammhöhe) bis 1986. Dabei legt er vor allem Augenmerk auf Piping und Böschungsinstabilität. Die Daten bezieht er aus verschiedenen ICOLD (International Commission on Large Dams) - Studien sowie auch aus anderen Quellen.

Es lassen sich bei dieser Studie die statistischen Zahlenwerte nicht zu konkreten Versagensereignissen von Talsperren zuordnen.

Die historische Häufigkeit eines Damm-Versagens liegt bei 1,2 % (der untersuchten 11192 Schüttdämme bis 1986, ohne Japan bis 1930 und China). Ein Versagen während des Betriebs kam bei 1,1 % vor. Die Wahrscheinlichkeit des Versagens eines Damms in einem Jahr liegt bei $4,5 \cdot 10^{-4}$.

Ähnlich wie in Witt [29] wird hier unterschieden zwischen:

- Unfälle (Accidents): sie beinhalten den Anfangsprozess von z.B. Piping, aber die Progression ist begrenzt und es kommt nicht zu einem Dambruch.
- Versagen (Failure):

In der Arbeit von Foster werden die analysierten Dämme anhand ihres Querschnitts folgendermaßen eingeteilt:

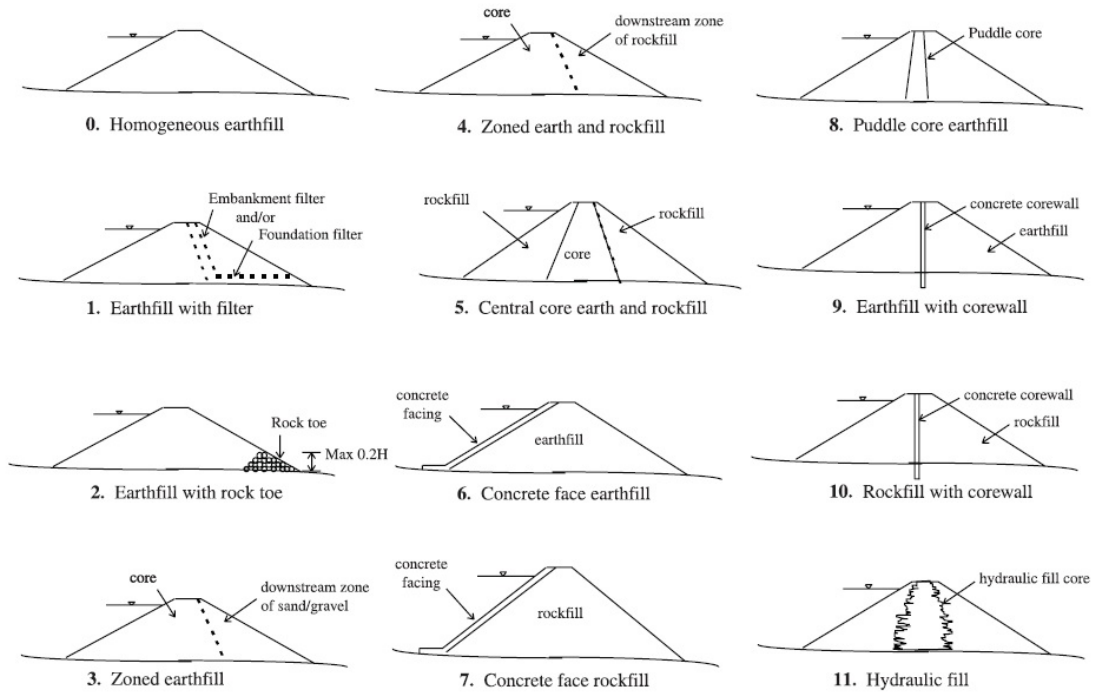


Abbildung 5.3: Einteilung der Dammquerschnitte nach Foster [26]

Als Versagensarten werden untersucht:

- Überströmen des Damms (overtopping)
- Versagen des Hochwasserentlastung (gate-spillway failure)
- Piping (durch den Damm, durch den Untergrund oder vom Damm in den Untergrund)
- Böschungs-Instabilität (wasserseitig oder luftseitig)
- Erdbeben

Es können auch gleichzeitig mehrere Versagensarten zu einem Versagen des Damms führen. Die wurde bei dieser Untersuchung berücksichtigt. Dies erklärt die unterschiedlichen Summen in den tabellarischen Auflistungen.

Mode of failure	No. of cases		% failures (where known)		Average frequency of failure ($\times 10^{-3}$)	
	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation
Overtopping and appurtenant						
Overtopping	46	40	35.9	34.2	4.1	3.6
Spillway-gate	16	15	12.5	12.8	1.4	1.3
Subtotal	62	55	48.4	47.0	5.5	4.9
Piping						
Through embankment	39	38	30.5	32.5	3.5	3.4
Through foundation	19	18	14.8	15.4	1.7	1.6
From embankment into foundation	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
Subtotal	59	57	46.1	48.7	5.3	5.1
Slides						
Downstream	6	4	4.7	3.4	0.54	0.36
Upstream	1	1	0.8	0.9	0.09	0.09
Subtotal	7	5	5.5	4.3	0.63	0.45
Earthquake-liquefaction	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
Unknown mode	8	7				
Total no. of failures	136	124			12.2 (1.2%)	11.1 (1.1%)
Total no. of failures where mode of failure known	128	117				
No. of embankment dams	11 192	11 192				

Note: Subtotals and totals do not necessarily sum to 100%, as some failures were classified as multiple modes of failure.

Abbildung 5.4: Versagen während des Betriebes [26]

Neben dieser allgemeinen Statistik untersucht Foster das Dammversagen insbesondere auf Piping und Böschungs-Instabilität noch detaillierter.

Beim Piping führt das progressive Wachstum der Strömung schließlich zum Bruch. Dieser Effekt wird in Kapitel 4.3 genauer erläutert.

Beim Piping wird unterschieden:

- Piping durch den Dammkörper
- Piping durch die Gründung
- Piping vom Dammkörper in die Gründung

Bei der Böschungsinstabilität wird unterschieden:

- Gleiten auf der Luftseite
- Gleiten auf der Wasserseite

In der folgenden Tabelle werden die verschiedenen Dammquerschnitte anhand den Versagensarten aufgelistet:

Table 3. Failure statistics for large embankment dams by dam zoning categories (up to 1986).

Dam zoning type	% of population	No. of failure cases	% of failure cases	Mode of failure								Spillway-gate failure	Unknown
				Piping			Slope instability						
				Through embankment	Through foundation	From embankment into foundation	Downstream slide	Upstream slide	Earthquake	Overtopping			
Homogeneous earthfill	9.5	23 (17)	28 (32)	14	2	0	1	0	1	6	0	0	
Earthfill with filter	15	4 (2)	5 (4)	2	0	0	0	0	0	2	0	0	
Earthfill with rock toe	6.1	9 (9)	11 (17)	5	3	1	0	0	0	0	0	0	
Zoned earthfill	35.9	7 (5)	9 (9)	4	1	0	0	0	0	2	0	0	
Zoned earth and rockfill	9.3	4 (3)	5 (6)	1	0	1	1	0	0	1	0	0	
Central core earthfill and rockfill	8.4	4 (1)	5 (2)	0	0	0	1	0	0	3	0	0	
Concrete face earthfill	4.1	4 (4)	5 (8)	2	3	0	0	0	0	0	0	0	
Concrete face rockfill	2.8	1 (0)	1 (0)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Puddle core earthfill	4.7	5 (4)	6 (8)	4	0	0	0	0	0	0	1	0	
Earthfill with concrete corewall	2.4	11 (3)	13 (6)	0	2	0	0	1	0	4	3	1	
Rockfill with concrete corewall	0.9	0 (0)	0 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydraulic fill	0.9	5 (3)	6 (6)	0	1	0	2	0	0	0	2	0	
Other	—	5 (3)	6 (6)	1	2	0	0	0	0	1	1	0	
Unknown	—	54 (13)	—	6	5	0	1	0	1	26	9	7	
Total	100	136 (66)	100 (100)	39	19	2	6	1	2	46	16	8	

Note: The values in parentheses refer to statistics for structural modes of failure, comprising piping, slope instability, and earthquake modes of failure. The number of failure cases for the modes of failure do not necessarily sum to the total number of failure cases because some dams were classified as multiple modes of failure.

Abbildung 5.5: Versagensstatistik der Dammtypen [26]

Im Vergleich mit Piping und Überströmen spielt Gleiten nur eine sehr Untergeordnete Rolle:

Versagen infolge	vor 1950	ab 1950 bis 1986	Tendenz
Piping	43 %	54 %	↗
Flood Overtopping	53 %	41 %	↘
Gleiten	7 %	1,5 %	↘

Tabelle 5.1: Versagen vor und nach 1950 [26]

Piping durch den Dammkörper

Eine tabellarische Auflistung befindet sich im Anhang A.1.3

Hier stechen besonders homogene Erddämme (Homogeneous earthfill) hervor. Sie haben beinahe eine 5-mal höhere Versagenswahrscheinlichkeit infolge Piping als der Durchschnitt der anderen Querschnittstypen.

Jedoch hatten Dämme, die noch vor 1900 gebaut wurden, eine 10-fach höhere Versagenshäufigkeit als jene nach 1950.

Es muss davon ausgegangen werden, dass nicht alle Piping-Unfälle (Accidents) der ICOLD gemeldet werden.

Steinschüttdämme mit zentralem Erdkern (Central core earth and rockfill) mit einer hohen Anzahl von Unfällen aber ohne Versagen deutet darauf hin, dass es unwahrscheinlich ist, dass es nach Initiierung von Piping zu einem progressiven Fortschreiten kommt. Dies liegt wahrscheinlich an der Stabilität der luftseitigen Steinschüttung gegen große Sickerwasser-Mengen.

Die Probleme lagen bei den Versagensfällen vor allem im Bereich von Rohrdurchführungen, schlecht verdichtetem Material, im Anschlussbereich von Betonbauwerken (Hochwasserüberlauf). Eine Gefahr stellt auch die Erosion von Kernmaterial in die anschließende Steinschicht. Erd- und Steinschüttdämme mit Betonauflandichtung (Concrete face earth und -rockfill) sind dabei am wenigsten gefährdet.

Gut verdichtete Dämme haben ein geringeres Risiko durch Piping zu versagen.

Die Häufigkeit des Versagens infolge Piping durch den Dammkörper ist doppelt so hoch wie durch das Fundament und 20 mal so hoch wie Piping vom Dammkörper in das Fundament.

Piping durch das Fundament

Eine tabellarische Auflistung befindet sich im Anhang A.1.4

Das Verhältnis von Unfällen zu Versagensfällen ist bei Piping durch das Fundament höher als bei Piping durch den Dammkörper. Dies deutet darauf hin, dass es im Gründungsbereich weniger zu einem progressiven Wachstum der Strömung kommt als im Dammkörper. Teilweise können auch Selbstheilungsprozesse eine Rolle spielen. Der Dammquerschnitt scheint hier eher eine untergeordnete Rolle zu spielen. Viel wichtiger sind die geologischen Untergrundverhältnisse und der Dichtungsschirm.

Sind Filter in der Gründung vorhanden, kommt es laut Abbildung A.7 zwar kaum

zum Versagen, es treten aber dennoch Unfälle auf.

Gleiten an der Luftseite

Eine tabellarische Auflistung befindet sich im Anhang A.1.1

Die geringe Anzahl an Versagensfällen im Vergleich zu den Unfällen zeigt, dass bei einer langsamen Bewegung rechtzeitig eingegriffen werden kann, und weitere Maßnahmen zur Verhinderung des Fortschreitens der Gleitung getroffen werden können. Auch hier sind am besonders die homogenen Erddämme gefährdet.

Gleiten an der Wasserseite

Eine tabellarische Auflistung befindet sich im Anhang A.1.2

5.1.2 Untersuchung von Lammerer [30]

In der Arbeit von Lammerer wurden 616 verschiedene Schadensfälle aus mehreren Datenquellen zusammengeführt und untersucht.

Ähnlich der Arbeit von Foster (Kapitel 5.1.1) erfolgt auch hier die Unterscheidung zwischen:

- Schadensereignissen und
- Bruchereignissen

In den folgenden Diagrammen von Lammerer wird der Auslöser jeweils nach Schadens- bzw. Bruchereignis dargestellt. Es werden dabei jedoch ausschließlich Erd- und Steinschüttdämme betrachtet. Dabei werden Vorfälle die zu Schäden führten getrennt von jenen Vorfällen, die bishin zu einem Bruchereignis führten dargestellt.

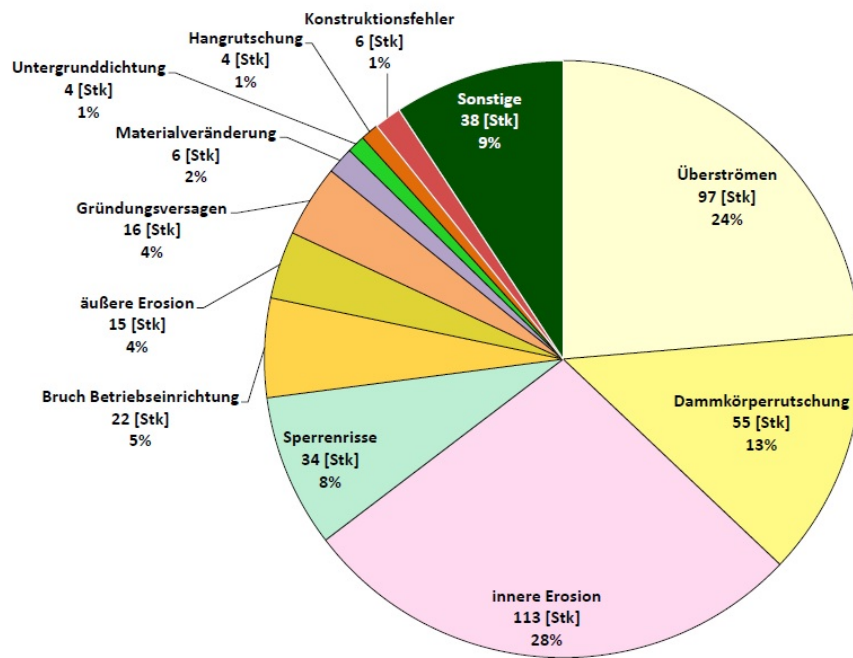


Abbildung 5.6: Schadensursachen [30]

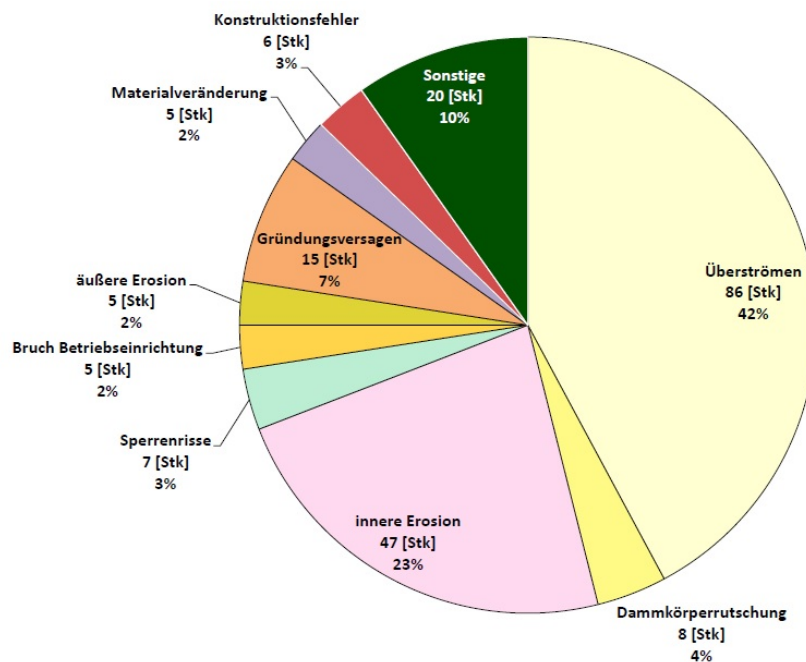


Abbildung 5.7: Bruchursachen [30]

In Abbildung 5.7 werden ausschließlich jene Ursachen gezählt, die bis hin zu einem Bruch führten.

Besonders häufig führt Überströmen sowie innere Erosion zu einem Dammbbruch. Dammkörperrutschungen sind zwar auch häufig Auslöser für Schadensereignisse, sie führen aber nur in wenigen Fällen bis zum Bruch des Damms. Dies wird in den Abbildungen 5.6 und 5.7 ersichtlich.

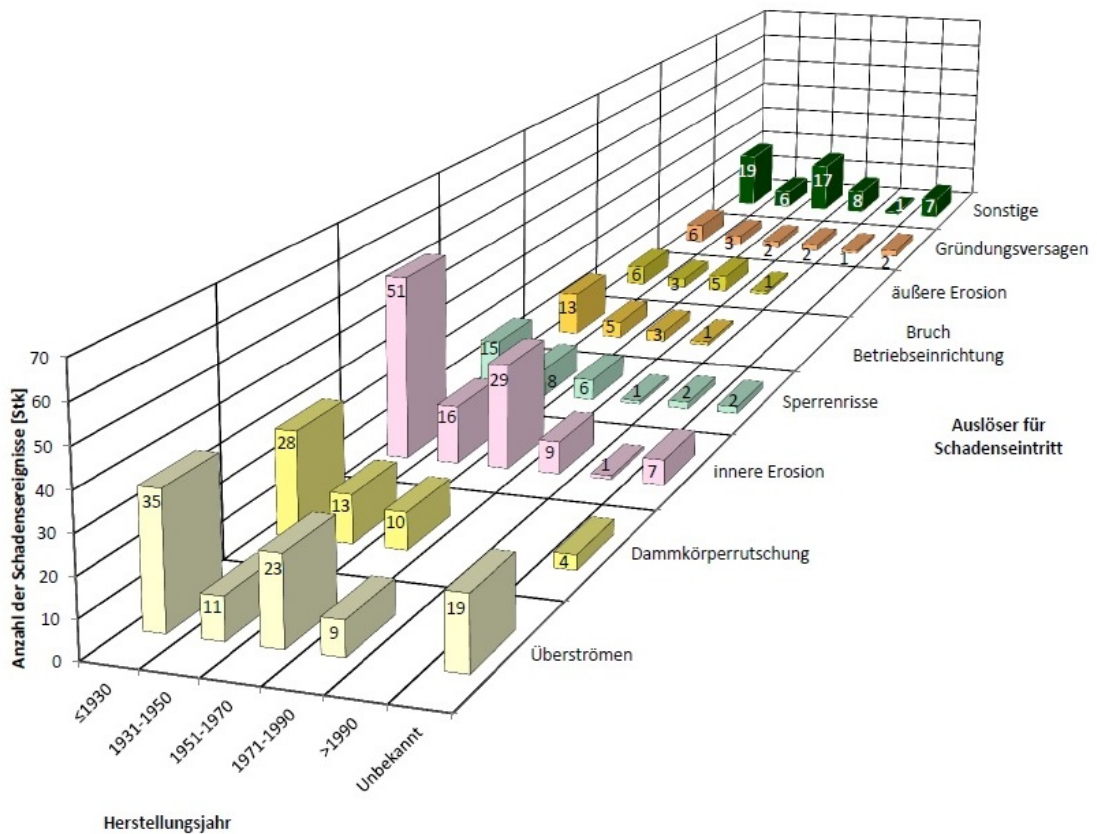


Abbildung 5.8: Schadensursachen je nach Herstellungsjahr [30]

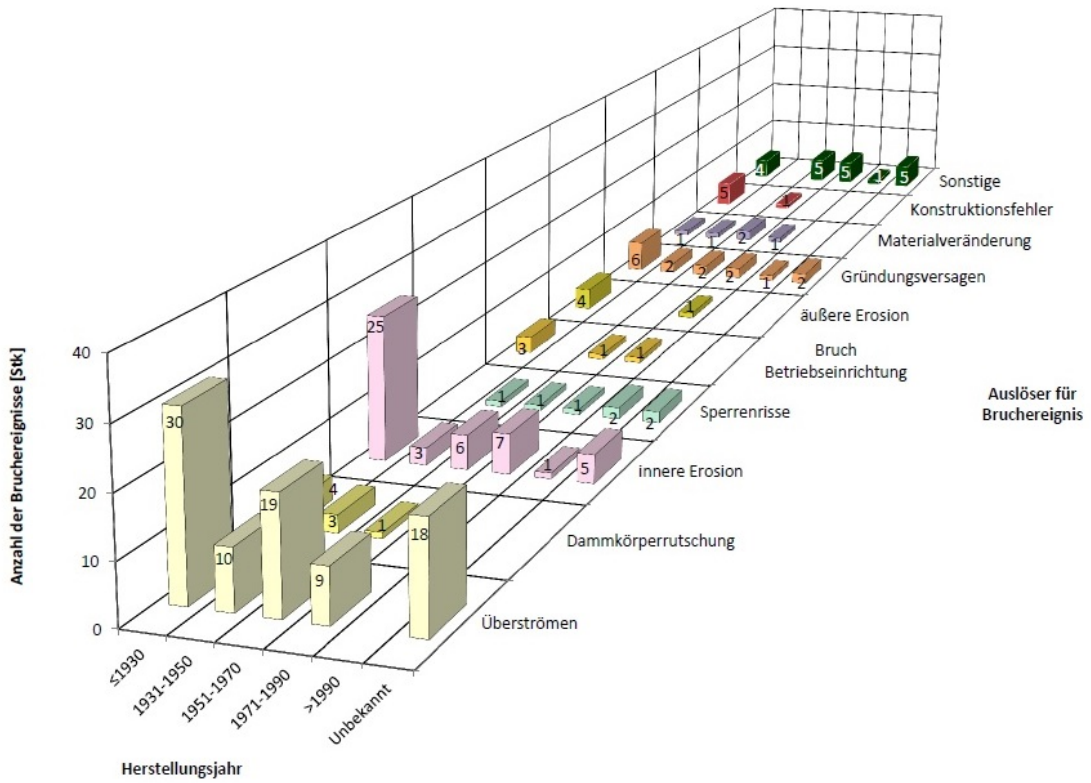


Abbildung 5.9: Bruchursachen je nach Herstellungsjahr [30]

Aus den beiden Abbildungen 5.8 und 5.9, die nach dem Herstellungsjahr gegliedert sind, kann man besonders bei den häufigen Schadens- bzw. Bruchauslösern erkennen, dass die Vorfälle im Laufe der Zeit tendenziell leicht abnehmen.

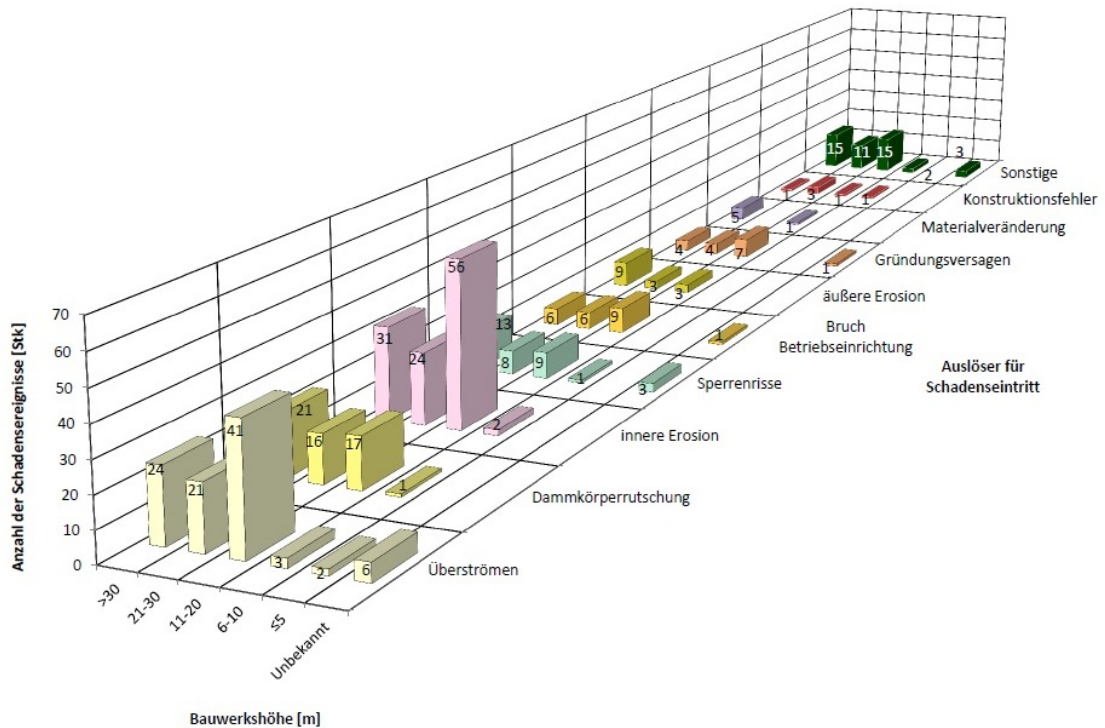


Abbildung 5.10: Schadensursachen je nach Bauwerkshöhe [30]

Eine Aufteilung der Schadensursachen je nach Bauwerkshöhe (Abbildung 5.10) lässt erkennen, dass es besonders bei Dämmen über 10 m Höhe zu Schäden kommt.

Da es besonders durch das Überströmen des Damms immer wieder zu Problemen kommt, sollte als Folgerung besonderen Wert auf eine ausreichend dimensionierte Hochwasserentlastungsanlage gelegt werden.

5.1.3 Untersuchung von ICOLD - Bulletin 121 (Tailings-Dämme) [31]

Das Versagen von Tailings-Dämmen wurde im ICOLD Bulletin 121 untersucht. Dieser Datensatz enthält 221 Vorfälle bis ins Jahr 2000. Dabei handelt es sich vor allem um Dämme für Deponien, Bergbaumaterialien usw.

Es wird darauf hingewiesen dass sämtliche Versagensursachen (Überströmen,

Böschungsinstabilität, Erosion usw.) vielfach auf mangelnde Kontrollen zurückzuführen sind.

Obwohl sich diese Masterarbeit auf Stauanlagen zur Speicherung von Wasser konzentriert, soll hier trotzdem kurz auf die Vorfälle bei Tailings-Dämmen eingegangen werden.

Interessant erscheint dabei die erfolgte Klassifizierung:

- Dam Type: (vgl. Abbildung 2.8)
 - UD ... upstream
 - DS ... downstream
 - CL ... centerline
 - WR ... water retention
 - NR ... not reported
- Incident Type:
 - 1a ... failure, active impoundment
 - 1b ... failure, inactive impoundment
 - 2a ... accident, active impoundment
 - 2b ... accident, inactive impoundment
 - 3 ... groundwater
- Incident Cause:
 - SI ... slope instability
 - SE ... seepage
 - FN ... foundation
 - OT ... overtopping
 - ST ... structural
 - EQ ... earthquake
 - MS ... mine subsidence
 - ER ... erosion
 - U ... unknown
 - NR ... not reported

- Dam Fill Material:
- T ... tailings
- CST ... cycloned sand tailings
- MW ... mine waste
- E ... earthfill
- R ... rockfill

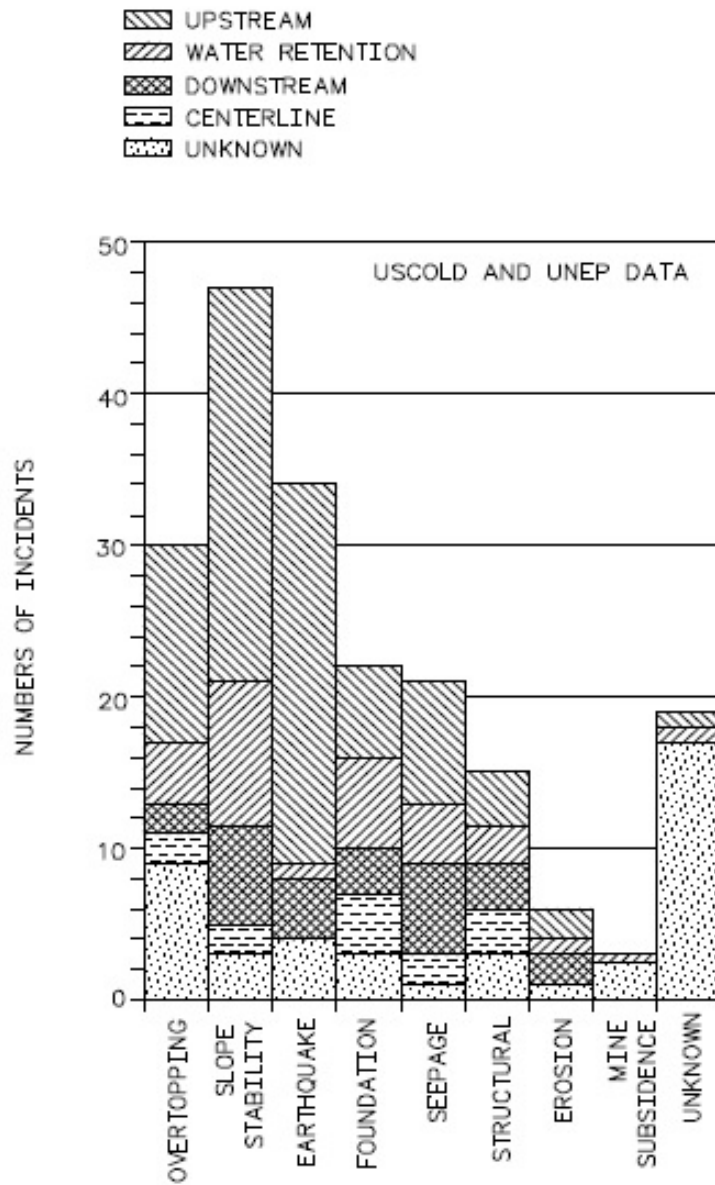


Abbildung 5.11: Vorfälle je nach Dammtyp [31]

Daraus wird ersichtlich, dass es besonders infolge der Böschungsinstabilität aber

auch aufgrund von Überströmungen und Erschütterungen durch Erdbeben häufig zu Problemen kommt.

Auch bei Tailings-Dämmen sollten die Methoden der Nachweise nach ingenieurwissenschaftlichen Aspekten geführt werden (z.B. Stand- bzw. Gleitsicherheit, Aufbau, Filter oder Überwachung).

6 Beispiele von Dammversagen und Vorfällen

6.1 Taum Sauk Damm - Missouri (Dammbruch durch Überströmen zufolge Überpumpen)

6.1.1 Allgemein

Dieser Damm unterscheidet sich wesentlich von sämtlichen anderen Talsperren. Üblicherweise werden Dämme in einer Talenge gebaut, deren Füllung über ein natürliches Gewässer wie auch durch Pumpen erfolgt. Der Taum Sauk Damm als Teil eines Pumpspeicherkraftwerks wurde direkt auf einem Bergplateau errichtet. Die Wasserzufuhr erfolgt ausschließlich durch Pumpen (und im geringeren Ausmaß durch Niederschlag).



Abbildung 6.1: Taum Sauk Damm – alter Damm [32]

Das Oberbecken der Pumpspeicher-Anlage wurde als nierenförmiger Steinschüttdamm in den 60er Jahren errichtet. Der Bau erfolgte lediglich durch Abladen des Schüttmaterials ohne weitere Verdichtungsmaßnahmen. Das Material konnte die Böschung hinunterrollen, somit stellte sich der Böschungswinkel von selbst ein. Der ca. 30 m hohe Damm wurde nur ca. in den oberen 5 m verdichtet. Auf der Dammkrone befand sich eine ca. 3 m hohe Betonmauer. Wasserseitig wurde der Damm mit Spritzbeton verkleidet. [32] [33]

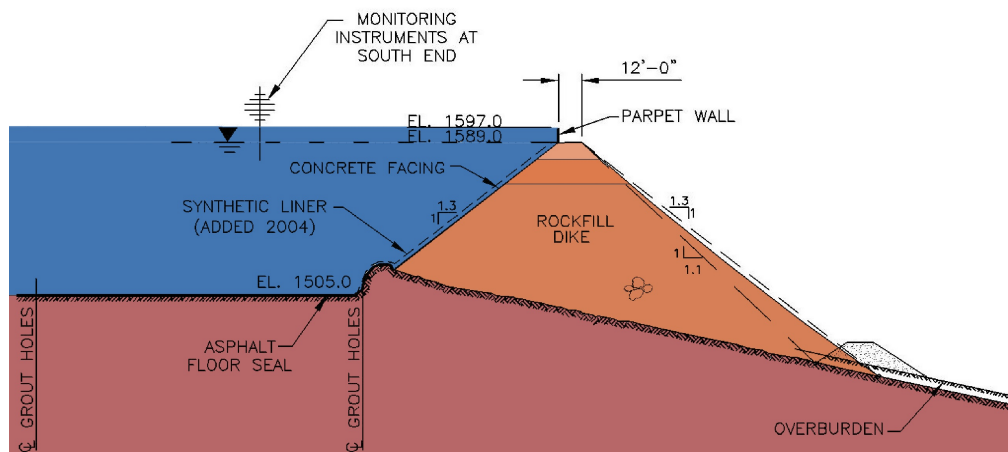


Abbildung 6.2: Querschnitt des alten Taum Sauk Damms [32]

Eine Hochwasserentlastung war nicht vorhanden. Zeitlebens trat im Damm Sickerwasser aus, besonders in jenem Bereich, wo 2005 das Versagen auftrat. Als Gegenmaßnahme wurde der Damm 2004 mit einem Geomembran ausgekleidet, wodurch der Sickerwasserverlust erheblich reduziert werden konnte. [32] [33]

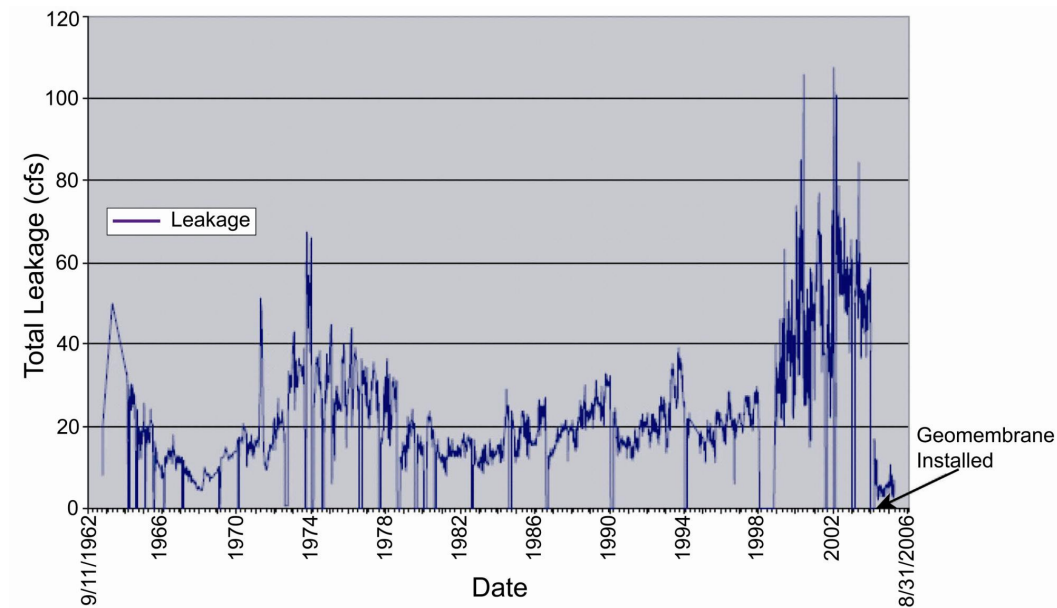


Abbildung 6.3: Sickerwasser – auffallende Zunahme ab 1999 [32]

6.1.2 Versagen

Wenige Monate vor dem Versagen kam es bereits zu einem sehr geringen Überlaufen des Beckens. Daraufhin konnten schon geringe Erosionen unterhalb der Betonmauer festgestellt werden. Bei der darauffolgenden Inspektion zeigte sich, dass sich die Verrohrung für die Sensoren zur Notabschaltung der Pumpturbinen („Fail-Safe“-Steuerung) aus der Verankerung gelöst haben. Diese Sensoren geben bei Kontakt mit Wasser ein elektrisches Signal, was aber im vorliegenden Fall unglücklicherweise nicht funktioniert hat. Der maximale Wasserstand wurde nach dieser Inspektion um ca. 1 m reduziert. [32]

Durch eine Fehlfunktion in der Pumpensteuerung wurde zu viel Wasser in das Becken gepumpt. Daraufhin wurde die Brüstungsmauer und in weiterer Folge auch die luftseitige Fläche des Schüttdamms überströmt. Das Wasser ergoss sich auf die ungeschützte luftseitige Dammoberfläche und unterspülte das Fundament der Betonmauer. Dies führte zum Einsturz der Betonmauer schließlich zum Bruch des Dammes. [33]



(a) vor bzw. nach dem Dammbbruch



(b) Verbruch

Abbildung 6.4: Taum Sauk Damm – Bruch des alten Steinschüttdamms [34]

Aufgrund von unregelmäßigen Setzungen, vor allem in den ersten Jahren nach der Fertigstellung des Damms, kam es zu einem ungleichmäßigen Verlauf der Brüstungshöhe mit einem Höhenunterschied von knapp einem halben Meter.

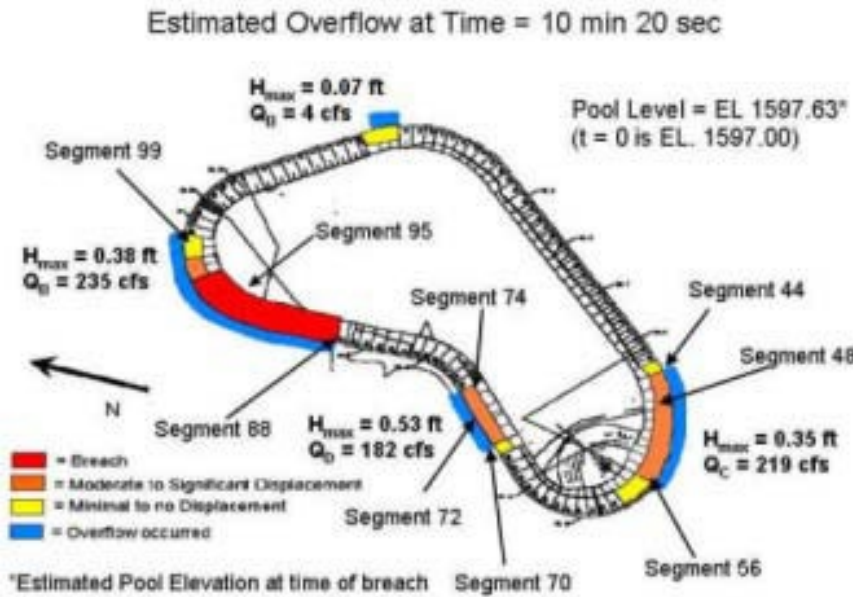


Abbildung 6.5: blau u. orange: überströmte Bereiche; rot: Dammbbruch [33]

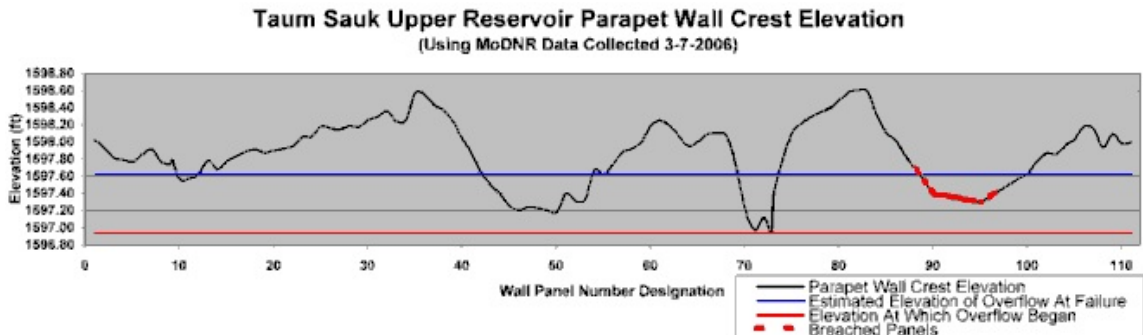


Abbildung 6.6: schwarz: Verlauf d. Brüstungshöhe; blau: Wasserspiegelhöhe kurz vor Dammbversagen; rote Punkte: Bereich des Dammbbruchs [33]

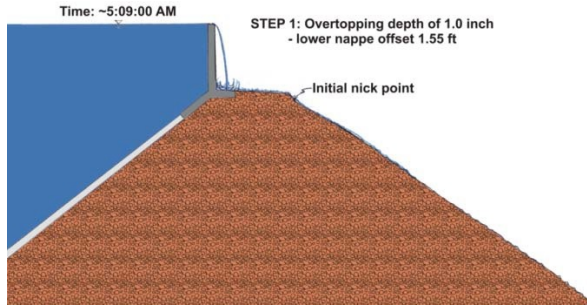
Der Verlauf der Katastrophe ist in Abbildung 6.9 rekonstruiert. Dabei wurde der Damm entlang einer Breite von bis zu ca. 270 m weggespült. [33]



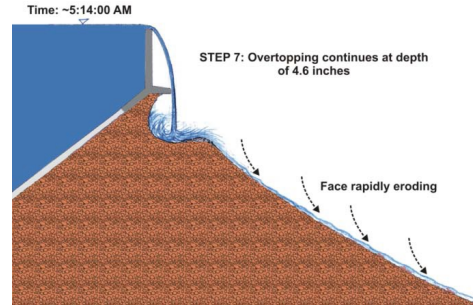
Abbildung 6.7: Unterspülung des Fundaments der Betonmauer [33]



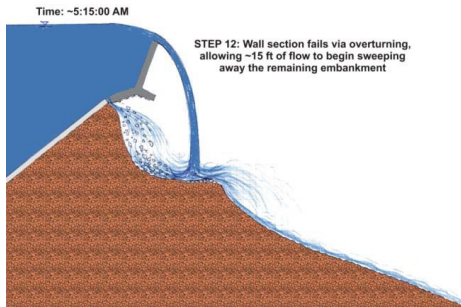
Abbildung 6.8: Erosion der Dammkrone und Unterspülung v. Fundament [33]



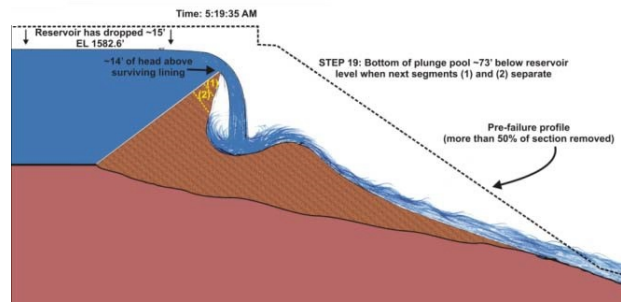
(a) Beginn der Überspülung



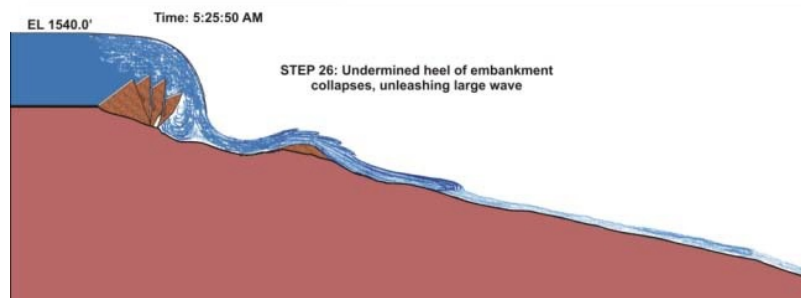
(b) Erosion des Dammes und Unterspülung des Fundaments



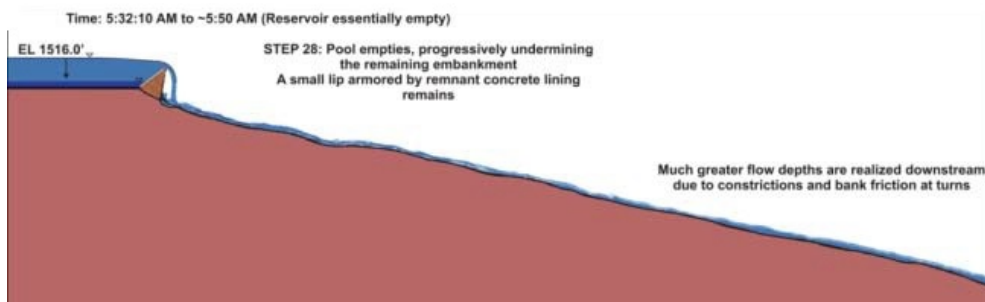
(c) Umkippen der Mauer führte zum katastrophalen Versagen



(d) Bildung eines Tauchbeckens



(e) Böschung erhält letzten großen Kollaps



(f) nur eine geringe Wassermenge verbleibt im Reservoir

Abbildung 6.9: Rekonstruktion des Ablaufs vom Dammversagen [33]

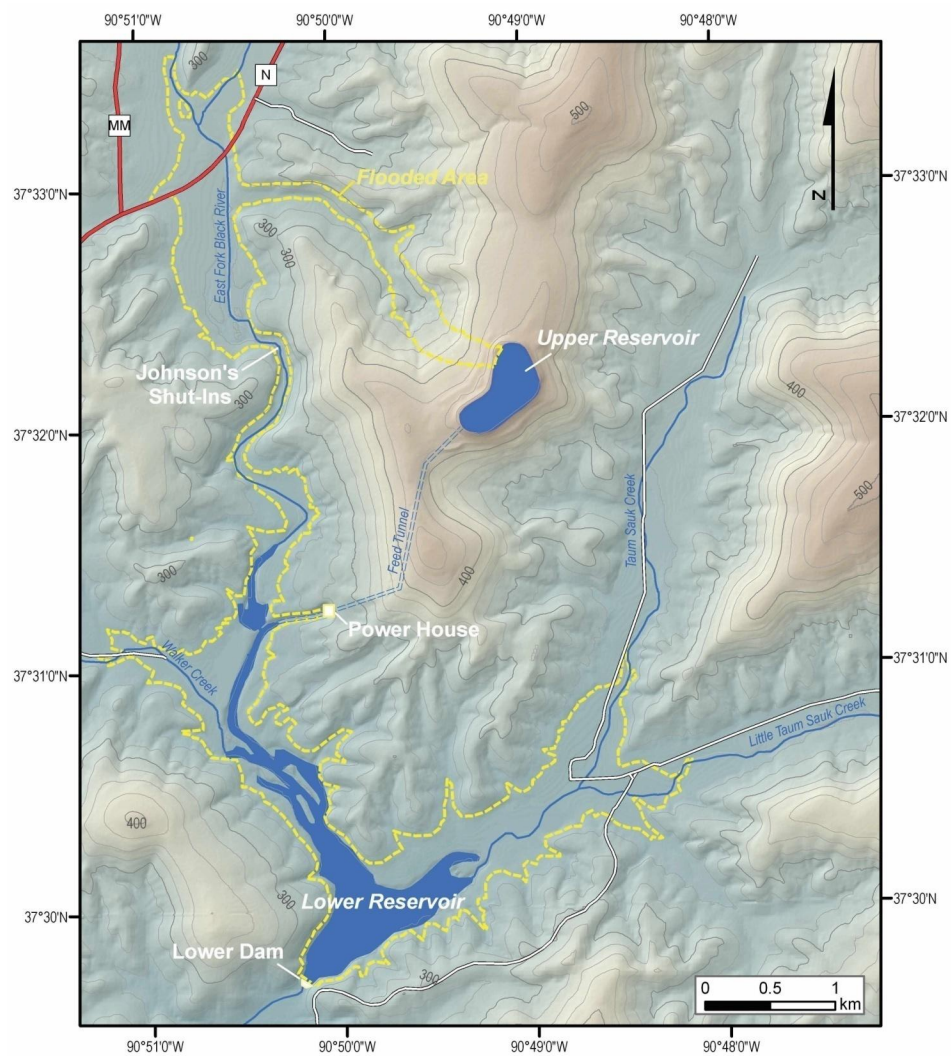


Abbildung 6.10: Überschwemmtes Gebiet (gelb strichliert) [32]

Einige Faktoren, die zum Versagen beigetragen haben:

- Fehlerhafte Wasserspiegellage
- Betrieb des Reservoirs mit geringem Freibord
- Fehler in der Programmierung von Messsystemen
- Technischer Fehler in der „Fail-Safe“ - Steuerung der Pumpen
- Übermäßige Menge an feinkörnigem Material im Damm
- Unzureichend gesäuberter Untergrund vor Erstellung der Fundierung

Dass es bei diesem Versagen zu keinen Toten kam, lässt sich vor allem dadurch

erklären, dass sich der Staudamm in einer nur dünn besiedelten Gegend befindet. Nach diesem Unglück wurde der Damm mit ähnlicher Geometrie, aber in Walzbeton-Bauweise (roller compacted concrete - RCC) wiederaufgebaut und konnte 2010 in Betrieb genommen werden. [33]



Abbildung 6.11: Taum Sauk Damm – neuer Damm [35]

6.2 Teton Damm - Idaho (Dammbruch durch innere Erosion)

6.2.1 Allgemein

Der ca. 95 m hohe Teton Erddamm in Idaho (USA) wurde von 1972 bis 1975 in der Schlucht des Teton Rivers zur Bewässerung, Stromerzeugung und zum Hochwasserschutz gebaut. Er hatte eine Einzugsgebiet von 2200 km². [36] Die Dammkrone besaß eine Länge von knapp 950 m. [37]



Abbildung 6.12: Blick vom linken zum rechten Widerlager während des Baus [38]

Die Füllung des Speichers begann am 3. Oktober 1975. [36]

In den Damm integriert waren: [37]

- eine dreifeldrige Hochwasserentlastung mit Segmentverschlüssen am rechten Widerlager
- der Notauslass mit Schacht am rechten Widerlager
- das Kraftwerk mit Pumpstation am linken Dammfuß
- ein Restwasserabgabe im linken Widerlager zur Gewährleistung einer Mindestabflussmenge des darunterliegenden Teton Rivers

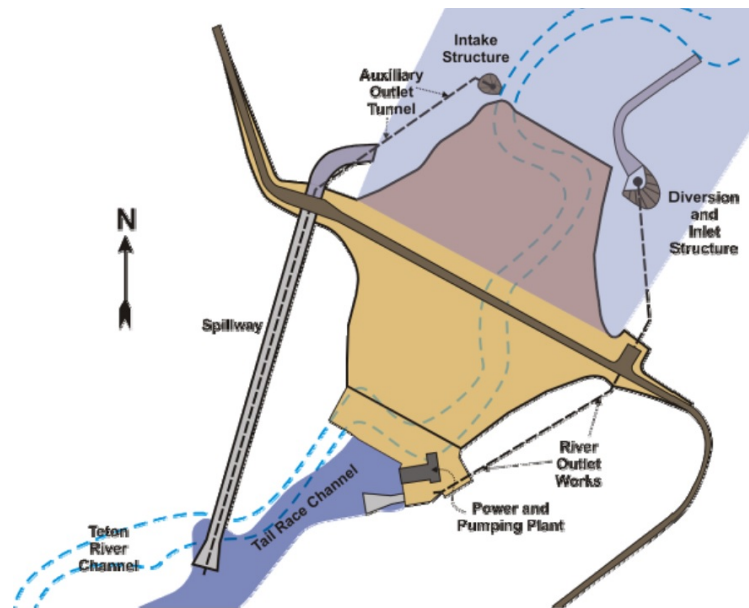


Abbildung 6.13: Teton Damm [37]

Zum Zeitpunkt des Versagens war das Krafthaus und Notauslass noch nicht fertiggestellt [37]

6.2.2 Versagen

Das Versagen des Teton Damms ereignete sich am 5. Juni 1976. Es wurde eine Fläche von mehr als 460 km² überschwemmt. Dabei kam es zu 11 Toten und etwa 770 zerstörten bzw. 3000 beschädigten Häusern. [36]

Der Damm speicherte vor dem Versagen etwa 310 Mio. m³ Wasser. Innerhalb von 6 Stunden verlor er durch das Unglück rund 300 Mio. m³ Wasser und wurde somit fast völlig entleert. [36]

Bereits zwei Tage vor dem Dammbbruch wurden ca. 400 m unterhalb des Dammfußes zwei Stellen mit Sickerwasser mit 150 - 230 l/min bemerkt. [36]

Die folgende Tabelle fasst die zeitlichen Abläufe am Tag des Dammbbruchs, dem 5. Juni 1976 zusammen: [36]

Uhrzeit	Ereignis
07:00	erstmalige Feststellung eines leicht trüben Leckage
10:15	Beginn der Erosion des Dammes an der Leckage
10:40	zwei Bulldozer begannen das Leck mit Material zuzuschütten
10:43	Talsperrenverantwortlicher informiert den Sheriff und weist ihn an, die Bevölkerung zu warnen und eine Evakuierung vorzubereiten
11:00	Entstehung eines Wasserstrudels im Stauraum
11:00 - 11:30	Anweisung zur Evakuierung der gefährdeten Gebiete
11:30	Bulldozer rutschten den Abhang hinab
11:45	Trichter bildet sich
11:55	Dammkrone bricht ein
11:57	Damm bricht
12:30 - 13:30	max. Wasserausfluss von bis zu 65.000 m ³ /sec
18:00	Damm entleert

Tabelle 6.1: Zeitlicher Ablauf am Tag des Dammsbruchs [36]

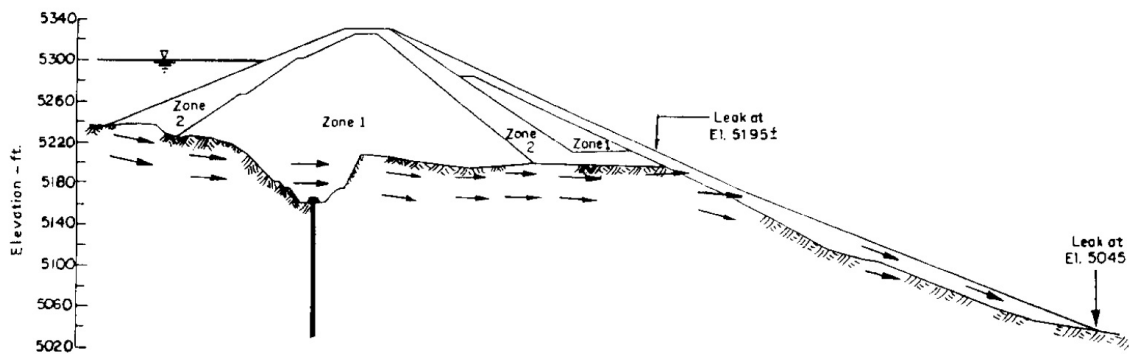


Abbildung 6.14: Vermutlicher Pfad des Sickerwassers zu Beginn der Leckage [39]

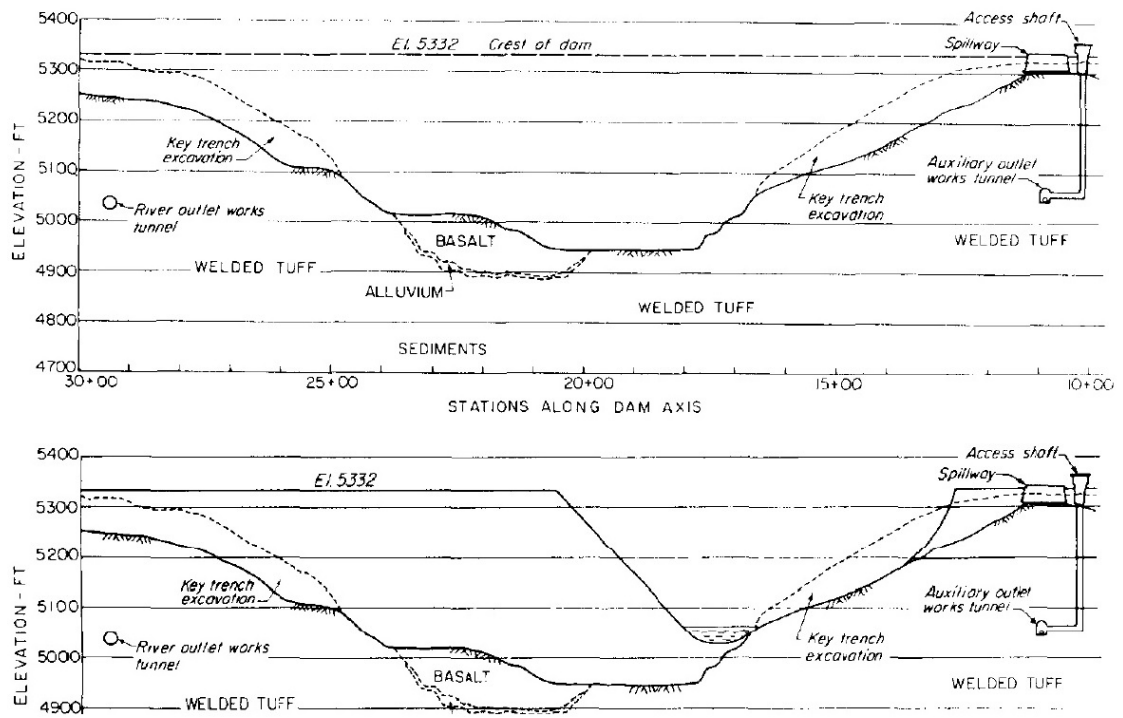


Abbildung 6.15: Längsschnitt des Damms - vor (oben) und nach (unten) dem Bruch
[39]



(a) 11:00 Uhr: Austritt von trübem Wasser verursacht Erosion des Dammes. Bulldozer auf der Dammkrone



(b) 11:20 Uhr: Fortschreiten der Erosion in Richtung Dammkrone



(c) 11:30 Uhr: Fortschreiten der Erosion in Richtung Dammkrone



(d) 11:35 Uhr: Fortschreiten der Erosion in Richtung Dammkrone



(e) 11:50 Uhr: unmittelbar vor Dammbruch



(f) 11:55 Uhr: Bruch des Teton Damms



(g) Luftbild des Dammversagens mit Flutwelle



(h) Luftbild des zerstörten Damms

Abbildung 6.16: Teton Dam - Ablauf des Dammversagens [38]

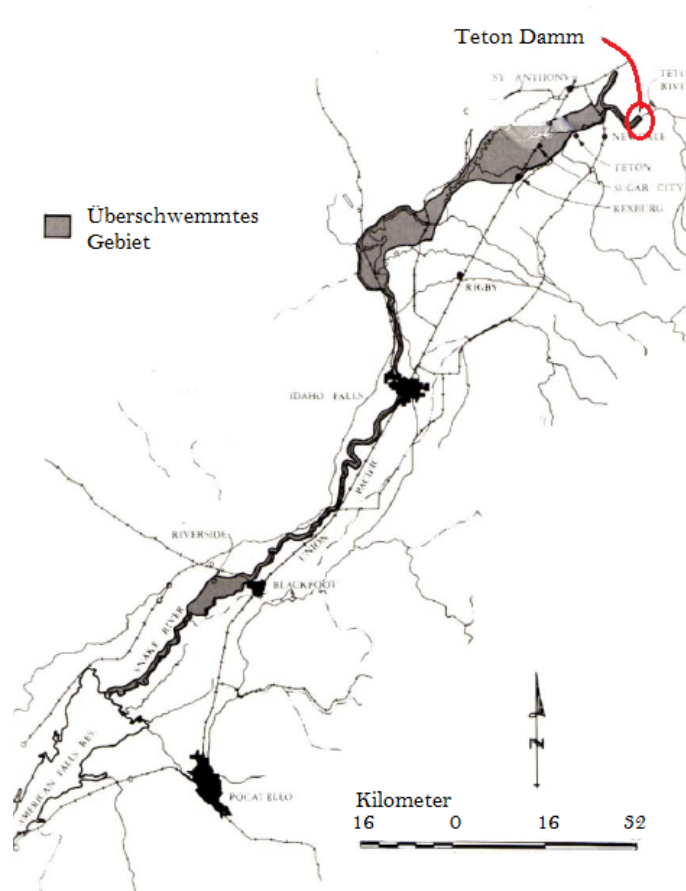


Abbildung 6.17: Überschwemmtes Gebiet (grau) (teilweise modifiziert nach [36])

Die ersten Anzeichen des Wasseraustrittes wurden unterschätzt. Dadurch verzögerte sich eine Alarmierung bzw. Evakuierung der Bevölkerung. [36]

Der Querschnitt bestand im unter anderem im wesentlichen aus einem undurchlässigen Kern (Zone 1) mit Dichtungsschirm, und außenhin aus zunehmend größeren Materialien (Zone 2). [37]

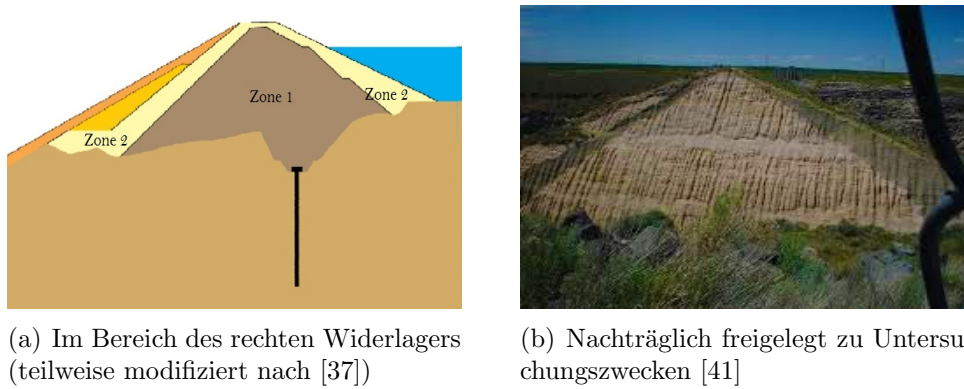


Abbildung 6.18: Dammquerschnitt

Für den Kern (Zone 1 - siehe Abbildung 6.18 a) wurde unter anderem windverfrachteter Löß aus der Umgebung verwendet. Dieses Material erwies sich im Nachhinein als ungünstig betreffend der Erosion. Die Zone 2 aus Sand, Kies und grobem Gestein sollte talseitig als Filter für Zone 1 wirken. Dies wurde aber nicht erreicht, da er zu viele Feinteile enthielt um eine Entwässerung zu ermöglichen. Der Damm wirkte eher wie ein homogener Damm. [37]

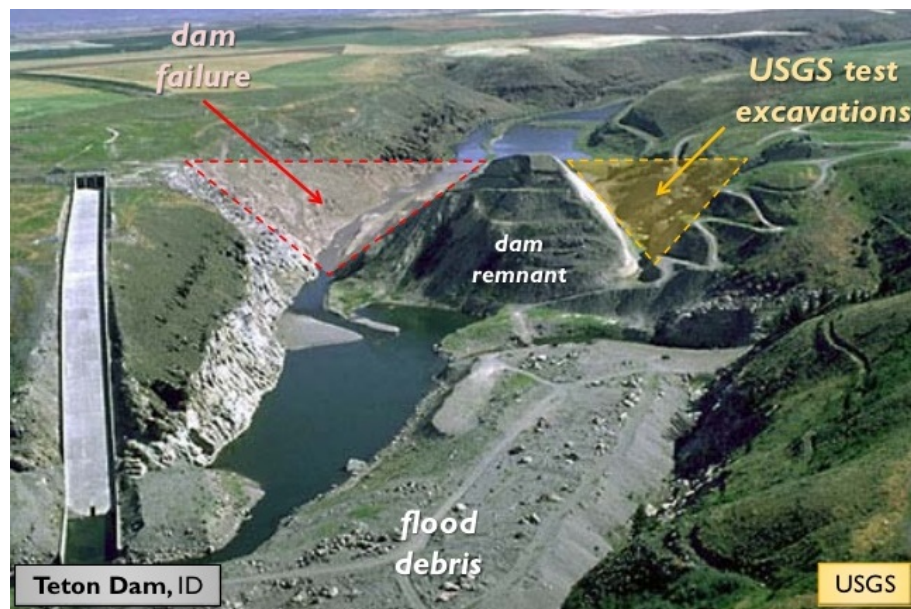


Abbildung 6.19: Nachträgliche Abtragung zu Untersuchungszwecken [41]

Bei Ausgrabungen nach dem Unglück wurde festgestellt, daß die Klüfte im Fels im Bereich der Widerlager wurden oft nur unzureichend geschossen waren. Sie waren

zum teilweise mit Ton und Lehm verfüllt. Teilweise waren sie aber auch offen. Dadurch konnten sie sich mit Wasser füllen. Mit dem Anstieg des Wasserdrucks entwickelte sich auf der Talseite ein hoher hydraulischer Gradient. Dies führte schließlich zu einer Inneren Erosion (Piping - vgl. Kapitel 4.3). [37]



(a) große Kluft [37]



(b) Klüftiges und wasserdurchlässiges Gestein [38]

Abbildung 6.20: rechtes Widerlager (nach dem Versagen)

Im Zuge weiterer Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich im Bereich der Felseinschnitte (Key trench excavation) unterhalb des Dammkerns durch Spannungsumlagerungen eine Gewölbewirkung im Kern einstellte. Dies führte in diesem Bereich dazu, dass die vertikale Spannung kleiner als der anstehende Porenwasserdruck wurde. Dieser Effekt (hydraulic fracturing) führte zu einem aufbrechen eines Initialrisses im Kern und schließlich zum Piping. [39]

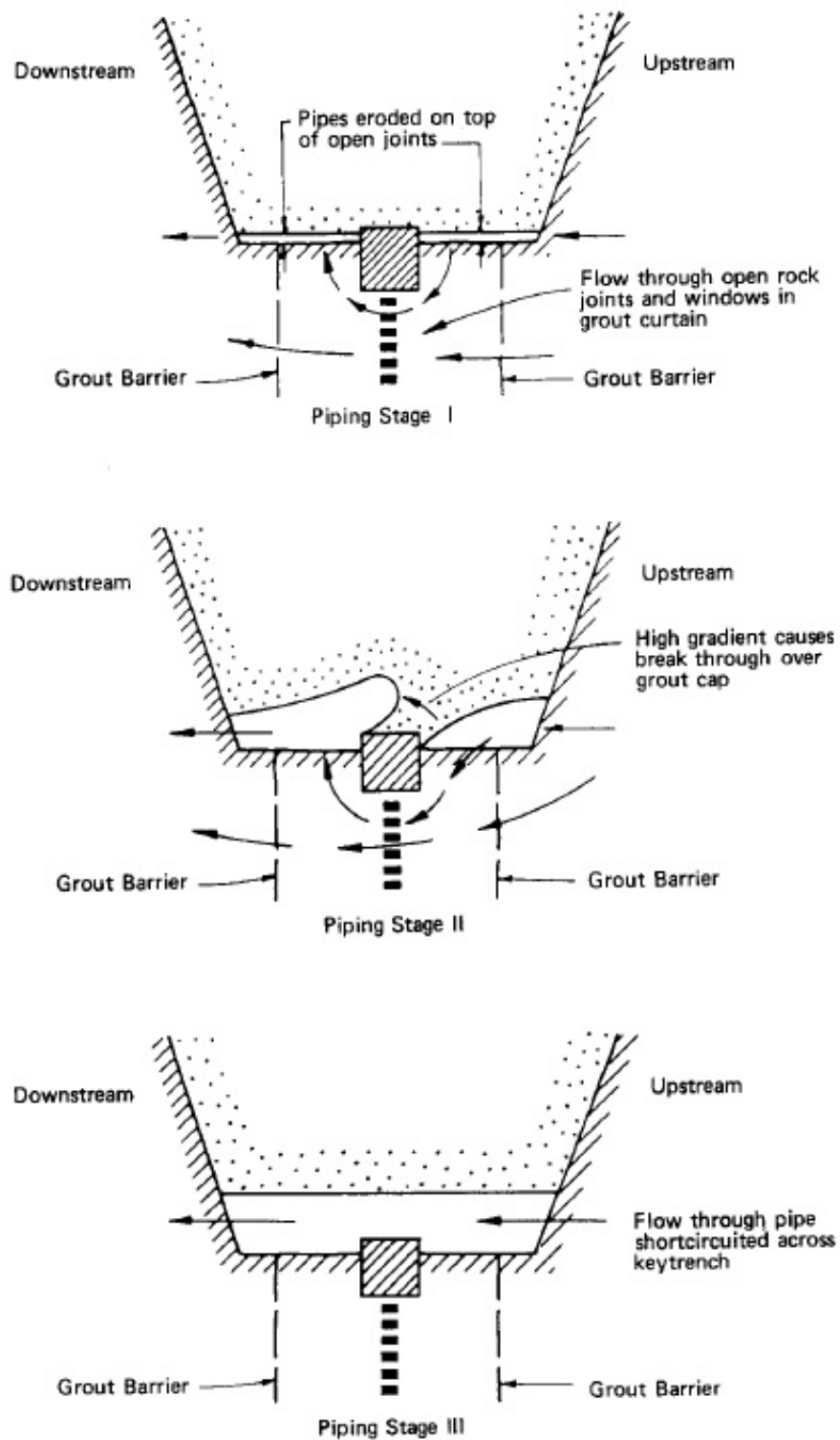


Abbildung 6.21: Sickerung durch nicht verschlossene Fugen [39]

Die Gründe für das Versagen sind nicht nur technische, sondern auch organisatorische. Ingenieure haben die Baustelle zu wenig oft besucht. Auf Probleme vor Ort konnte nur eingeschränkt angemessen reagiert werden. Neben der unzureichenden Kommunikation zwischen den Beteiligten spielte auch der Kostendruck eine wesentliche Rolle. [37]

Dieser Vorfall führte zu einem Wandel in der Risikobeurteilung. Die Lehren, die daraus gezogen wurden waren unter anderem eine verstärkte externe Überprüfung von Entscheidungen. Es wurde etwa ein „Dam Safety Office“ eingeführt (angesiedelt beim „Bureau of Reclamation“, einer Behörde, die im Westen der USA für Angelegenheiten der Wasserwirtschaft zuständig ist [40]). Es sollte mehr als nur eine Barriere gegen die Versickerung getroffen werden. Die Kommunikation mit der betreffenden Bevölkerung sollte ausgebaut werden. [37]

6.3 Bennett Damm - Kanada

6.3.1 Allgemein

Der etwa 2 km lange und ca. 180 m hohe Bennett Damm (frühere Bezeichnung: Portage Mountain Dam) befindet sich in den kanadischen Rocky Mountains. Er staut das Wasser des Peace River Canyons. Der Bau des Erddamms erfolgte in den Jahren 1964 bis 1967. Die Befüllung wurde 1970 erreicht. Der Dammkörper besitzt einem Volumen von 44 Mio. m³ und der Stauraum umfasst 41 km³ Wasser. In einem unterirdischen Krafthaus wird elektrischer Strom mit einer Leistung von ca. 2,3 GW erzeugt. [42]



Abbildung 6.22: Bennett Damm [43]

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung war der Bennett Damm der höchste Erddamm der Welt. Der zonierte Erddamm hat einen Kern aus breitgestuftem schluffigen Sand mit Kies. Talseitig des Kerns befinden sich Filter aus grobem Kies zur Kontrolle des Sickerwassers. Der Damm ist auf einem geschieferten Sandstein gegründet. [44]

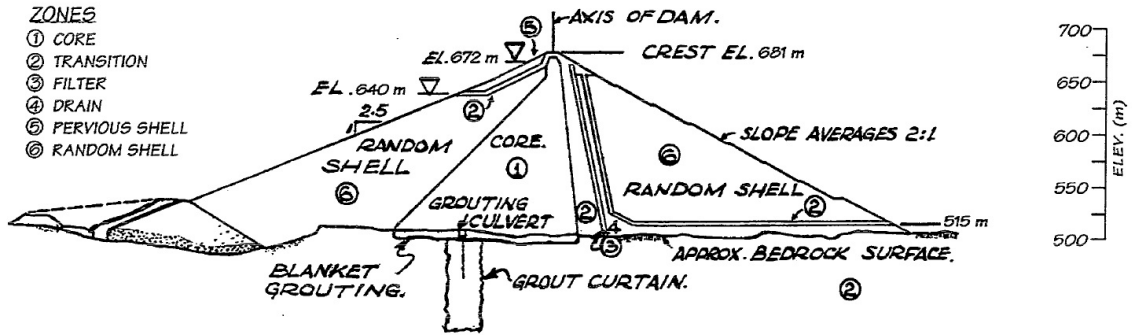


Abbildung 6.23: Bennett Damm: Querschnitt [44]

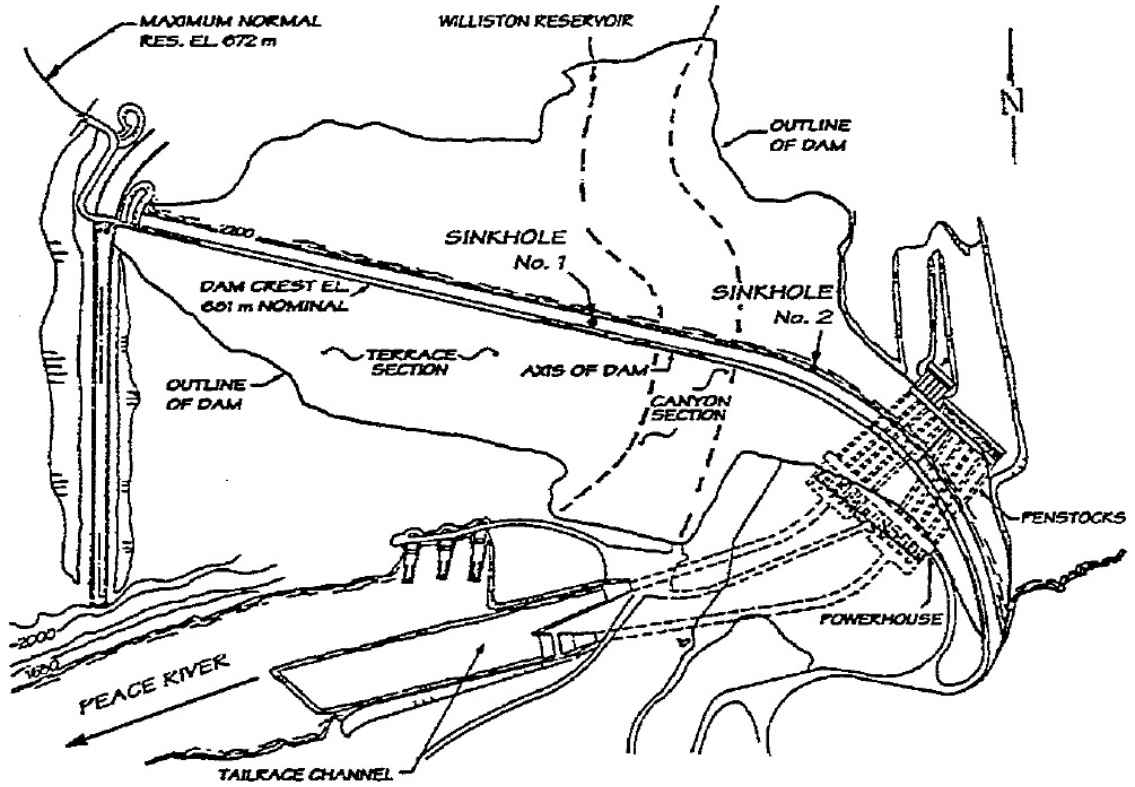


Abbildung 6.24: Bennett Damm: Grundriss [44]

6.3.2 Dolinen-Vorfall

Von einem Passanten wurde am 14. Juni 1996 ein Loch mit einem Durchmesser von etwa 45 cm im Asphalt auf der Dammkrone des Bennett Damms entdeckt. Erste Untersuchungen ca. eine Stunde nach dem Entdecken zeigten einen darunterliegenden Hohlraum von 2 m³ und 2 m Tiefe. [44]

Die Messinstrumente zeigten jedoch keine Auffälligkeiten. Es war auch kein verschmutztes Sickerwasser oder ein erhöhter Sickerwasserabfluss bemerkbar. [46]

Weiters zeigte sich am Boden des Hohlraums das obere Ende von zwei ineinandergesteckten vertikalen Stahlrohren mit Durchmessern von 6,5 cm und 15 cm. Wie sich später herausstellen sollte, dienten solche Stahlrohre im Zuge der Bauarbeiten als Höhenmarkierung, und verliefen von der Felsgründung bis zur Dammkrone. Diese Rohre waren jedoch in keinen Plänen eingezeichnet und keinem der zuständigen Ingenieure bekannt. Später wurde dann noch eine zweite derartige Doline mit einem solchen Stahlrohre entdeckt. [44]

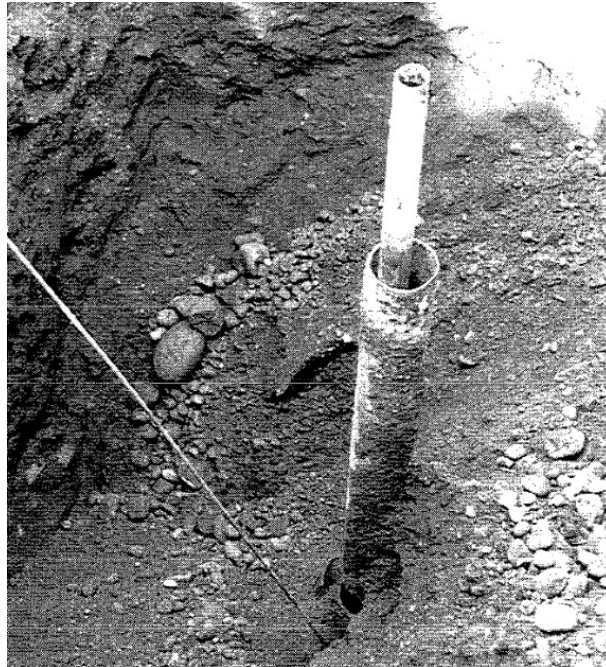


Abbildung 6.25: Bennett Damm: entdeckte Stahlrohre im entstandenen Hohlraum [44]

Die erste Vermutung legte nahe, dass das Entstehen des Hohlraums mit diesem Rohr in Verbindung stand. Das Volumen des Hohlraums entsprach dem Volumen des Rohres (bis hinunter zur Gründung). Daher wurde angenommen, dass im Laufe der Zeit Erdmaterial im Rohr hinunterrieselte. [44]

Um den Zustand des Dammkerns festzustellen wurde 3 Tage später eine Probebohrung an dieser Stelle durchgeführt. Bei der Bohrung gab es kaum nennenswerten Widerstand. Bei der Bohrtiefe von 32 m kam es an dieser Stelle zu einem plötzlichen Einbruch und es entstand ein Doline von 7 m Tiefe und 2,5 m Durchmesser. [44]



Abbildung 6.26: Bennett Damm: Sinkhole [46]

Dieser Vorfall ereignete sich zur Zeit des Frühjahrs-Hochwassers und der Speicher war voll gefüllt. Um weitere intrusive Erkundigungen zum Zustand des Dammes auszuführen wurde zur Sicherheit der Pegel abgesenkt. Dazu wurden am 22. Juni die Tore der Hochwasserentlastung geöffnet. Bei einem Abfluss von bis zu $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ konnte der Pegel innerhalb zwei Monate um zwei Meter abgesenkt werden. Während dieser Zeit wurden verschiedene geophysikalische Messungen an der Dammoberfläche durchgeführt. [44]

Ziele der Dammuntersuchungen waren: [44]

- Ermittlung des Ausmaßes dieser Störungszonen im Dammkern unterhalb der Doline
- Feststellen, inwiefern diese lose Zonen die Dammsicherheit beeinflussen
- Informationen für eine Sanierung zu erhalten
- die Nachforschungen noch vor dem Winter abzuschließen

Bei den Erkundigungen sollte das Sicherheitsrisiko durch Bohrungen mittels bewährter Methoden gering gehalten werden und verstärkt geophysikalische Methoden an der Oberfläche angewendet werden. [44]

Die Erkundigung erfolgte mittels verschiedener Methoden. Unter anderem durch Drucksondierung. Es sollten möglichst viele Informationen gewonnen werden bei gleichzeitig geringer Störung des Dammkörpers. Neben den Bohrungen in der gestörten Zone sollten auch Bohrungen in der ungestörten Zonen durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu vergleichen. [44]

In Abbildung 6.27 ist die Anordnung der verschiedenen Erkundungsverfahren um die Doline Nr. 1 (bei den vertikalen Stahlrohren) dargestellt.

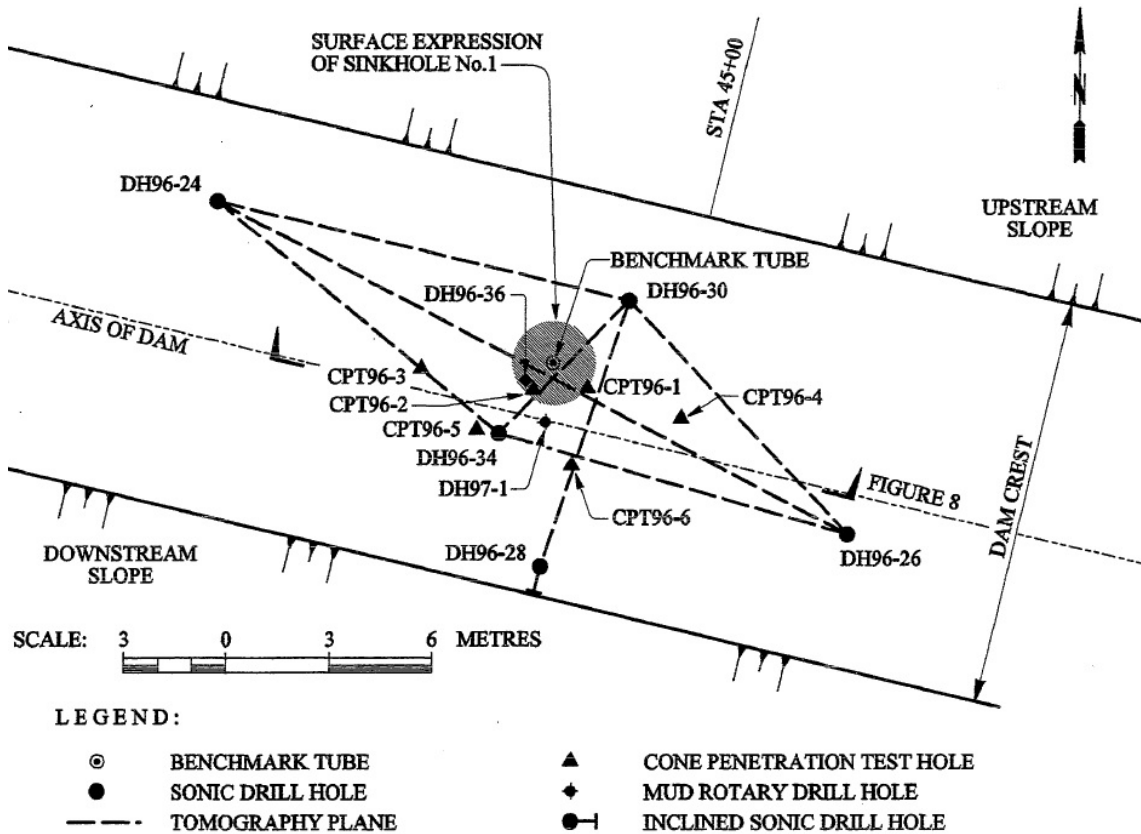


Abbildung 6.27: Bennett Dam: Anordnung der verschiedenen Aufschlussmethoden bei der Doline (Sinkhole) Nr. 1 [44]

Abbildung 6.28 zeigt das Ergebnis der Seismischen Tomographie. Gut erkennbar ist der vertikale Verlauf der Störungszone im Bereich der Stahlrohre in Bildmitte.

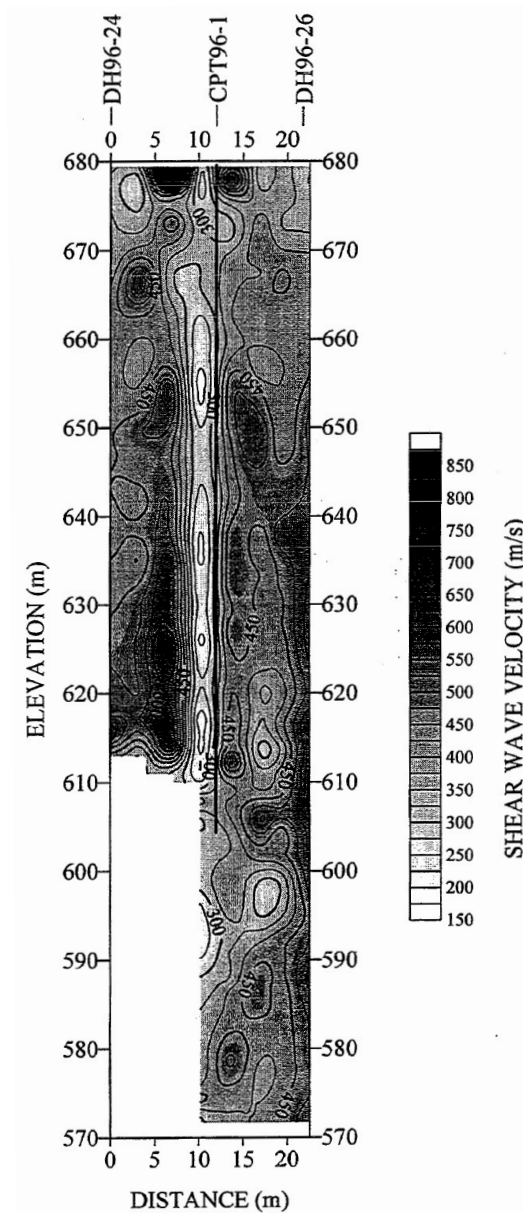


Abbildung 6.28: Bennett Damm: Ergebnis der Seismischen Tomographie bei der Doline (Sinkhole) Nr. 1 [44]

Das Entstehen der Dolinen wird sowohl durch eine geringere Verdichtung in diesem Bereich als auch durch Innere Erosion bzw. Suffosion erklärt. [42]

Beide Dolinen wurden mittels Verdichtungsinjektionen saniert. [42]

Die Sanierung wurde 1997 abgeschlossen. [44]

7 Talsperrenüberwachung

7.1 Überwachung

Zu einer üblichen Überwachung großer Talsperren zählen: [10]

- **Messungen:** liefern quantitative und präzise Daten, jedoch auf einzelne Messpunkte beschränkt
- **visuelle Kontrollen:** Qualitativer Zustand der Stauanlage und visuelle Beurteilung von Veränderungen. So kann beispielsweise bei einer im Zuge eines Rundgangs entdeckten Trübung des Sickerwassers auf ein Auswaschen von Feinteilen aus dem Dammkörpers geschlossen werden. In weiterer Folge können dann gezielte Untersuchungen durchgeführt werden, wie in diesem Fall etwa eine Messung mittels Trübungsmesssonden.
- **Funktionskontrollen:** Überprüfung von Ausrüstungen über deren jederzeitigen Funktionsfähigkeit sowie deren Prozesse mit den damit beteiligten Personen.

7.2 Sicherheitskonzept

Das Versagen einer Talsperre und die daraus resultierende Flutwelle kann flussabwärts zu verheerenden Auswirkungen führen. Sicherheit muss daher oberste Priorität haben. [2]

Das Sicherheitskonzept stützt sich auf 3 Säulen: [2] [10]

1. **konstruktive Sicherheit:** einwandfreie Projektierung und Ausführung der Talsperre sowie ihrer Nebenanlagen; speziell das Zusammenwirken mit dem umgebenden Untergrund.
2. **Überwachung:** Kontrollmessungen (insbesondere Sperren- und Felsdeformationen, hydrostatischer Auftrieb auf das Mauerfundament, Sickerwasserverluste, Temperatur im Bauwerk) während der gesamten Bau- und Betriebsdauer der Talsperre um schädliche Einflüsse, Veränderungen und anormales Verhalten frühzeitig erkennen zu können und um Gegenmaßnahmen einzuleiten; dies gilt auch für die Nebenanlagen bzw. deren beweglichen Organe.
3. **Notfallkonzept:** Wenn ein Versagen der Sperre befürchtet werden muss: Entleerung des Sees durch den Grundablass um den Wasserdruck auf die Sperre zu reduzieren und um das Seevolumen zu verringern; Alarmierung und unter Umständen Evakuierung der Bevölkerung.

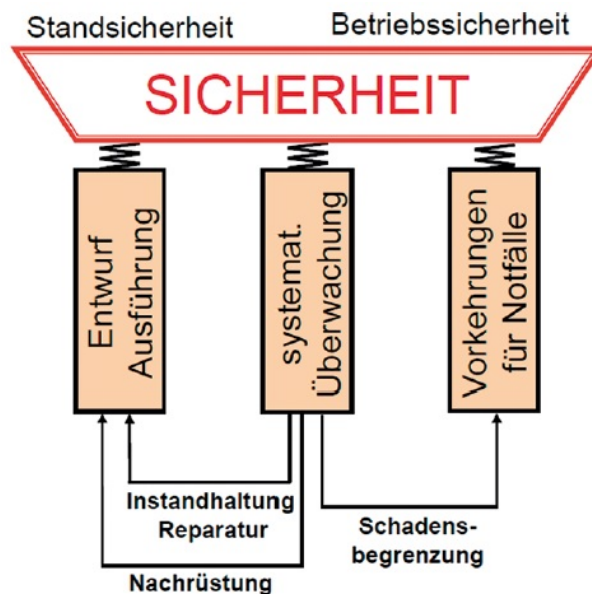


Abbildung 7.1: 3-Säulen-Modell [45]

7.3 Sicherheitsanforderungen

Dabei muss zwischen den Begriffen „Hochwassersicherheit“ und „Hochwasserschutz“ unterschieden werden:

7.3.1 Hochwassersicherheit

Darunter wird die Sicherheit der Stauanlage bei einem Hochwasserereignis verstanden. [10]

Zur Ermittlung der Hochwassersicherheit von Talsperren sind zwei Belastungsfälle nachzuweisen: [22]

- **Bemessungshochwasser BHQ:** Die Hochwasserentlastungsanlage sowie das Freibord ist auf das BHQ zu bemessen. Dieses ist mit einem Wiederkehrintervall von 5000 Jahren festgelegt (HQ_{5000}). Bei diesem Lastfall darf es zu keinen Schäden der Anlage führen. Außerdem muss dabei die volle Stand- und Betriebssicherheit gegeben sein.

- **Sicherheitshochwasser SHQ:** Darunter versteht man das überschreiten des BHQ und es kommt zu einem „vermutlich größten Hochwasser“ (Probable Maximum Flood (PMF)). Begrenzte Schäden der Talsperre und den zugehörigen Anlagen können dabei in Kauf genommen werden. Jedoch muss die Standsicherheit der Sperre sowie die Funktionalität der Betriebseinrichtungen immer noch gegeben sein.

Dazu werden folgende Höhenkoten unterschieden: [22]

- **Stauziel:** maximal zulässige Wasserspiegelhöhe im Regelbetrieb

- **Überstau:** zeitlich begrenzte maximal zulässige Wasserspiegelhöhe für die Abfuhr des BHQ bzw. SHQ

- **Sicherheitsfreibord:** Deckt zusätzliche Gefahrenmomente ab, die in Verbindung mit einem extremen Hochwasserereignis auftreten können (zB. Wellen).
- **Sicherheitskote:** Wasserspiegelhöhe die durch Hochwasserüberstau samt Wellenauflauf und Sicherheitsfreibordreserve nicht überschritten werden darf. Ein Überschreiten dieser Kote würde die Sicherheit der Anlage gefährden.

Verfahren zur Berechnung der jeweiligen Koten sind in [22] erläutert.

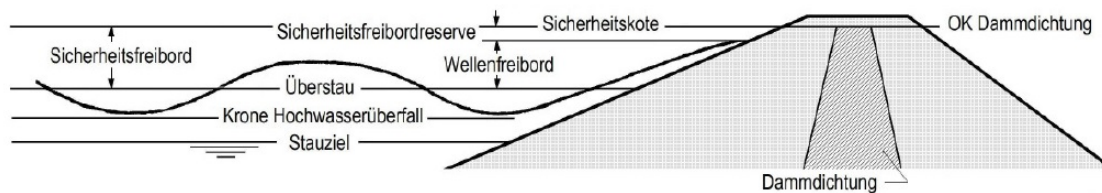


Abbildung 7.2: Für den Nachweis der Hochwassersicherheit maßgebende Koten eines Staudamms mit Kerndichtung [22]

7.3.2 Hochwasserschutz

Dabei handelt es sich um den Schutz der Bevölkerung vor derartigen Ereignissen. Hier wird üblicherweise mit Wiederkehrperioden von 100 bis 300 Jahren gerechnet, während diese zur Bemessung der Hochwassersicherheit von Stauanlagen wesentlich höher angesetzt werden. Diese Differenzen erklären sich durch ein höheres Schadenspotential infolge eines Bruchs der Stauanlage als bei einem Hochwasser. [10]

7.4 Talsperrenüberwachung in Österreich

Einen Überblick über die Talsperren in Österreich erhält man online unter <https://atcold.at/talsperren/> auf der Seite von ATCOLD. [47]

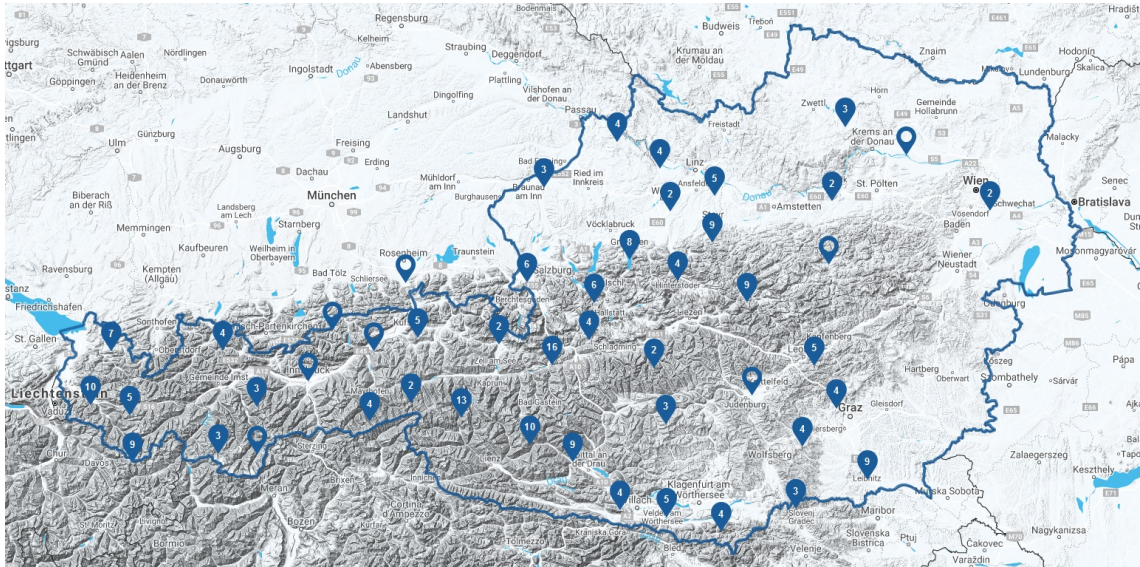


Abbildung 7.3: online - Überblick über die Talsperren in Österreich [47]

Als rechtliche Grundlage zur Überwachung von Stauanlagen dienen in Österreich folgende Regelwerke: [48]

- Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959)
- Staubeckenkommissionsverordnung 1985

7.4.1 Wasserrechtsgesetz

Maßgebliche Paragraphen des Wasserrechtsgesetzes sind: [48] [49]

- §23a Anforderungen an den Talsperrenverantwortlichen und seine Aufgaben
- §100 (3) Bildung der Staubeckenkommission
- §104 (3) Einholung von Gutachten der Staubeckenkommission
- §131 (1) periodische Überprüfung durch die Staubeckenkommission
- §134 (7) Überprüfung bei kleineren Stauanlagen

Um die Sicherheit von Talsperren zu gewährleisten, sind in Österreich die jeweiligen Betreiber dieser Anlagen für deren Überwachung und Instandhaltung verpflichtet. [48]

7.4.2 Staubeckenkommission

Die Tätigkeit und Zusammensetzung der Staubeckenkommission ist durch die Staubeckenkommissionsverordnung 1985 geregelt. Die Staubeckenkommission, angesiedelt im Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, hat die Aufgabe einer fachlichen Begutachtung von Talsperren bzw. Staubecken und soll die entsprechenden Wasserrechtsbehörden unterstützen. Dies umfasst die Begutachtung von Entwürfen neuer Anlagen, als auch der im Bau befindlichen sowie bestehenden Anlagen. Daneben soll sie den Zustand der österreichischen Staubeckenanlagen, ihr Verhalten und auch die Berichte der Talsperrenverantwortlichen während ihrer gesamten Bestandsdauer evident halten. Weitere Aufgaben sind unter anderem auch fachliche Untersuchungen, Herausgabe von Publikationen und Mitarbeit bei internationalen Institutionen. [50]

Die Staubeckenkommission setzt sich zusammen aus Experten und Vertretern verschiedener Ministerien und Vertretern von Universitäten einschlägiger Fachrichtungen. [50]

Die Staubeckenkommission hat drei Ebenen zur Überwachung von großen Talsperren (höher als 15 m über der Gründungssohle und 500.000 m³ Speichervolumen) festgelegt: [51] [49]

- Talsperrenüberwachung des Bundes
- Gewässeraufsicht (Landes- od. Bezirksebene)
- Talsperrenverantwortliche d. Wasserberechtigten (Talsperreneigentümerin)

Spätestens alle 5 Jahre erfolgt eine Überprüfung der Sperre durch den Unterausschuss der Staubeckenkommission (WRG 1959 § 131).

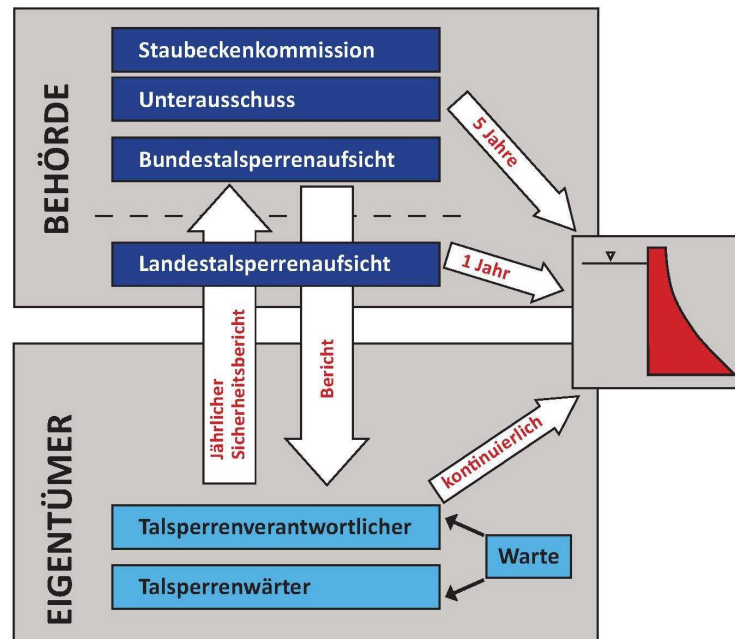


Abbildung 7.4: Verantwortlichkeit und Aufgaben der Eigentümer sowie Schnittstellen zu den Behörden [52]

7.4.3 Talsperrenverantwortliche

Der bzw. die Talsperrenverantwortliche (TSV) sowie die Vertretung, gehören dem technischen Führungsstab der wasserberechtigten Unternehmen an und haben alle Befugnisse um sicherheitsrelevante Maßnahmen zu setzen. Zu ihren Aufgaben gehören laut dem Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959) § 23 a: [49]

- Überwachung der Sicherheitsvorschriften
- Mängel abzustellen
- besondere Vorkommnisse der Behörde zu melden
- jährlicher Bericht an die Gewässeraufsicht bzw. an d. Bundesminister/-in
- leichte Erreichbarkeit

Der TSV muss daher fachlich qualifiziert, mit der Anlage bestens vertraut und mit entsprechenden Anordnungsvollmachten ausgestattet sein. [53] Ein genaues Anforderungs- und Qualifikationsprofil ist in [54] angeführt.

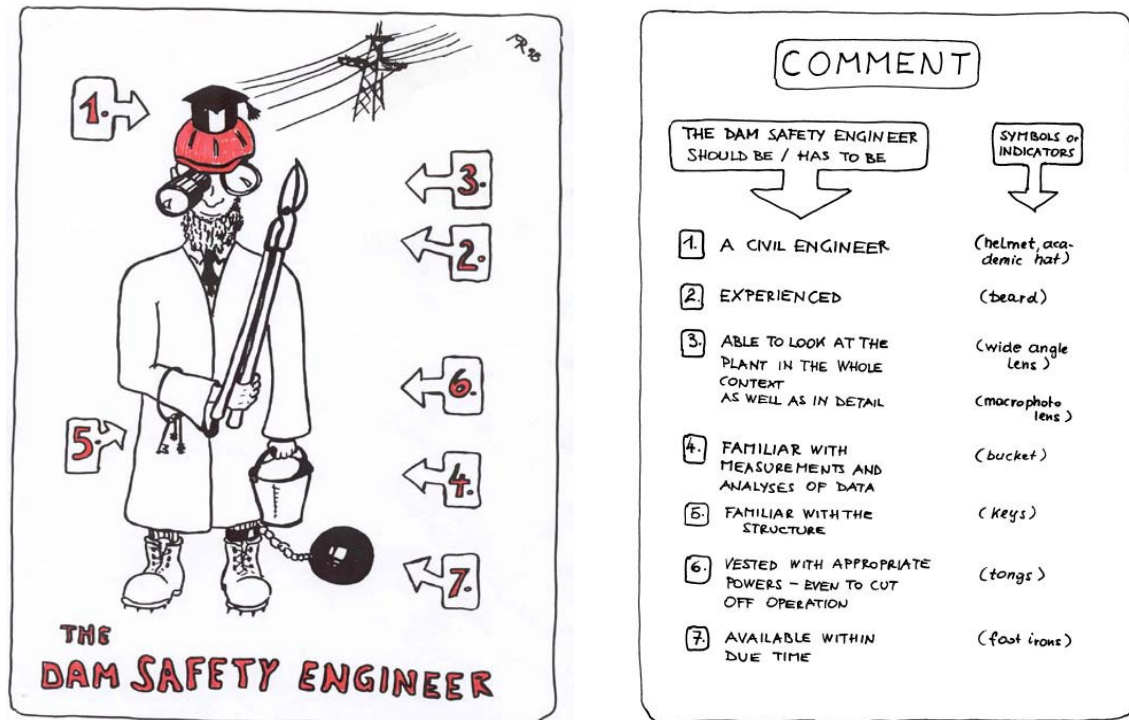


Abbildung 7.5: Karikatur zu den Anforderungen eines Talsperrenverantwortlichen [55]

Die Ausbildung zum Talsperrenverantwortlichen in Österreich stützt sich auf 3 Säulen: [55]

- **1. Studium:** Einer entsprechenden Fachrichtung.
- **2. Training on the Job:** Durch Ausbildung innerhalb des Unternehmens. Etwa über neue Methoden und Technologien zur Erfassung, Übertragung und Verarbeitung von Messdaten oder Änderungen von Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft. Talsperrenverantwortliche und deren Stellvertreter in einem Unternehmen sollten auf dem gleichen Stand an Informationen über die Sperre sein.
 Von der gemeinnützigen Interessensvertretung AT-COLD (österreichisches Nationalkomitee für Talsperren) werden Tagungen zu aktuellen Fragen der Talsperrensicherheit organisiert.
 Bei einem Personalwechsel der TSV sollten die Nach-

folger zumindest 3 Jahre mit der Überwachung, Instandhaltung und Betrieb der Anlage vertraut sein.

- **3. Life long Learning:** Durch Weiterbildung in speziellen Fachkursen. Dazu werden von ATCOLD mehrtägige Kurse angeboten, in denen besonders folgende Themen behandelt werden: gesetzliche Grundlagen, die Rolle der Staubeckenkommission, Talsperrentechnik, Betriebseinrichtungen, Sicherheitsphilosophie, Beobachtungseinrichtungen, geologische Untersuchungen, Instandhaltungsmaßnahmen, Anpassung an den Stand der Technik, Alarmpläne sowie organisatorische Aspekte.

Gerade Versagensfälle, wie sie beispielhaft in Kapitel 6 angeführt sind, machen deutlich, wie verantwortungsvoll und wichtig die Aufgaben der Talsperrenverantwortlichen sind.

7.4.4 Talsperrenwärter

Die Talsperrenverantwortlichen werden von Talsperrenwärtern unterstützt. Sie müssen mit den betrieblichen Einrichtungen vertraut sein. Ein langfristiges Arbeitsverhältnis begünstigt die erforderliche Kontinuität. Anzeichen über Veränderungen der Anlage können dadurch leichter frühzeitig erkannt werden. [56]

Ihre Aufgabe besteht darin, vor Ort visuelle Überprüfungen, Messungen und Erprobungen durchzuführen (vgl. Kapitel 8). Sie sollten Veränderungen und abnormale Entwicklungen erkennen und den Talsperrenverantwortlichen melden. Bei einer Gefahrenmeldung ist eine Nachschau vor Ort erforderlich. [56]

Außergewöhnliche Situationen müssen immer wieder trainiert werden. [56]

Die Inhalte von Ausbildungskurse für Talsperrenwärter werden in Kapitel 7.4.6, Tabelle 7.2 beschrieben.

Bereits schon ab Baubeginn werden im „Talsperrenbuch“ Informationen bzw. Messdaten über die Sperre und dessen Verhalten laufend eingetragen. [53]

7.4.5 Kleinere Stauanlagen

Auch für kleinere Stauanlagen (unter 15 m Höhe und ein geringeres Speichervolumen als 500.000 m³) und für Flusskraftwerke kann die Wasserrechtsbehörde im Interesse der allgemeinen Sicherheit einen Talsperrenverantwortlichen sowie eine Talsperrenüberwachung vorschreiben. [49]

Bei diesen Anlagen mit einem sogenannten „Gefährdungspotential“ spricht man jedoch etwa von „Stauanlagenverantwortlichen“ (STV) und dem Führen eines „Stauanlagenbuchs“. [57]

Die Sicherheitsaufgaben der STV sind in [58] festgelegt, und entsprechen im wesentlichen jenen der TSV von großen Sperren. Eine Abweichung von den Regelungen großer Sperren gibt es im Bereich der erforderlichen Qualifikationen der STV und der Zuordnung eines Gefährdungspotentials der Stauanlage zu Gefahrenklassen. [58] Das heißt große Talsperren sind immer der höchsten Gefahrenklasse zugeordnet.

Maßgebend zur Einschätzung des Gefährdungspotentials sind insbesondere: [58]

- Stauhöhe und -inhalt, im Zusammenhang mit den topographischen und geologischen Verhältnissen
- Geländeneigung im Abflussbereich
- Nähe zu Wohnobjekten, Arbeitsstätten, Verkehrswegen, Versorgungs- und Sicherheitseinrichtungen

Mittels einer Flutwellenausbreitung im Falle eines angenommenen Bauwerksversagens können die Speicheranlagen den Gefährdungsklassen „gering“ oder „erheblich“ zugeordnet werden. [58]

SCHUTZGÜTER		Schwellenwerte der Einwirkung					
		v.h ≤ 0,5m ² /s h ≤ 0,5m Flucht zu Fuß möglich	v.h > 0,5m ² /s h > 0,5m Flucht zu Fuß Lebensgefahr	v.h ≤ 2,0m ² /s h ≤ 1,0m Schäden an Gebäuden	v.h > 2,0m ² /s h > 1,0m Gefährdung der Standsicherheit	≤ SHQ Schadensgefahr	> SHQ Gefährdung der Standsicherheit
Betroffene Personen							
1	Personen ohne Vorwarnung und/oder ohne Fluchtmöglichkeit (bewohnte Kellerräume, öffentliche Campingplätze, Kinderspielplätze, Veranstaltungsplätze,...)	gering	erheblich				
2	Personen im Inneren von Gebäuden bei Vorwarnung und mit Fluchtmöglichkeit in obere Stockwerke			gering	erheblich		
Betroffene Gebäude							
3	öffentliche Gebäude von besonderer Bedeutung (Notfalleinrichtungen, Kultur, Verwaltung, ...)	gering	erheblich				
4	sonstige Gebäude von besonderem Wert (Wohnhäuser, Betriebseinrichtungen, ...)			gering	erheblich		
Betroffene Sonstige Einrichtungen							
5	wichtige öffentliche Einrichtungen (Infrastruktur, Notfalleinrichtungen, ...)	gering	erheblich				
6	wichtige öffentliche Verkehrswege ohne Ausweichmöglichkeit	gering	erheblich				
7	Eisenbahnen und Einrichtungen zur Personenbeförderung (wenn auf SHQ bemessen)					gering	erheblich
8	Brücken und Brückenfundamente wichtiger Verkehrswege und Eisenbahnen (wenn auf SHQ bemessen)					gering	erheblich
9	Anlagen mit gefährlichen Gütern (z.B. Öltanks) - im Einzelfall abzuklären			gering	erheblich		
10	Bauten auf Uferböschungen			gering	erheblich		
11	Wasserbauten (wenn auf SHQ bemessen)					gering	erheblich
12	Brücken und Brückenfundamente untergeordneter Verkehrswege						gering
13	Geparkte Autos ohne Vorwarnung	gering	erheblich				

Abbildung 7.6: Zuordnung zu den Gefährdungsklassen „gering“ oder „erheblich“ [58]

Aus dieser Zuordnung ergibt sich das erforderliche Profil der Stauanlagenverantwortlichen: [56]

Talsperrenverantwortliche (Stauanlagenverantwortliche)	
TV (STV) - Kleine Stauanlagen, h<15m oder l<500.000m³	
mit erheblichem Gefährdungspotential	mit geringem Gefährd.pot.
sh. Leitfaden „Mindestanford. an STV v. Kl. Stauanlagen“	
Qualifikation: Uni.abschluss Baufach + einschlägige Erfahrung oder HTL+ umfassende theoret. u. prakt. Erfahrung + Absolvierung der einschlägigen Spezialkurse	Qualifikation: mit Planung, Bau u. Betrieb einschlägig befassete Person
STV-Stellvertreter: „geeignete Stellvertreter“ → z.B. Person in leitender Funktion mit Bau u. Überwachung d. Stauanlage vertraut (einschlägige Erfahrung)	wenn möglich Stellvertreter nominieren
bisher: 9 Kurse veranstaltet, zukünftig: für Stellvertreter ohne Uni.abschluss oder HTL → zusätzlicher Grundkurs	Kurse empfohlen
Anordnungsbefugnis des internen und externen TV bzw. STV für den Fall v. aussergewöhnlichen Beobachtungen an der Stauanlage muss festgelegt sein (z.B. in Betriebsordnung / Vorstandsanweisung,...)	
Bei höheren Staulagen: Rufreichbarkeit	Mobiltelefon
STV: Jährliche umfassende vor-Ort Kontrollen	
Jährl. Sicherheitsbericht abfassen, auf Verlangen d. TAO u. zust. Behörde vorlegen, 5 jährl. Überwachungsbericht an zust. Behör.	Jährl. Sicherh.berichte abfassen, auf Verlangen d. zust. Beh.+TAO vorlegen

Abbildung 7.7: Erforderliches Profil von Stauanlagenverantwortlichen [56]

Die erwähnte Flutwellenausbreitung kann etwa nach den in [58] beschriebenen Verfahren von Fröhlich, Broich oder mittels eindimensionaler numerischer Berechnung (z.B. HEC-RAS) ermittelt werden. [58]

Ausführliche Anweisungen zur Führung des Stauanlagenbuchs, zur Durchführung von Überprüfungen, Messungen und Erprobungen sowie zum Erstellen des Jahresberichtes und des Überwachungsberichtes (5-jährlich) werden im „Handbuch - Betrieb und Überwachung von „kleinen Stauanlagen“ mit länger dauernden Staabelastungen“ [57] gegeben.

7.4.6 Vereinigungen und Verbände (ATCOLD, ÖWAV)

In Österreich diesbezüglich wichtige Vereinigungen sind ATCOLD (Österr. Nationalkomitee für Talsperren - Austrian National Committee On Large Dams) sowie der ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband). Diese geben aktuelle Richtlinien und Empfehlungen heraus, organisieren Tagungen und bieten auch in Zusammenarbeit mit Universitäten sowohl nationale als auch internationale Kurse (ICOLD, European Club) an.

Neben den bereits erwähnten Weiterbildungskursen für Talsperrenverantwortliche bietet ATCOLD auch Kurse für andere Personengruppen an, etwa für Talsperrenwärter oder Betriebspersonal, das auch in die Überwachung und in den Betrieb der Anlagen involviert ist. [55]

Zielpersonen	Dauer des Kurses [Tage]
Talsperrenverantwortliche	3,5 Tage
Sperrenwärter	Grundkurs 2,5 Tage + Praxisteil 2,5 Tage
Betriebspersonal für große Talsperren	1,5 Tage
Betriebspersonal für kleine Talsperren	1,5 Tage

Tabelle 7.1: verschiedene ATCOLD Ausbildungskurse und deren Dauer [55]

Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über Ausbildungsinhalte solcher Sperrenwärter - Kurse:

Grundkurs (Theorie) [59]	Praxisteil [60]
Stauanlagen	Visuelle Inspektion eines Dammes und einer Gewölbesperre
Staumauern - System und Standsicherheit	Werkseinführung
Geologie und Geotechnik der Fundierung	Besichtigung der Warte
Dammbau	Bautechnische Beschreibungen
Hydraulische Modellversuche	Aufzeichnungen aus der Baugeschichte
Grundzüge der Talsperrenüberwachung	Instrumentierung
Organisation der Überwachung	Messeinrichtungen
Baumesstechnik - Grundlagen	Messwerte selbständig ablesen
Durchführung von Messungen	Messwertdokumentierung
Elektrisches Messen mechanischer Größen	Auswerteformeln
Betriebseinrichtung	Auswertung manueller Messungen
Beobachtung	Fernübertragene Messwerte
Erprobungen	Sicherheitsbeurteilung
Kommunikation	Fallbeispiele
Arbeitssicherheit	

Tabelle 7.2: Ausbildungsinhalte von Sperrenwärter - Kursen

7.4.7 Die „12 Thesen“ zur Sicherheit der großen Talsperren Österreichs

Wichtige Grundsätze zur Sicherheit von großen Talsperren in Österreich wurden von Melbinger (ehem. Geschäftsführer der Staubeckenkommission) in „12 Thesen“ aufgestellt: [61]

„1. Die Sicherheit muss hoch sein“: Die Sperre muss Belastungen standhalten, die mit einer nur sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten (BHQ: 5000-jährliches Hochwasser, SHQ: größtes anzunehmendes Erdbeben).

„2. Ohne Überwachung keine Sicherheit“: Außergewöhnliches Verhalten soll rasch erkannt werden, um dementsprechend zu reagieren.

ren (z.B. Reduktion der Stauhöhe, Reparaturen, Warnungen).

- „3. Messen allein genügt nicht“: Durch aufmerksame Beobachtung können Anomalien entdeckt werden, bevor sich diese in den Messdaten niederschlagen (z.B. neuer Riss, feuchte Stelle); Messen, Beobachten, Überprüfen.
- „4. Keine Talsperre ohne Wärter“: Ein enger Personenkreis soll mit dem individuellen Bauwerk langfristig besonders vertraut sein.
- „5. Ohne Talsperrenverantwortliche geht nichts“: Alle Sicherheitsvorkehrungen im Unternehmen sollen beim TSV gebündelt sein. Neben schematisierten Entscheidungsabläufen muss vor allem Platz für Flexibilität bei außergewöhnlichen Ereignissen gegeben sein.
- „6. Kommunikation muss sein“: Überwachungsergebnisse müssen unverzüglich an TSV weitergeleitet werden. Redundante und zuverlässige Kommunikationswege sind gerade bei außergewöhnlichen Ereignissen von Bedeutung.
- „7. Dokumentation ist lästig, aber notwendig“: Leicht und rasch verfügbare Informationen, Stichwort Talsperrenbuch.
- „8. Automatisierung ist nicht alles“: Eine automatische Erfassung bezieht sich hauptsächlich nur auf Messdaten und kann den Menschen nur unterstützen, aber nicht ersetzen.
- „9. Privat plus Staat“: Behördliche Überprüfung (der jährlichen Sicherheitsberichte des Betreibers sowie einer 5-jährliche Überprüfung vor Ort); Pflicht des Betreibers zur Überwachung und Instandhaltung der Anlage.
- „10. Zentral plus Föderal“: Aufsichtsorgane des Bundes gewährleisten eine österreichweit einheitliche Vorgehensweise; Organe des Landes sind rascher verfügbar.

„**11. Individuen verdienen Experten**“: Fachleute (in Geologie, Statik, Bodenmechanik, Hydraulik) die mit den Eigenheiten der Anlage vertraut sind - sowohl auf Betreiber- als auch auf Behördenseite.

„**12. Kein Spezialist fällt vom Himmel**“: Schulung und Einarbeitung.

7.5 Talsperrenüberwachung in der Schweiz [10]

Als gesetzliche Grundlage zur Gewährleistung der Sicherheit von Stauanlagen dient das Stauanlagengesetz sowie die Stauanlagenverordnung.

Die Minimierung des Risikos eines unkontrollierten Wasseraustritt ist das erklärte Ziel aller Sicherheitsanforderungen. Ein nicht ausschließbares Restrisiko soll auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Dies ist jedoch nicht allein eine Frage der Technik, sondern auch eine politische Entscheidung.

Die Aufsichtsbehörde des Bundes beaufsichtigt in etwa 200 große Stauanlagen. Weiters werden durch kantonale Aufsichtsbehörden zusätzlich ca. 250 kleinere Stauanlagen beaufsichtigt.

Fundamentale Elemente der Anlagensicherheit sind:

- **konstruktive Sicherheit:** Voraussehbare Lastfälle mit definierter Sicherheitsreserve für statische und dynamische Einwirkungen sowie für Hochwasser.
- **Überwachung:** Sowohl während des Baus als auch während des Betriebs erfolgen Messungen, visuelle Beobachtungen und Funktionskontrollen von beweglichen Organen.
- **Notfallplanung:** Die Gefahrenlage wird durch fünf Gefahrenstufen dargestellt. Diese reichen vom normalen und gefahrlosen Betrieb (Stufe 1) bis hin zur Evakuierung der Bevölkerung aufgrund eines bevorstehenden Bruchs

der Anlage (Stufe 5). Die Alarmierung in Stufe 5 erfolgt durch Wasseralarmsirenen.

Die Überwachung fußt auf dem Unabhängigkeits- bzw. Mehrstufenprinzip mittels Personen von vier verschiedenen „Niveaus“:

- **Niveau 1:** Führen vor Ort Messungen, visuelle Kontrollen und Funktionsprüfungen durch und leiten Rohdaten an Niveau 2 weiter.
- **Niveau 2:** Wertet diese Daten laufend aus und beurteilt sie. Führt jährlich eine eigene Inspektion durch und erstellt einen jährlichen Sicherheitsbericht.
- **Niveau 3:** 2 unabhängige Experten (ein Ingenieur für die Sperre und ein Geologe für den Stauraum) führen eine eigene Sicherheitsüberprüfung alle fünf Jahre aus.
- **Niveau 4:** Zuständige Aufsichtsbehörde von Bund oder Kanton.

7.6 Talsperrenüberwachung in Bayern

Neben dem deutschen Wasserhaushaltsgesetz (WHG), dem Bayerischen Wassergesetz (BayWG) gibt es eine Reihe weiterer Regelwerke. Etwa die DIN 19700 (Stauanlagen), insbesondere deren Teile 10 (Gemeinsame Festlegungen) und 11 (Talsperren), das DVWK-Merkblatt 231 (Sicherheitsbericht Talsperren - Leitfaden, 1995) oder diverse DWA-Merkblätter und Themenbänder. [62]

Unter anderem werden darin die Zuständigkeiten für Betrieb, Eigen- sowie Fremdüberwachung (Gewässeraufsicht) von Talsperren geregelt. [62]

Neben eines jährlichen Sicherheitsberichtes sind auch sogenannte „Vertiefte Überprüfungen (VÜ)“ erforderlich. [63]

In diesen VÜ werden in angemessenen zeitlichen Abständen von etwa 10 Jahren oder nach außergewöhnlichen Ereignissen relevante Sicherheitsnachweise geführt. Dabei

sind statische, hydrologische und hydraulische Bemessungsgrundlagen, betriebliche Vorgaben sowie das Überwachungskonzept zu überprüfen und mittels Bericht zu dokumentieren. [63]

Dazu ist der vorhandene Unterlagenbestand zu sichten und auszuwerten. Dazu wird eine Digitalisierung des Talsperrenbuchs empfohlen. Es ist zu überprüfen, ob die Anlage den aktuell gültigen Anforderungen und Regeln der Technik entspricht. Hier sind etwa aktualisierte Regelwerke, Neuentwicklungen in der Messtechnik oder auch geänderte Ansprüche der Gesellschaft an Betrieb und Sicherheit zu berücksichtigen. [63]

Der Bericht setzt sich zum einen aus einem Prüfbericht mit den Ergebnissen und zum anderen aus den Berechnungen der jeweiligen Fachdisziplinen zusammen. Overhoff gibt dazu ein Beispiel zur Gliederung an (siehe Anhang A.2). Dieses soll aber nicht den Handlungsspielraum des Anlagenbetreibers einschränken, sondern soll ihn vielmehr bei der Erstellung unterstützen. [63]

Dadurch sollen langfristige Veränderungen des Anlageverhaltens erkannt werden. [62]

Im Zuge dieser Untersuchungen kann ein Handlungsbedarf festgestellt werden. Dieser kann von einzelnen baulichen Maßnahmen bis hin zu einer Sanierung der Gesamtanlage führen. Dazu sollte auch ein Ausführungszeitraum definiert werden. [63]

Derzeit ist geplant, das DVWK-Merkblatt 231 zu überarbeiten und in ein neues DWA-Merkblatt 516 (Leitfaden für Stauanlagen zur Durchführung der Vertieften Überprüfung und die Erstellung des Sicherheitsberichts) zu überführen. Geplant darin sind neben Aktualisierungen und Anpassungen an neue Erkenntnisse, auch eine Abstufung des Überprüfungsumfangs je nach Größe und Gefahrenpotential. Die Durchführung der Überprüfung soll dabei konkretisiert werden. Außerdem soll darin auch die Unabhängigkeit und Weisungsfreiheit der Prüfer hervorgehoben werden. [64]

7.7 Festlegung der Grenzwerte [65]

Grenzwerte dienen dem Erkennen von Abweichungen vom bisherigen Normalverhalten einer Talsperre. Dazu bedient man sich verschiedenster Meß- und Überwachungseinrichtungen (siehe Kapitel 8). Die Ablesung kann manuell oder automatisch mit Fernübertragung der Daten in eine Warte erfolgen.

Grenzwerte können festgelegt werden anhand von:

- Gesetzen, Vorschriften und Normen
- Erfahrungswerten
- strukturmechanischen Berechnungen (z.B: Sohlwasserdruck, Höhe der Sickerlinie in Dämmen)
- statistischen Auswertungen

Für manche Messmethoden (z.B. Volumetrische Messung der Sickerwassermenge (vgl. Kapitel 8)) können separate Grenzwerte gegeben sein, wie z.B. für:

- einzelne Messungen
- Summenwerte

Kommt es zu einer Verletzung dieser Grenzwerte, müssen sie entsprechend analysiert bzw. neu bewertet werden. Dies kann in Folge zu Sanierungsmaßnahmen führen.

Die entsprechenden Grenzwerte werden anhand des bisherigen Verhaltens sowie Prognosemodellrechnungen festgelegt.

Unter Mitwirkung des Talsperrenverantwortlichen werden die Grenzwerte im Wasserrechtsverfahren mit der sachverständigen Bewilligungsbehörde bzw. im Zuge der regelmäßigen Überprüfungen durch den Unterausschuss der Staubeckenkommission abgestimmt.

Die Grenzwerte sollten aber so festgelegt sein, dass sie nicht bereits bei jährlichen Ereignissen erreicht werden. Zu häufige Alarme bieten die Gefahr einer Abstumpfung des Personals und tatsächlich relevante Ereignisse könnten dadurch übersehen werden.

Andererseits kann bei einer Grenzwertverletzung die Informationskette trainiert werden, um im Ernstfall richtig zu reagieren. Dazu werden periodisch Probeauslösungen des Alarms durchgeführt, indem das Erreichen des tatsächlich eingestellten Grenzwertes simuliert wird.

Es sollte bei Grenzwertproben folgendes beachtet werden:

- Messung mit realistischem Medium und Kinematik (Z.B: Überprüfung der Schwimmsonden durch anheben des Wasseraufstaus und nicht durch händisches anheben)
- scharfes anfahren von Grenzwerten zur Überprüfung der exakten Lage
- Simulierung am Geber selbst, um die Fernübertragung in die Warte zu testen

Grenzwerte in der Talsperrenüberwachung dürfen nicht als Alarm kurz vor einem Versagen der Sperre gesehen werden. Vielmehr stellen sie eine Wachsamkeitsgrenze dar, um ungewöhnliche Veränderungen rechtzeitig zu erkennen und dementsprechend zu reagieren.

Auf ein überschreiten der Grenzwerte kann wie folgt reagiert werden:

- intensivere Überwachung
- Abstau
- Sanierungsmaßnahmen (z.B: Drainagen, Abdichtungen)
- Nachweise

Es wird unterschieden in: [66]

- fixe Grenzwerte
- dynamische Grenzwerte

Dynamische Grenzwerte werden ständig anhand der Messungen angepasst und neu berechnet. Dazu können verschiedene Prognosemodelle zum Einsatz kommen: [66]

- regressive Modelle
- autoregressive Modelle (selbstlernend)

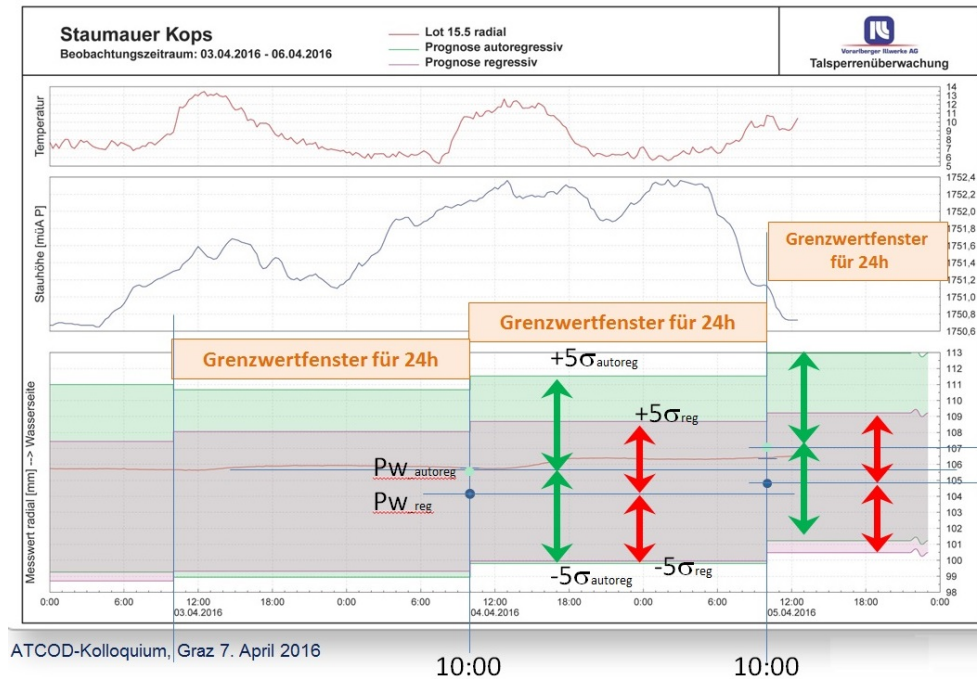


Abbildung 7.8: Tägliche Festlegung der Grenzwerte um 10:00 Uhr [66]

In der Abbildung 7.8 sind zwei Prognosen erkennbar: eine regressive (dunkelblauer Punkt) und eine autoregressiv (türkiser Punkt). Die beiden Grenzwerte haben dabei eine Abweichung von $\pm 5\sigma$ ($\sigma \dots$ Standardabweichung). Täglich um 10:00 Uhr werden sie für die nächsten 24 Stunden neu festgesetzt. [66]

7.8 Frühwarnsysteme [67]

Frühwarnsysteme erfassen und übertragen automatisch die aktuellen Überwachungsdaten wie etwa Pegelstand oder Durchflussmenge. Im Regelbetrieb ist dazu kein eingreifen des Personals erforderlich. Dies ist gerade bei schwer zugänglichen oder abgelegenen Orten, Schnee, Nacht und dergleichen vorteilhaft. Im Gegensatz zu den herkömmlichen manuellen Ablesungen von Einzelpunkten liefern sie einen kontinuierlichen Datensatz. Diese Daten können dann online abgegriffen werden. Derartige Messungen werden nicht nur im Regelbetrieb sondern auch während der Bauphase oder im Zuge der ersten Füllung des Stauraums durchgeführt.

Durch langfristige Aufzeichnungen können damit zeit- oder lastabhängige Trends erkannt werden. Dazu zählt zum Beispiel die Sickerwassermenge in Abhängigkeit von Pegelstand oder Jahreszeit. Solche langsamen Veränderungen können auf potentielle Problemstellen hinweisen.

Werden kritische Schwellenwerte überschritten, erfolgt eine automatische Auslösung eines Alarmes. Dadurch erhält man eine längere Vorwarnzeit um geeignete Maßnahmen zu treffen. Wie Beispiele aus der Vergangenheit zeigen (vgl. Kapitel 6) kann eine rechtzeitige Warnung und richtige Reaktion bei einem Dammversagen lebensrettend sein.

Es gilt jedoch zu bedenken dass derartige Frühwarnsysteme regelmäßige Routinekontrollen nur ergänzen aber niemals ersetzen können. Am wichtigsten bleibt immer noch eine visuelle Überprüfung da bei diesen Systemen nur punktuelle Messwerte quantitativ ausgewertet werden und sie daher keinen Gesamtüberblick über die Anlage bieten.

7.9 Alarm

7.9.1 Information der Bevölkerung [68]

Die Art und Weise, wie die Bevölkerung über Gefahren, Auswirkungen und Verhaltensregeln bei schweren Unfällen informiert werden kann, ist in der sogenannten Störfallinformationsverordnung (StIV 1994) geregelt. Dies betrifft laut §2 Abs. 6 unter anderem auch Sperrenbauwerke höher als 15 Meter oder die mehr als 2 Mio. m^3 Wasser speichern.

Die StIV verpflichtet die Betreiber diese Informationen auf deren Internetseite der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Zusätzlich kann dies auch durch öffentliche Aushänge, Flugblätter, Informationsveranstaltungen oder einen Tag der offenen Tür udlg. erfolgen.

Ein Beispiel eines solchen Störfallinformationsblattes ist in Anhang A.3 angeführt.

7.9.2 Alarmierung der Bevölkerung

Außerordentliche Ereignisse erfordern eine rasche Reaktion, bis hin zur Alarmierung der Bevölkerung. [53]

Im Notfall erfolgt die Alarmierung der Bevölkerung durch die permanent besetzte Bundes- bzw. Landeswarnzentrale (BWZ bzw. LWZ) mittels Sirenen, Rundfunk oder online durch die App „KATWARN“. [69]



Abbildung 7.9: Alarmsignale der Bundeswarnzentrale [69]

Die LWZ steht mit den regionalen Zentralen der Hilfs- und Rettungsorganisationen in Verbindung und ist für die Koordination der Einsatzkräfte zuständig. [69]

8 Sickerwassermessung

In dieser Arbeit wird besonders auf die Messung des Sickerwassers, im Hinblick auf Versagensmechanismen bei Schüttdämmen eingegangen. Dazu werden verschiedene Methoden vorgestellt:

- Direkte Messung der Sickerwassermenge (Volumen)
- Messung der Temperatur, zur Ortung von Leckagen
- Messung des Magnetometrischen Widerstandes, zur Ortung von Sickerwasser

Weitere Messmethoden zur Bestimmung von Wasserspiegelhöhe, Neigung, Verformungen, Spannung usw. werden in der Publikation des Schweizerischen Talsperrenkomitees von 2005 [70] oder in der Masterarbeit von Lammerer [30] ausführlich beschrieben.

8.1 Sickerwassermenge

8.1.1 Volumetrische Messung [70]

Bei dieser einfachen und zuverlässigen Messmethode wird ein geeichter Messbehälter mit dem Sickerwasser befüllt und die Füllzeit mit einer Stoppuhr gemessen.

Grundsätzlich gibt es dazu zwei Möglichkeiten:

- definiertes Volumen: Füllzeit wird gemessen oder
- definierte Zeit: Volumen wird gemessen

Somit kann die Sickerwassermenge Q in l/sec bestimmt werden.

Diese Methode bietet sich für einzelne Messungen im Zuge regelmäßiger Begehungen an. Sie ist jedoch für eine Automatisierung oder Fernübertragung ungeeignet.

Um eine repräsentative Messung durchzuführen, sollte die Fülldauer mind. 20 Sekunden betragen. Die Größe des Messbehälters sollte auf den erwartbaren Wasserzufluss abgestimmt sein, um eine zu schnelle Vollfüllung des Behälters zu verhindern. Die Messeinrichtung ist so anzupassen, dass es zu keinen Wasserverlusten kommt.



(a) geringes Q



(b) höheres Q

Abbildung 8.1: Volumetrische Messung bei verschiedenen Sickerwassermengen [70]

Sicker- und Drainagewässer sollten möglichst getrennt voneinander abgeführt und gemessen werden. Niederschlagswasser sollte dabei unbedingt ferngehalten werden.

Zur Kontrolle der Messergebnisse können die Summen der einzelnen sektoriellen Messungen mit dem Gesamtsickerwasser der Sperre verglichen werden.

8.1.2 Messwehr

Diese Methode eignet sich besonders für automatische elektronische Aufzeichnungen, sowie auch für geringe Wassermengen. [30]

Das gesammelte Sickerwasser wird in ein Becken mit einem Messwehr geleitet. Der Abfluss kann durch ein geeichtes dreieckiges Thomson Profil erfolgen. Um die Sickerwassermenge zu ermitteln, wird der Pegel des aufgestauten Wassers gemessen. Dies kann entweder direkt manuell vor Ort oder automatisch erfolgen.



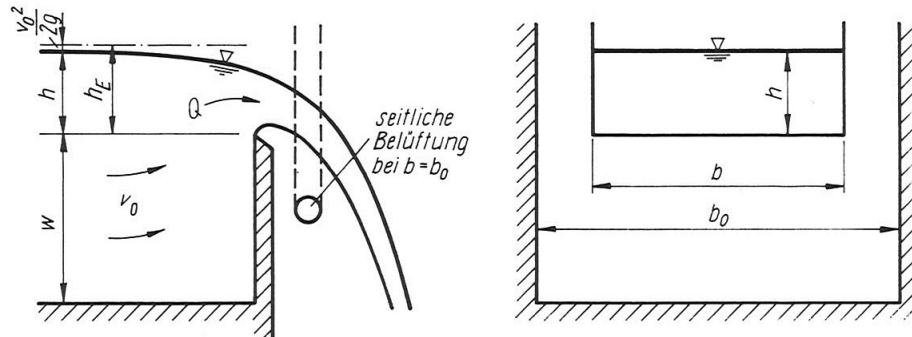
Abbildung 8.2: Durchflussmessung: Thomsonwehr [71]

Mit einer Überfallsformel kann somit der Durchfluss Q berechnet werden: [72]

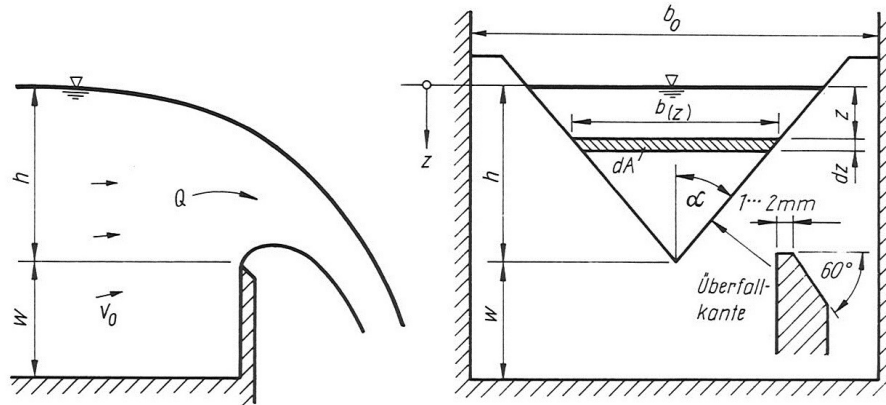
$$\text{rechteckiges Profil (Poleni-Formel):} \quad Q = \frac{2}{3}\mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (8.1)$$

$$\text{dreieckiges Profil (Thomsonwehr):} \quad Q = \frac{8}{15}\mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan(\alpha) \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (8.2)$$

- Q ... Durchfluss
- μ ... Überfallbeiwert
- α ... halber Öffnungswinkel des dreieckigen Profils



(a) Rechteckiges Profil



(b) Dreieckiges Profil

Abbildung 8.3: Querschnitte von verschiedenen Messwehren [72]

Zur Ermittlung des Pegels stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: Lattenpegel, Stechpegel, Ultraschall-Messpegel, Schwimmpegel, Druckmesssonde oder pneumatischem Pegel. [30]



Abbildung 8.4: Pegelmessung: Ultraschall (links) und Lattenpegel (rechts) [73]

Wasser mit Ablagerungen oder Verunreinigungen sowie ein unterwasserseitiger Aufstau können zu verfälschten Ergebnissen führen. [30]

Abbildung 8.5 zeigt eine pneumatische Pegelmessung. Unterhalb der Stelle des niedrigsten Wasserstands wird Stickstoff oder Sauerstoff ausgeperlt. Dabei entspricht der benötigte Gasdruck jenem hydrostatischen Druck, der sich durch die Stauhöhe ergibt. Somit kann die Wasserspiegelhöhe berechnet werden.

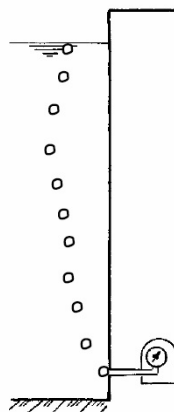


Abbildung 8.5: pneumatische Pegelmessung [70]

8.1.3 Durchflussmessung in Druckrohren [30]

Desweiteren bietet sich die Möglichkeit einer Durchflussmessung in Druckrohren an. Bei diesen Messverfahren muss jedoch darauf geachtet werden, dass auch bei sehr geringem Durchfluss die Rohre ständig mit Wasser vollgefüllt sind.

Diese Messverfahren werden eher im Labor bzw. in Versuchsaufbauten angewandt, sie werden hier aber trotzdem kurz vorgestellt.

– **Druckdifferenzverfahren:** Venturi-Kanal, Pitot-Rohr usw.

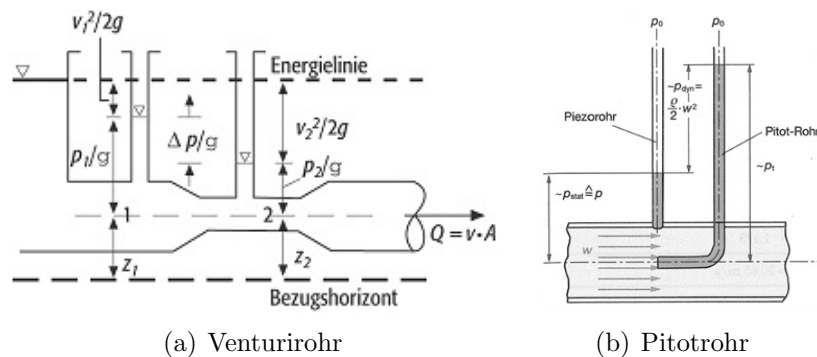


Abbildung 8.6: Messung von Druckdifferenzen [74]

– **Elektromagnetische Verfahren:** Bei der Magnetisch Induktiven Durchflussmessung (MID) wird ein Magnetfeld aufgebracht. Die dabei entstehende Spannung ist proportional zur Fließgeschwindigkeit.

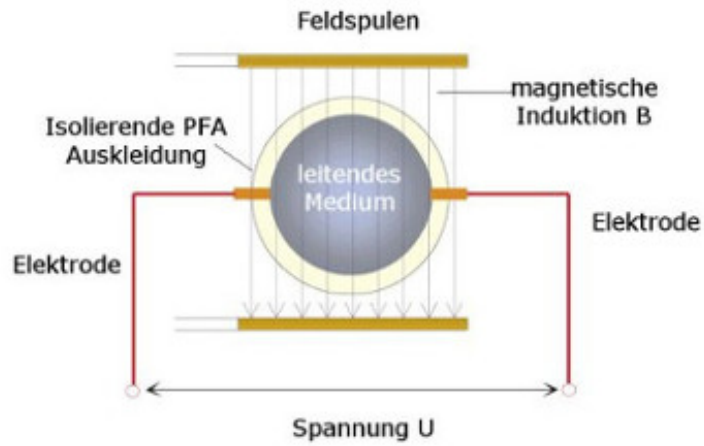


Abbildung 8.7: MID-Durchflussmessung [75]

- **Ultraschallverfahren:** Dabei wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers mittels der veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen entsprechend dem Doppler-Effekt ermittelt.

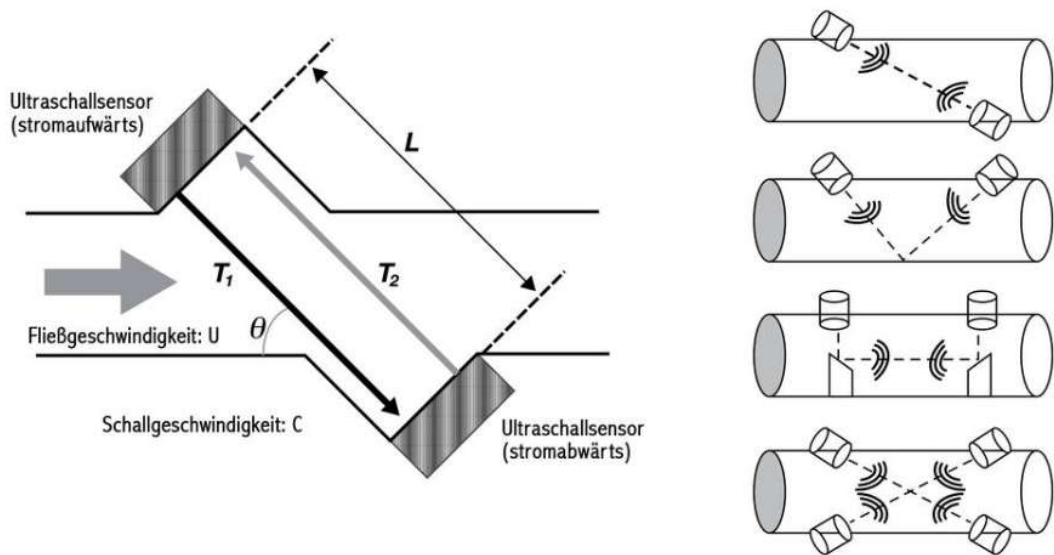


Abbildung 8.8: Ultraschall-Durchflussmessung [76]

Die Durchflussmenge Q kann somit aus der Fließgeschwindigkeit v und der Querschnittsfläche A mittels der Kontinuitätsgleichung berechnet werden:

$$Q = A \cdot v \quad (8.3)$$

8.2 Temperaturmessungen zur Ortung von Leckagen

Die Ortung und Lokalisierung von Leckagen im Dichtungsschirm von Staudämmen kann durch Temperaturmessungen erfolgen. Vorhandene Strömungen innerhalb eines Erdbauwerks führen zu Temperaturanomalien an der betreffenden Stelle. [14]

Dazu wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden zur Temperaturmessung entwickelt. Eine Weiterentwicklung dieser Systeme ermöglicht mittlerweile auch eine Bestimmung der Filtergeschwindigkeit oder des Sättigungsgrades des umgebenden Bodens. Dadurch ist es möglich, sowohl restfeuchte Bereiche von gesättigten Bereichen zu unterscheiden, als auch die Menge des durchsickernden Wassers zu quantifizieren. Weiters wurden neben Versuchen zur Optimierung der Kabelquerschnitte auch Versuche der Dehnungsmessung unternommen, um Hinweise auf Auflockerungszonen oder Setzungstrichter im Damm zu finden. [14]

Die folgenden Verfahren sind jedoch nur anwendbar, wenn der Wärmeabfluss durch das Sickerwasser deutlich größer ist als die Wärmeleitung durch das Erdmaterial. Erst mit einer Fließgeschwindigkeit ab 10^{-7} m/s ist es möglich einen dementsprechenden Wärmeabfluss durch das Sickerwasser zu erreichen. [77]

8.2.1 Temperatursondierung

Hier werden entlang des Dammkörpers verschraubbare Hohlgestänge (22 mm Durchmesser) in die erforderliche Tiefe gerammt. [77]



Abbildung 8.9: Einrammen der Temperaturmessgestänge [78]

Mit diesem Verfahren wurden Sondierungen bis zu Tiefen von 40 m durchgeführt. Die horizontalen Abstände der einzelnen Messrohre sollten der Durchlässigkeit des Erdmaterials angepasst werden - es empfiehlt sich: [14]

Kies und Sand ... bis 20 m
schluffiges Erdmaterial ... 10 m

In das Hohlgestänge wird eine Messkette mit mehreren Temperatursensoren und einer elektrischen Zuleitung einlassen. Diese Einzelsensoren sind im vertikalen Abstand von höchstens einem Meter angebracht. Um sich der Bodentemperatur anzupassen, ist eine thermische Angleichszeit von etwa 15-20 Minuten erforderlich. [77]

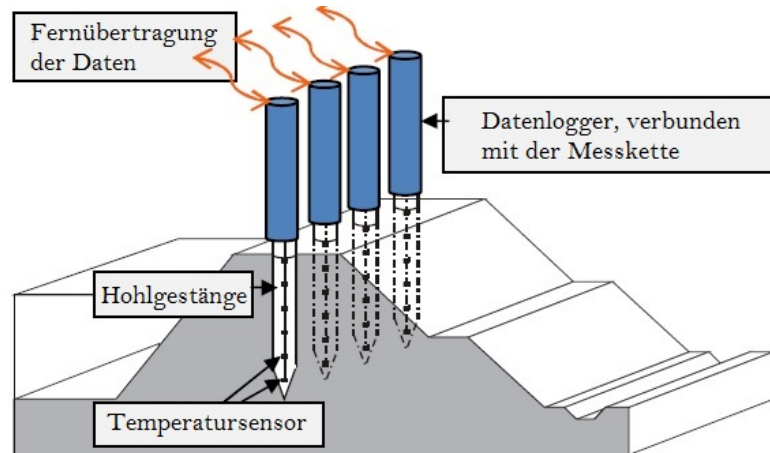


Abbildung 8.10: Schema einer Temperatursondierung (teilweise modifiziert nach [79])

Die Messdaten dieser Präzisions-Temperaturmessgeräte werden automatisch von einem Datenlogger aufgezeichnet. Daraus lassen sich für verschiedene Tiefen Bodentemperaturprofile erstellen. Mittels einer Temperatur-Tiefen-Darstellung lässt sich eine Aussage über die Tiefenlage von Unregelmäßigkeiten treffen: [77]

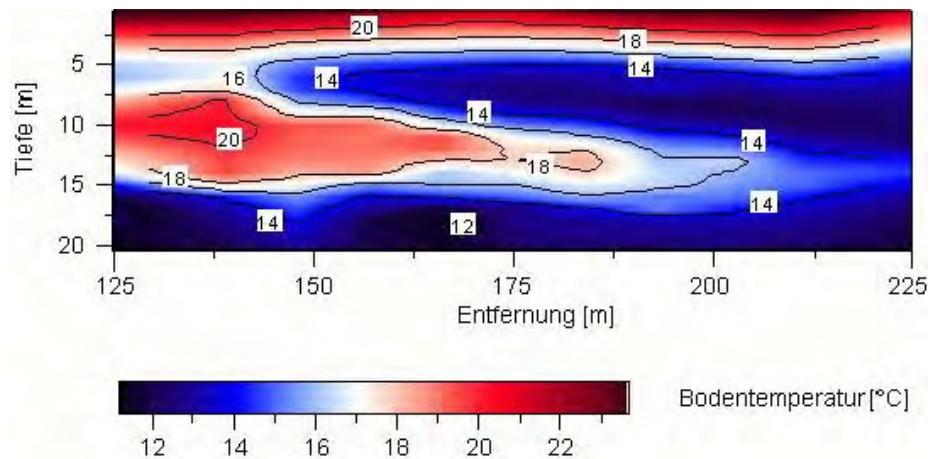


Abbildung 8.11: Temperaturverteilung in und unterhalb eines Staudamms [77]

Die ermittelte Temperaturverteilung eines Dammschnitts ist beispielhaft in Abbildung 8.11 dargestellt.

Länge des Dammabschnitts	... 100 m (Abschnitt 125 m bis 225 m)
Tiefe Dichtungskern	... bis 7 m
Tiefe Schmalwand	... bis 12 m
Tiefe der Temperaturmessung	... bis 20 m
Gewässertemperatur	... 20,5 °C (Ende Sommer)

Der Damm besitzt einen Dichtungskern sowie eine Schmalwand, welche ein Unterströmen verhindern soll. Deutlich erkennbar sind einerseits die oberflächennahe Erwärmung des Damms aufgrund der klimatischen Bedingungen im Sommer, andererseits im linken Bereich der Abbildung in einer Tiefe von ca. 7 bis 15 m eine Anomalie der Wassertemperatur. Diese Erwärmung (etwa der Gewässertemperatur entsprechend) lässt auf ein Sickerwasseraustritt bzw. auf eine Leckage in diesem Bereich schließen. [77]

8.2.2 Verteilte faseroptische Temperaturmessungen (VFTM)

Bei diesem Verfahren (engl.: DTS - distributed temperature sensing) bedient man sich eines Lasers sowie den faseroptischen Eigenschaften von Lichtwellenleitern, um Temperaturmessungen entlang eines in einem Damm verlegten Glasfaserkabels durchzuführen. [77]

Von einem Laser wird ein Signal in Form eines Lichtimpulses in ein Glasfaserkabel gesendet. Dieses wird entlang des gesamten Kabels reflektiert. Die zurückgestreuten Signale haben zwar eine geringe Intensität, sind aber ausreichend um ihre Frequenzbereiche auszuwerten. [77]

Dieses reflektierte Lichtsignal wird größtenteils wieder mit der gleich großen Wellenlänge reflektiert wie es ausgestrahlt wurde. Ist in einem Bereich entlang des Kabels eine Temperaturanomalie vorhanden, kommt es jedoch zu einer Frequenzverschiebung des reflektierten Signals. [14]

Das Frequenzspektrum des reflektierten Lichts ist von der Temperatur an der Stelle der Reflexion abhängig. Mittels einer Analyse der Frequenzen kann die Temperatur an diesem Ort ermittelt werden. Die Lage wiederum wird mittels der Geschwindigkeit des Lichtes im Glasfaserkabel und durch eine Messung der Reflexionszeit

festgestellt. [77]

In einem Abstand von 0,25 - 1 m können entlang des Glasfaserkabels Temperaturdaten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2$ °C ermittelt werden. [80]

Es wird zwischen 2 Verfahren der VFTM unterschieden:

- **Passive- oder Gradientenmethode:** Bei diesem Verfahren wird entlang des Kabels die absolute Temperaturverteilung ermittelt. Dabei ist aber ein entsprechender Temperaturunterschied (bzw. -gradiente) zwischen Gewässer und Damm notwendig. Deshalb ist ein ausreichender Abstand zwischen Glasfaserkabel und Gewässer erforderlich. [14]
- **Aktive- oder Aufheizmethode bzw. Heat Pulse Method:** Ist der Temperaturunterschied zwischen Gewässer und dem nicht durchströmten Dammkörper zu gering, um mit der passiven Methode gemessen werden zu können, wird das Kabel aktiv aufgeheizt. Dadurch wird eine höhere Temperatur des umgebendes Erdmaterials erreicht. [77]

Dazu werden sogenannte Hybridkabel verwendet. Die Ummantelung besteht aus robusten Stahl- oder Kunststoffschichten. Sie beinhalten neben den Glasfasern auch einen elektrischen Leiter sowie einer Zentralader zur Zugentlastung. Die Kabel werden mit einer Steckverbindung an den Laser angeschlossen. [77]

Um eine Messung durchzuführen wird der elektrische Leiter unter Spannung gesetzt (Heizspannung) und somit dementsprechend erwärmt. Die Temperaturänderung entlang des Kabels wird mittels faseroptischer Messtechnik aufgezeichnet und ausgewertet. Wie tief die Wärme in den Boden eindringt, ist abhängig von der Heizdauer. Ein erhöhter Wärmeabfluss findet in Bereichen von Sickerwasseraustritten statt. Diese Stellen weisen eine geringere Temperatur auf. [77]

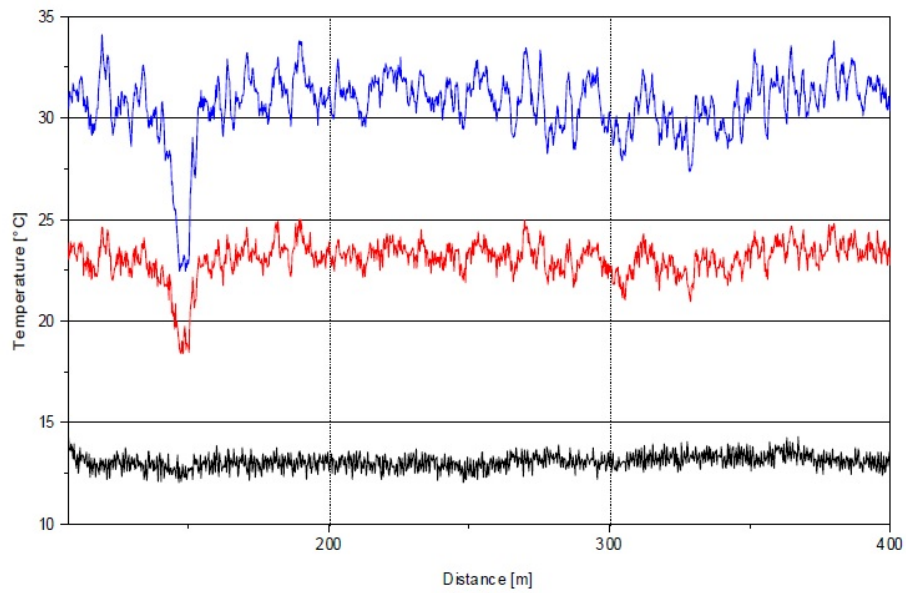


Abbildung 8.12: Temperaturverteilung beim Aufheizverfahren [77]

Abbildung 8.12 zeigt das Resultat einer Temperaturmessung mittels Aufheizmethode bei einem 400 Meter langem Damm. Das Aufheizen erfolgte unmittelbar unterhalb der Oberflächendichtung. Die schwarze Kurve zeigt die Referenz-Temperatur vor Beginn der Aufheizung, die rote Kurve zeigt die gemessene Temperatur nach 20 Minuten und die blaue Kurve nach 40 Minuten. Deutlich erkennbar ist ein Einbruch bei der roten und blauen Temperaturkurve bei 100 m. Hier findet ein erhöhter Temperaturabfluss statt. Dies lässt auf ein Sickerwasseraustritt an dieser Stelle schließen. [77]



Abbildung 8.13: Verlegung der Glasfaserkabel (Isarkanal) [81]

Der Temperaturanstieg im umgebenden Material wird von zwei verschiedenen Arten der Wärmeübertragung bestimmt. Findet keine Umströmung des Kabels mit Sickerwasser statt, kommt es zu dem Prozess der Wärmeleitung. Aufgrund der wassergehaltsabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Bodens lässt sich ein Zusammenhang mit dem Sättigungsgrad ableiten. Wird hingegen das Erdreich von Sickerwasser durchströmt, führt dies zur effektiveren Wärmeübertragung durch Konvektion. Daraus können Rückschlüsse auf die Filtergeschwindigkeit des Bodens gezogen werden. [81]

Weitere Untersuchungen dazu, sowie auch etwa zu verschiedenen Kabelquerschnitten wurden von Goltz [82] und Perzlmaier [83] durchgeführt.

Der Vorteil von faseroptischen Messungen im Vergleich etwa zu Messungen des Porenwasserdrucks liegt in der raschen Erfassung der Temperaturanomalien mittels kontinuierlicher Messung. [14]

Eine Nachrüstung bestehender Staudämme mit faseroptischen Messsystemen lässt

sich bei Dämmen mit Oberflächendichtung leicht realisieren. Besitzt der Damm eine innenliegende Kerndichtung, muss geprüft werden, ob und wie sich faseroptische Messsysteme einbauen lassen. [14]

Anwendungsbeispiele dieser Technologie finden sich etwa bei Dämmen mit Asphalt- oder Betonoberflächendichtungen sowie Geo-Membranen. [81]



Abbildung 8.14: Verlegung des Kabels auf einer Betonoberflächendichtung (Merowe Dam am Nil, Sudan) [81]

Auch zur Überwachung von Bauwerksfugen werden diese Methoden angewandt. In Abbildung 8.15 ist der Verlauf des faseroptischen Leckortungskabels beim Dichtungsanschluss der Asphaltbetonoberflächendichtung mit der Schlitzwand dargestellt. [81]



Abbildung 8.15: Verlauf des Kabels entlang der Dichtungsfuge (Midlands Dam, Mauritius) [81]

Ein weiteres Anwendungsfeld dieser Technologie im konstruktiven Wasserbau findet sich bei Staumauern, bei denen die Temperaturverteilung zufolge der Hydrationswärmeentwicklung im Massenbeton ermittelt werden kann. Daraus können thermische Kennwerte des Betons bestimmt werden (Wärmeleitfähigkeit oder -kapazität). [81]

Bei Staumauern besteht außerdem die Möglichkeit des Einbaus einer verteilten faseroptischen Dehnungsmessung. Damit sollen Größe und Position von Rissen erkannt werden. [81]

Weltweit hat sich die Technologie der faseroptischen Temperaturmessung im Wasserbau bereits seit mehr als 20 Jahren bewährt und wird auch zukünftig ein wesentlicher Bestandteil der Bauwerksüberwachung sein. [81]

8.2.3 Kombination von Temperatursondierung und VFTM

Auch eine Kombination der beiden vorhin genannten Verfahren (Kapitel 8.2.1 und 8.2.2) ist möglich. Dabei werden biegeoptimierte Glasfaserkabel, mit denen sehr klei-

ne Biegeradien möglich sind, in die Hohlgestänge (analog denen, die für Temperatursondierungen (Kapitel 8.2.1) hergestellt worden sind) schleifenförmig eingeschoben. [77]

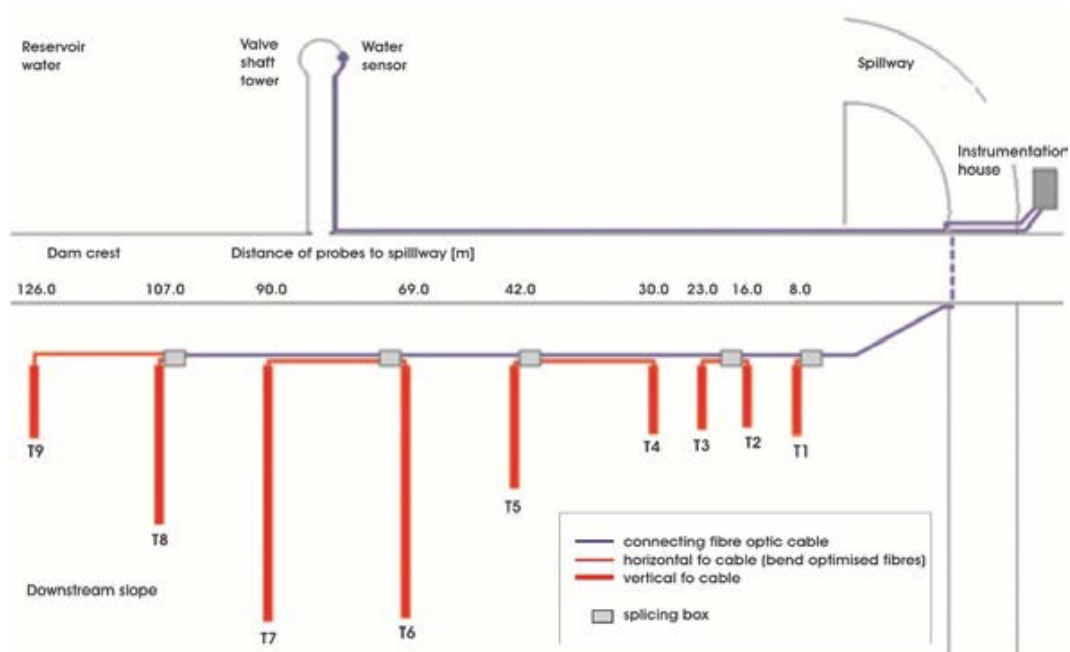


Abbildung 8.16: Anordnung der Glasfaserkabel [79]

Die einzelnen Messstellen bzw. Bohrungen werden an der Dammoberfläche durch ein weiteres Glasfaserkabel verbunden, um eine durchgehende Messstrecke zu erhalten. [77]

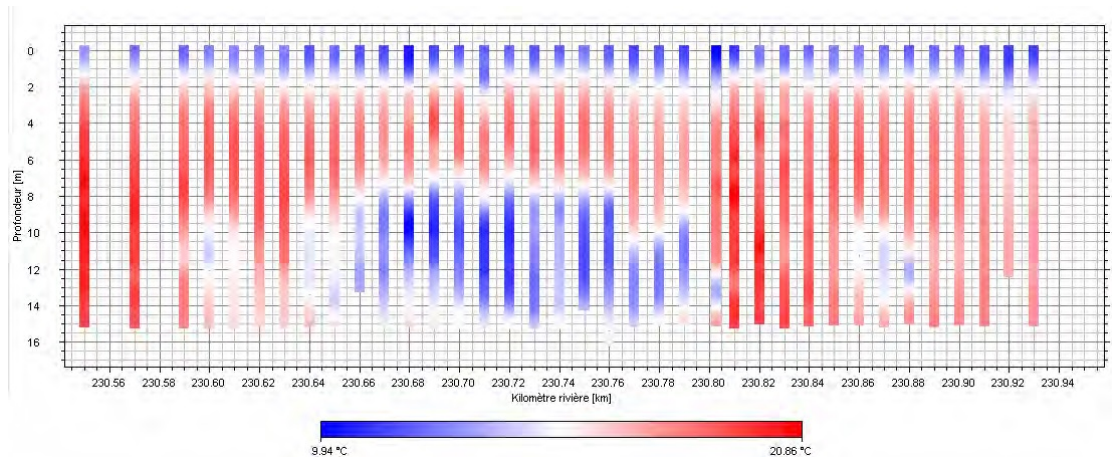


Abbildung 8.17: Temperaturverteilung in den einzelnen Bohrungen, gemessen mittels Glasfaserkabeln [77]

In Abbildung 8.17 wird ein 380 Meter langer Abschnitt eines Staudamms betrachtet. Hier wird der Temperaturverlauf für jede senkrechte Bohrung einzeln dargestellt. Aus dem daraus folgenden Gesamtbild ist an der gesamten Dammoberkante die winterliche Abkühlung erkennbar. Zusätzlich weist der Damm im mittleren Abschnitt in einer Tiefe ab etwa 8 Metern eine Abkühlung auf. Auch hier lässt sich auf einen verstärkten Sickerwasseraustritt schließen. [77]

8.3 Magnetometrischer Widerstand zur Ortung von Sickerwasser

Eine weitere Methode, mit der unerwünschte Sickerwasserwege aufgrund hoher Porosität im Dammkörper aufgespürt werden können, basiert auf Verfahren des Magnetometrischen Widerstandes¹. [84]

In das betreffende Gelände wird ein elektrischer Stromkreis aufgebracht. Das daraufhin entstehende magnetische Feld kann gemessen werden und es lassen sich 2D- bzw. 3D-Bilder generieren. [84]

¹Firma Willowstick Technologies, LLT (USA)

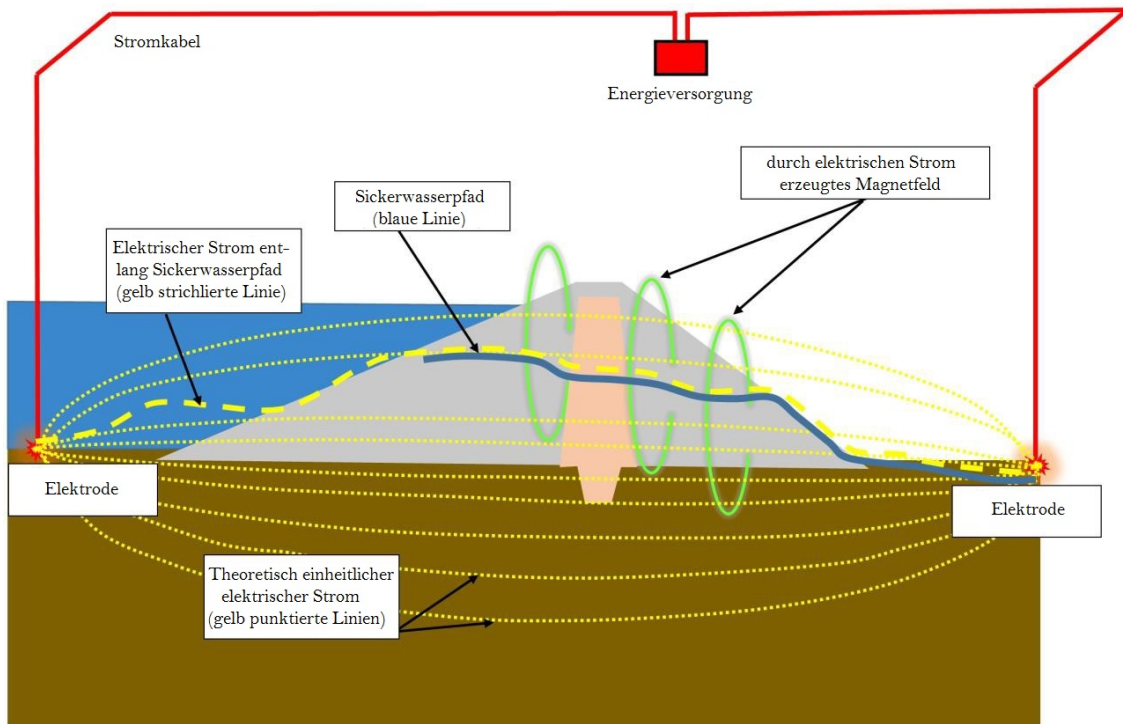


Abbildung 8.18: Prinzip der Erzeugung des Magnetfeldes (teilweise modifiziert nach [85])

Grundlage dafür ist das Gesetz von „Biot-Savart“. Dieses beschreibt die Entstehung eines Magnetfeldes durch einen elektrischen Strom. [85]

Bei einer Erregerstromstärke I entsteht die Magnetische Flussdichte B . [86]

$$B = \mu_0 \frac{I}{2r\pi} \quad (8.4)$$

- | | |
|---|---|
| B | ... Magnetische Flußdichte [$\frac{N}{A \cdot m}$] bzw. [Tesla] |
| μ_0 | ... Magnetische Feldkonstante |
| $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} [\frac{V \cdot s}{A \cdot m}]$ | ... Magnetische Feldkonstante im Vakuum |
| I | ... Erregerstromstärke [A] |
| r | ... Entfernung vom Stromdurchflossenen Leiter [m] |

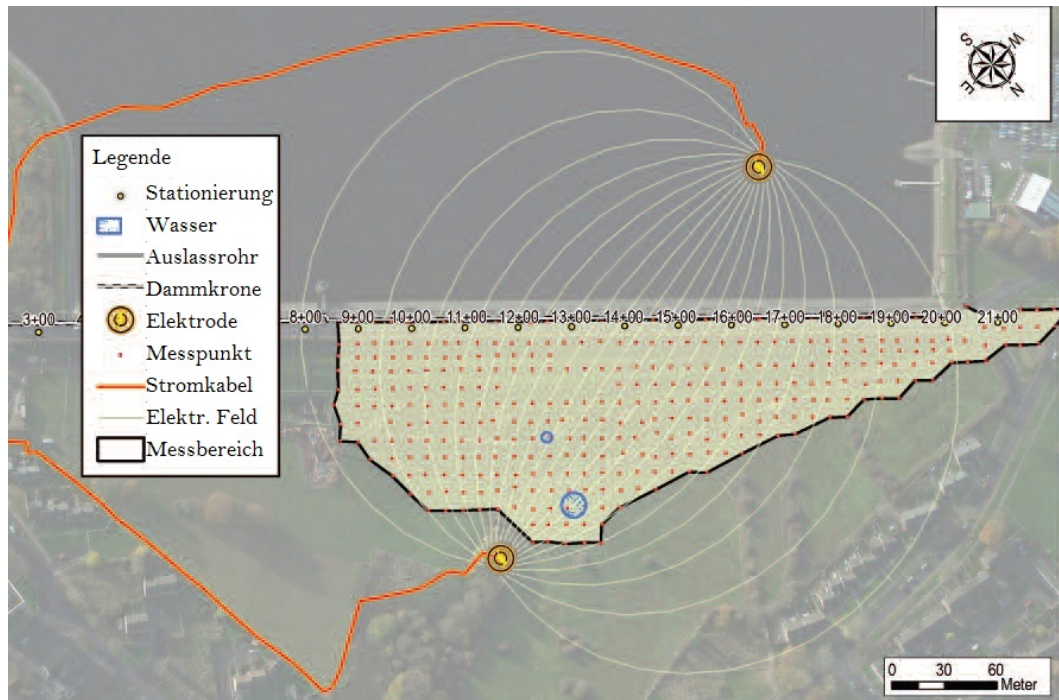


Abbildung 8.19: Anordnung der Messeinrichtungen für das Verfahren des Magnetometrischen Widerstandes am Beispiel des Bartley Damms (UK). (teilweise modifiziert nach [84])

Dazu wird mittels zwei Elektroden ein Stromkreis (Wechselstrom mit einer Stromstärke I von 0,3 - 1,7 Ampere und einer Frequenz von 380 Hz [85]) erstellt. Eine Elektrode befindet sich im Stausee, die andere wird auf den Dammkörper bzw. in dem Bereich in dem Sickerwasserströmungen erwartet werden, aufgebracht. Die beiden Elektroden werden mit einem Draht verbunden. Um Interferenzen zu minimieren, wird dieser großräumig um das zu untersuchende Gebiet herum verlegt. [84]

Der elektrische Strom folgt dem Verlauf von wasserführenden Schichten aufgrund deren höheren Leitfähigkeit bzw. geringeren Widerstands. [85]

Hochempfindliche Messgeräte in einem Abstand bis zu 2,5 m voneinander entfernt erfassen und analysieren die Daten des entstandenen Magnetfeldes, welches Erdmaterial oder Beton durchdringt. Mittels speziellen Software-Filtern kann unerwünschtes Rauschen reduziert werden. [85]

Die ermittelten Daten werden mit einem erwarteten Magnetfeld eines „theoretisch einheitlichen Modells“ verglichen. Aus den Abweichungen können in folge Strömungspfade von Sickerwasser in Zonen höherer Porosität ermittelt werden. [85]

Elektromagnetische Messungen werden an sämtlichen Punkten an der Oberfläche des Damms durchgeführt. Eine besondere Herausforderung ist daher die Ermittlung der Tiefenlage des Verlaufs von Sickerwasserströmungen (bis zu 300 m Tiefe bei Betrieb mit geringen Frequenzen [85]). Mittels mathematischer Modelle lässt sich ihr räumlicher Verlauf berechnen. [84]

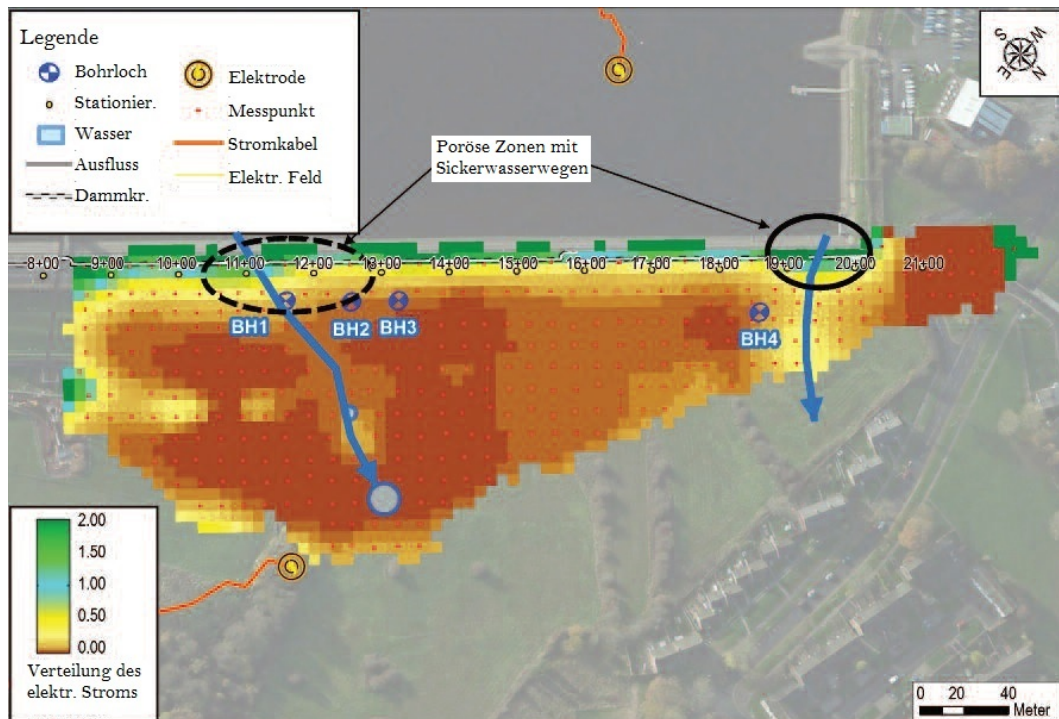


Abbildung 8.20: 2D-Bild zur Verteilung des elektrischen Stroms 20 m unterhalb der Dammkrone am Beispiel des Bartley Damms (UK). (teilweise modifiziert nach [84])

Beim Bartley Damm wurden als zusätzliche Untersuchung 4 Bohrlöcher (BH1 bis BH4) gebohrt. In den Bohrlöchern BH1, BH2 und BH 4 versickerte das Bohrwasser in einer Tiefe von 20 Meter. Kein Verlust von Bohrwasser gab es hingegen in Bohrlöch BH3. Dieses Verhalten stimmt mit den Ergebnissen aus Abbildung 8.20 gut überein. [84]

Die Wassermenge kann mit diesem Verfahren allerdings nicht ermittelt werden. [85]

8.3.1 2D - Pläne und 3D - Modelle

In einem ersten Schritt werden 2D Pläne erstellt (vgl. Abbildung 8.20). Zusätzlich können aufwändigere 3D Modelle generiert werden: [87]

– **Electric Current Flow Model (ECF):**

Elektrisches Stromflussmodell: Für die jeweiligen Pfade der Sickerwasserströmung wird die Tiefenlage ermittelt.

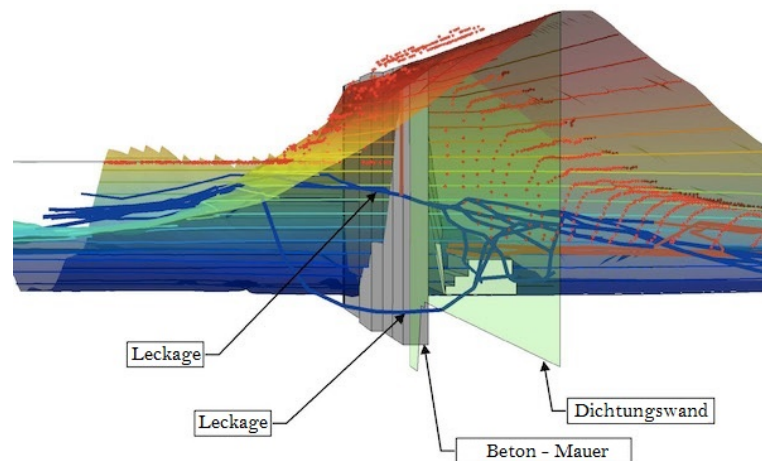


Abbildung 8.21: ECF Modell (teilweise modifiziert nach [88])

– **Electric Current Distribution Model (ECD):**

Elektrisches Stromverteilungsmodell: Verteilung des elektrischen Stroms bzw. des Sickerwassers an der jeweiligen Stelle.

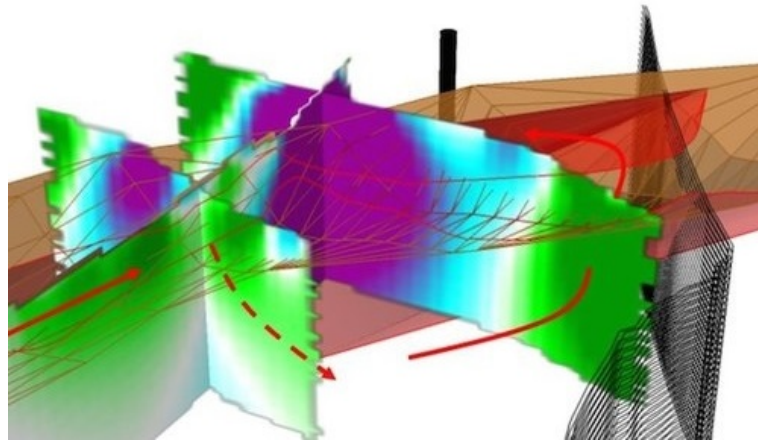


Abbildung 8.22: ECD Modell [88]

9 Statistische Datenanalyse von Messwerten

Die in den nachfolgenden Kapiteln angeführten Methoden sollen Möglichkeiten zur Analyse und zur Schätzung von künftigen Messwerten liefern.

Dazu steht eine Reihe verschiedenster Programmpakete zur Verfügung, wie etwa die Statistik-Software „SPSS“ oder „R“. Die Programmiersprache „Python“ kann mittels Packages erweitert werden. Dazu zählen „NumPy“ oder „scikit-learn“.

9.1 Regressionsanalyse [89]

9.1.1 Grundlagen

Mittels Regressionsanalyse können Beziehungen zwischen Variablen analysiert werden.

Als anschauliches Beispiel wird dazu die Sickerwassermenge eines Damms betrachtet. Diese kann von einem oder von mehreren Faktoren abhängig sein, wie zum Beispiel von Pegelstand, Wetter, Temperatur usw.

Die Sickerwassermenge wird daher in der Regressionsanalyse als „abhängige“ Variable y bezeichnet. Der Pegelstand und die Temperatur sind hingegen die „unabhängigen“ Variablen x_j .

Würde die Sickerwassermenge ausschließlich vom Pegelstand abhängen, also nur von einer Variable x , verwendet man die einfache Regressionsanalyse. Hängt die

Sickerwassermenge aber von mehreren Variablen x_j ab, also etwa vom Pegelstand und von der Temperatur, verwendet man die multiple Regressionsanalyse.

Die Sickerwassermenge y kann daher als Funktion von x bzw. x_j angeschrieben werden:

$$\text{einfache Regressionsanalyse: } y = f(x) \quad (9.1)$$

$$\text{multiple Regressionsanalyse: } y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_J) \quad (9.2)$$

x_j ... unabhängige Var. „Regressor“ z.B. Pegelstand, Temperatur, usw.
 y ... abhängige Variable „Regressand“ z.B. Sickerwassermenge

Die Regressionsanalyse soll helfen, die Werte der abhängigen Variable y zu ermitteln. [89] In unserem Fall also die Sickerwassermenge.

Ist eine Variable y jedoch von der Zeit t abhängig, benutzt man die sogenannte „Zeitreihenanalyse“. Damit lassen sich zukünftige Werte der abhängigen Variable y prognostizieren. Diese Methode wird im Kapitel 9.2 behandelt.

$$\text{Zeitreihenanalyse: } y = f(t) \quad (9.3)$$

t ... Zeitindex
 y ... Abhängige Variable

9.1.2 Einfache Regressionsanalyse

Regressionsfunktion

Für unser Beispiel betrachten wir zuerst die lineare Regression. Die Sickerwassermenge soll für diese Modellannahme also ausschließlich vom Pegelstand abhängen. Die Geschätzte Sickerwassermenge bzw. der Schätzwert der abhängigen Variable \hat{y} kann mit der „Regressionsfunktion“ ermittelt werden:

$$\text{einfache Regressionsfunktion:} \quad \hat{y}_k = b_0 + b_1 x_k \quad (9.4)$$

Die damit entstandene Gerade wird auch als „Regressionsgerade“ bezeichnet. Hier und im folgenden bedeuten:

- x_k ... Wert der unabhängigen Variable
- y_k ... Beobachtungswert der abhängigen Variable Y bei x_k
- \hat{y} ... Schätzwert der abhängigen Variable Y bei x_k
- b_0 ... konstantes Glied
- b_1 ... Regressionskoeffizient
- k ... Aufzählung der Beobachtungen
- K ... Anzahl der gesamten Beobachtungen

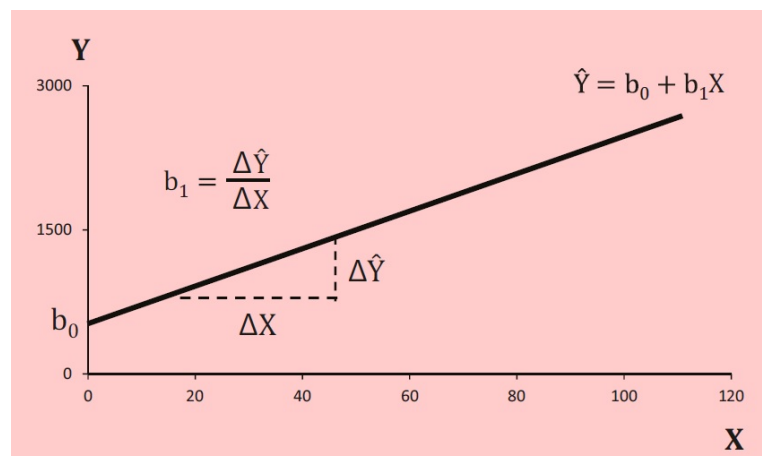


Abbildung 9.1: Lineare Regressionsfunktion [89]

Es muss zwischen dem Beobachtungswert y_k und dem Schätzwert \hat{y} der abhängigen Variable (Sickerwassermenge) unterschieden werden.

Der Ordinatenabschnitt b_0 kann theoretisch also als derjenige Anteil der geschätzten Sickerwassermenge \hat{y} verstanden werden, der vom Pegelstand x_k nicht beeinflusst wird.

Der Regressionskoeffizient b_1 gibt die Steigung der Regressionsgeraden an. Je größer dieser Wert bzw. je steiler die Gerade ist, umso höher ist der Einfluss der unabhängigen Variable x_k (Pegelstand) auf die abhängige Variable \hat{y} (Sickerwassermenge).

Allerdings sind die beiden Parameter b_0 und b_1 zunächst noch unbekannt und müssen erst mittels Regressionsanalyse anhand bereits vorhandener Messdaten aus Beobachtungen von Pegelstand x_k und Sickerwassermenge y_k bestimmt werden. Die Messwerte können in einem Streudiagramm mit den jeweiligen Koordinaten (x_k/y_k) dargestellt werden (siehe Abbildung 9.2). Die Punkt mit den Koordinaten (\bar{x}/\bar{y}) bezeichnet den Mittelpunkt der Punktwolke.

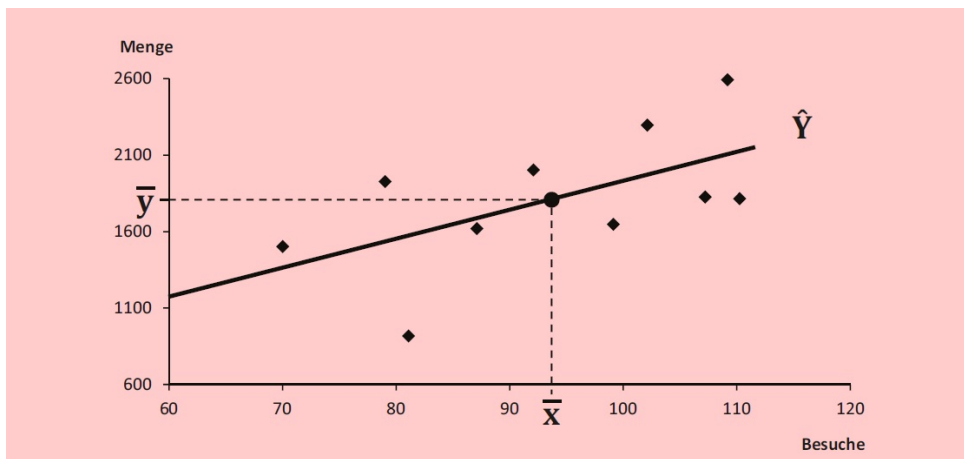


Abbildung 9.2: Streudiagramm mit Regressionsgerade [89]

Residuen

Zwischen den beobachteten Werten y_k und den geschätzten Werten \hat{y} bestehende Differenzen werden als „Residuen“ e_k (error) bezeichnet. Dieser ist in der folgenden

Abbildung als vertikaler Abstand von einem Beobachtungspunkt k zur Regressionsgeraden zu erkennen.

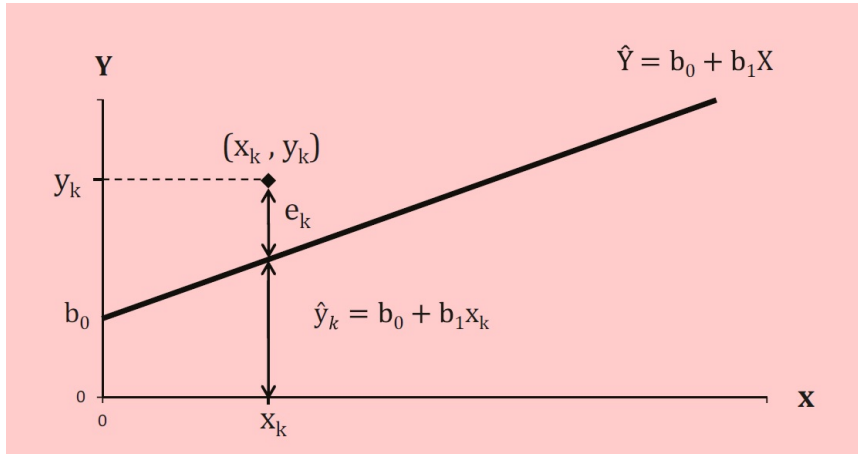


Abbildung 9.3: Residuen [89]

Die Regressionsgerade wird der Punktolke am besten angepasst, wenn die Residuen möglichst klein sind.

$$\text{Residuen:} \quad e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (9.5)$$

- x_k ... Wert der unabhängigen Variable
- y_k ... Beobachtungswert der abhängigen Variable Y bei x_k
- \hat{y} ... Schätzwert der abhängigen Variable Y bei x_k
- e_k ... Residuen

Somit kann mittels der Methode der Kleinsten-Quadrate angeschrieben werden:

$$\text{kleinste Quadrate - Schätzung:} \quad S = \sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min! \quad (9.6)$$

Lösung mittels Partieller Differentiation

Eine partieller Differentiation der Gleichung (9.6) nach b_0 bzw. b_1 ergibt sich zu:

$$\frac{\partial S}{\partial b_0} = 2 \sum (y_k - b_0 - b_1 x_k)(-1) = 0 \quad (9.7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b_1} = 2 \sum (y_k - b_0 - b_1 x_k)(-x_k) = 0 \quad (9.8)$$

Die Summe der Residuen werden dabei gleich Null. Die Lösung dieses Gleichungssystems führt zu:

$$b_1 = \frac{K \sum (x_k y_k) - \sum (x_k) \sum (y_k)}{K \sum (x_k^2) - \sum (x_k)^2} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (9.9)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (9.10)$$

\bar{x} ... Mittelwert der unabhängigen Variablen x_k

\bar{y} ... Mittelwert der abhängigen Variablen y_k

Für eine ausführliche Darstellung der Lösungsschritte von der Gleichung (9.6) bishin zu den Gleichungen (9.9) und (9.10) wird auf [89] verwiesen.

Die bis dahin noch unbekannt Parameter b_0 und b_1 können jetzt mittels den Gleichungen (9.9) und (9.10) bestimmt werden. Somit ist die Regressionsfunktion vollständig bestimmt.

9.1.3 Multiple Regressionsanalyse

Wird das vorige Beispiel unter der Modellannahme betrachtet, dass die Sickerwassermenge neben dem Pegelstand auch noch von weiteren Größen abhängig ist, wie zum Beispiel Temperatur, Niederschlag, Durchlässigkeit des Schüttmaterials, usw., führt dies zur multiplen Regressionsanalyse.

Bei dieser Methode wird mit mehreren unabhängigen Variablen gerechnet. Dazu wird der Formelsatz der einfachen Regressionsanalyse entsprechend erweitert. Aus den Gleichungen (9.4) und (9.6) wird somit:

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_Jx_J \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (9.11)$$

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1x_{1k} + b_2x_{2k} + \dots + b_jx_{jk} + \dots + b_Jx_{JK})]^2 \rightarrow \min! \quad (9.12)$$

x_{jk}	... Werte der unabhängigen Variablen	$(j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K)$
b_j	... Regressionskoeffizient	$(j = 1, 2, \dots, J)$
e_k	... Residuen	
J	... Anzahl der unabhängigen Variablen	
K	... Anzahl der Beobachtungen	

Eine partielle Ableitung von Gleichung (9.12) führt zu einem linearen Gleichungssystem mit mehreren Unbekannten. Die Lösung kann bei vielen Unbekannten sehr aufwändig werden und es empfiehlt sich die Verwendung entsprechender Software. Damit erhält man die Parameter b_0 und b_j mit denen die Regressionsfunktion schließlich bestimmt ist.

9.1.4 Linearer und Nichtlinearer Zusammenhang

In den vorigen Kapiteln wurde von einem linearen Zusammenhang der unabhängigen und der abhängigen Variablen ausgegangen. Dies muss jedoch nicht immer der Fall

sein, wie in folgender Abbildung zu sehen ist.

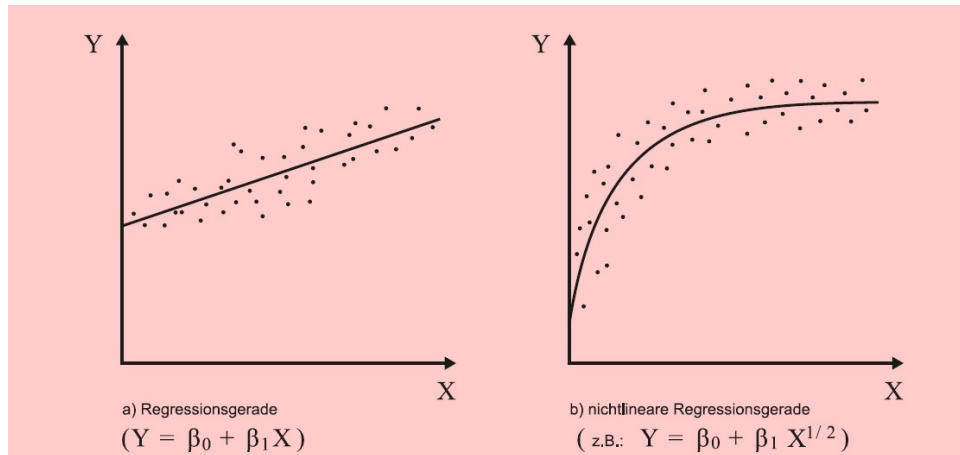


Abbildung 9.4: Vergleich einer a) Linearen Regression mit einer b) Nichtlinearen Regression [89]

Ein nichtlinearer Zusammenhang lässt sich oft alleine durch das betrachten der Punktwolke feststellen. Eine nicht entdeckte Nichtlinearität hätte zur Folge, dass mit steigender Punkteanzahl die Schätzwerte von den Beobachtungswerten immer stärker abweichen würde.

9.2 Zeitreihenanalyse [90]

Wie bereits in Kapitel 9.1.1 erwähnt, können bei zeitabhängigen Verläufen die Variablen mittels einer Zeitreihenanalyse beschrieben werden.

Eine zeitliche Folge von Beobachtungswerten eines bestimmten Vorgangs wird als Zeitreihe bezeichnet. Sie kann mehrere Ziele verfolgen:

- zur Beschreibung eines Zeitlichen Vorgangs
- die Zeitliche Beobachtung dient der Kontrolle um Veränderungen möglichst frühzeitig zu erkennen und um darauf zu reagieren
- um zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren

Dazu gibt es mehrere Verfahren:

- Autoregressive Prozesse (AR-Prozesse)
- Moving average Prozesse (MA-Prozesse)
- Gemischte Prozesse (ARMA)
- Instationäre stochastische Prozesse (ARIMA, SARIMA, Box-Cox-Transformation)

An dieser Stelle werden die Autoregressiven Prozesse näher beschrieben. Die restlichen Verfahren werden in [90] ausführlich dargestellt.

9.2.1 Autoregressive Prozesse (AR-Prozesse)

Ist ein zu ermittelnder Wert einzig von seinem Vorgänger abhängig, wird dieser Prozess als AR(1)-Prozess bezeichnet:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (9.13)$$

Ein AR(2)-Prozess hängt demnach von seinen letzten zwei Vorgängern ab. Allgemein kann somit ein „Autoregressiver Prozess der Ordnung p “ als AR(p)-Prozess bezeichnet werden. Hier hängt der zu ermittelnde Wert von seinen p Vorgängern ab:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_j y_{t-j} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (9.14)$$

$$\text{bzw.} \quad y_t = \sum_{j=1}^p \phi_j y_{t-j} + \varepsilon_t \quad \text{für alle } t \quad (9.15)$$

p	... Anzahl der Vorgänger	
t	... Zeitpunkt	
ϕ_j	... Parameter des Prozesses	$(\phi_j \neq 0 \text{ mit } j = 1, 2, \dots, p)$
y_t	... Gewichteter Mittelwert seiner Vorgänger	
y_{t-1}	... Beobachtungswert des Vorgängers	
y_{t-2}	... Beobachtungswert des Vor-Vorgängers	
y_{t-j}	... Beobachtungswert des j -en Vorgängers	
ε_t	... Zufälliger Rest („weißes Rauschen“)	

9.3 Künstliche Intelligenz (KI) [91]

Mittels Künstlicher Intelligenz sollen Maschinen bzw. Computerprogramme lernen, Aktionen durchzuführen, die sie bisher noch nicht durchführen konnten und dabei bisher den Menschen unterlegen waren. Unter anderem werden dabei auch biologische Muster als Vorbild herangezogen.

9.3.1 Maschinelles Lernen (Machine Learning)

Die sich ständig weiterentwickelnden Systeme des Maschinellen Lernens können sich automatisch den Gegebenheiten anpassen, um dadurch ihre Funktionsweise laufend zu verbessern.

Die meisten dieser sich ständig weiterentwickelnden Systeme des Maschinellen Lernens lassen sich anhand ihrer verschiedenen Arten zu lernen unterscheiden:

- **überwachtes Lernen:** Ein Feedback gibt an, ob die Vorhersage Richtig oder Falsch ist. Dazu muss der Eingangs-Datensatz auch schon seine gewünschte Ausgabe enthalten. Eine Funktion kann dadurch den dabei entstandenen Fehler ermitteln. Aus diesem entstandenen Fehler kann das System seine Funktion anpassen und sich somit auch verbessern. Derartige Systeme lassen sich mittels eines „Trainings-Datensatzes“ trainieren. Anschließend erfolgt eine Prüfung mittels „Test-Daten“. Die Funk-

tion soll dadurch derartig aufgebaut werden, dass eine Verallgemeinerung der Funktion über den Datensatz hinaus möglich ist.

- **unüberwachtes Lernen:** Die Funktion unterteilt den Datensatz in verschiedene Klassen, aber erhält keine Reaktion darauf. Damit fehlt eine Kontrollinstanz und es besteht keine Möglichkeit die Qualität der Ergebnisse zu kontrollieren.
- **bestärkendes Lernen:** Erhält ähnlich dem unüberwachten Lernen ein Feedback. Aber nicht unbedingt für jeden Zustand. Dies ähnelt dem menschlichen Verhalten: nicht für jedes Verhalten bekommt man eine „Belohnung“ oder „Strafe“. Das Ziel dieser Systeme ist daher eine Maximierung der Belohnungen.

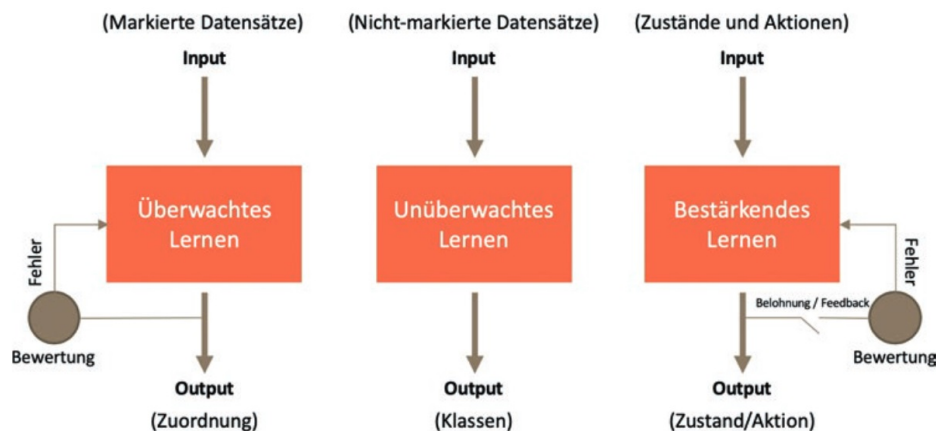


Abbildung 9.5: Arten des Maschinellen Lernens [91]

9.3.2 Neuronale Netze

Neuronale Netze sind eine Reihe Algorithmen und sollen ähnlich dem menschlichen Gehirn gewisse Muster erkennen können. Die kleinsten Einheiten dieser Netze sind die sogenannten „Neuronen“. Neuronale Netze sind schließlich lauter miteinander verbundene Neuronen. Ein Neuron hat folgende Aufgaben:

- Aufnahme von Eingaben
- Ausführung einer Berechnung mit diesen Eingaben
- Erzeugung einer Ausgabe

Die Berechnung wird anhand eines 2-Eingangs Neurons dargestellt. Jede der beiden Eingaben x_i wird mit einem Gewicht w_i multipliziert:

$$x_1 \rightarrow x_1 w_1$$

$$x_2 \rightarrow x_2 w_2$$

Die somit erhaltenen gewichteten Eingänge werden aufsummiert und zusätzlich mit einer „Verzerrung“ b addiert. Mittels einer „Aktivierungsfunktion“ f wird die Ausgabe y berechnet:

$$y = f(x_1 w_1 + x_2 w_2 + b) \tag{9.16}$$

- x ... Eingabe
- w ... Gewichtung
- b ... Verzerrung
- f ... Aktivierungsfunktion
- y ... Ausgabe

Die Aktivierungsfunktion kann so gestaltet sein, dass als Ausgabe y nur 0 oder 1 möglich ist. Das würde bedeuten:

- $y = 0$... Wert wird nicht weitergegeben
- $y = 1$... Wert wird weitergegeben

Alternativ zu diesem binären System kann der Wert auch dann weitergegeben werden, wenn etwa ein gewisser Schwellenwert überschritten wird.

Ein einfaches Neuronales Netz ist in folgender Abbildung 9.6 dargestellt. Es besitzt zwei Eingänge, zwei versteckte Neuronen und einem Neuron für die Ausgabe. In der

Praxis kann die Versteckte Ebene oft aus mehreren hunderten Neuronen bestehen. Entscheidend ist, dass alle Eingänge zu der Ausgabe führen.

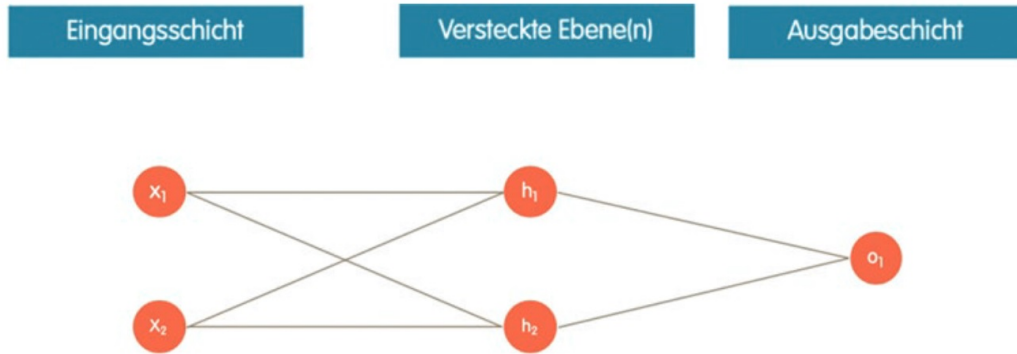


Abbildung 9.6: Neuronales Netz mit einer versteckten Ebene [91]

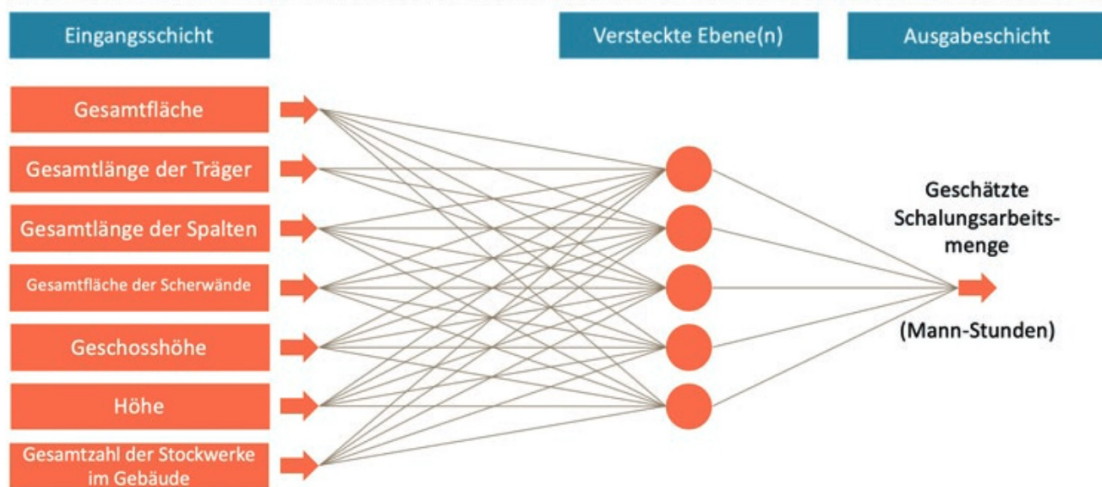


Abbildung 9.7: Beispiel eines Neuronalen Netzes [91]

Das „lernen“ der Neuralen Netze erfolgt, indem das berechnete Endergebnis des Systems mit einem „richtigen“ Ergebnis verglichen wird. Anhand dieser Differenz werden im Anschluss die Gewichte w des Netzes neu angepasst. Dieser Vorgang erfolgt rückwärts, also beginnend mit der Ausgabeschicht, dann mit der Verdeckten Schicht und schließlich mit der Eingabeschicht. Dies wird auch als „Backpropagation“ bezeichnet, und solange mittels Testdaten durchgeführt, bis die berechneten Endergebnisse mit dem zu erwarteten Ergebnis übereinstimmen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Herausforderungen der Zukunft

Auch wenn Talsperren für eine größere Lebens- bzw. Betriebsdauer geplant und gebaut werden, zeigt die Erfahrung, dass die geplante Dauer bei weitem überschritten wird. Deshalb ist eine laufende Überwachung und Instandhaltung die Grundlage für einen sicheren Betrieb über mehrere Generationen hinweg. Ein Rückbau ist derzeit keine realistische Option [92]

Deshalb stellen sich Herausforderungen, um auch zukünftig die Sicherheit von Stauanlagen zu gewährleisten: [10]

- Alterung der Bauwerke
- Auswirkungen des Klimawandels
- Beibehaltung und Weitergabe von Fachwissen
- Veränderungen am Energiemarkt
- Neue Entwicklungen, Technologien und Digitalisierung
- Forschungen, etwa zur besseren Erfassung einer Erdbebengefährdung oder von Hochwasserereignissen.
- neue Erkenntnisse führen zu neuen Sicherheitskonzepten und Regelwerken
- Bauwerke sind mit einem hohen geforderten Sicherheitsstandard zu betreiben

10.1.1 Alterung

Nach dem ersten erhöhten Risiko des Ersteinstaus und Behebung von Problemen bei etwaigen unerwarteten Ereignissen in der Anfangsphase des Bauwerks, ist die Schadenswahrscheinlichkeit während des normalen Betriebs eher als gering einzustufen.

Eine Talsperre wird jedoch nicht alleine aus „Gewohnheit“ sicher. Mit zunehmender Alterung der Anlage steigt die Schadenswahrscheinlichkeit wieder an. Eine entsprechende Überwachung der Talsperre und das Ergreifen der richtigen Maßnahmen kann diesem Trend entgegenwirken.

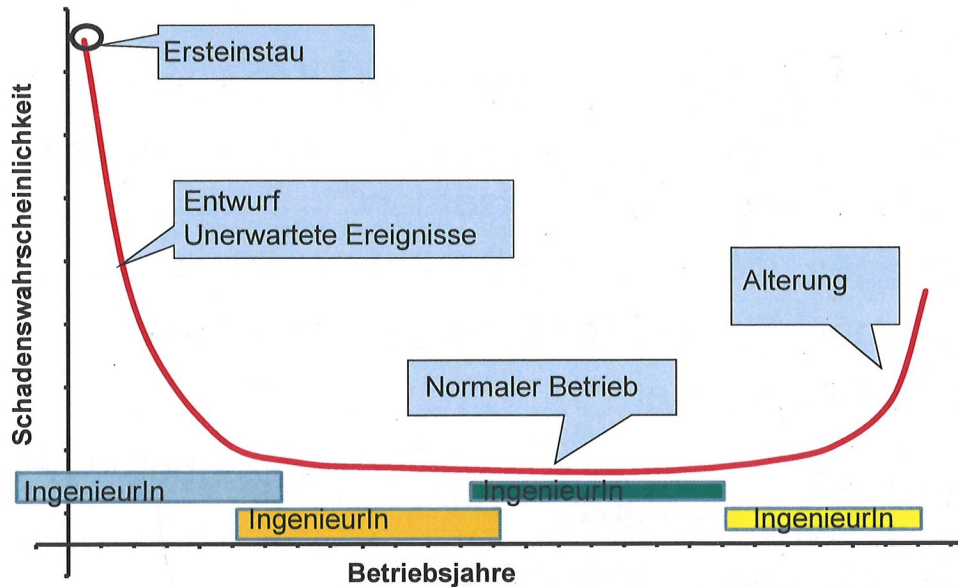


Abbildung 10.1: Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Alterung [56]

10.1.2 Veränderungen am Energiemarkt

Die Liberalisierung des Strommarktes führte zu einem Bedarf an schnellverfügbarer Energie und regelfähigen Kraftwerken. [93]

Am Beispiel des Speichers Vermunt (1930 fertiggestellt) der Illwerke VKW AG ist die geänderte Betriebsweise ersichtlich, welche durch die Inbetriebnahme des neu-

en Obervermuntwerks II (OVW II) im Juli 2018 ausgelöst wurde. Eine bis dahin als Wochenspeicher genutzte Anlage wurde zu einem Speicher mit stundenweisem Pumpwälzbetrieb. Der geänderte Betrieb lässt sich aus der Ganglinie der Stauhöhe ablesen. [93]

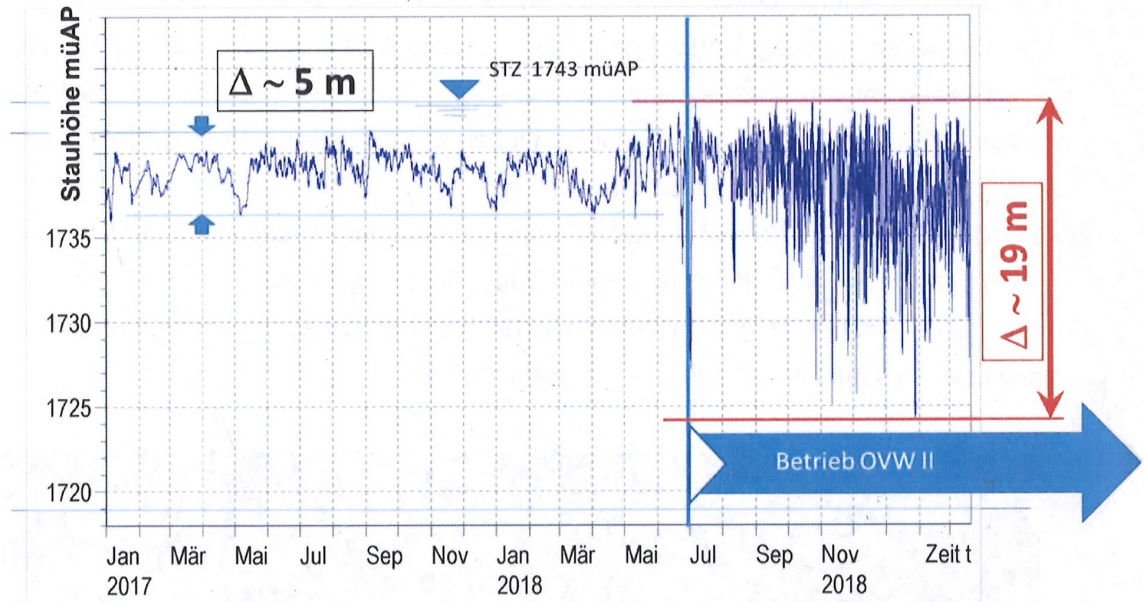


Abbildung 10.2: Geänderte Speicherbewirtschaftung des Speichers Vermunt [93]

Dadurch kommt es innerhalb weniger Stunden teilweise bis fast zu viermal so großen Stauspiegelschwankungen als zuvor. Dies stellt eine bis dahin nicht vorhandene neue Belastungssituation für die Sperre bzw. den Untergrund sowie für die hydrogeologischen Verhältnisse dar. [93]

Solche Veränderungen in der Betriebsweise und deren Auswirkungen werden auch in Zukunft sehr beschäftigen. Daher ist eine an die geänderten Erfordernisse adaptierte Talsperrenüberwachung essentiell.

10.1.3 Digitalisierung in der Stauanlagenüberwachung

Die immer stärker voranschreitende Digitalisierung in allen Lebenslagen macht sich auch in der Stauanlagenüberwachung bemerkbar. Aufgrund der ständigen Entwicklung neuer Hard- und Software zur Erfassung und Dokumentation der Messdaten

wird der Trend wohl verstärkt in Richtung Einsatz von tragbaren Tablets und Smartphones gehen.

Als Ergänzung zur visuellen Überwachung bietet sich gerade bei schwer zugänglichen Stellen der Einsatz von immer leistungsfähigeren Drohnen mit entsprechendem Kameraequipment an.

Auch die Weiterentwicklung von mathematischen Modellen und Künstlicher Intelligenz wird eine Prognose in Zukunft noch treffsicherer machen können.

Gerade bei online- oder cloud-basierten Diensten ist besonderen Wert auf Datenschutz und Schutz vor Internetkriminalität zu legen.

Bei all den Möglichkeiten zur automatisierten Erfassung des Zustandes einer Talsperre von der Ferne aus, ist die regelmäßige visuelle Beurteilung durch einen höheren MitarbeiterInnenstab wichtig. [94]

Literaturverzeichnis

- [1] Strobl, Theodor; Zunic Franz (2006): Wasserbau - Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen; Springer Verlag, Berlin;
- [2] Vischer, Daniel; Huber Andreas (2002): Wasserbau; 6. Auflage; Springer Verlag, Berlin;
- [3] Patt, Heinz; Gonsowski, Peter (2010): Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen; 7. Auflage; Springer Verlag, Berlin;
- [4] Striegler, Werner (1998): Dammbau - in Theorie und Praxis; 2. Auflage; Verlag für Bauwesen, Berlin;
- [5] Kolymbas, Dimitrios (1998): Geotechnik - Bodenmechanik und Grundbau; Springer Verlag, Berlin;
- [6] Kossoff, D.; Dubbin, W.E; et al. (2014): Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation; In: Applied Geochemistry, p. 229-245; Volume 51; 2015;
- [7] <https://www.goldfm.co.nz/general/the-difference-between-tailings-dams-and-impoundments>; Abruf: 27.8.2018;
- [8] <https://www.nps.gov/articles/aps-v13-i2-c8.htm>; Abruf: 27.8.2018;
- [9] <https://www.australiangeographic.com.au/travel/destinations/2014/01/gallery-roxby-downs/>; Abruf: 27.8.2018;

- [10] Panduri, Rocco; Bundesamt für Energie, Bern (2019): Bedeutung der Talsperrensicherheit, Aktuelle Praxis und Ausblick aus Schweizer Sicht; In: Talsperrensicherheit, Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen; ÖWAV Wien, Innsbruck;
- [11] Berger, Michael (2018): Dissertation: Sicherheit von Staudämmen - Probabilistische und deterministische Sicherheitskonzepte für Dammbauwerke; TU Wien;
- [12] Kolymbas, Dimitrios (2018): Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau; 5. Auflage; Springer Verlag, Berlin;
- [13] Kjærnsli, Bjørn; et al. (1992): Rockfill Dams - Design and Construction; In: Hydropower Development; Volume No 10;
- [14] Bauer, Andreas (2016): Aspekte zur Sicherheitsbeurteilung eines Staudammes mit und ohne Sickerwassermessung; Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft; Nr. 135 / 2016;
- [15] <https://www.naue.com/de/anwendungen/wasserbau/staugewaesser/>; Abruf: 19.12.2020;
- [16] Witt, Karl Josef (2017): Grundbau-Taschenbuch - Teil 2: Geotechnische Verfahren; 8. Auflage; Ernst & Sohn Verlag, Berlin;
- [17] Werhli, E. (2013): Geosynthetische Tondichtungsbahnen; Bauen mit Geokunststoffen, Tief.Bau.Tex.2; HTW Chur;
- [18] Fleischer, P., Heibaum, M. (2012): Geosynthetische Tondichtungsbahnen („Bentonitmatten“) für Wasserbauwerke; In: Mitteilungshefte Gruppe Geotechnik Graz 46; Seiten 257-272; Technische Universität Graz;
- [19] <https://www.naue.com/de/geokunststoffe/tondichtungsbahn-bentofix/tondichtungsbahn-bentofix-x/>; Abruf: 19.12.2020;
- [20] https://nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=107007&org=NSF; Abruf: 24.08.2018;

- [21] Saberi, Omid (2016): Embankment dam failure outflow hydrograph development; Doctoral Thesis; TU Graz;
- [22] Staubeckenkommission (2009): Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien;
- [23] BAW Merkblatt (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB); Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Ausgabe 2013; Karlsruhe;
- [24] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen - EAU 2012 (2012); 11. Auflage; Ernst & Sohn Verlag, Berlin;
- [25] Kœlewijn, André; Förster, Ulrich (2016): Ausschluss von mit Piping verbundenen Risiken mit Hilfe wasserstandsunabhängiger Maßnahmen; In: 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016 „Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“; Seiten 89-96; TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik;
- [26] Foster, M.; Fell R.; Spannagle M. (2000): The statistics of embankment dam failures and accidents; In: Can. Geotech J., p. 1000-1024; Vol. 37, 2000, Canada;
- [27] Möller, Gerd (2016): Geotechnik - Grundbau; 3. Auflage; Ernst & Sohn Verlag, Berlin;
- [28] Obernhuber, P. (2001): Erdbebenberechnung von Talsperren - Band 1-6; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft; Österreichische Staubeckenkommission;
- [29] Witt, Karl Josef (2002): Stochastische Prozesse in der Geotechnik - Eine Einführung in die Thematik; Geotechnik im Bauwesen; Mitteilung Nr. 1; RWTH Aachen;
- [30] Lammerer, Wolfgang (2014): Masterarbeit: Sicherheit und Versagensmechanismen von Talsperren; TU Graz;

- [31] ICOLD Bulletin 121 (2001): Tailings dams risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences; Paris;
- [32] Rogers, David; Watkins, Conor; Overview and History of the Taum Sauk Pumped Storage Project; Missouri University of Science and Technology;
- [33] Watkins, C.M.; Rogers, J.D. (2008): Overview of the Taum Sauk pumped storage power plant upper reservoir failure, Reynolds County, MO; Presented at the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, p. 12;
- [34] <https://www.facte.eu/energiya-vody/gidroakkumuliruyushchaya-elektrostantsiya-taum-sauk>; Abruf: 02.08.2018;
- [35] <https://interestingengineering.com/hydroelectric-power-station-failed-wiped-state-park>; Abruf: 02.8.2018;
- [36] Graham, Wayne J., P.E. (2008): The Teton Dam failure - An effective Warning and Evacuation; U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation; Denver;
- [37] Snorteland, N.; et al. (2009): Fontenelle Dam, Rire Dam, and Teton Dam - An Examination of the Influence of Organizational Culture on Decision-Making; In: Annual Conference Proceedings - Association of State Dam Safety Officials, p. 31-60; 2009;
- [38] Association of State Dam Safety Officials (2021); Lexington; <https://damfailures.org/case-study/teton-dam-idaho-1976/>; Abruf: 10.02.2021;
- [39] Seed, H.B.; Duncan J.M. (1987): The Failure of Teton Dam; In: Engineering Geology, 24 (1987); Page 173-205; Elsevier Science Publishers B.V.; Amsterdam;
- [40] <https://www.usbr.gov/>; Abruf: 30.05.2021;
- [41] Roc Doc Travel (2015); <https://www.rocdottravel.com/coming-soon-teton-dam>; Abruf: 21.02.2021;

- [42] Hoeg, Kaare; et al. (2012): BC Hydro, WAC Bennett Dam, Expert Engineering Panel, Report-Volume 1; Report No. 3405;
- [43] <https://www.dawsoncreekmirror.ca/regional-news/prrd/plan-to-drain-more-williston-reservoir-water-scrapped-3494118>; Abruf: 09.04.2021;
- [44] Stewart, R.A.; et al.: WAC Bennett Dam - the characterisation of a chrest sinkhole;
- [45] Czerny, Helmut; et al. (2021): Erfahrungen mit dem Sicherheitskonzept der Überprüfungen von Stauanlagen in Österreich; In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft (2021);
- [46] Mullens, Anne (1999): The Sixty-Storey Crisis: The Story behind BC Hydro's worst nightmare: The discovery of a hole in its massive Bennett Dam and the behind-the-scenes efforts to ensure the unthinkable - a breach in the dam - would never happen; In: BC Business magazine, January 1999;
- [47] ATCOLD - Österreichisches Nationalkomitee für Talsperren (2021); Graz; <https://atcold.at/talsperren/>; Abruf: 09.02.2021;
- [48] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2020); Wien; <https://www.bmlrt.gv.at/wasser/nutzung-wasser/stauanlagen-talsperren/stauanlagen.html>; Abruf: 05.08.2020;
- [49] Wasserrechtsgesetz (1959), in der geltenden Fassung; <http://www.ris.bka.gv.at>
- [50] Staubeckenkommissionsverordnung (1985), in der geltenden Fassung; <http://www.ris.bka.gv.at>
- [51] Staubeckenkommission (2000): Grundsatzbeschluss; 66. Sitzung v. 30.11.2000; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;

- [52] Zenz, Gerald (2016): Project Planning and Supervision of Hydraulic Structures, WS 2015/16; Vorlesungs-Präsentation; TU Graz;
- [53] Staubeckenkommission (1992): Grundsatzbeschluss; 60. Sitzung v. 12.1992; Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus;
- [54] Staubeckenkommission (1998): Anforderung an den Talsperrenverantwortlichen, Beschluss; 24.06.1998; Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus;
- [55] Knoblauch, Helmut; Oberhuber, Pius; Melblinger, Rudolf: Das Ausbildungskonzept für den österreichischen Talsperrenfachmann; Graz, Wien;
- [56] Zenz, Gerald; Czerny, Helmut (2019): Sicherheitsbeurteilung von Talsperren; In: Talsperrensicherheit, Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen; ÖWAV Wien, Innsbruck;
- [57] Staubeckenkommission (2009): Handbuch - Betrieb und Überwachung von „kleinen Stauanlagen“ mit länger dauernden Staubebelastungen; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;
- [58] Staubeckenkommission (2009): Mindestanforderungen an den Stauanlagenverantwortlichen von „Kleinen Stauanlagen“; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;
- [59] ATCOLD - Österreichisches Nationalkomitee für Talsperren (2019): Sperrenwärter - Grundkurs - Theorie, 24. bis 26. April 2019; Technische Universität Graz;
- [60] ATCOLD - Österreichisches Nationalkomitee für Talsperren; ÖWAV - Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2006): Ausbildungskurs zum „Sperrenwärter“ - Praxiskurs, 10. bis 12. Oktober 2006; Mayrhofen im Zillertal;
- [61] Staubeckenkommission; Melbinger, Rudolf (ohne Jahr): 12 Thesen zur Sicherheit der großen Talsperren Österreichs; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;

- [62] Overhoff, Gregor; Bayerisches Umweltministerium (2019): Sicherheitsüberprüfung von Talsperren, Erfahrungen in Bayern; In: Talsperrensicherheit, Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen; ÖWAV Wien, Innsbruck;
- [63] Overhoff, Gregor; Bieberstein, Andreas; Bettzieche, Volker (2004): Erfahrungen und Hinweise zum Sicherheitsbericht und zur vertieften Überprüfung von Talsperren; In: Sonderdruck aus Wasserwirtschaft 94 (2004); Vieweg Verlag, Wiesbaden;
- [64] DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall; <https://de.dwa.de/de/regelwerksankuendigungen-volltext/leitfaden-stauanlagen.html>; Abruf: 01.09.2020;
- [65] Czerny, Helmut (2016): Grenzwerte in der Talsperrenüberwachung: Lebenszeichen oder Alarmkriterien?; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Staubeckenkommission; Vortrag zum ATCOLD-Kolloquium, TU-Graz;
- [66] Netzer, Elmar (2016): Grenzwerte bei automatisierten Messwerten in der Talsperrenüberwachung bei den Illwerken; unveröffentlicht; Illwerke VKW; Vortrag zum ATCOLD-Kolloquium, TU-Graz;
- [67] Mauney, Lee: Lesson learned: Early Warning Systems can provide real-time information on the health of a dam, conditions during incidents, and advanced warning to evacuate ahead of dam failure flooding - Description and Background; Association of State Dam Safety Officials; Lexington; <https://damfailures.org/lessons-learned/early-warning-systems/>; Abruf: 27.02.2021;
- [68] Störfallinformationsverordnung (1994), in der geltenden Fassung; <http://www.ris.bka.gv.at>
- [69] Bundeswarnzentrale; <https://www.bmi.gv.at/204/skkm/Bundeswarnzentrale.aspx>; Abruf: 01.03.2021;
- [70] Schweizerisches Talsperrenkomitee (2005): Messanlagen zur Talsper-

- renüberwachung; Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung; Teil 3: Messgeräte/Messmethoden;
- [71] <https://de.wikipedia.org/wiki/Thomsonwehr>; Abruf: 27.7.2018;
- [72] Bollrich, Gerhard; Technische Hydromechanik 1 - Grundlagen; 6. Auflage; Verlag Bauwesen, Huss; Berlin;
- [73] <https://de.wikipedia.org/wiki/Füllstandmessung>;
Abruf: 27.7.2018;
- [74] <http://www.geodz.com/deu/d/Venturi-Rohr>;<https://www.motor-talk.de/bilder/ladedruckanzeige-g997668/piezo-pitotrohr-i202848583.html>; Abruf: 29.7.2018;
- [75] <https://www.anderson-negele.com/de/magnetisch-induktive-durchflussmessung/>; Abruf: 29.7.2018;
- [76] <https://www.industr.com/de/fliessraten-zuverlaessig-messen-2317245>; Abruf: 29.7.2018;
- [77] Dornstädter, Jürgen (2015): Temperaturmessung im Wasserbau - Sichere Überwachung von Dämmen und Deichen seit mehr als 60 Jahren; In: 38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015 „Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer“; TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik;
- [78] Dornstädter, Jürgen; Heinemann, Barbara (2012): Temperature as Tracer for In Situ Detection of Internal Erosion; In: Société Hydrotechnique de France; International Conference on Scour and Erosion, ICSE6; Seiten 1369-1375; Paris;
- [79] Dornstädter, J., Fabritius, A. (2017): Online Alarming for Internal Erosion; In: 25th Meeting of the European Working Group on Internal Erosion; Seiten 160-167; Delft;
- [80] Aufleger, Markus; et al. (2007): Innovative Dam Monitoring Tools Based

- on Distributed Temperature Measurement; In: Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 1, No. 1, 2007, p. 29-37;
- [81] Aufleger, Markus; et al. (2007): 10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau; In: WasserWirtschaft; 10/2007; Springer Verlag;
- [82] Goltz, Matthias (2012): A contribution to monitoring of embankment dams by means of distributed fibre optic measurements; Dissertation, Arbeitsbereich Wasserbau, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck;
- [83] Perzlmaier, Sebastian (2007): Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen; Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München;
- [84] Kofoed, V.; et al. (2014): Investigating seepage at the Bartley dam, UK; In: Hydropower & Dams; Issue Four, 2014;
- [85] Willowstick Technologies (2016): White Paper; Willowstick Technologies, LLC White Paper: A Patented Non-invasive Process To Accurately Model Preferential Groundwater Flow in Three Dimensions;
- [86] Kraker; Paill (1991): Physik, Band 3 - Elektrizitätslehre; E.Dorner Verlag, Wien;
- [87] Willowstick Technologies (2021): www.willowstick.com/mapsmodels; Abruf: 10.01.2021;
- [88] www.willowstick.com/mapsmodels; Abruf: 10.01.2021;
- [89] Backhaus, Klaus; et al. (2015): Multivariate Analysemethoden; 14. Auflage; Springer Verlag, Berlin;
- [90] Hartung, Joachim; et al. (2005): Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; Oldenbourg Verlag, München;
- [91] Weber, Felix (2020): Künstliche Intelligenz für Business Analytics - Algo-

rithmen, Plattformen und Anwendungsszenarien; Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden;

- [92] Aufleger, M. (2018): Talsperrensicherheit - Eine Aufgabe für Generationen; In: Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, Seiten 377-387; Ausgabe 70, 2018;

- [93] Netzer, Elmar (2019): Sperrenverhalten durch veränderte Anforderungen des Strommarktes; In: Talsperrensicherheit, Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen; ÖWAV Wien, Innsbruck;

- [94] Staubeckenkommission (2011): Leitfaden zur Volage eines Projektes für die Prüfung in der Staubeckenkommission; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;

Abbildungsverzeichnis

2.1	Talsperrentypen (vgl.[2])	3
2.2	Wahl des Talsperrentyps (vgl.[2])	4
2.3	Gewichtsmauer - a) Querschnitt, b) Längsschnitt (teilweise modifiziert nach [3])	5
2.4	Bogenmauer - a) Querschnitt, b) Längsschnitt, c) Horizontalschnitt (teilweise modifiziert nach [3])	6
2.5	Erddamm - a) homogen mit wasserseitigem Erosionsschutz, b) inhomogen mit wasserseitiger Dichtungshaut, c) inhomogen mit Kern aus bindigem Lockergestein [3]	8
2.6	Gleitflächen bzw. Gleitkreise bei Schüttdämmen [1]	9
2.7	Tailings-Dämme; https://www.goldfm.co.nz/general/the-difference-between-tailings-dams-and-impoundments ; Abruf: 27.8.2018	10
2.8	Verschiedene Herstellunsweisen (Typen) von Tailing-Dämmen; https://www.nps.gov/articles/aps-v13-i2-c8.htm ; Abruf: 27.8.2018	11
2.9	Abfälle einer Uran-Mine, Olympic Dam, Australien; https://www.australiangeographic.com.au/travel/destinations/2014/01/gallery-roxby-downs/ ; Abruf: 27.8.2018	11
2.10	Hochwasserentlastung (teilweise modifiziert nach [3])	13
2.11	Nebenanlagen (teilweise modifiziert nach [3])	14
2.12	Umleitstollen mit Fangdämmen (teilweise modifiziert nach [3])	14
3.1	Sickerströmung nach Darcy (teilweise modifiziert nach [11])	16
3.2	Potentialnetz eines Schüttdamms (teilweise modifiziert nach [13])	17
3.3	Potentialnetz eines Schüttdamms am unterwasserseitigen Dammfuß (teilweise modifiziert nach [13])	18

3.4	Dammgründungen - a) direkter Anschluss an dichten Untergrund, b) Dichtungsschleier (ein- od. mehrreihiger Injektionsschirm), c) Schlitzwand, d) Dichtungsteppich, e) Dichtungsschleier mit Druckbank, f) Dichtungsteppich mit luftseitigen Entwässerungsanlagen, 1 Druckbank, 2 Dichtungswand [4]	26
3.5	Dichtungsbahnen als Außendichtung (Fa. Naue (Deutschland)); https://www.naue.com/de/anwendungen/wasserbau/staugewaesser/ ; Abruf: 19.12.2020	27
3.6	Verschiedene GTD-Bahnen (Fa. Naue (Deutschland)); https://www.naue.com/de/geokunststoffe/tondichtungsbahn-bentofix/tondichtungsbahn-bentofix-x/ ; Abruf: 19.12.2020	29
4.1	Geotechnisches Versagen; https://nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=107007&org=NSF ; Abruf: 24.08.2018	31
4.2	Überströmen; https://nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=107007&org=NSF ; Abruf: 24.08.2018	31
4.3	Suffosion: a) innere Suffosion, b) äußere Suffosion, c) Kontaktsuffosion [4]	33
4.4	Erosion; https://nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=107007&org=NSF ; Abruf: 24.08.2018	34
4.5	Verhinderung von Piping durch Drainage (vgl.[25])	36
4.6	Verhinderung von Piping durch ein Geotextil (vgl.[25])	36
4.7	Verhinderung von Piping durch eine Grobsandbarriere (vgl.[25])	37
4.8	Erosion - a) äußere Erosion, b) innere Erosion, c) Kontakterosion [4]	37
4.9	Suffosion in einem Homogendamm (links); Erosionsröhre im Dichtkern und Versagen zufolge Ausspülen des luftseitigen Dammkörpers (rechts) [11]	38
4.10	Innere Erosion (Piping) in einem Homogendamm (links); Böschungsbruch infolge gesteigerter Durchlässigkeit innerhalb des Schüttkörpers (rechts) [11]	38
4.11	Innere Erosion (Piping) im Untergrund [11]	38
4.12	Kontakterosion Dichtkern/Filter mit Ausbildung einer Stömungsröhre [11]	39
4.13	Kontakterosion Dichtkern/Untergrund (Aufstandsfläche): Austragung von Feinteilen des Kerns und Bildung einer Erosionsröhre [11]	39
4.14	Risserosion im Dichtkern mit anschließender Bildung einer Erosionsröhre [11]	39
4.15	Entwicklungsstadien von Piping [26]	40

4.16	Entwicklungsstadien von Piping anhand einer Spundwand dargestellt [27]	40
4.17	Weitere Versagensursachen; https://nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=107007&org=NSF ; Abruf: 24.08.2018	41
5.1	Vergleich einer probabilistischen (unten) bzw. einer stochastischen (oben) Standsicherheitsbetrachtung (Kohäsion c , Porenwasserdruck p_w) [29]	42
5.2	Ereignisbaumanalyse für Staudamm-Schadensfall [29]	44
5.3	Einteilung der Dammquerschnitte nach Foster [26]	46
5.4	Versagen während des Betriebes [26]	47
5.5	Versagensstatistik der Dammtypen [26]	48
5.6	Schadensursachen [30]	51
5.7	Bruchursachen [30]	51
5.8	Schadensursachen je nach Herstellungsjahr [30]	52
5.9	Bruchursachen je nach Herstellungsjahr [30]	53
5.10	Schadensursachen je nach Bauwerkshöhe [30]	54
5.11	Vorfälle je nach Dammtyp [31]	56
6.1	Taum Sauk Damm – alter Damm [32]	58
6.2	Querschnitt des alten Taum Sauk Damms [32]	59
6.3	Sickerwasser – auffallende Zunahme ab 1999 [32]	60
6.4	Taum Sauk Damm – Bruch des alten Steinschüttdamms; https://www.facte.eu/energiya-vody/gidroakkumuliruyushchaya-elektrostantsiya-taum-sauk ; Abruf: 02.08.2018	61
6.5	blau u. orange: überströmte Bereiche; rot: Dammbruch [33]	62
6.6	schwarz: Verlauf d. Brüstungshöhe; blau: Wasserspiegellhöhe kurz vor Dammversagen; rote Punkte: Bereich des Dammbruchs [33]	62
6.7	Unterspülung des Fundaments der Betonmauer [33]	63
6.8	Erosion der Dammkrone und Unterspülung v. Fundament [33]	63
6.9	Rekonstruktion des Ablaufs vom Dammversagen [33]	64
6.10	Überschwemmtes Gebiet (gelb strichliert) [32]	65
6.11	Taum Sauk Damm – neuer Damm; https://interestingengineering.com/hydroelectric-power-station-failed-wiped-state-park ; Abruf: 02.8.2018	66
6.12	Blick vom linken zum rechten Widerlager während des Baus [38]	67
6.13	Teton Damm [37]	68
6.14	Vermutlicher Pfad des Sickerwassers zu Beginn der Leckage [39]	69

6.15	Längsschnitt des Damms - vor (oben) und nach (unten) dem Bruch [39]	70
6.16	Teton Damm - Ablauf des Dammversagens [38]	71
6.17	Überschwemmtes Gebiet (grau) (teilweise modifiziert nach [36]) . . .	72
6.18	Dammquerschnitt	73
6.19	Nachträgliche Abtragung zu Untersuchungszwecken [41]	73
6.20	rechtes Widerlager (nach dem Versagen)	74
6.21	Sickerung durch nicht verschlossene Fugen [39]	75
6.22	Bennett Damm; https://www.dawsoncreekmirror.ca/regional-news/prrd/plan-to-drain-more-williston-reservoir-water-scrapped-3494118 ; Abruf: 09.04.2021	77
6.23	Bennett Damm: Querschnitt [44]	78
6.24	Bennett Damm: Grundriss [44]	78
6.25	Bennett Damm: entdeckte Stahlrohre im entstandenen Hohlraum [44]	79
6.26	Bennett Damm: Sinkhole [46]	80
6.27	Bennett Damm: Anordnung der verschiedenen Aufschlussmethoden bei der Doline (Sinkhole) Nr. 1 [44]	81
6.28	Bennett Damm: Ergebnis der Seismischen Tomographie bei der Do- line (Sinkhole) Nr. 1 [44]	82
7.1	3-Säulen-Modell [45]	84
7.2	Für den Nachweis der Hochwassersicherheit maßgebende Koten eines Staudamms mit Kerndichtung [22]	86
7.3	online - Überblick über die Talsperren in Österreich [47]	87
7.4	Verantwortlichkeit und Aufgaben der Eigentümer sowie Schnittstellen zu den Behörden [52]	89
7.5	Karikatur zu den Anforderungen eines Talsperrenverantwortlichen [55]	90
7.6	Zuordnung zu den Gefährdungsklassen „gering“ oder „erheblich“ [58]	93
7.7	Erforderliches Profil von Stauanlagenverantwortlichen [56]	93
7.8	Tägliche Festlegung der Grenzwerte um 10:00 Uhr [66]	102
7.9	Alarmsignale der Bundeswarnzentrale [69]	104
8.1	Volumetrische Messung bei verschiedenen Sickerwassermengen [70] . .	106
8.2	Durchflussmessung: Thomsonwehr; https://de.wikipedia.org/wiki/Thomsonwehr ; Abruf: 27.7.2018	107
8.3	Querschnitte von verschiedenen Messwehren [72]	108
8.4	Pegelmessung: Ultraschall (links) und Lattenpegel (rechts); https://de.wikipedia.org/wiki/Füllstandmessung ; Abruf: 27.7.2018	109

8.5	pneumatische Pegelmessung [70]	109
8.6	Messung von Druckdifferenzen; http://www.geodz.com/deu/d/Venturi-Rohr ; https://www.motor-talk.de/bilder/ladedruckanzeige-g997668/piezo-pitotrohr-i202848583.html ; Abruf: 29.7.2018	110
8.7	MID-Durchflussmessung; https://www.anderson-negele.com/de/magnetisch-induktive-durchflussmessung/ ; Abruf: 29.7.2018	111
8.8	Ultraschall-Durchflussmessung; https://www.industr.com/de/flie SSRaten-zuverlaessig-messen-2317245 ; Abruf: 29.7.2018	111
8.9	Einrammen der Temperaturmessgestänge [78]	113
8.10	Schema einer Temperatursondierung (teilweise modifiziert nach [79])	114
8.11	Temperaturverteilung in und unterhalb eines Staudamms [77]	114
8.12	Temperaturverteilung beim Aufheizverfahren [77]	117
8.13	Verlegung der Glasfaserkabel (Isarkanal) [81]	118
8.14	Verlegung des Kabels auf einer Betonoberflächendichtung (Merowe Dam am Nil, Sudan) [81]	119
8.15	Verlauf des Kabels entlang der Dichtungsfuge (Midlands Dam, Mauritius) [81]	120
8.16	Anordnung der Glasfaserkabel [79]	121
8.17	Temperaturverteilung in den einzelnen Bohrungen, gemessen mittels Glasfaserkabeln [77]	122
8.18	Prinzip der Erzeugung des Magnetfeldes (teilweise modifiziert nach [85])	123
8.19	Anordnung der Messeinrichtungen für das Verfahren des Magnetometrischen Widerstandes am Beispiel des Bartley Damms (UK). (teilweise modifiziert nach [84])	124
8.20	2D-Bild zur Verteilung des elektrischen Stroms 20 m unterhalb der Dammkrone am Beispiel des Bartley Damms (UK). (teilweise modifiziert nach [84])	125
8.21	ECF Modell; www.willowstick.com/mapsmodels ; Abruf: 10.01.2021	126
8.22	ECD Modell; www.willowstick.com/mapsmodels ; Abruf: 10.01.2021	127
9.1	Lineare Regressionsfunktion [89]	130
9.2	Streudiagramm mit Regressionsgerade [89]	131
9.3	Residuen [89]	132
9.4	Vergleich einer a) Linearen Regression mit einer b) Nichtlinearen Regression [89]	135
9.5	Arten des Maschinellen Lernens [91]	138
9.6	Neuronales Netz mit einer versteckten Ebene [91]	140

9.7	Beispiel eines Neuronalen Netzes [91]	140
10.1	Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Alterung [56]	142
10.2	Geänderte Speicherbewirtschaftung des Speichers Vermunt [93]	143
A.1	Versagen und Unfälle von luftseitigem Gleiten [26]	r
A.2	Versagenshäufigkeit infolge Gleiten [26]	s
A.3	Versagen und Unfälle von wasserseitigem Gleiten [26]	s
A.4	Versagen und Unfälle von wasserseitigem Gleiten [26]	t
A.5	Versagenshäufigkeit infolge Piping durch den Dammkörper [26]	t
A.6	Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament [26]	u
A.7	Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament bei vorhandenen Filtern [26]	u
A.8	Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament, je nach Abdichtungskategorie [26]	v
A.9	Prüfbericht [63]	w
A.10	Einzelberichte [63]	x
A.11	Störfallinformationsblatt für das Kraftwerk Kaunertal der TIWAG; https://www.tiwag.at/fileadmin/user_upload/bilder/kraftwerke/bestehende_kraftwerke/Notfallinformation_zu_KWs/kw_kaunertal_stoerfallinformationsblatt_2016.pdf ; Abruf: 01.03.2021	y

Tabellenverzeichnis

3.1	Übliche Werte für die Durchlässigkeit k [12]	16
3.2	Filterregeln nach Kjærnsli [13]	23
3.3	Filterregeln nach Sherard and Dunnigan [13]	24
5.1	Versagen vor und nach 1950 [26]	48
6.1	Zeitlicher Ablauf am Tag des Dammbbruchs [36]	69
7.1	verschiedene ATCOLD Ausbildungskurse und deren Dauer [55]	94
7.2	Ausbildungsinhalte von Sperrenwärter - Kursen	95

A Anhang

A.1 Tabellen von Foster

Detaillierte Aufstellung nach Foster. [26]

A.1.1 Gleiten an der Luftseite

Category	No. of cases	Average frequency	Average annual frequency	
			First 5 years	After 5 years
Failures	6	5.4×10^{-4}	4×10^{-5}	1.5×10^{-5}
Incidents (failures and accidents)	59	5.3×10^{-3}	5.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}
Incidents in operation	50	4.4×10^{-3}	4.4×10^{-4}	1.0×10^{-4}

Abbildung A.1: Versagen und Unfälle von luftseitigem Gleiten [26]

Das Gleiten an der Luftseite wurde unterteilt in Sloughing (progressives Gleiten infolge Versickerung durch die Böschung), Embankment (Gleitfläche durchläuft den Dammkörper), Embankment and Foundation (Gleitfläche durchläuft den Dammkörper und die Böschung)

Zoning type	Sloughing	Embankment	Embankment and foundation	Unknown
Homogeneous earthfill	5 (1)	12	6 (1)	3 (2)
Earthfill with filter	1	4	4	0
Earthfill with rock toe	1	3	0	0
Zoned earthfill	1	2	3	0
Zoned earthfill and rockfill	1 (1)	0	0	0
Central core earth and rockfill	1 (1)	0	2	0
Concrete face earthfill	0	0	0	0
Concrete face rockfill	0	0	0	0
Puddle core earthfill	0	1	3	0
Earthfill with concrete corewall	1	4	0	0
Rockfill with concrete corewall	0	0	0	0
Hydraulic fill	3 (1)	2	0	1 (1)
Other	0	1	0	1 (1)
Unknown	0	5 (1)	0	2 (1)
Total	14 (4)	34 (1)	18 (1)	7 (5)

Note: Values in parentheses are the number of failure cases.

Abbildung A.2: Versagenshäufigkeit infolge Gleiten [26]

A.1.2 Gleiten an der Wasserseite

Das Gleiten entlang der Wasserseite wurde analog zum luftseitigen Gleiten kategorisiert. Es trat jedoch nur ein Versagensfall auf:

Category	No. of cases	Average frequency	Average annual probability	
			First 5 years	After 5 years
Failures	1	9×10^{-5}	3×10^{-6} all years	
Incidents (failures and accidents)	47	4.2×10^{-3}	4.1×10^{-4}	1.0×10^{-4}

Abbildung A.3: Versagen und Unfälle von wasserseitigem Gleiten [26]

Type of slide	No. of failures	No. of accidents
Sloughing	0	1
Through embankment only	0	26
Through embankment and foundation	0	17
Unknown	1	2
Total	1	46

Abbildung A.4: Versagen und Unfälle von wasserseitigem Gleiten [26]

A.1.3 Piping durch den Dammkörper

Table 5. Average frequency of failure due to piping through the embankment by dam zoning categories for large dams up to 1986.

Zoning category	No. of failures	No. of accidents	Average frequency of failure ($\times 10^{-3}$)	Average frequency of accident ($\times 10^{-3}$)	Average annual frequency of failure ($\times 10^{-6}$)*	
					First 5 years of operation	After 5 years of operation
Homogeneous earthfill	14	9	16.0	9.2	2086	188
Earthfill with filter	2	1	1.5	0.6	189	37
Earthfill with rock toe	5	5	8.9	8.0	1160	158
Zoned earthfill	4	9	1.2	2.4	158	25
Zoned earth and rockfill	1	7	1.2	7.3	152	24
Central core earth and rockfill	0 (1)	19	(<1.1) [†]	22.0	(<143) [†]	(<34) [†]
Concrete (or other) face earthfill	2	1	5.3	2.4	691	75
Concrete (or other) face rockfill	0	1 (11) [‡]	(<1) [§]	3.5	(<130) [§]	(<17) [§]
Puddle core earthfill	4	10	9.3	20.7	1205	38
Concrete corewall, earthfill	0	2	(<1) [§]	8.1	(<130) [§]	(<8) [§]
Concrete corewall, rockfill	0	2	(<1) [§]	21.6	(<130) [§]	(<13) [§]
Hydraulic fill	0	3	(<1) [§]	32.4	(<130) [§]	(<5) [§]
Zoning type unknown	7	6				
All dams	39	75	3.5	6.7	453	56

*The percentages of failures by piping through the embankment occurring at the different times after construction are as follows: 49% during first filling, 16% during the first 5 years operation, and 35% after 5 years operation. Calculations of annual frequencies of failure are made as follows: annual frequency of failure (all years) = (average frequency of failure)/(average age); annual frequency of failure (first 5 years) = (average frequency of failure)0.65/5; and annual frequency of failure (after 5 years) = (average frequency of failure)0.35/(average age - 5).

[†]Upper bound value of the average frequency of failure determined by assuming one dam failure.

[‡]Eleven accidents to concrete face rockfill dams involving leakages through the concrete face (not included in % statistics).

[§]Assume average frequency of failure of $< 1 \times 10^{-3}$.

Abbildung A.5: Versagenshäufigkeit infolge Piping durch den Dammkörper [26]

A.1.4 Piping durch das Fundament

Zoning category	No. of failures	No. of accidents	Average frequency of failure ($\times 10^{-3}$)	Average frequency of accident ($\times 10^{-3}$)	Average annual frequency of failure ($\times 10^{-3}$)	
					First 5 years of operation	After 5 years of operation
Homogeneous earthfill	2	9	3.0	11.2	447	25
Earthfill with filter	0	5		3.9		
Earthfill with rock toe	3	2	7.0	3.9	1044	88
Zoned earthfill	1	14	0.4	4.6	59	6
Zoned earth and rockfill	0	6		7.6		
Central core earth and rockfill	0	7		9.8		
Concrete (or other) face earthfill	3	2	10.4	5.8	1553	105
Concrete (or other) face rockfill	0	0				
Puddle core earthfill	0	0				
Concrete corewall, earthfill	2	1	11.8	4.9	1768	68
Concrete corewall, rockfill	0	0				
Hydraulic fill	1	7	15.7	91.8	2358	61
Unknown	7	17				
All dams	19	70	1.7	6.2	255	19

Note: The percentage of failures by piping through the embankment occurring at the different times after construction are as follows: 25% during first filling, 50% during first 5 years of operation, and 25% after 5 year of operation. Calculations of annual frequencies of failure are made as follows: annual frequency of failure (all years) = (average frequency of failure)/(average age), annual frequency of failure (first 5 years) = (average frequency of failure)0.75/5, and annual frequency of failure (after 5 years) = (average frequency of failure)0.25/(average age - 5).

Abbildung A.6: Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament [26]

Presence of foundation filter	No. of failures	No. of accidents
No foundation filter	13	33
One foundation filter	1	23
Two foundation filters	0	2
Unknown	7	27
Total	21	85

Abbildung A.7: Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament bei vorhandenen Filtern [26]

Type of piping	No. of failures		No. of accidents	
	Partially penetrating cutoff	Fully penetrating cutoff	Partially penetrating cutoff	Fully penetrating cutoff
Piping through soil foundation	9	0	23	5
Piping of foundation soil into rock	0	0	1	5
Piping through rock foundation	1	4	0	7
Foundation sand boils	0	0	14	5
Piping of foundation soil into drainage systems	0	0	7	2
Piping in spillway foundation	0	0	5	1
Unknown	1	0	0	0
Total	11	4	50	25
% of piping incidents	73	27	67	33
% of population	15	85	15	85

Abbildung A.8: Versagenshäufigkeit infolge Piping durch das Fundament, je nach Abdichtungskategorie [26]

A.2 Gliederungsbeispiel von Overhoff

Gliederungsbeispiel von Overhoff zur „Vertieften Überprüfung (VÜ)“ von Talsperren in Bayern.

A.2.1 Prüfbericht

Teil I – Prüfbericht	
Allgemeines	
	Grundlagen Umfang der Vertieften Überprüfung Durchführung der VÜ – vorangegangene Untersuchungen
Ergebnis der Vertieften Überprüfung	
A.	Hydrologische Nachweise Hydrologisches Gutachten Bemessungshochwasserereignisse Abflussganglinien (ausgewählte Ereignisse)
B.	Hydrotechnische Nachweise Bemessungsgrundlagen Bemessung des HW-Rückhalteraums Entnahme- und Entlastungsanlagen Freibord ... Zusammenfassende Beurteilung
C.	Untergrund
D.	Bauwerke Zustand und Sicherheit des Absperrbauwerks Entwicklung der Messgrößen-Indikatoren ... Sonstige Einzelbauwerke (Massivbau) Prüfungsergebnis und Beurteilung Dokumentation des Zustands
E.	Betriebseinrichtungen ... Stahlwasserbau Elektrotechnik
F.	Überwachung ... Betriebliche Überwachung Bauwerksüberwachung Zusammenfassende Bewertung
G.	Zusammenfassung und abschließende Beurteilung mit Dringlichkeitsliste für erforderliche Maßnahmen

Abbildung A.9: Prüfbericht [63]

A.2.2 Einzelberichte

Teil II – Einzelberichte	
<p>A. Hydrologische Nachweise</p> <p>1 Hydrologisches Gutachten (Niederschlag)</p> <p>2 Kennwerte der Bemessungshochwasserereignisse</p> <p>3 Zuflussganglinien (ausgewählter Ereignisse als Tabellen und Grafiken)</p> <p>B. Hydrotechnische Nachweise</p> <p>1 Allgemeines</p> <p>2 Bemessungsgrundlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hydrologische Grundlagen - Speicherinhalt - Abfluss aus dem Speicher - Eisbildung - Windverhältnisse <p>3 Bemessung eines HW-Rückhalteriums</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allgemeines - Retentionsgleichung - Gewöhnlicher HW-Rückhalteraum - Außergewöhnlicher HW-Rückhalteraum <p>4 Entnahme- und Entlastungsanlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bemessungsgrößen - Nachweisverfahren - Nachweis der Leistungsfähigkeit <p>5 Freibord</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ausgangsgrößen - Berechnungsverfahren - Nachweis des Freibords <p>6 Tosbecken</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ausgangsgrößen und örtliche Verhältnisse - Nachweis des Tosbeckens <p>7 Unterwassergerinne</p> <p>8 Beurteilung der hydrotechnischen Nachweise</p> <p>9 Zusammenfassende Beurteilung</p> <p>C. Untergrund</p> <p>1 Baugrund Boden: zeitliche Veränderungen von</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wasserdurchlässigkeit - Erosions- und Suffosionsbeständigkeit - Dichtungen - Verformungsverhalten und Festigkeit (Scherfestigkeit) <p>2 Baugrund Fels: zeitliche Veränderungen von</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verwitterungszustand, Zersetzungsgrad, Grad der Entfestigung - Beständigkeit gegen Luft und Wasser Festigkeiten (Druckfestigkeit, Spalt-Zug-Festigkeit) - Elastizitätsmodul <p>D. Bauwerke</p> <p>1 Sicherheit der Absperrbauwerke</p> <p>1.1 Geotechnische Nachweise</p> <ul style="list-style-type: none"> - Statische Sicherheit - Dauerhaftigkeit - Rissicherheit - Hydraulische Sicherheit <p>1.2 Zustand relevanter Bauteile und Entwicklung der Messgrößen-Indikatoren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dränsysteme (Befahrungen) - Dichtungselemente - Porenwasserdrücke - Wasserspiegelhöhen im Dammkörper, Untergrund, Talhängen - Setzungen - Sickerwasser durch das Absperrbauwerk und -untergrund bzw. Dichtungsschürze, Umströmung 	<p>1.3 Beurteilung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Statische und hydraulische Sicherheit - Folgerungen - Auswirkungen auf Messumfang - Materialkennwerte <p>2 Sonstige Einzelbauwerke und Bauteile (Massivbau)</p> <p>2.1 Prüfergebnis und Beurteilung der vorhandenen Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grundablass (Gebäude, Einstiegsschacht, Einlaufbauwerk, Regulierbauwerk, Stollenprofil, Verziegungsstrecken, Auslaufbauwerk ...) - Betriebsauslass (Gebäude, Schächte, Stollen...) - Hochwasserentlastung (Gebäude, Einlaufbereich, Schussrinne oder Stollen ...) - Tosbecken (bei GA und HWE) - Herdmauer - Sonstige Anlagen (Betriebsgebäude, Brücken, Pegelhaus, Treppen, Stützmauern ...) <p>2.2 Zusammenfassung</p> <p>3 Dokumentation des Zustands der Einrichtungen</p> <p>E. Betriebseinrichtungen</p> <p>1 Allgemeines</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung der Anlagen - Ablauf der Vertieften Überprüfung <p>2 Stahlwasserbau</p> <p>2.1 Beschreibung der vorhandenen Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grundablass (Grobrechen, Betriebs-/Regulierschütz, Reserveschütz, Revisionsverschluss) - Betriebsauslass (wie oben, zzgl. Feinrechen, ggfls. Rechenreinigungsmaschine, Rohrleitung ...) - Hochwasserentlastung (Fischbauchklappe, Antrieb...) - Turbine (Feinrechen, Schnellschlussorgane, Leitschaufeln, Turbinenschaufel und -gehäuse, Saugschlauch...) <p>2.2 Prüfungsergebnis und Beurteilung (wie oben)</p> <p>2.3 Zusammenfassung der Untersuchung Stahlwasserbau</p> <p>3 Elektrotechnik</p> <p>3.1 Prüfungsergebnis und Beurteilung der vorhandenen Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verschluss- und Regulierorgane (siehe oben) <p>3.2 Messgeräte und Störmeldeverarbeitung</p> <p>3.3 Licht- und Steckdoseninstallation</p> <p>3.4 Blitz- und Überspannungsschutz</p> <p>3.5 Notstromversorgung</p> <p>3.6 Objektschutz</p> <p>3.7 Zusammenfassung der Untersuchung Elektrotechnik</p> <p>F. Überwachung</p> <p>1 Allgemeines</p> <p>2 Betriebliche Überwachung</p> <p>2.1 Betriebsvorschrift</p> <p>2.2 Dienstanweisung</p> <p>2.3 Betriebstagebuch</p> <p>2.4 Jahresbericht</p> <p>3 Bauwerksüberwachung / Messsysteme</p> <p>3.1 Beschreibung der Messsysteme</p> <p>3.2 DV-Ausstattung der Betriebszentrale</p> <p>3.3 Datenbestand und Auswertung der Messergebnisse</p> <p>4 Visuelle Kontrolle</p> <p>5 Zusammenfassende Bewertung</p>

Abbildung A.10: Einzelberichte [63]

A.3 Beispiel eines Störfallinformationsblattes

Beispiel eines Störfallinformationsblattes lt. StIV (TIWAG Kraftwerk Kaunertal):

Betriebsleiter und seinen **qualifizierten Mitarbeitern** laufend überwacht. Weiters werden jahresdurchgängig automatisierte und fernübertragene Messungen vor Ort kontrolliert, ergänzende Messungen vorgenommen und Kontrollbegehungen mit Expertenbefundungen vorgenommen. Der **Talsperrenverantwortliche** der Anlage nimmt die Kontrolle der Messungen und Beobachtungen vor, beurteilt diese und erstellt einen jährlichen Zustandsbericht, welcher der Behörde vorgelegt wird. Für diese führt die **Talsperrenaufsicht des Landes Tirol** eine jährliche **Begehung** und Kontrolle vor Ort durch. Weiters führt der **Unterausschuss für Talsperrensicherheit** in der österreichischen Staubeckenkommission (BMLFUW) 5-jährliche, umfangreiche und detaillierte Zustands- und Sicherheitsbeurteilungen durch, infolge dieser mehrstufigen Verantwortlichkeit sind die Anlagensicherheit und die Betriebssicherheit durchgängig gewährleistet.

5. Gefahrenquellen und Auswirkungen


Obwohl die in Punkt 4 genannten Maßnahmen eine sehr hohe Sicherheit gewährleisten und ein Störfall damit praktisch ausgeschlossen werden kann, ist die Örtlichkeit aufgrund der Vorgaben des Umweltinformationsgesetzes und der Störfallinformationsverordnung über das (theoretische) Risiko von Störfällen beim Betrieb von Wasserkraftanlagen mit Sperrbauwerken zu informieren. Folgende Störfälle und allenfalls damit einhergehende Auswirkungen auf Leben, Gesundheit oder Umwelt, die unter Heranziehung der praktischen Erfahrung zu einer Gefährdung führen können, sind grundsätzlich denkbar:

- Gebrechen an den Kraftabstiegen oder Beileitungen (Gefahr der Überflutung und Vermurung kleinerer regionaler Bereiche)
- Ölaustritt infolge eines Störfalles an den Maschinenanlagen (Gefahr der Verunreinigung des Vorfluters oder Bodens mit Öl)
- Sperrengebrennen an Stauanlagen (Gefahr der Überflutung und Vermurung des Talbodens der betroffenen Täler)

Sollte ein Störfall eintreten, wird die Bevölkerung durch **Feuerwehreinheiten** auf diesen Umstand aufmerksam gemacht. Bei Gefahr eines Talsperrengebrennens wird die Bevölkerung im Bereich Kaunertal bis Zams zusätzlich von **Tyfonanlagen** gewarnt.

6. Information über den Störfall

Die Gefahrenmeldung ergeht durch die **Kraftwerksleitstelle Prutz** bzw. durch die **zentrale Erzeugerleitstelle Silz** direkt an **→ Polizeibezirokommando Landeck, Leitstelle Tirol und an die Landeswarzentrale** **→ von dort zu lokalen Feuerwehren, der Bezirkshauptmannschaft Landeck und an die betroffenen Gemeinden.**

Warnsignale:
 Warnung: _____ 3 Minuten Dauerton
 Alarm:  1 Minute auf- und abschwellender Ton
 Entwarnung: _____ 1 Minute Dauerton

7. Verhaltensregeln bei Eintreten der Warn- und Alarmsignale

- Schalten Sie Ihr Rundfunkgerät ein!
- Stellen Sie einen österreichischen (Lokal-) Sender ein!
- Beachten Sie die Gefahrenmeldungen und die empfohlenen Schutzmaßnahmen (zB Aufsuchen der Fluchtziele), die über Rundfunk durchgegeben oder vor Ort von Feuerwehr, Polizei oder sonstiger Stelle vermittelt werden!
- Informieren Sie Ihre Nachbarn!
- Blockieren Sie keine Telefonleitungen, da diese möglicherweise für Koordinierungs- und Einsatzinformationen benötigt werden!

K 010-0335
Stand: Dez. 2016

TIWAG
Tiroler Wasserkraft AG
Eduard Wallnöfer-Platz 2
A-6020 Innsbruck

KAUNERTALKRAFTWERK
Staudamm Gepatsch

STÖRFALL – INFORMATIONSBLATT
In Erfüllung der Störfallinformationsverordnung des Umweltministeriums
BGBI Nr. 495/1993 zuletzt geändert durch BGBI II Nr. 191/2016

für die Bewohner des Kaunertales



1. Betreiber
TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG
Eduard Wallnöfer-Platz 2
A-6020 Innsbruck

2. Auskunftspersonen
Talsperrenverantwortlicher:
Dr. DI Bernhard HOFER
Festnetz: 050607/21301
Mobil: 0699/12572301

Stellvertreter
DI Michael HOLZMANN
Festnetz: 050607/21314
Mobil: 0699/12572314

Kraftwerksanlagen Oberland
DI Christian WIEDENGER
Festnetz: 050607/21590
Mobil: 0699/12572590

3. Beschreibung der informationspflichtigen Anlage

Der Staudamm **Gepatsch** wurde in den Jahren 1961 - 1964 als Steinschüttdamm mit zentralem Dichtungskern errichtet und 1965 in Betrieb genommen. Seine größte Höhe über Gründungssohle beträgt 153 m. Der Speicher Gepatsch beinhaltet eine Wassermenge von 138 Mio. m³. Zu den Betriebsrichtungen gehört die **Hochwasserentlastungsanlage**, die infolge eines unsichtigen Hochwassermanagements und betrieblicher Vorkerungen bisher noch nie in Betrieb genommen werden musste. Der **Grundablass** ist mit zwei hintereinanderliegenden Talsperrenschiebern ausgerüstet und weist somit eine hundertprozentige Reserve auf. Er wurde ebenfalls noch nie in seiner Funktion als Notablassrichtung für den Speicher in Betrieb gesetzt. Die **Talsperrenschieber** des Grundablasses und deren Antriebe werden jährlich vom Talsperrenverantwortlichen im Beisein der Talsperrenaufsicht des Landes Tirol erprobt, wobei eine definierte Wassermenge abgegeben wird. Die Antriebe werden über das öffentliche Stromnetz gespeist. Im Falle einer Störung übernimmt ein Notstromdieselselaggregat im Sperrnhaus die Stromversorgung. Als weitere Reserve steht ein zweites Kraftstoffbetriebenes Aggregat in der Grundablass-Schieberkammer zur Verfügung. Der Schieber kann auch mittels einer Handpumpe geöffnet werden.

4. Maßnahmen zur Gewährleistung eines störungsreifen Betriebes

Das Sperrbauwerk mit seinen Betriebsrichtungen und der Stauraum sind mit zahlreichen Überwachungs- und Beobachtungsrichtungen ausgestattet. Die Messungen und Funktionskontrollen sind in der Betriebsordnung festgelegt. Die Einrichtungen werden vom erfahrenen

Abbildung A.11: Störfallinformationsblatt für das Kraftwerk Kaunertal der TIWAG