

GEHÖLZSTRUKTUREN AN HOCHWASSERSCHUTZDÄMMEN

und ihr Einfluss auf die Dammstabilität
unter besonderer Berücksichtigung der Durchwurzelung

WOODY PLANTS ON LEVEES

and their impact on levee stability
with special focus on root penetration

MASTERARBEIT

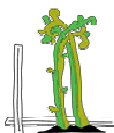
der Studienrichtung Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

Eingereicht von **Irmgard SIEBERER, Bakk.techn.**

Betreuung: o.Univ.Prof.Dr. Florin Florineth

Dipl.-Ing. Walter Lammeranner

Wien, Dezember 2012



Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur Wien



INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung.....	4
Zusammenfassung.....	5
Abstract.....	6
Einleitung.....	7
Ziele.....	8
1 Vorgangsweise.....	9
2 Grundlagen	10
2.1 Bodenkennwerte.....	10
2.1.1 Körnung	10
2.1.2 Bodendichte	12
2.1.3 Bodenwasser	12
2.2 Hochwasserschutzdämme.....	14
2.2.1 Aufbau eines Dammes	14
2.2.2 Dichtungen und Dräns	15
2.2.3 Linienführung und Standsicherheit	18
2.2.4 Versagen eines Dammes	20
2.3 Wurzel	23
2.3.1 Aufgaben der Wurzel.....	23
2.3.2 Wurzelaufbau	23
2.3.3 Wurzelformen	27
2.3.4 Primäres Wachstum	30
2.3.5 Sekundäres Wachstum	30
2.3.6 Genetik und Umwelteinfluss der Wurzelformen.....	31
3 Gehölze und Wurzelausbreitung an Dämmen	36
3.1.1 Negative Auswirkungen von Gehölzwurzeln auf Dämmen.....	37
3.1.2 Positive Auswirkungen von Gehölzwurzeln auf Dämmen	41
3.1.3 Derzeitige Regelung des Bewuchses	43
3.1.4 Ertüchtigungsmaßnahmen am Damm	47
3.1.5 Wurzelausbreitung von Gehölzen auf Dämmen.....	49
3.1.5.1 Einfluss der Lage.....	51
3.1.5.2 Wurzelsystem der Silber-Weide (Salix alba)	52
4 Feldaufnahmen an der Zaya	55

4.1 Grundlagen	56
4.1.1 Einzugsgebiet	57
4.1.2 Niederschlagsverhältnisse	57
4.1.3 Abflussregime	57
4.1.4 Historische Entwicklung	58
4.1.5 Dammaufbau	59
4.1.6 Vegetation	59
4.1.7 Untersuchungsgebiet	62
4.2 Aufnahmemethodik	64
4.2.1 Freilegung des Wurzelstockes	64
4.2.2 Bodenuntersuchung	67
4.3 Ergebnisse	71
4.3.1 Boden	71
4.3.2 Durchwurzelung	75
5 Feldaufnahmen an der Donau in Hainburg	79
5.1 Grundlagen	79
5.2 Aufnahmemethodik	80
5.3 Ergebnisse	80
6 Diskussion und Vorschläge für die Praxis	84
7 Literaturverzeichnis	87
8 Abbildungsverzeichnis	94
9 Tabellenverzeichnis	97
10 Anhang	98
10.1 Korngrößenverteilung Bodenprobe A	99
10.2 Korngrößenverteilung Bodenprobe B	100
10.3 Korngrößenverteilung Bodenprobe C	101
10.4 Stechzylinderproben	102
10.5 Penetrologger-Messungen	103

DANKSAGUNG

Herzlichen Dank an Professor Florin Florineth für seine ansteckende Begeisterung für die Ingenieurbiologie und die Korrektur dieser Arbeit, an Dipl.-Ing. Walter Lammeranner für die Betreuung, und an Dipl.-Ing. Dr. Markus Rauchecker vom Institut für Geotechnik für seine Unterstützung bei der Auswertung der Bodenproben.

Weiters möchte ich Herrn Ing. Luxbacher und Ing. Mitterhauser vom Amt der Niederösterreichischen Landesregierung - Abteilung Wasserbau für die gute Zusammenarbeit bei den Untersuchungen am Zayadamn danken. Meinen Kollegen Gregor Buggelsheim, Martin Neuwirth und Josef Schönleitner danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Freilegung des Wurzelstocks.

Zuletzt möchte ich mich noch besonders bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mir während des gesamten Studiums und ganz besonders beim Verfassen dieser Masterarbeit eine unersetzbare Stütze waren.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Masterarbeit befasst sich mit den Auswirkungen von Gehölzbewuchs auf die Stabilität von Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Durchwurzelung. Es handelt sich in erster Linie um eine Literaturarbeit, in der neben der Grundlagenrecherche Ergebnisse zahlreicher internationaler Studien bearbeitet werden. Der praktische Teil der Arbeit beinhaltet die Ausgrabung und Untersuchung eines alten Wurzelstocks einer Silber-Weide am Hochwasserschutzdamm der Zaya (NÖ) und der Dokumentation weiterer Wurzelwerke von durch Hochwasserereignisse freigespülten Silber-Weiden an der Donau in Hainburg (NÖ).

Sowohl die Literaturrecherche als auch die Ergebnisse der Aufgrabung bestätigen, dass Gehölzwurzeln an Dämmen bevorzugt im Oberboden auftreten. Vor allem der Feinwurzelanteil beschränkt sich häufig auf den humosen, weniger stark verdichteten Oberbodenbereich. Es kommt zu einer verstärkt horizontalen Wuchsrichtung der Wurzeln, und hangabwärts des Wurzelstocks zu einer höheren Wurzelanzahl. Der Verlauf der Wurzeln wird sehr stark von Bodentextur und Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Die Untersuchungen an der Zaya und in Hainburg legen zusätzlich die Vermutung nahe, dass gewässernahe Horizontalwurzeln in Fließrichtung wachsen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen außerdem, dass Wurzeln ungünstige Bodenschichten durchwachsen, tiefer in den Damm eindringen und auch in Dichtungen einwachsen können. Wie gefährlich die Durchwurzelung für die Dammstabilität ist, hängt außerdem sehr stark mit der jeweiligen Baumart zusammen. Vor allem Pappelwurzeln können extrem lang werden, wachsen tief in Dämme und durchdringen sogar Abdichtungswände aus Zement und Bentonit.

Aus heutiger Sicht kann die Bepflanzung mit Spreitlagen aus Strauchweiden eine passende Vegetationsform für Dämme darstellen, da diese ein dichtes, bodenstabilisierendes Wurzelsystem ausbilden, ohne zu tief in den Damm einzudringen, und dünne flexible Stämme aufweisen, die sich bei Überströmung schützend über die Dammoberfläche legen.

Da das Wuchsverhalten von Wurzeln stark von Gehölzart und Aufbau des Dammes abhängt und dadurch ihre Eigenschaften auf die Dammstabilität in gewisser Weise beeinflussbar sind, bestätigt, dass eine in der Ufersicherung erprobte und erfolgreiche Vegetationsform wie die Weidenspreitlage auf einem korrekt aufgebauten Damm einen positiven Einfluss haben kann.

ABSTRACT

This master thesis revolves around the effects of woody vegetation on the stability of levees and, in particular, the influence of root penetration. It is a literature research paper which captures, besides the basic research, the results of numerous international studies. The practical part of this thesis includes the excavation and investigation of an old white willow rootstock which is located on a levee at the Zaya (NÖ) and the documentation of further root systems of the same species at the Danube in Hainburg (NÖ).

Both literature research and the results of the excavation attest to the fact that roots in levees occur predominantly in the soil surface. Especially fine roots are restricted to the humus and less compact surface area. The direction of root growth appears to be increasingly horizontal and the number of roots are elevated on the lower slope of the rootstock compared to those on the upper slope. Root development is highly influenced by soil structure and the availability of water. Investigations at the Zaya and in Hainburg also venture the hypothesis that horizontal roots near the river grow with the flow direction of the water.

Furthermore, studies show that roots can grow through diverse soil layers, penetrate deep into the levee and even into seals. The tree species also affects the force of root penetration. Above all, cottonwood roots can become extremely long, growing deep into levees and penetrating even slurry cut-off walls.

From today's point of view, shrubby willows grown from brush-mattresses could be a suitable vegetation for levees because they build dense, soil stabilizing root systems without penetrating too deep into the levee itself. Besides that, they have thin, flexible trunks which protect the levee surface during overtopping.

Because root characteristics depend that much on tree species and the construction of the levee, the effects of roots on the stability of the levee are, in a sense, able to be influenced. This proves that a, in soil bioengineering approved and successfully used vegetation form, like shrubby willows grown from brush-mattresses, can, on an accurate constructed levee, improve its stability.

EINLEITUNG

Die Verwendung von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen ist ein kontrovers diskutiertes Thema. Obwohl die Problematik wissenschaftlich noch relativ wenig erforscht ist, gehen die fachlichen Meinungen teilweise stark auseinander. Vor allem die Effekte der Durchwurzelung sollen laut Literaturangaben die Standsicherheit des Dammes einerseits herabsetzen und sie andererseits auch erhöhen.

Gehölze weisen eine tiefere Durchwurzelung auf als Gräser und krautige Pflanzen. Eine intensive Durchwurzelung von Gleitfugen erhöht den Scherwiderstand durch Verdübelung der Gleitfläche, die Ausbildung eines Wurzelgeflechts verhindert besonders in den oberen Schichten ein Ausspülen von Feinmaterial (HÄHNE, 1999). Allerdings können das zu tiefe Vordringen von Wurzeln in den Damm, das Hineinwachsen in vorhandene Dichtungen oder die durch Windbelastung hervorgerufenen Wurzelbewegungen die Standsicherheit sehr stark herabsetzen (DÖSCHER, 1999 und HASERSTEINER & STROBL, 2005).

Wichtige Erkenntnisse über die Auswirkung von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen liefert bisher das Forschungsprojekt „Gehölzstrukturen an Dämmen und Deichen“ des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der BOKU, das im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Abteilungen Wasserbau und Wasserwirtschaft der Niederösterreichischen Landesregierung durchgeführt wurde. Dieses Projekt präsentiert erste Ergebnisse einer 2007 in Deutsch-Wagram (NÖ) errichteten Versuchsanlage. Weitere Ergebnisse sind in den folgenden Diplom- und Masterarbeiten der BOKU unter dem Titel „Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen“ zu finden:

HOLZAPFEL, G. (2008), EBNER, E. (2008), RAIJIC, F. (2009), KRAYCHNIKOVA, D. (2009), OBRIJETAN, M. (2010), LESZCZYNSKI, J. (2011), SOKOPP, M. (2012), KLÄRING, A. (2012)

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Durchwurzelung von Gehölzen und deren Auswirkung auf die Dammstabilität. Es handelt sich in erster Linie um eine Literaturrecherche, deren Aussagen anhand der Ergebnisse zweier praktischer Beispiele geprüft wurden. Diese betreffen die Ausgrabung und Untersuchung eines alten Wurzelstocks einer Silber-Weide (*Salix alba*) an einem Hochwasserschutzdamm an der Zaya und die Dokumentation weiterer durch Hochwasser freigespülter Wurzelwerke von Silber-Weiden an der Donau bei Hainburg.

ZIELE

Anhand der Literatur soll wissenschaftlich erläutert werden, wie Pflanzenwurzeln generell und auf Hochwasserschutzdämmen wachsen, was ihre Wachstumsentwicklung beeinflusst und welche Auswirkungen dies auf die Verwendung von Gehölzen an Hochwasserschutzdämmen hat.

Die Freilegung des Wurzelwerks einer Silber-Weide (*Salix alba*) am Hochwasserschutzdamm der Zaya zwischen Bullendorf und Wilfersdorf (NÖ) gibt beispielhaft Aufschluss darüber, wie Wurzeln dieser Gehölzart an diesem Standort wachsen. Es wird anhand einer Ausgrabung der Zustand und die räumliche Verteilung der Wurzeln sowie die Beschaffenheit des Dammes erläutert und untersucht, wie das Wurzelwachstum den Damm positiv oder negativ beeinflusst hat. Die Dokumentation freigespülter Silber-Weiden in Hainburg liefert zusätzliche Information über das Wuchsverhalten von Wurzeln dieser Baumart.

Anhand der realen Bedingungen des Ausgrabungsbeispiels an der Zaya und den Wurzelwerken in Hainburg werden die Aussagen der Literatur geprüft und dadurch allgemeine Aussagen über das potentielle Wurzelwachstum auf Dämmen und die resultierenden Effekte getroffen.

Dabei wird folgende Fragestellung behandelt:

Welche Faktoren beeinflussen und lenken das Wurzelwachstum, wie wirkt sich dies auf die Stabilität von Hochwasserschutzdämmen aus und welche Konsequenzen zieht das für die Verwendung von Gehölzen auf Dämmen mit sich?

1 VORGANGSWEISE

Die vorliegende Arbeit behandelt einerseits in der Literatur recherchierte Ergebnisse und andererseits eigene Untersuchungen. Im Folgenden werden Vorgangsweise und Gliederung der Arbeit erläutert. Die Methodik der praktischen Untersuchungen wird in den Kapiteln 4.2 bzw. 5.2 „Aufnahmemethodik“ separat beschrieben.

In den Grundlagenkapiteln werden zunächst die wichtigsten Bodenkennwerte und deren Bestimmung definiert, Aufbau und Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen sowie Wachstum und Eigenschaften der Wurzel erläutert.

In Kapitel 3 „Gehölze und Wurzelausbreitung auf Dämmen“ werden die Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt. Hierbei wird auf positive und negative Auswirkungen insbesondere der Durchwurzelung, auf die derzeitige Regelung des Bewuchses und auf in der Literatur dokumentierte Wurzelfreilegungen und Untersuchungen eingegangen.

Kapitel 4 „Feldaufnahmen an der Zaya“ beschreibt die durchgeführten Untersuchungen an der Zaya. Im Grundlagenkapitel werden zunächst noch aus der Literatur recherchierte Informationen wie allgemeine Standorteigenschaften, die historische Entwicklung, Aufbau des Dammes und seine Vegetation erläutert. In der Aufnahmemethodik wird die Vorgangsweise bei den durchgeführten Untersuchungen beschrieben. Im Ergebnisteil finden sich dann die Resultate der Bodenuntersuchungen wie Bodenart und –dicke sowie die Beschreibung und Darstellung der Wurzelausbreitung der freigelegten Silber-Weide. Kapitel 5 „Feldaufnahmen an der Donau in Hainburg“ ist ebenfalls in einen Grundlagen-, Aufnahmemethodik- und Ergebnisteil gegliedert und befasst sich mit der Dokumentation der freigespülten Silber-Weiden am Ufer der Donau.

Abschließend wird in der Diskussion analysiert, welchen Einfluss der Wurzelstock an der Zaya auf die Dammstabilität hatte, welche Rückschlüsse man aus den teils widersprüchlichen Aussagen der Literaturrecherche ziehen kann und abgeleitet, wie die zukünftige Bepflanzung von Hochwasserschutzdämmen aussehen könnte.

2 GRUNDLAGEN

Zum besseren Verständnis werden in den folgenden Grundlagenkapiteln Details über die wichtigsten Bodenkennwerte, über Aufbau, Funktion und Sicherheit von Hochwasserschutzdämmen sowie über Wachstum und Eigenschaften der Pflanzenwurzel angeführt.

2.1 BODENKENNWERTE

Boden entsteht durch Verwitterungsprozesse von Fels oder Felsgestein und besteht im Allgemeinen aus festen Mineralbestandteilen wie Quarz, Feldspat, Glimmer, Tonmineralen und organischen Bestandteilen. Sie bilden zusammen das Bodengefüge, in dessen Hohlraumsystem Poren unterschiedlicher Größe vorkommen, die mit Bodenwasser oder Bodenluft gefüllt sind.

(SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL et al., 2010)

2.1.1 Körnung

Die Körnung (auch Korngrößenverteilung genannt) beschreibt die Zusammensetzung des Bodensubstrates. Die festen Bodenbestandteile kommen in unterschiedlicher Größe und Form im Boden vor. Je nach Größe werden sie in sogenannte Kornfraktionen eingeteilt. (HARTGE & HORN, 1999)

Äquivalentdurchmesser		Kornfraktion		Symbol
mm	µm	gerundet	eckig-kantig	
> 200		Blöcke, Geschiebe		
200 - 63		Gerölle	Grobsteine	Kiese: X
63 - 20		Grobkies	Mittelsteine	
20 - 6,3		Mittelkies	Feinsteine	Steine: G
6,3 - 2		Feinkies	Grus	
2 - 0,063	2000 - 630	Grobsand	Sand	S
	630 - 200	Mittelsand		
	200 - 63	Feinsand		
0,063 - 0,002	63 - 20	Grobschluff	Schluff	U
	20 - 6,3	Mittelschluff		
	6,3 - 2,0	Feinschluff		
< 0,002	2,0 - 0,63	Grohton	Ton	T
	0,63 - 0,2	Mittelton		
	< 0,2	Feinton		

Tab. 1: Einteilung der Kornfraktionen (nach BLUM, 2007)

Diese Kornfraktionen kommen im Boden fast ausschließlich in gemischter Form vor. Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung werden die unterschiedlichen Kornfraktionen mittels Sieb- und Schlämmanalysen getrennt und in Häufigkeitsverteilungen oder Summenkurven dargestellt (HARTGE & HORN, 1999).

Vor der Sieb- und Schlämmanalyse muss die Bodenprobe dispergiert werden, da die festen Bestandteile teilweise aggregiert sind. Die Korngröße wird in Äquivalentdurchmessern angegeben, da die Körner nicht einheitlich geformt sind. Dieser Ersatzwert gibt die Größe einer Kugel an, die sich so verhält wie das zu untersuchende Bodenteilchen. (HARTGE & HORN, 1999)

Anhand der Kornfraktionen kann auch die Bodenart bestimmt werden. Sie ist die Körnungs- oder Texturklasse des Bodens und gibt Aufschluss über Wasser- und Nährstoffhaushalt, Durchwurzelung und Bearbeitbarkeit (BLUM, 2007).

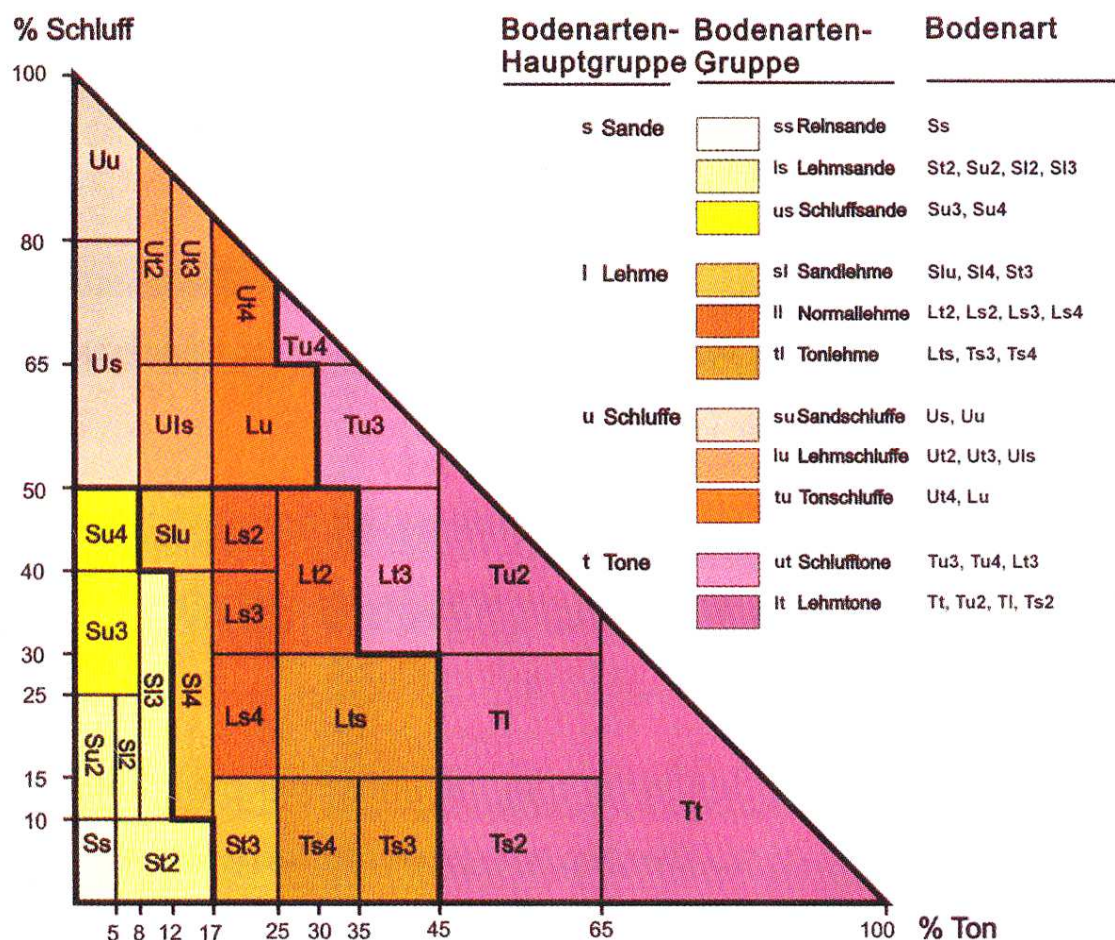


Abb. 1: Einteilung der Bodenarten (BLUM, 2007)

2.1.2 Bodendichte

Die Bodendichte ist das Verhältnis des Trockengewichts einer Probe zu ihrem Volumen. Bodendichte (dB) = Trockengewicht / Substanzvolumen (BLUM, 2007).

Sie gibt Auskunft über die Verdichtung des Bodens und lässt dadurch Rückschlüsse über die Standfestigkeit eines Dammes zu.

2.1.3 Bodenwasser

Der Wassergehalt (w) gibt die in den Bodenporen vorhandene Wassermenge bezogen auf die Trockenmasse der Probe an. Er wird durch die Gewichts Differenz der Bodenprobe vor und nach der Trocknung bei 105°C bestimmt.

Der größte Teil des Bodenwassers entstammt den Niederschlägen. Es verbleibt entweder als Haftwasser im Boden oder fließt als Sickerwasser weiter und bildet so Grund- oder Stauwasser. Durch Transpiration der Pflanzen und Verdunstung am Boden (Evapotranspiration) geht ein Teil des Wassers zurück in die Atmosphäre. Abbildung 3 zeigt den Kreislauf der Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser. (BLUM, 2007)

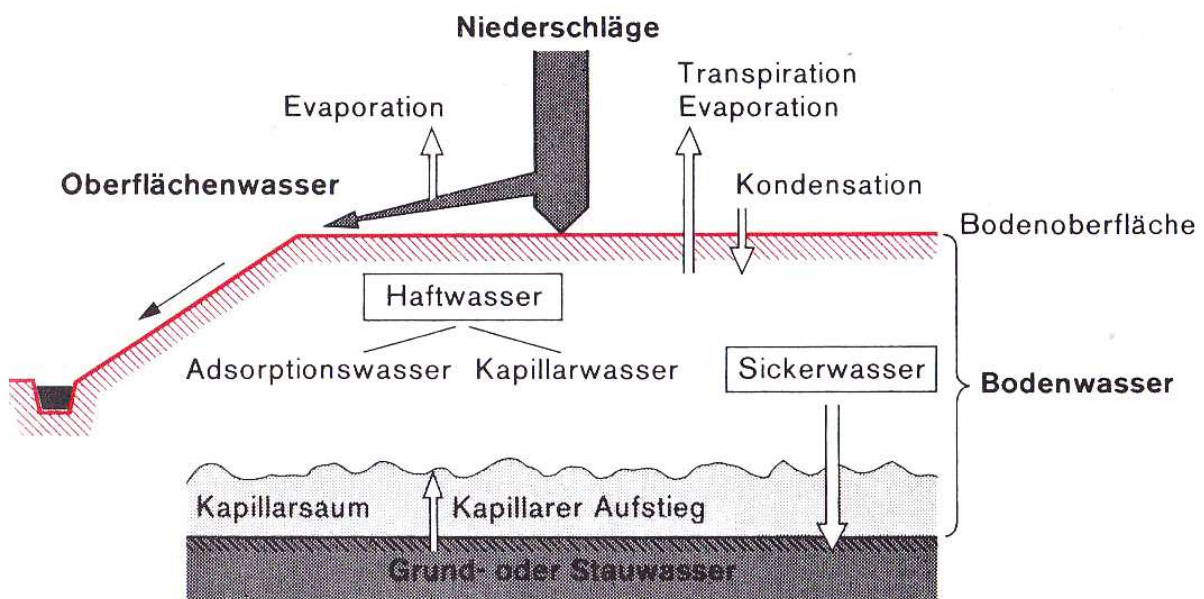


Abb. 2: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser (BLUM, 2007)

Die Menge des Wassers im Erdmaterial kann die Standfestigkeit des Dammes sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Eine gewisse Feuchtigkeit im Boden stärkt die Bindungskräfte. Ist zu viel Wasser im Boden, kommt es zu Ausschwemmungen. (BLUM, 2007)

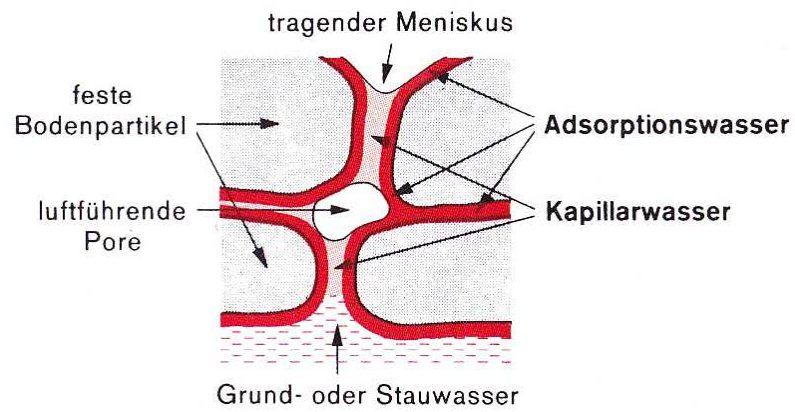


Abb. 3: Formen des Wassers im Boden (BLUM, 2007)

2.2 HOCHWASSERSCHUTZDÄMME

„Flussdeiche sind Dämme aus Erdbaustoffen an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlandes vor Hochwasser“ (DVWK, 1986).

In Deutschland spricht man von „Deich“ oder „Flussdeich“, in Österreich ist der Begriff „Damm“ oder „Hochwasserschutzdamm“ gebräuchlich. In dieser Arbeit werden die Begriffe ebenfalls synonym verwendet. Hochwasserschutzdämme sind im Gegensatz zu Staudämmen nur für eine zeitweilige Einstauung konzipiert. Sie verringern den durchflossenen Querschnitt und beschleunigen dadurch den Abfluss des Wassers.

Aufbau und Linienführung des Dammes hängen von Untergrund, den landschaftlichen, ökologischen und städtebaulichen Belangen und den bereits vorhandenen Nutzungsansprüchen ab.

Entscheidend für die Art der Ausführung sind außerdem Kosten-Nutzen-Überlegungen. Der Nutzen der Eindeichungsmaßnahme muss größer sein als ihre Kosten. (DVWK, 1986)

2.2.1 Aufbau eines Dammes

Abbildung 4 zeigt den Aufbau eines Hochwasserschutzdammes. Der Dammkörper setzt sich aus der Deichkrone, den links und rechts davon verlaufenden Böschungen, eventuell vorhandenen Bermen und dem Deichfuß zusammen. Wasserseitig schließen an den Deichfuß Deichvorland und Ufer an.

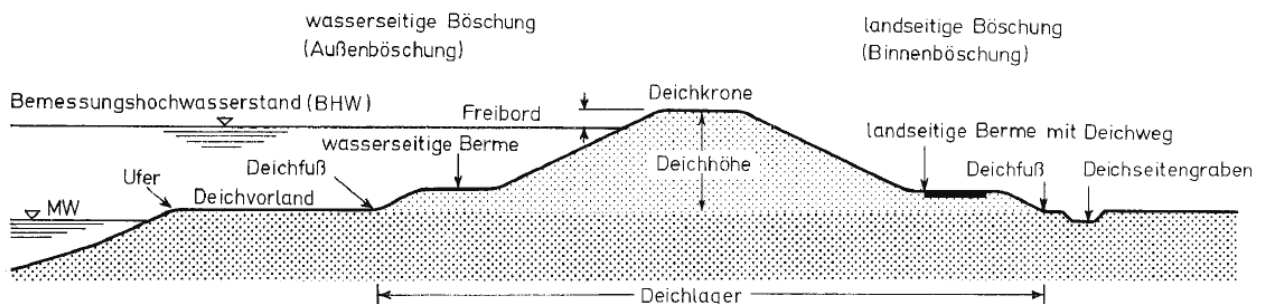


Abb. 4: Begriffe eines Dammes (DVWK, 1986)

Die Querschnittsgestaltung hängt vor allem von Lage, Zweck und Höhe des Dammes und den daraus resultierenden Beanspruchungen sowie von Material und Untergrundverhältnissen ab. Dementsprechend variieren Böschungsneigung, Anordnung der Bermen und Kronenbreite. Die Dammkrone soll zur besseren Entwässerung gewölbt oder zur Wasserseite hin leicht geneigt und mindestens 3 m breit sein.

(DVWK, 1986)

Um das Austreten von Sickerwasser und die dadurch entstehende Erosion an den Böschungen zu verhindern, wird oft auf der Wasserseite Baumaterial mit geringer und auf der Landseite mit größerer Durchlässigkeit verwendet (DVWK, 1986).

Abbildung 5 zeigt den Aufbau mit einem durchlässigen Damm- oder Stützkörper (S), einer wasserseitig gelegenen abdichtenden Böschungszone (D), einem landseitig verlaufenden, stark durchlässigen Filterkörper (F), der am Fuß durch eine Dränung (E) entwässert wird, und einem dichten Untergrund (U). (U') zeigt einen tiefliegenden Untergrund, der wenn nötig mit einer wandartigen Dichtung (W) versehen sein kann.

(DVWK, 1986)

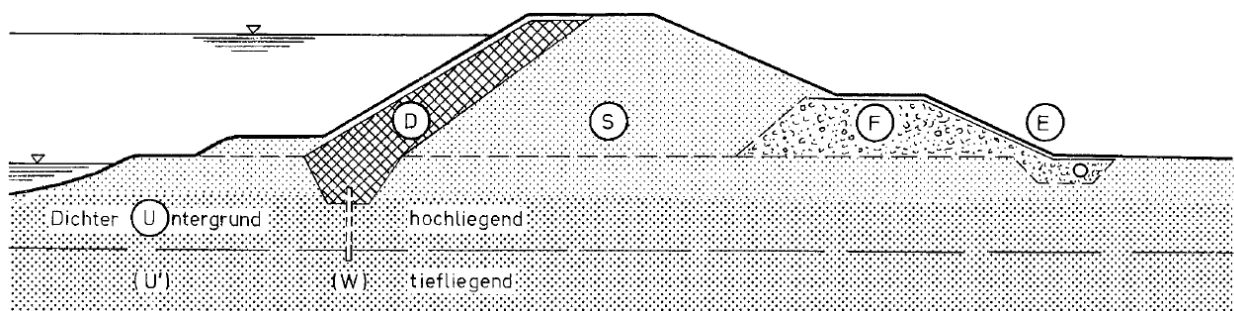


Abb. 5: Möglicher Dammaufbau (DVWK, 1986)

Das in den Damm eindringende und durchströmende Wasser wird durch die Höhe der sogenannten Sickerlinie, also der Wasserspiegellinie des Sickerwassers, dargestellt. Die Sickerlinie ist somit der Übergang zwischen wassergesättigter und –ungesättigter Zone im Damm.

(HASELSTEINER, 2007)

2.2.2 Dichtungen und Dräns

Dichtungen sollen den Sickerwasserdurchfluss verringern und so die Standsicherheit des Dammes erhöhen (HASELSTEINER, 2007). Man unterscheidet zwischen vollkommenen und unvollkommenen Dichtungen. Vollkommene Dichtungen unterbinden die Dammdurchströmung, während unvollkommene Dichtungen lediglich den Sickerweg verlängern und dadurch die Strömungsbelastung verringern (BAW, 2011).

Oberflächendichtungen bestehen meist aus natürlichen oder künstlichen gering durchlässigen Böden. Sie sollten mindestens 1 m dick sein und zusätzlich durch eine Deckschicht von mehr als 80 cm geschützt werden. Oberflächendichtungen können auch aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen aufgebaut sein, die ebenfalls eine Überdeckung von mindestens 80 cm haben sollten.

(BAW, 2011)

HASELSTEINER (2007) zählt Stahlspundwände, Einphasenschlitzwände, Schmalwände und Bodenvermörtelungsverfahren zu den Innendichtungen und beschreibt ihre Eigenschaften wie folgt:

Stahlspundwände werden je nach Beanspruchung aus unterschiedlichem Stahl angefertigt, sind zwischen 4 und 24 mm dick und können maximal 33 m tief eingebaut werden.

Einphasenschlitzwände bestehen aus einer selbsterhärtenden Suspension. Sie können bis in eine Tiefe von 50 m reichen und sind zwischen 40 cm und 2 m dick. Bei der Schmalwand wird die Suspension in ein Stahlprofil im Boden gefüllt. Schmalwände haben eine Wanddicke von bis zu 2 m und können bis in eine Tiefe von 25 m hergestellt werden.

Bei der **Bodenvermörtelung** wird der Boden mit einer Suspension versetzt, die anschließend erhärtet. Diese Wände gehen bis zu 25 m tief in den Boden und sind zwischen 35 cm und 1 m dick.

(HASELSTEINER, 2007)

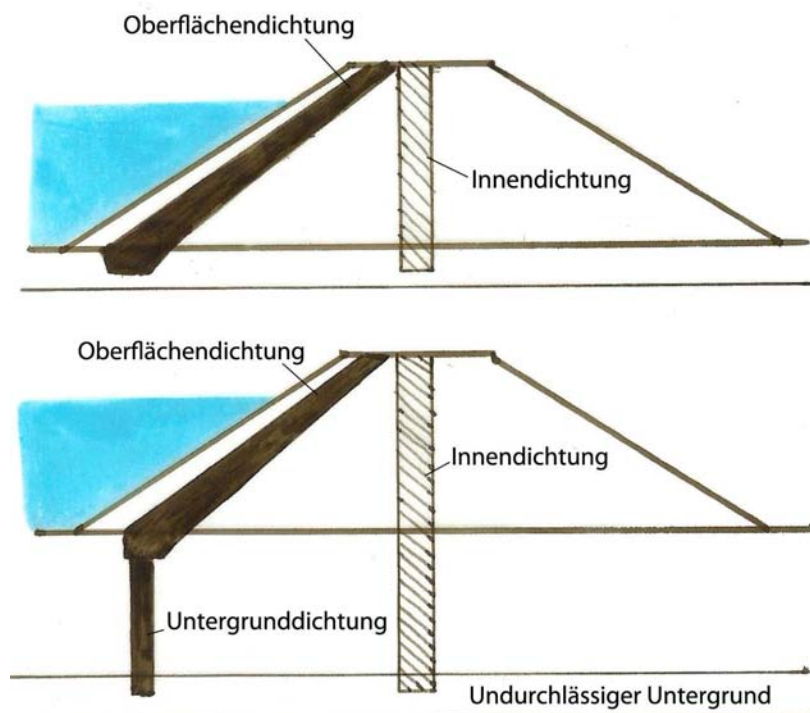


Abb. 6: Vollkommene Dichtungen (nach HASELSTEINER, 2007)

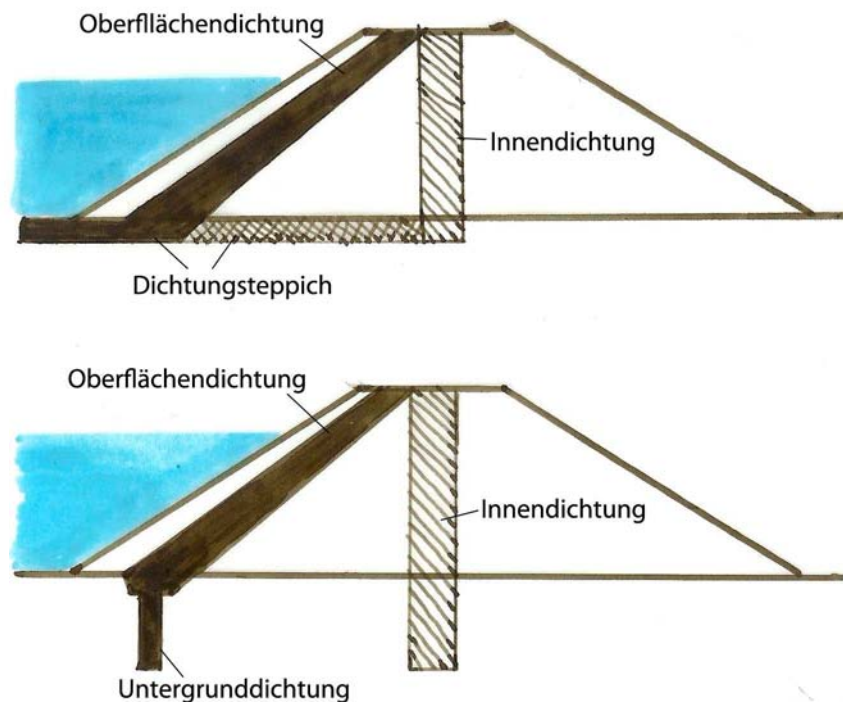


Abb. 7: Unvollkommene Dichtungen (nach HASELSTEINER, 2007)

Dräns haben die Aufgabe, Sickerwasser sicher aus dem Damm abzuführen. Sie bestehen aus körnigem Material wie Sand, Kies, Splitt und Schotter oder Geokunststoffen. (HASELSTEINER, 2007)

Innenliegende Dränsysteme senken die Sickerlinie im Damm ab. Außenliegende beeinflussen die Sickerlinie im Damm nicht, sondern sichern die Böschung durch Auflast. (BAW, 2011)

Die Dränschicht sollte mindestens 20 cm dick sein. Auflastdräns müssen mit ihrer Oberkante mindestens einen halben Meter über dem Austrittspunkt der ursprünglichen Sickerlinie liegen. Innenliegende Dräns am luftseitigen Böschungsfuß müssen mindestens 1 m breit sein.

(BAW, 2011)

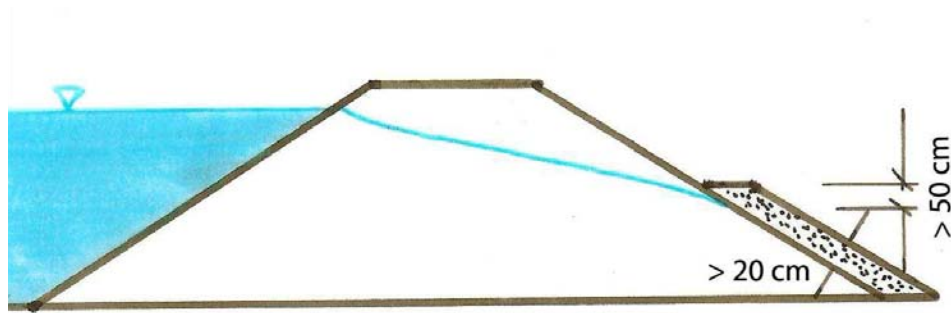


Abb. 8: Auflastdrän (nach BAW, 2011)

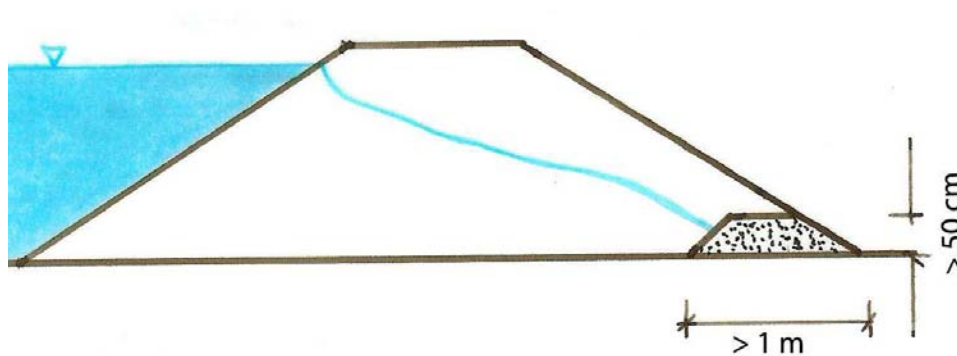


Abb. 9: Innenliegender Drän (nach BAW, 2011)

2.2.3 Linienführung und Standsicherheit

Die optimale Linienführung eines Damms richtet sich vor allem nach dem Fluss- und Talverlauf und den hydraulischen Randbedingungen. Generell sollten Dämme möglichst gestreckt Richtung Hochwasserabfluss führen. Krümmungen und plötzliche Verengungen oder Erweiterungen sind zu vermeiden, da Querströmungen und Ablagerungen entstehen.

Die Mindestbreite des Vorlandes wird durch den hydraulisch erforderlichen Durchflussquerschnitt bestimmt.

Die erforderliche Höhe des Damms wird durch den Bemessungshochwasserstand und den Freibord bestimmt. Der Bemessungshochwasserstand ist der höchste Wasserstand, der sich bei Bemessungshochwasser einstellt. Das Bemessungshochwasser wird mit Hilfe von Abfluss und Niederschlagsbeobachtungen mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit statistisch errechnet.

Der Freibord setzt sich aus Windstau, Wellenauflauf und gegebenenfalls Einstau und Zuschlägen zusammen und ist der vertikale Abstand zwischen Deichkrone und Bemessungshochwasserstand.

(DVWK, 1986)

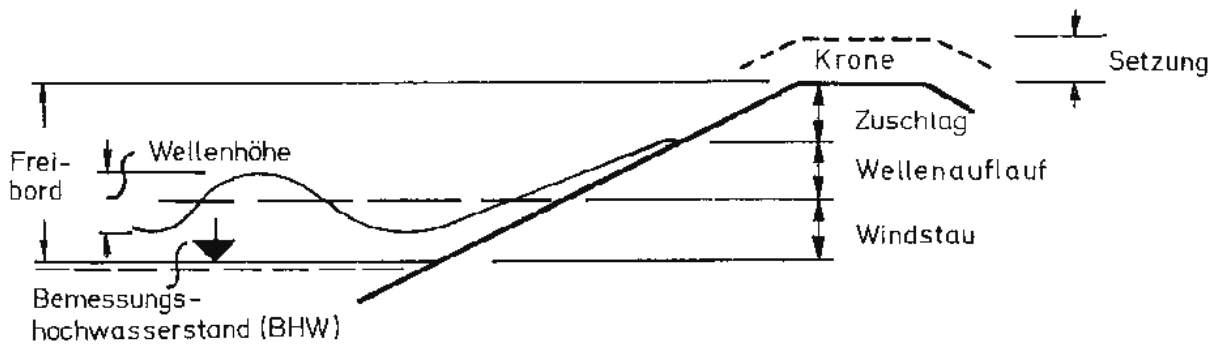


Abb. 10: Freibord (DVWK, 1986)

Die Böschungsneigung hängt vor allem stark von der Einbindung in das Landschaftsbild, der Dammunterhaltung und den zur Verfügung stehenden Flächen und ihrer Nutzungen ab. Die DIN-Norm (1997) empfiehlt Neigungen von 1:3 oder flacher.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beschreibt in ihrem Merkblatt „Standicherheit für Dämme an Bundeswasserstraßen“ (2011) den erforderlichen Mindestquerschnitt eines Dammes.

Es wird von unterschiedlichen Bemessungssituationen ausgegangen. Die ständige Bemessungssituation (BS-P) beschreibt ständige Einwirkungen auf den Damm wie Eigenlast, Erddruck und Druck- und Strömungskräfte bei ständigem Wasserstand. Veränderliche Einwirkungen sind Nutz- und Verkehrslasten und Hochwasserstände. Mit der vorübergehenden Bemessungssituation (BS-T) sind ständige und veränderliche Einwirkungen während der Bau- oder Revisionsmaßnahmen gemeint. In der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) werden zusätzlich zur BS-P und BS-T auch außergewöhnliche Einwirkungen, wie etwa das Versagen eines Sicherungselementes oder ein über das Bemessungshochwasser hinausgehendes Hochwasser berücksichtigt. Der Mindestquerschnitt sieht eine Kronenbreite von 5 m vor, gemessen in einem Meter über dem maßgebenden Wasserstand in der ständigen Bemessungssituation (BS-P).

(BAW, 2011)

Zur Gewährleistung der Standicherheit darf der Damm nicht überflutet werden - außer er wurde speziell dagegen geschützt. Die Böschung muss der Sicker- und Porenwasserströmung standhalten können, es darf zu keinem Grundbruch oder Gleiten durch Wasserdruck und Eigengewicht kommen. Außerdem muss eine Ausspülung von Dammmaterial verhindert werden.

(BAW, 2011)

Eigengewicht, Wasserstände, Durchsickerung, Verkehrslasten, Frost, Bauzustand, Verformungen und Setzungen, Einwirkung durch Gehölze, Wühltiertätigkeit, Starkregenereignisse, Wind und Schnee sowie anthropogene Einwirkungen müssen bei der Berechnung der Standsicherheit berücksichtigt werden. Durch die teilweise sehr schwere Kalkulierbarkeit dieser Faktoren ist eine vollständige Einberechnung aller Parameter leider nicht möglich.

(HASELSTEINER & STROBL, 2005)

2.2.4 Versagen eines Dammes

Das Herabsetzen der Standsicherheit und Schutzfunktion des Dammes bis hin zu seinem Komplettversagen kann viele Ursachen haben.

An der Dammoberfläche sowie innerhalb des Dammkörpers können Materialtransporte wie Erosion, Suffosion und Kolmation die Durchlässigkeit des Dammes erhöhen und seine Standfestigkeit und Funktionstüchtigkeit gefährden.

Bei **Erosion** kommt es zu Umlagerung und Transport aller Bodenfraktionen durch die Strömung des Wassers (BAW, 2011).

Bei der **rückschreitenden Erosion** wird Material zur Landseite hin ausgetragen. Dadurch kann sich ein Erosionskanal in Richtung Wasserseite bilden (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Die rückschreitende Erosion findet entlang vorhandener oder sich bildender Hohlräume statt (BAW, 2011). Dies passiert, wie in Abbildung 11 „Materialtransport im Boden“ dargestellt, meist an Kontaktflächen zwischen erosionsgefährdetem und festem Material.

Bei der **Suffosion** werden nur die feinen Fraktionen im Porenraum der groben Fraktionen umgelagert. Dadurch kommt es zu keiner Veränderung des tragenden Korngerüsts. Die Durchlässigkeit des Bodens wird erhöht und die Dichte nimmt ab.

(BAW, 2011)

Als **Kolmation** bezeichnet man das Einspülen von Bodenteilchen (HASELSTEINER & STROBL, 2005).

Je nachdem, wo diese Umlagerungs- und Transportprozesse stattfinden, unterscheidet man zwischen innerer, äußerer und Kontaktsuffosion bzw. -erosion (BAW, 2011).

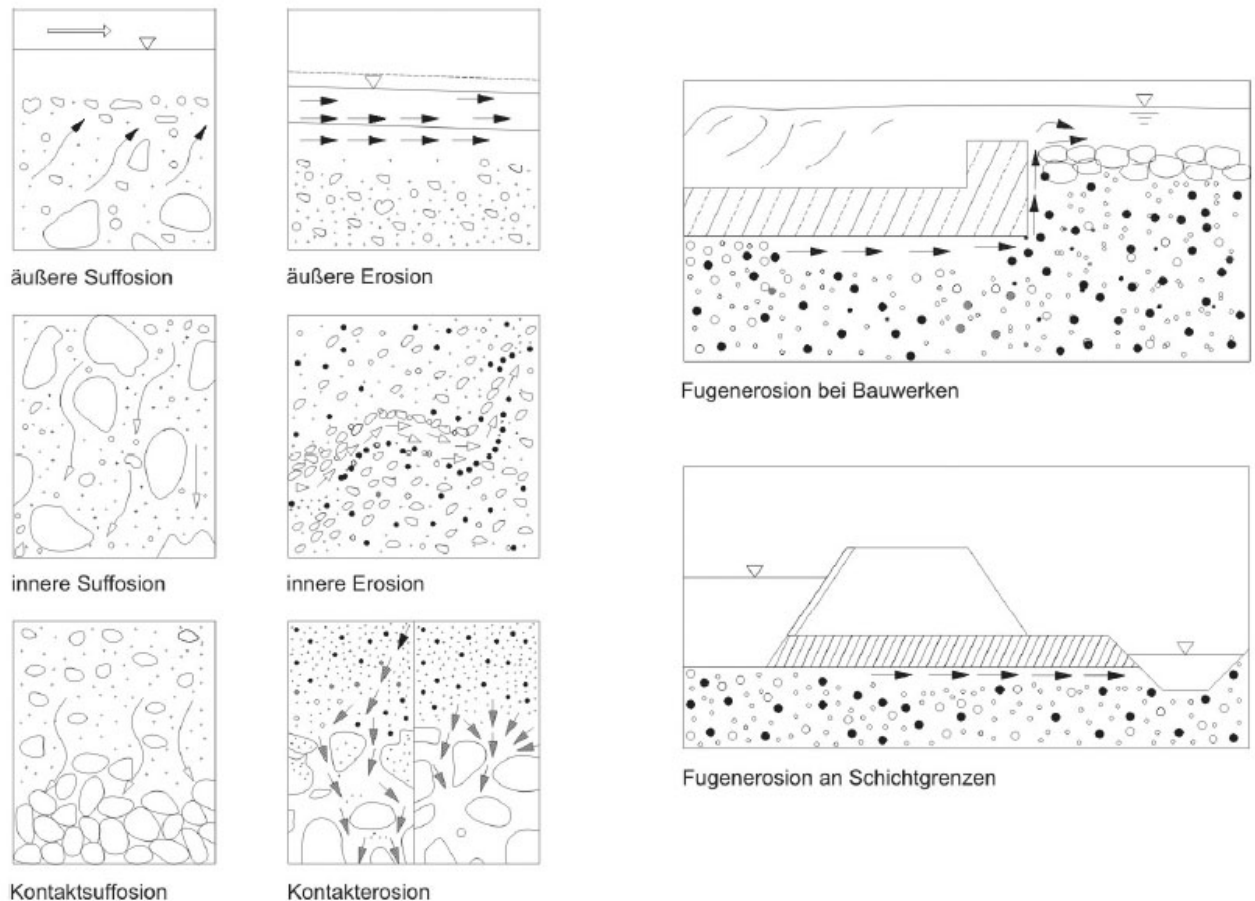


Abb. 11: Materialtransport im Boden (BAW, 2011)

Unterschiedliche, außerhalb und innerhalb des Dammes wirkende Faktoren können zu einem Versagen des Dammes führen.

Der **Dammbruch** ist das Komplettersagen des Dammes und führt zur Überflutung des Hinterlandes. Die wahrscheinlichste Ursache ist die Überströmung des Dammes (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Gründe für einen Dammbruch können laut DÖSCHER (1999) außerdem das Ausfließen von Wasser und Dammmaterial an der landseitigen Böschung, das Abrutschen des Erdkörpers entlang einer Gleitlinie sowie innere Erosion und folglich Einbruch der Dammoberfläche sein.

Aber auch folgende in HASELSTEINER & STROBL (2005) beschriebene Teilversagens-Varianten gefährden die Standsicherheit, setzen die Schutzfunktion des Dammes herab und können in Kombination oder bei zu lang anhaltender Belastung ebenfalls zu einem Komplettersagen führen:

Der **Grundbruch** ist ein Bruch am Böschungsfuß. Zum Grundbruch kommt es beispielsweise, wenn der Damm auf einer nachgiebigen Schicht liegt. Dadurch kann es zum Absacken der Böschung und in Folge dessen zur Bildung von Rissen und Spalten auf Böschung und Krone kommen.

Beim **hydraulischen Grundbruch** wird die Bildung von Rissen und Spalten durch die Bodenauflockerung und –volumsvergrößerung bei Einwirkung von zu starken Strömungskräften verursacht.

Beim **globalen Böschungsbruch** kommt es zum Abrutschen der Böschung entlang einer Gleitfuge. Beim **lokalen Böschungsbruch** rutschen oberflächige Bodenschichten parallel zur Oberfläche ab und verursachen Risse.

Hohlräume, wie zum Beispiel Bauten von Wühltieren oder alte Gänge verrotteter Wurzeln, können einen **Einbruch** des Dammes verursachen.

Bei einer **Setzung** setzt sich der Dammkörper durch Untergrundverschiebung nach unten ab. Dies führt zu Zerrungen und Stauchungen, die Risse verursachen können. Bei Einstau kann entlang dieser Risse verstärkt Sickerwasser durchströmen und zu Erosionen führen.

Beim **Abschieben** gleitet der Deichkörper entlang einer Scherfuge, wie sie beispielsweise an Dichtungen entstehen können, ab.

Beim **Auftrieb** strömt Wasser unter dem Deich bis zum Hinterland hindurch und hebt die Bodenschicht hoch. Der Auftrieb wird beispielsweise durch das Vorkommen durchlässiger Schichten im Untergrund und gering durchlässiger Bodenschichten verursacht.

Durch zu lange Einstauung des Dammes kann es zum **Austreten von Sickerwasser** über eine Hangquelle auf der landseitigen Böschung kommen. Dabei kann die Böschungsoberfläche erodieren.

Wird die Dammoberfläche nicht ausreichend durch eine intakte Vegetationsdecke geschützt, kann es bei Einwirkungen von außen wie Wind, Regen oder Schnee zu **Oberflächenerosion** kommen.

Steigt der Wasserstand so weit, dass das Wasser über die Dammkrone tritt, so spricht man von einer **Überströmung**. Durch die Wasserströmung kann es zu Erosionen an Krone und landseitiger Böschung kommen.

Bei Hochwasserereignissen können die **Strömungskraft des Wassers** und der **Wellenauflauf beim Einstau** zu Erosionen führen. Zusätzlich können Treibgut und Eis Schäden an der Dammoberfläche verursachen.

(HASELSTEINER & STROBL, 2005)

2.3 WURZEL

Die Wurzel ist ein meist unterirdisch gelegenes, für die Aufnahme von Wasser und Ionen aus dem Boden spezialisiertes Saugorgan der Pflanze (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

2.3.1 Aufgaben der Wurzel

Die Hauptaufgaben der Wurzel sind die Verankerung der Pflanze im Boden und die Aufnahme und Weiterleitung von Wasser mit den darin gelösten Stoffen. Alle weiteren Aufgaben sind Folgeerscheinungen dieser primären Aufnahmefunktionen.

Die weiteren Aufgaben sind die Ausscheidung von Stoffen zur Erschließung von Nährstoffen im Boden, die Speicherung von Assimilaten und Wasser mit den darin gelösten Stoffen, die Rückführung von Assimilaten in den Spross, der Austausch von Luft mit dem Spross, die fallweise Assimilation, die Symbiose mit Pilzen zur besseren Aufschlüsselung von Stoffen aus dem Abfall der Pflanzen, die Symbiose mit Bakterien zur Bindung von Luftstickstoff, die Bildung von Wurzelknospen zur Erhaltung und Vermehrung der Pflanzen und die Erschließung des Bodens bzw. des Luftraumes durch das Richtungswachstum der Wurzelspitzen (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).

Die Aufgaben der Wurzel haben auch Auswirkungen auf den Boden und das Bodengefüge. Durch die Verankerungsfunktion der Wurzel im Boden kommt es zur Verstrickung und Komprimierung der Bodenteilchen. Die Wasseraufnahme der Wurzel entzieht dem Boden Wasser, die Nährstoffaufnahme bewirkt eine Änderung von Ladung, Dichte und Bindung der Bodenteilchen und durch die aktive und passive Ausscheidung von organischem und anorganischem Material wie beispielsweise der Ablösung von Zellen beim Wachstumsvorgang, ändert sich der Anteil organischer Substanz im Boden. (GROSS, 1991)

2.3.2 Wurzelaufbau

Als Meristem bezeichnet man einen Verband teilungsbereiter Zellen. Je nach Lage unterscheidet man bei Pflanzen zwischen Apikal- und Lateralmeristem. Das Apikalmeristem befindet sich an den Spitzen von Sprossen und Wurzeln, das Lateralmeristem verläuft parallel zu den Seiten des jeweiligen Pflanzenorgans. Zu den Meristemen, die am Wurzelaufbau beteiligt sind, gehören Protoderm, Prokambium und das Grundmeristem. Diese differenzieren sich zu den primären Geweben: Rhizodermis, Zentralzylinder und primäre Rinde. (HIETZ et al., 2009)

Übersicht über die Entwicklung der Wurzel

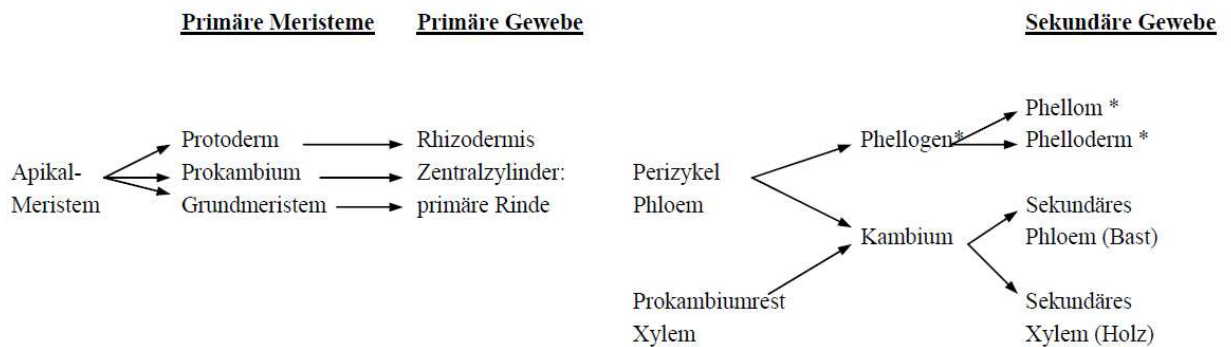


Abb. 12: Die Entwicklung der Wurzel (HIETZ et al., 2009)

Die Rhizodermis ist das primäre Hautgewebe der Wurzel. Das sekundäre, durch das Dickenwachstum entstandene Hautgewebe besteht aus Phellogen (Korkkambium), einem Meristem, das nach außen Phellom und nach innen Phelloderm bildet.

(HIETZ et al., 2009)

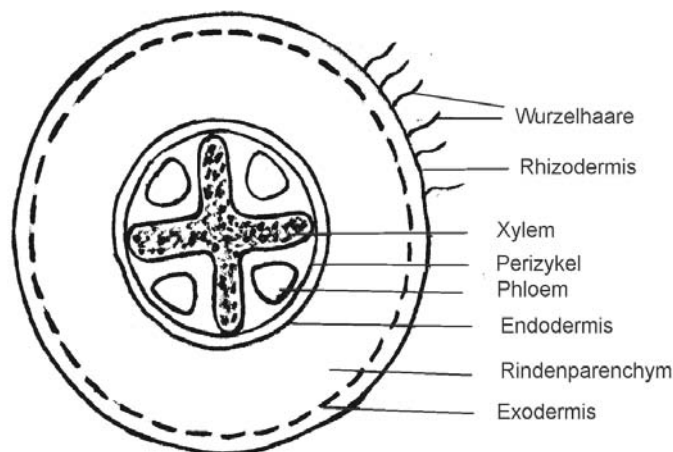


Abb. 13: Wurzelaufbau im Querschnitt (HIETZ et al., 2009)

Abbildung 13 zeigt die primären Gewebe der Wurzel im Querschnitt. Die Oberflächenschicht der Wurzel im primären Wachstumszustand ist, wie bereits erwähnt, die Rhizodermis. Die Rhizodermis erfüllt keine Abschlussfunktion wie die Epidermis, die das primäre Hautgewebe bei Stängeln, jungen Stämmen und Blättern darstellt, sondern ermöglicht die Aufnahme von Substanzen aus dem Boden.

(HIETZ et al., 2009)

Unter der Rhizodermis liegt die primäre Rinde (Rindenparenchym). Sie wird nach außen hin von der Exodermis und auf der Innenseite von der Endodermis umgeben. Wasser und gelöste Stoffe können bis zur Endodermis eindringen. Ab da bildet sie eine Sperre für Substanzen, die den Stofftransport belasten würden.

Bei älteren Wurzeln stirbt die gesamte Rhizodermis ab und es entwickelt sich ein Abschlussgewebe. Dies entsteht durch Einlagerung von Suberin in den Zellen der Exodermis. Die Exodermis wird dadurch wasserundurchlässig und verhindert den Stoffaustausch mit dem Boden.

Im Inneren der Wurzel liegt der aus dem Prokambium entstandene Zentralzylinder, welcher aus Xylem und Phloem besteht, die eingebettet im Grundgewebe zu radiären Gefäßbündeln vereinigt sind. Im Xylem werden die von der Wurzel aus dem Boden aufgenommenen Stoffe zu den oberirdischen Teilen der Pflanze befördert. Das Phloem transportiert Kohlenhydrate von den Orten der Synthese zu den Orten des Verbrauchs oder der Speicherung.

Der Zentralzylinder wird vom Perizykel umgeben, der bei der Entstehung von Seitenwurzeln, der Anlage von Peridermen und beim sekundären Dickenwachstum von Bedeutung ist (HIETZ et al., 2009).

Die Abbildung 14 auf der folgenden Seite zeigt nochmals den Wurzelaufbau im Längsschnitt und die drei unterschiedlichen Wurzelzonen. In der Teilungszone werden Zellen durch besonders starke Teilungsaktivität vermehrt, in der Streckungszone findet das Streckenwachstum statt und in der Differenzierungszone erfahren Zellen ihre endgültige Ausbildung. An der Wurzelspitze sitzt die Kalyptra, die Wurzelhaube. (HIETZ et al., 2009)

Im Bereich der Differenzierungszone befinden sich die Wurzelhaare. Sie sind Zellausstülpungen zur Oberflächenvergrößerung, um die Wasser- und Nährsalzaufnahme aus dem Boden zu verbessern (BRAUNE et al., 2002).

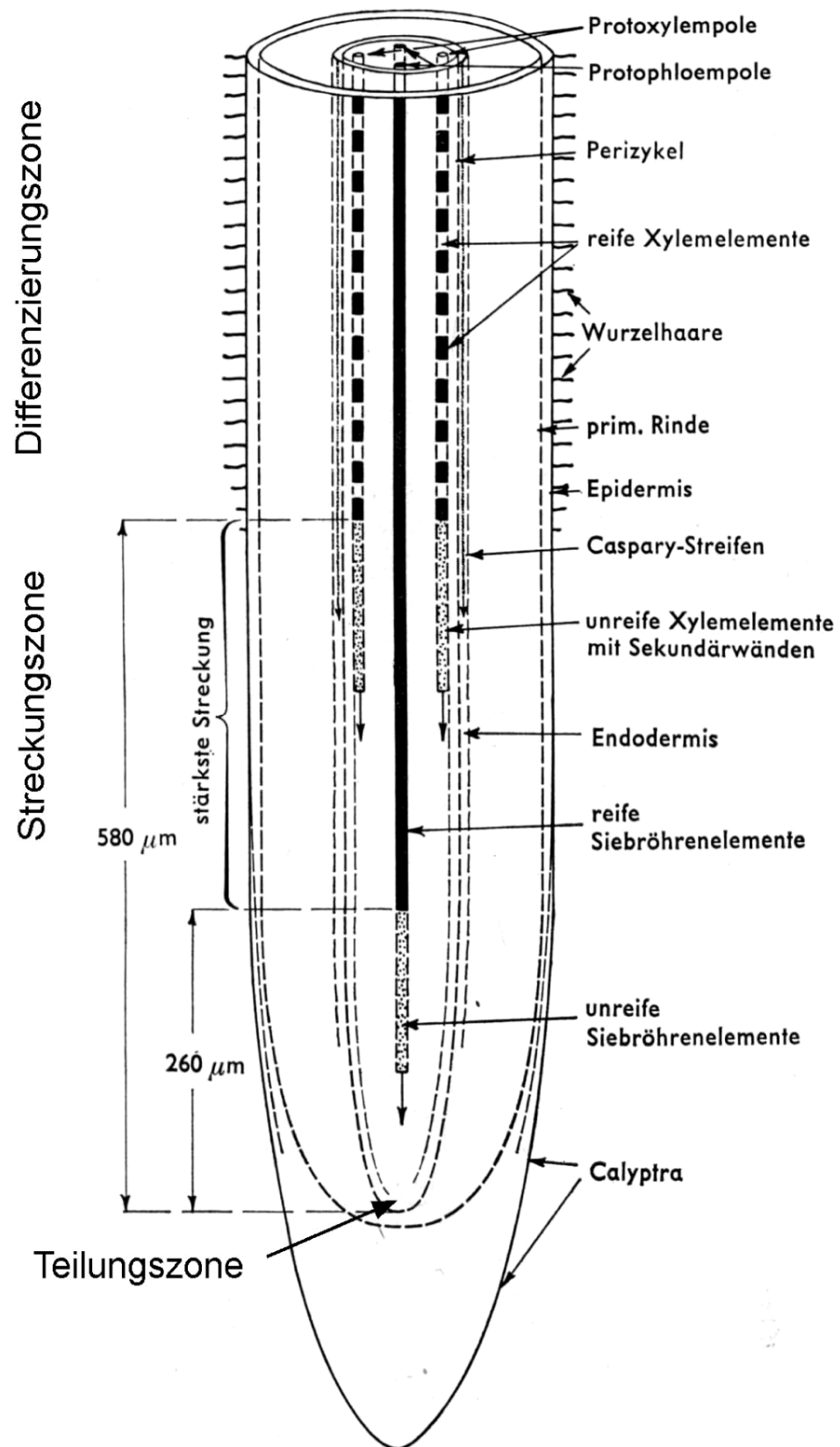


Abb. 14: Wurzelzonen (HIETZ et al., 2009)

2.3.3 Wurzelformen

Man unterscheidet je nach Wuchsrichtung vertikale und horizontale Wurzeln. Die vertikalen Wurzeln differenzieren sich weiters in Pfahlwurzeln, die vom Wurzelpol ausgehend meist abwärts wachsen, in Nebenpfahlwurzeln, die parallel zur Pfahlwurzel nach unten wachsen, in Senkwurzeln, die meist von dickeren Horizontalwurzeln aus abwärts wachsen, und in Herzwurzeln, welche vom Wurzelstock ausgehend schräg nach unten verlaufen.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Generell unterscheidet man zwischen Flachwurzeln und Tiefwurzeln. Die Tiefwurzler lassen sich weiters in Pfahlwurzler und Herzwurzler unterteilen. Der Flachwurzeltyp kommt einerseits genetisch bedingt vor (z.B. Rosskastanie, Esche, Grauerle, Fichte) und andererseits standortbedingt durch Staunässe oder verdichtete Bodenhorizonte.

(FLORINETH et al., 2012/13)

Die Wurzeltypen sind jedoch nur relativ selten in ihrer typischen Form zu finden. Wie in Kapitel 2.3.6 „Genetik und Umwelteinfluss der Wurzelformen“ noch näher erläutert wird, beeinflussen vor allem Standortverhältnisse die Ausprägung der arttypischen Merkmale sehr stark, sodass es häufig zu Mischformen der Wurzeltypen kommt.

Der Pfahlwurzeltyp tritt häufig bei jungen Gehölzen auf und ist durch eine stark hervortretende Polwurzel gekennzeichnet. Beim Herzwurzeltyp fehlen Polwurzel und kräftige Hauptseitenwurzeln, wodurch er eine gleichmäßige, etwa halbkugelförmige Bewurzelung im engeren Stockbereich aufweist. Der Herzwurzeltyp entsteht oft aus der Pfahlwurzelform von jungen Holzgewächsen.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

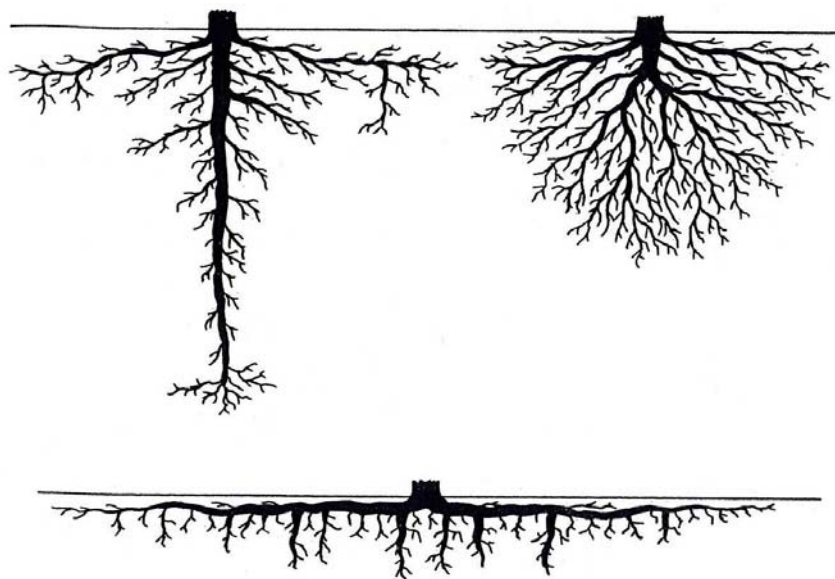


Abb. 15: (v.l.n.r.) Pfahlwurzeltyp, Herzwurzeltyp und Flachwurzeltyp (ROLOFF, 2008)

Je nach räumlicher Verteilung der Wurzelmasse differenziert man außerdem zwischen zylinderförmigen, verkehrt zylinderförmigen, teller- oder scheibenförmigen, hantelförmigen und T-förmigen Wurzeltypen. Beim zylinderförmigen Wurzeltyp sind die Wurzeln relativ gleichmäßig in der Form eines Zylinders im durchwurzelten Bodenraum verteilt. Der verkehrt zylinderförmige Typ hat einen annähernd zylinderförmigen, aber nach oben erweiterten Wurzelkörper. Beim teller- oder scheibenförmigen Wurzeltyp verlaufen die Wurzeln in den oberen, besser erwärmten Bodenschichten und weisen eine höhere Seitenausdehnung auf als bei den anderen Wurzeltypen. Für den hantelförmigen Wurzeltyp sind flachstreichende Gruppen von Wurzeln im oberen und unteren Bereich charakteristisch. Beim T-förmigen Wurzeltyp ist die Bewurzelung im oberen Bereich erweitert und nach unten hin lang und schmal.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

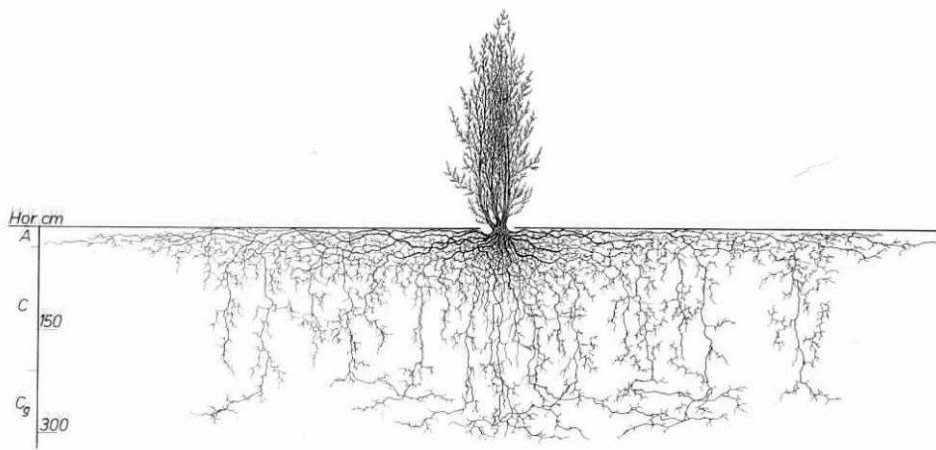


Abb. 16: Zylinderförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

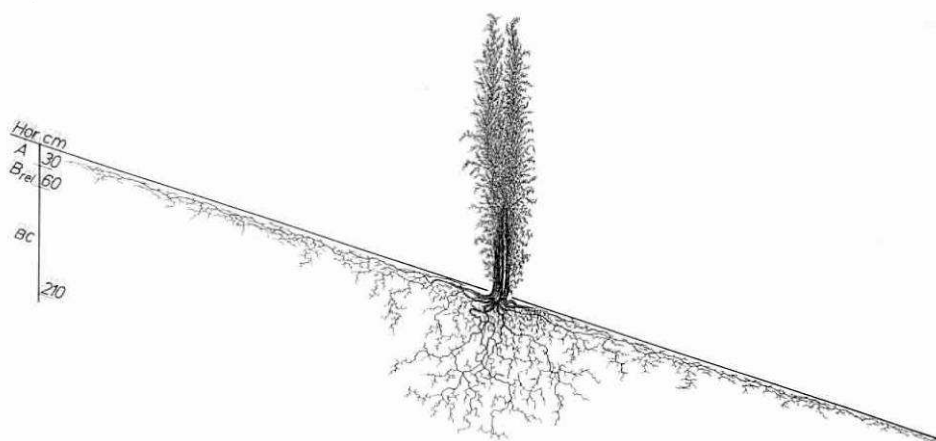


Abb. 17: Verkehrt zylinderförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)



Abb. 18: Scheibenförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

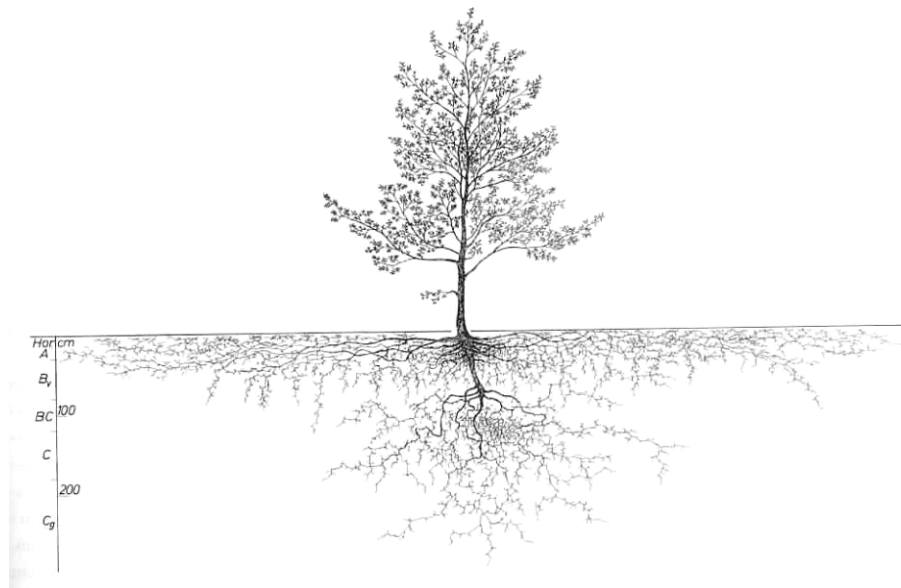


Abb. 19: Hantelförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

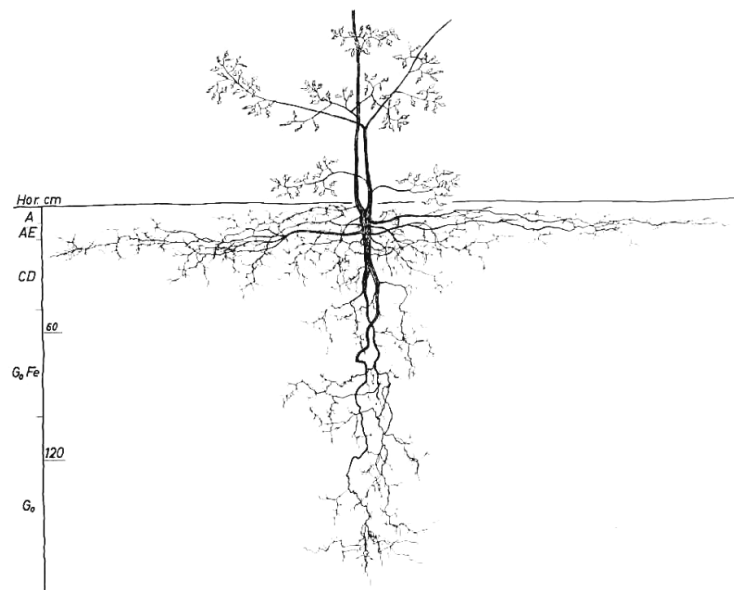


Abb. 20: T-förmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

2.3.4 Primäres Wachstum

Das von den Meristemen der Wurzelspitze abstammende Zellmaterial baut die primären Gewebe der Wurzel auf. Dieser Vegetationspunkt wird von der Wurzelhaube (Kalyptra) geschützt.

(BRAUNE et al., 2002)

Durch Teilung, Streckung und Differenzierung der Zellen des Apikalmeristems werden Zellen zur Wurzelspitze und zur Wurzelbasis hin abgegeben und es kommt zum Längenwachstum.

Die äußersten Zellen der Wurzelspitze lösen sich ab, bewirkt durch die sogenannte natürliche Mazeration, die enzymatisch ausgelöste Verschleimung der Mittellamelle. Sie werden laufend von innen her durch die neuen Zellen ersetzt. Die Schleimbildung bei der Auflösung der Mittellamellen dient auch der Verringerung des Reibungswiderstandes beim Eindringen der Wurzel in den Boden.

(HIETZ et al., 2009)

2.3.5 Sekundäres Wachstum

Beim sekundären Wachstum handelt es sich um das Dickenwachstum der Wurzel. Hierbei kommt es zu einem Zuwachs im Zentralzylinder (BRAUNE et al., 2002).

Die zwischen Xylem und Phloem gelegenen Parenchymzellen beginnen sich zu teilen. Es entstehen Kambiumzellen, die nach außen Bast- und nach innen Holzzellen bilden. Die Perizykelzellen über den Xylempolen teilen sich und schließen sich mit den kambialen Streifen zu einem vollständigen Kambiummantel zusammen.

In den äußeren Lagen des Perizykels entsteht das Phellogen, welches nach außen Phellomzellen und nach innen Phelloderm abgibt. Die primäre Rinde wird dadurch zerrissen und abgestoßen.

Auch etwaige Seitenwurzeln entstehen aus dem Perizykel. Die Perizykelzellen teilen sich und durchdringen die primäre Rinde. Schließlich bilden sich durch Zelldifferenzierung und -teilung Apikalmeristem, primäres Gewebe und die Wurzelhaube der Seitenwurzel.

(HIETZ et al., 2009)

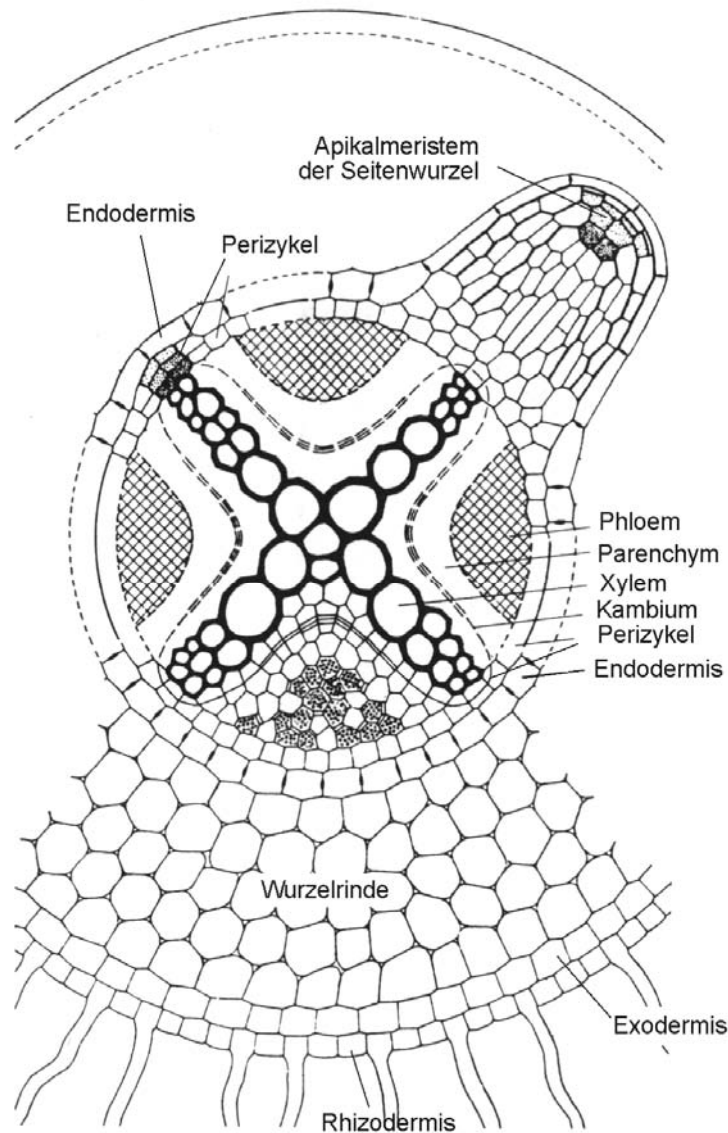


Abb. 21: Beginn des sekundären Wachstums und Bildung einer Seitenwurzel (HIETZ et al., 2009)

2.3.6 Genetik und Umwelteinfluss der Wurzelformen

Die Wurzelform wird durch die genetischen Anlagen der Pflanze bestimmt. Dieser erbliche Bauplan ist im Wesentlichen das Ergebnis einer genetisch fixierten Anpassung an bestimmte Umweltbedingungen. Zusätzlich beeinflussen aber auch aktuelle Umweltfaktoren die Ausprägung bestimmter Formen innerhalb der Wandelbarkeit des anlagebedingten Bauplanes.

Genetisch bedingt haben samenlose Pflanzen eine endogene sprossbürtige Bewurzelung (primäre Homorrhizie) und Samenpflanzen eine polbürtige Bewurzelung (Allorrhizie) oder ebenfalls eine endogene sprossbürtige Bewurzelung (sekundäre Homorrhizie). (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Beim allorhizen Wurzelsystem, wie es bei den meisten Zweikeimblättrigen (Dikotylen) und Nacktsamigen (Gymnospermen) vorkommt, wächst der Wurzelpol direkt zu einer Hauptwurzel aus. Spross und Wurzel sind deutlich voneinander getrennte Systeme. Beim homorhizen Wurzelsystem gibt es nur morphologisch gleichwertige, sprossbürtige Wurzeln. Während bei der primären Homorhizie keine Hauptwurzel identifizierbar ist, stirbt sie bei der sekundären Homorhizie frühzeitig ab.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

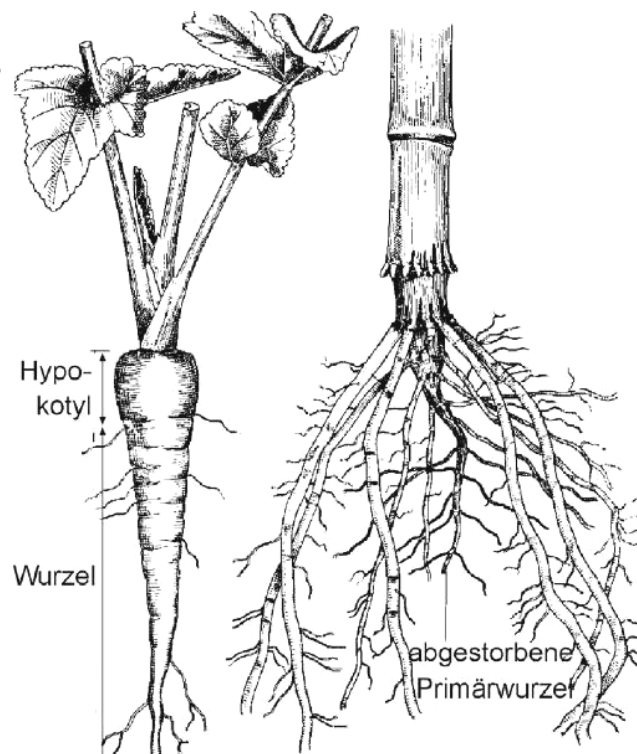


Abb. 22: Allorhizie (l.) bei Dikotylen und Homorhizie (r.) bei Monokotylen (HIETZ et al., 2009)

Generell strebt jede Pflanze danach, ihre anlagebedingte Bewurzelung zu entfalten. Deswegen sind die typischen Wurzelformen auch besonders gut an jungen Pflanzen zu sehen. Ändern sich jedoch die Umweltbedingungen, beispielsweise weil die Pflanze sich nicht in ihrem optimalen Standortsbereich befindet, kommt es zu Abwandlungen der art eigenen Wurzelform.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Das Vorkommen von Licht, Wärme, Wasser, Luft und Nährstoffen beeinflusst die Art der Ausbildung der anlagebedingten Wurzelform maßgeblich.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Das Wurzelwachstum richtet sich nach der Haupteigenschaft der Wurzel als Aufnahmeorgan. Die Wurzeln wachsen sozusagen der Luft, dem Wasser und den Mineralstoffen des Bodens hinterher und werden so zu den noch unerschlossenen Bodenregionen gelenkt (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

Diese gerichteten Wachstumsbewegungen nennt man Tropismen. Sie werden durch ungleiche Streckung in verschiedenen Bereichen des Organs bewirkt, durch differenzielles Wachstum oder differentielle elastische Dehnung. Die Tropismen werden durch Umweltfaktoren ausgelöst und ausgerichtet.

SCHOPFER & BRENNICKE (2010) unterscheiden bei Wurzeln folgende Tropismus-Typen:

- **Gravitropismus:** Die Wachstumsbewegungen werden durch die Schwerkraft ausgelöst und orientieren sich folglich an der Erdanziehung.
- **Thigmotropismus:** Die Wachstumsbewegungen werden durch Berührung, wie beispielsweise dem mechanischen Widerstand des Bodensubstrates, gelenkt.
- **Thermotropismus:** Die Wachstumsbewegungen richten sich nach Wärmegradienten.
- **Hydrotropismus:** Die Wachstumsbewegungen orientieren sich an Feuchtgradienten.
- **Phototropismus:** Bei der Wurzel eine negative, also vom Licht weg orientierte Wachstumsbewegung.

Beim Gravitropismus erfolgt die Aufnahme des Schwerereizes und die Änderung des Wachstums in der vordersten Zellspitze. Die sensorischen Prozesse finden in den zentralen Columellazellen der Kalyptra statt. In diesen Zellen befinden sich Amyloplasten, welche aufgrund ihrer Funktion als Schwerkraftsensoren Statolithen genannt werden.

Wird nun die Wurzel in eine horizontale Position gebracht, sedimentieren die Statolithen auf die untere Zellflanke. Es kommt zu einer Umorientierung des Auxinstroms. Das Auxin fließt nach unten und bewirkt eine Hemmung der Zellstreckung auf der Wurzelunterseite. Durch das ungleiche Wachstum entsteht folglich eine Krümmung nach unten. (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010)

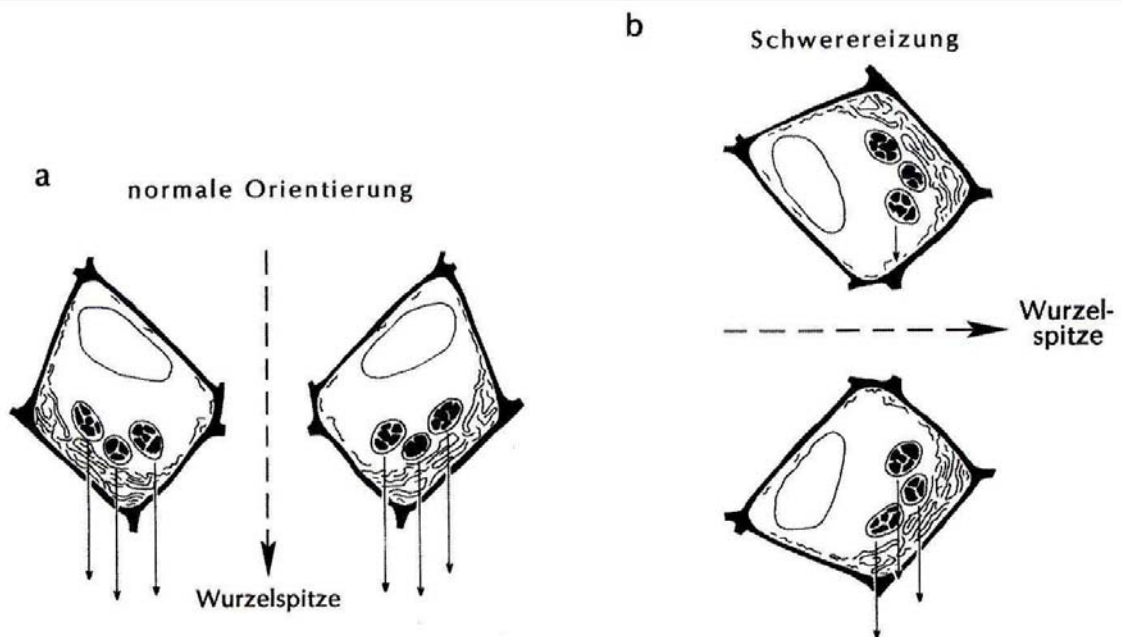


Abb. 23: Sedimentation der Statolithen (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010)

Abbildung 23 zeigt die Sedimentation der Statolithen in der Wurzelspitze. a) stellt die normale Orientierung der Wurzel nach unten dar, b) die Umorientierung durch den Schwerereiz.

Da in der Natur die oben genannten Einflussgrößen immer im gegenseitigen Zusammenspiel vorkommen, ist eine isolierte Betrachtung schwierig. KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) gehen davon aus, dass bei Lichteinfluss gleichzeitig auch ein Wärmeeinfluss wirksam ist. Zusätzlich bildet die Pflanze bei erhöhtem Lichtgenuss durch die gesteigerte Photosynthesewirkung mehr Wurzelmasse, was sich ebenfalls auf das Wachstum auswirkt. Das ist auch der Grund, warum die Durchwurzelungstiefe mit zunehmender Beschattung - und dadurch vermindertem Licht- und Wärmeeinfluss - abnimmt.

Vorwiegend durch das Klima beeinflusste Wurzelformen sind beispielsweise die flachen oder tellerförmigen Wurzelsysteme im Gebirge, im hohen Norden oder in Mooren. In höheren Lagen oder bei anstehendem Grundwasser wurzeln auch tiefwurzelnende Arten weniger tief. In wärmeren, trockenen Lagen streben die Wurzeln mehr nach unten, sodass hier häufig zylinderförmige Wurzelkörper zu finden sind.

Aber auch Textur und Struktur des Bodens beeinflussen das Wurzelwachstum sehr stark. Einerseits durch die bessere oder schlechtere Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, andererseits aber auch durch die Hemmung des Wurzelverlaufs, wenn eine zu hohe Verdichtung oder ein zu hoher Grundwasserstand das Tiefenstreben der Wurzeln verhindert.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Durch ungünstige Bodentextur oder -struktur kann die aufgrund der Bodenerwärmung eigentlich mögliche Wurzeltiefe nicht erreicht werden. Die Wurzelspitzen sind dann nicht mehr in der Lage die Bodenteilchen zur Seite zu schieben und müssen in eine andere Richtung wachsen.

(BLW, 1989)

Im Fels oder Blockschutt ergibt sich die Verteilung der Wurzeln dadurch hauptsächlich aus dem Angebot von Rissen. Manchmal kommt es bei Humusanreicherungen in größeren Holräumen auch zur Entstehung von Wurzelnestern.

(KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

3 GEHÖLZE UND WURZELAUSBREITUNG AN DÄMMEN

Die Stabilität eines Hochwasserschutzdammes wird maßgeblich von der Form seines Bewuchses beeinflusst. Ein Bewuchs mit Gehölzen wird in der Fachwelt sehr kontrovers betrachtet.

Durch das Eigengewicht von Gehölzen erhöht sich die statische Belastung für den Dammkörper (HASELSTEINER, 2007). Auch die übertragenen Schubkräfte verursachen eine Mehrbelastung am Damm. Gehölze erschweren die Sichtung eventueller Schäden, behindern die Verteidigung im Notfall und stellen ein Hindernis für den Einsatz großer Maschinen dar. Wasserseitige Bäume können die Strömung aufstauen und dadurch den Wasserstand erhöhen (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Wellenschlag und Strömung können dann Erosionen begünstigen (HASELSTEINER, 2007). Durch den Schatten von Gehölzen wird die Entwicklung einer bodendeckenden Gräser-Kräuter-Vegetation verhindert, was zu Oberflächenerosion führen kann (HASELSTEINER & STROBL, 2005).

Weiters können Gehölze den Standort attraktiver für Wühltiere machen, deren Wühltätigkeit zu Hohlräumen im Boden führt (HASENSTEINER & STROBL, 2005). Die Bauten und Gänge der Wühltiere sind bevorzugte Sickerwege (BAW, 2011). Untersuchungen an Dämmen in Kalifornien zeigen allerdings, dass das kalifornische Ziesel und die amerikanische Taschenratte eher offenere Habitate für ihre Bauten bevorzugen und Standorte mit Bäumen meiden. Das liegt vermutlich daran, dass offenere Flächen die nötige Sicht zum Entdecken von Raubtieren bieten und bei den sich hauptsächlich von Gräsern ernährenden Taschenratten das Nahrungsangebot durch Bäume stark verringert wird.

(VAN VUREN, 2012 und CLVRP, 2011)

Andererseits bietet ein korrekter Aufbau des Gehölzbestandes Schutz für wandernde Tierarten und wertet das Landschaftsbild auf (BLW, 1990). Gehölzstrukturen tragen zur Biotopvernetzung und Biodiversität bei (HASELSTEINER, 2007) und haben durch Entwässerung und Wurzelverankerung bodenstabilisierende Eigenschaften (FLORINETH, 2012).

In den folgenden Kapiteln werden die negativen und positiven Effekte von Gehölzwurzeln auf die Dammstabilität vorgestellt, sowie die derzeitige Regelung des Bewuchses auf Dämmen und Maßnahmen zur Ertüchtigung von Dämmen mit Gehölzbewuchs beschrieben. Im Kapitel 3.1.5 „Wurzelausbreitung von Gehölzen auf Dämmen“ wird anhand in der Literatur dokumentierter Wurzelfreilegungen erläutert, wie sich Gehölzwurzeln auf Dämmen ausbreiten, und insbesondere die Wurzelarchitektur von *Salix alba* näher betrachtet.

3.1.1 Negative Auswirkungen von Gehölzwurzeln auf Dämmen

Folgende negative Effekte können durch Gehölzwurzeln auftreten und die Standsicherheit und Schutzfunktion des Dammes gefährden.

Hohlräume durch abgestorbene Gehölzwurzeln: Verrottete Wurzeln können Hohlräume im Damm hinterlassen. Dadurch wird der Boden durchlässiger und erosionsanfällig. Zusätzlich können sie bevorzugte Fließwege für Sickerwasser darstellen. (HASELSTEINER & STROBL, 2005)

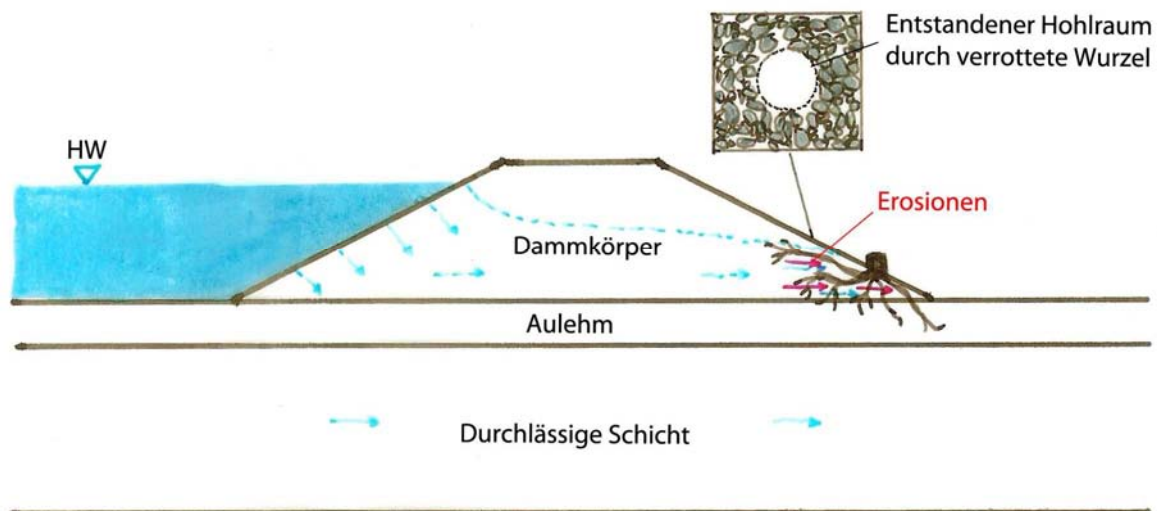


Abb. 24: Verrottende Wurzeln nach Absterben des Baumes (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

Wissenschaftler des Levee Vegetation Research Programs führten am Hochwasserschutzdamm des American River in Sacramento (Kalifornien) Fließversuche bei einem verrottenden Wurzelstock eines Eukalyptusbaumes und bei einem lebenden Zürgelbaum durch, um den Einfluss von lebenden und verrotteten Wurzelsystemen auf die Durchsickerung zu untersuchen. (SHRIRO et al., 2011) Hierfür wurden über und unter den Bäumen Gräben, sowie etwas weiter davon entfernt Kontrollgräben derselben Größe angelegt (CLVRP, 2011). Verteilt über den Testbereich wurden Piezometer und Tensiometer installiert sowie zusätzlich visuelle Beobachtungen während des Fließtestes dokumentiert und die Geometrie des Wurzelsystems und vorhandener Wühltierbauten kartiert (SHRIRO et al., 2011). Der obere Graben wurde mit Wasser gefüllt und auf einem konstanten Wasserstand gehalten. Im unteren Graben wurde das Sickerwasser gesammelt (CLVRP, 2011). Bei manchen verrottenden Wurzeln wurde ein kleiner Abstand zwischen Rinde und Holz gefunden, der mit lockerem Boden gefüllt war (SHRIRO, 2012). Allerdings zeigte der Fließtest, dass das Wasser vermehrt durch ein Netzwerk aus engen Wühltierbauten floss und nicht entlang der Wurzeln. Der Bereich unter dem Wurzelstock wurde zuletzt vom Wasser gesättigt. Sowohl die lebenden als auch die verrottenden Wurzeln waren keine bevorzugten Sickerwege (SHRIRO et al., 2011).

Untersuchungen von 350 Bäumen an 11 unterschiedlichen Standorten in Frankreich zeigen, dass das Verrotten von Wurzeln stark von Gehölzart und dem Wurzeldurchmesser abhängt. Je größer die Wurzeln waren, desto resistenter waren sie gegen Verrottung. In bindigen Böden blieben die alten Gänge der verrotteten Wurzeln zurück, während sie in körnigen Böden zusammenfielen.

(ZANETTI, 2012)

Durchwurzelung von Dichtungen und Dränkörpern: Wachsen Wurzeln in Dichtungen oder Dränkörper, kommt es zu Beschädigungen. Im Falle des Dränkörpers können andere Materialien eingespült werden und dessen Funktion dadurch beeinträchtigen. Folgen sind die Erhöhung der Sickerlinie und das Auftreten von Erosion.

(HASELSTEINER & STROBL, 2005)

Vor allem nach Absterben der die Dichtung durchwachsenen Wurzeln kommt es durch die entstandenen Hohlräume zu Sickerwegsverkürzung und zu einer langfristig erhöhten Durchlässigkeit (BAW, 2011). Besonders Oberflächendichtungen können von Gehölzen auf der wasserseitigen Böschung durchwurzelt werden (HASELSTEINER & STROBL, 2005).

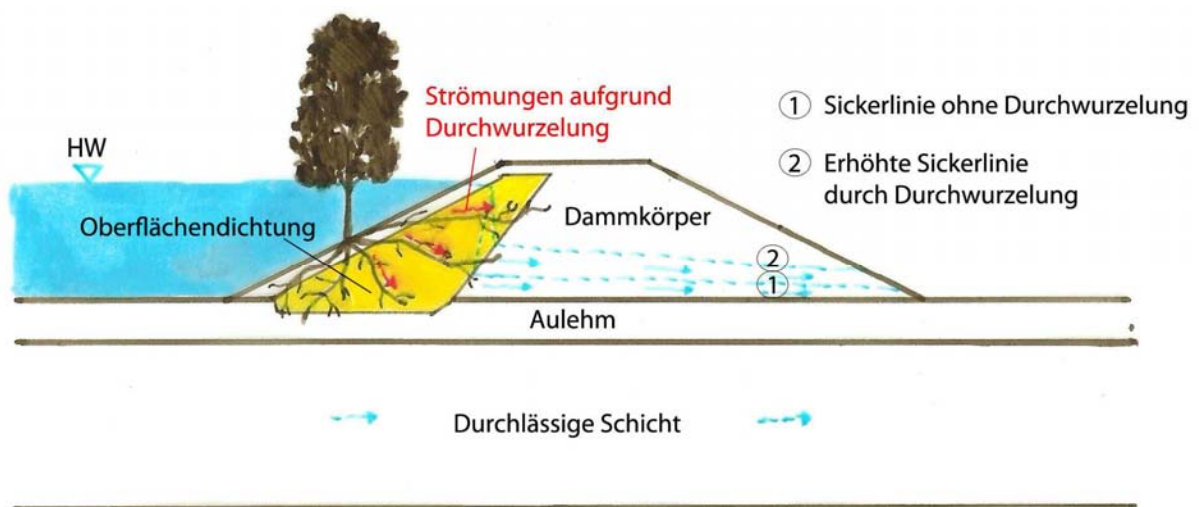


Abb. 25: Durchwurzelung einer natürlichen Oberflächendichtung (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

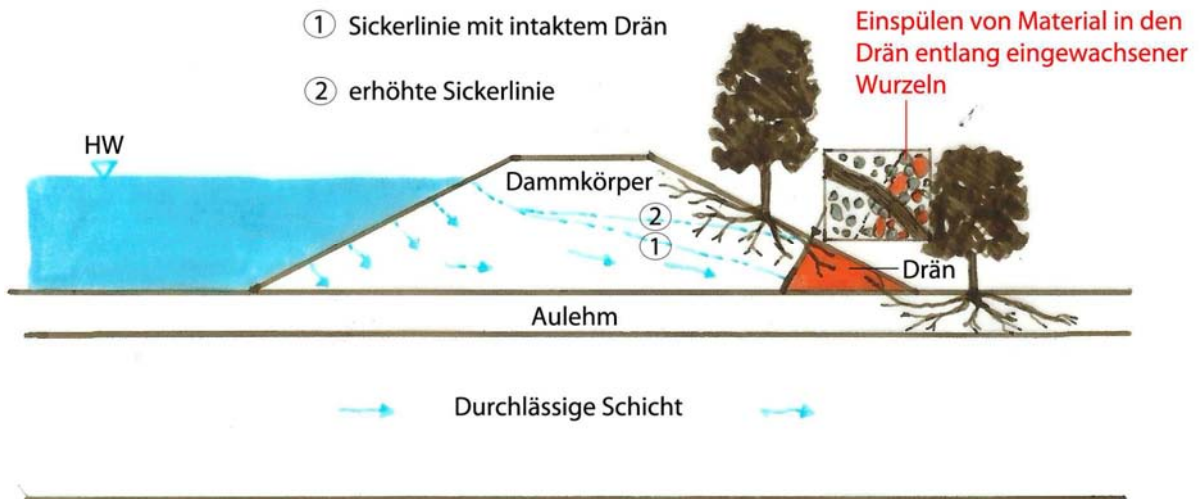


Abb. 26: In den Dränkörper eingewachsene Wurzeln (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

Bodenlockerung und Windwurf: Durch die Bewegung des Baumes bei Windbelastung können die Wurzeln den Boden lockern (DVWK, 1986). Das Pendeln des Stammes wird auf die Wurzeln übertragen. Dadurch wird die Lagerungsdichte des Bodens verringert, die Durchlässigkeit erhöht und die Entstehung von Kontakterosion entlang der Wurzeln gefördert (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Stürzen Bäume um, reißen sie meist Krater in den Damm, was Rutschungen, Einbrüche und Dammbrüche zur Folge haben kann. In den meisten Fällen führt das Umstürzen zu einem Dammbruch (DVWK, 1986). Entscheidend für die Stärke der Windbelastung sind Windgeschwindigkeit und Größe der Angriffsfläche. Das Vorkommen von Windwurf ist wahrscheinlicher, wenn der Damm durchsickert wurde (HASELSTEINER & STROBL, 2005).

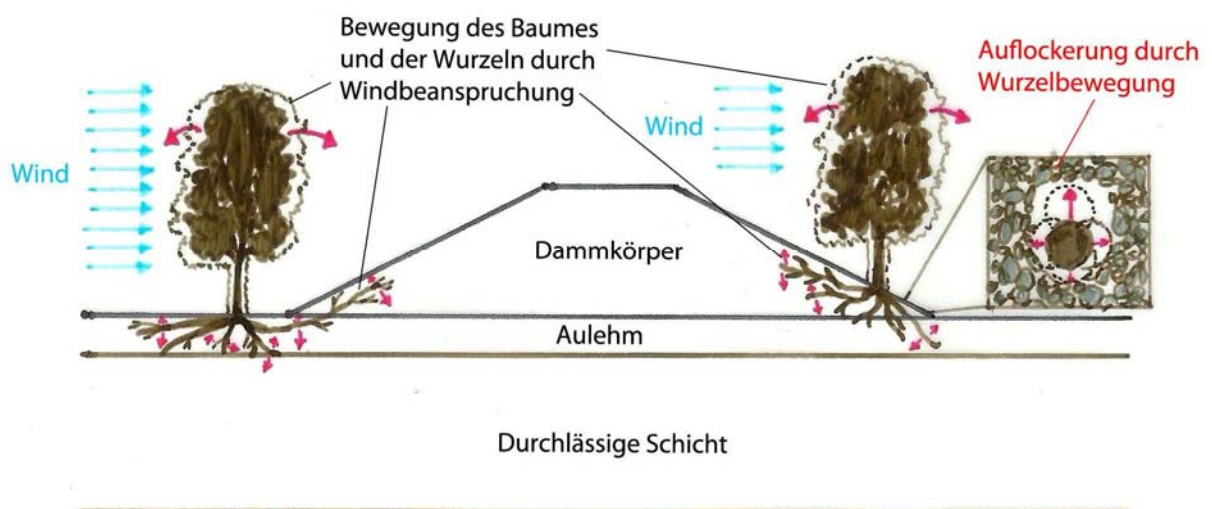


Abb. 27: Bodenlockerung durch Gehölzbewegung am Damm (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

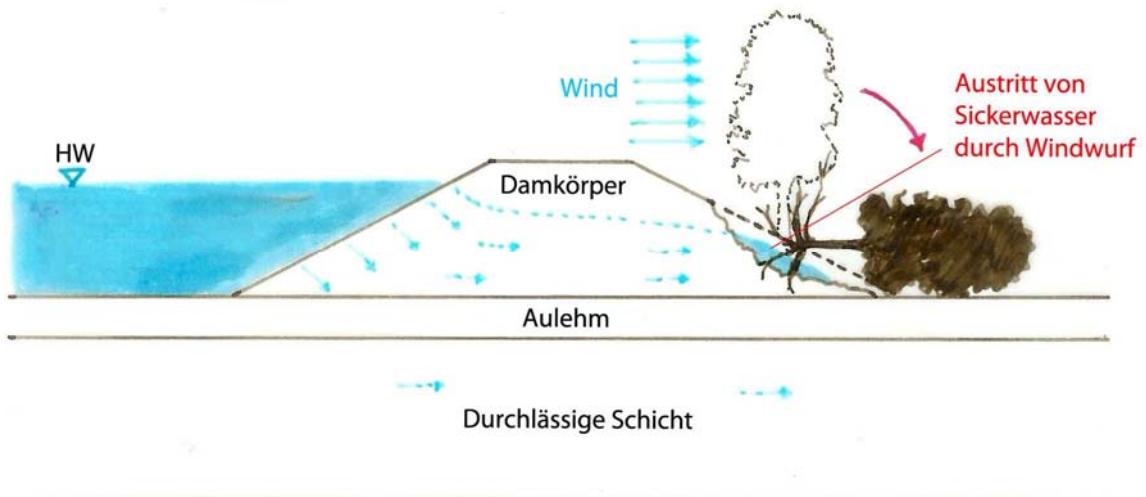


Abb. 28: Ausbruchstrichter durch Windwurf eines Baumes (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

Erhöhung der Sickerlinie: Befinden sich Gehölze auf der Wassenseite des Dammes, kann die Bewegung des Baumes zum Aufpumpen von Wasser entlang der Wurzelkanäle führen und somit die Sickerlinie erhöhen (HASELSTEINER & STROBL, 2005).

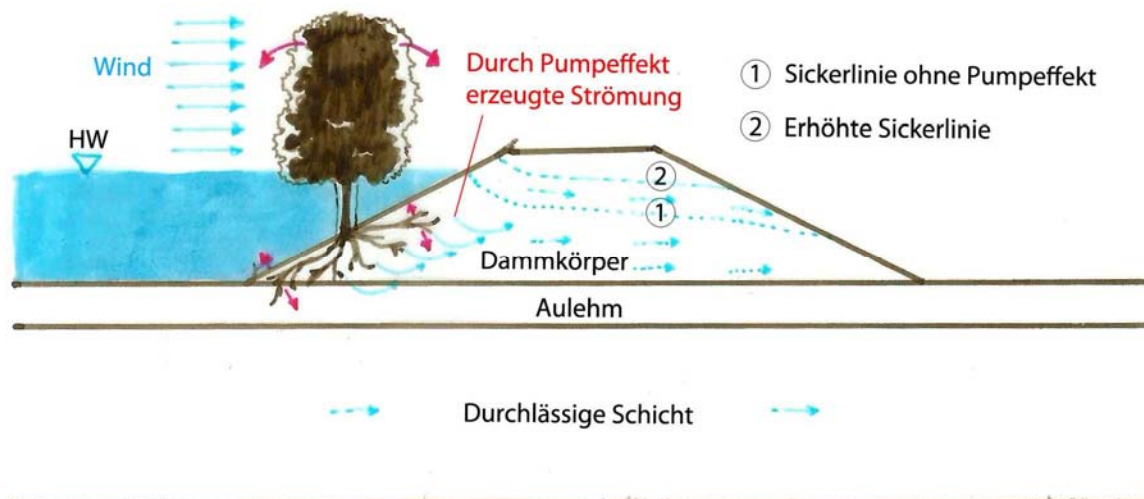


Abb. 29: Durch Baumbewegung erhöhte Sickerlinie (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)

Dokumentierte Windwürfe des bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (BLW) auf Dämmen in Deutschland zeigten, dass die meisten umgestürzten Bäume einen Stammdurchmesser von 20 bis 50 cm hatten. Auf flachgründigen Standorten war die Gefahr von Sturmschäden am Höchsten, jedoch waren die Schäden hier verhältnismäßig gering, da meist nur der Oberboden angerissen oder angehoben wurde (BLW, 1990).

Im Zuge des California Levee Vegetation Research Programs führte PETERSON im Central Valley (Kalifornien) Zugversuche mit Seilwinden an Kalifornischen Weiß-Eichen (*Quercus lobata*) und Frémont-Pappeln (*Populus fremontii*) mit Stammdurchmessern von 15 cm bis zu 1 m durch, um deren Verhalten bei Windbelastung zu berechnen. Die Widerstandskraft der Bäume nahm mit deren Stammdurchmesser zu. Trotz des härteren Holzes und der vermutlich tieferen Wurzelsysteme waren die Eichen nur geringfügig widerstandsfähiger als die Pappeln. Bäume im ufernahen, flachen Bereich waren leichter zu entwurzeln als vergleichbare Bäume auf der Dammböschung. Aus den benötigten Auszugskräften der Versuche konnten die Windgeschwindigkeiten errechnet werden, welche die Bäume umgeworfen hätten. Nur bei zwei kleinen Bäumen mit weniger als 25 cm Stammdurchmesser lagen diese kritischen Windgeschwindigkeiten bei 120 km/h. Die größeren Bäume waren die windstabilsten. Bei 40 cm Stammdurchmesser hätten die meisten einer Windgeschwindigkeit von über 160 km/h stand gehalten.

(CLVRP, 2011 und PETERSON, 2012)

3.1.2 Positive Auswirkungen von Gehölzwurzeln auf Dämmen

Den oben genannten Gefahren für die Standsicherheit des Dammes stehen auch positive Erfahrungen gegenüber. Die bodenstabilisierende Wirkung von Gehölzen und ihrer Wurzeln ist der Ingenieurbiologie schon lange bekannt und wird in der Hang- und Ufersicherung erfolgreich genutzt. Die oben genannten negativen Auswirkungen treffen vor allem für unpassenden Bewuchs wie große Einzelbäume oder sehr dichte Vegetationsbestände zu (HASELSTEINER, 2007). Es liegt somit nahe, dass es bei einem angemessenen Bewuchs mit korrektem Aufbau keine negativen Auswirkungen auf die Standsicherheit des Dammes gibt.

Im Zuge des California Levee Vegetation Research Programs (CLVRP) des Ingenieurkorps der US Armee wurde unter anderem eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Durch die große Anzahl gesammelter Berichte konnte der potentielle Einfluss von Gehölzvegetation auf die vergangene Funktionsfähigkeit von Dämmen beurteilt werden. Von insgesamt 6.970 vegetationsbezogenen Berichten wurden in 348 Dammbüche dokumentiert. Bei keinem dieser Berichte wurde ein Zusammenhang zwischen der Gehölzvegetation und dem Dambruch identifiziert. 41% der vegetationsbezogenen Berichte bestätigten, dass es keinen Einfluss der Vegetation auf die Funktionsfähigkeit des Dammes gab. 26% dokumentierten einen Einfluss der Vegetation auf die Unterhaltung des Dammes und 12% zeigten einen Zusammenhang zwischen Funktionsfähigkeit und Vegetation auf.

(KABIR & BEAN, 2011)

Entwässerung: Durch die Aufnahme von Wasser durch die Wurzeln wird der Boden verfestigt und stabilisiert (HASELSTEINER, 2007). Vegetation entzieht dem Boden Wasser, dadurch kommt es zu einer gesteigerten Kohäsion der Bodenpartikel und einer erhöhten Bodenwasserspannung. Die entstehende Gewichtsverminderung erhöht ebenso den inneren Reibungswiderstand und die Standsicherheit von Böschungen.

(FLORINETH, 2012)

Lysimeterversuche mit Fässern, von denen ein Teil mit Purpur-Weiden (*Salix purpurea* L.) bepflanzt, ein weiterer Teil mit einer Gräser-Kräuter-Mischung begrünt und ein Teil ohne Bewuchs gelassen wurde, zeigten, dass es beim Bewuchs mit den Purpur-Weiden bereits einen Monat nach der Bepflanzung zu erhöhten Bodenwasserspannungen und geringeren Bodenwassergehalten kam als bei der Gräser-Kräuter-Vegetation oder den unbewachsenen Fässern. Die Gräser-Kräuter-Vegetation wirkte sich erst gegen Ende der Vegetationsperiode und beschränkt auf die obersten Bodenschichten positiv auf den Bodenwasserhaushalt aus.

(LAMMERANNER & OBRIJETAN, 2011)

Verdübelungseffekt: Wurzeln durchdringen ungünstige Gleit- und Rutschflächen und erhöhen so die Standsicherheit (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Wurzelintensive Sträucher schützen vor Oberflächenerosion (HASELSTEINER, 2007).

Erosionsminderung: Elastische Sträucher setzen bei Überströmung die Fließgeschwindigkeit herunter und wirken so einer Erosion entgegen. Dünne Zweige junger Gehölze biegen sich durch die Last des überströmenden Wassers und legen sich so schützend über die Bodenoberfläche.

(FLORINETH, 2012)

Überströmversuche auf Versuchsdämmen in Deutsch-Wagram zeigen, dass eine Spreitlage mit Purpur-Weiden (*Salix purpurea* L.) überströmungsresistenter ist als eine Gräser-Kräuter-Begrünung. Beim ersten Versuch im Jahr 2008 mit einer Überströmdauer von 30 Minuten kam es zwar bei der Spreitlage zu leichten Freispülungen im obersten Feinwurzelbereich, aber in den Folgeversuchen 2009 und 2010 gab es bei den Weidenspreitlagen auch bei dreistündiger Überströmung mit 50 Litern pro Sekunde keine weiteren Erosionserscheinungen mehr, während bei der Gräser-Kräuter-Begrünung auf der gesamten Fläche leichte Erosionen festgestellt wurden.

(LAMMERANNER & OBRIJETAN, 2010)

Absenken der Sickerlinie: Gehölzwurzeln senken durch ihre Saugspannung die Sickerlinie ab (SEETHALER, 1999). Durchsickerungsversuche auf Versuchsdämmen in Deutsch-Wagram (NÖ) ergaben bis jetzt nur geringfügige Unterschiede im Verlauf der Sickerlinie bei Weidenpflanzungen und Gräser-Kräuter-Begrünungen. Allerdings kann dadurch auch eine negative Auswirkung des Weidenbewuchses auf die Durchsickerung ausgeschlossen werden.

(LAMMERANNER & OBRIJETAN, 2010)

WESSOLLY (2002) führte baumstatische Untersuchungen an 500 Linden und Rosskastanien am seit 65 Jahren mit Bäumen bepflanzten Rheindamm durch und kam zu dem Ergebnis, dass keinerlei Gefährdung von den untersuchten Bäumen ausging. Zugversuche zeigten, dass eine flache Verwurzelung sowie Adventiv- und Würgewurzeln keinen negativen Einfluss auf die Standsicherheit hatten.

3.1.3 Derzeitige Regelung des Bewuchses

In einigen Publikationen und Regelwerken wie beispielsweise der DIN-NORM 19712 „Flussdeiche“ (1997), dem Merkblatt 210 „Flussdeiche“ (DVWK, 1986) des deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau oder dem Merkblatt „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“ (BAW, 2011) der Bundesanstalt für Wasserbau wird die Vermeidung von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen empfohlen. Sie gefährden die Standsicherheit von Dämmen und dürfen dadurch nur unter besonderen Bedingungen geduldet werden.

Laut DIN-NORM (1997) sind von Gehölzen frei zu halten:

- Überdimensionierte Deiche aus Bodenarten, die eine Durchwurzelung begünstigen
- Wasserseitige Böschungen und Bermen, Deichkronen und Überlaufstrecken
- Das untere Drittel der landseitigen Böschung

Bedingt bepflanzt werden dürfen:

- Vorland: es darf zu keiner Einschränkung des Hochwasserabflusses durch Gehölze kommen
- Hinterland: Mindestabstand von 10 m zum Böschungsfuß bei normalwüchsigen Baumarten (Pappel: 30 m). Sträucher sind bis zum Dammschutzstreifen zulässig.

Weitere Anforderungen sind:

- Der erdstatisch erforderliche Dammquerschnitt darf nicht durchwurzelt werden
- Oberflächendichtungen, Drän- und Filterschichten müssen vor Durchwurzlung geschützt werden
- Die Dammunterhaltung darf nicht beeinträchtigt werden
- Verwendung standortgerechter, heimischer Gehölze in Gehölzgruppen
- Gehölze sind aufzuasten, um einer Bodendeckung für Wühltiere entgegen zu wirken
- Gefährden Gehölze aufgrund ihres Alters oder ihrer Größe die Standsicherheit sind sie zu entfernen und spätestens zwei Jahre später ihre Wurzeln auszugraben.

(DIN-NORM, 1997)

Im BAW-Merkblatt steht weiters, dass aufkommende Gehölze frühzeitig zu entfernen sind, und bei abgestorbenen oder zu entfernenden Gehölzen der gesamte Wurzelstock und große Wurzeln in einem Radius von 1 m um den Wurzelstock auszugraben und die Rodungslöcher mit filterstabilem Material zu verfüllen sind (BAW, 2011).

Unter diesen Bedingungen ist somit ein Bewuchs der oberen zwei Drittel der landseitigen Böschung mit einem Abstand von 1 m zur Dammkrone mit Sträuchern und niedrig wachsenden Bäumen zulässig (HASELSTEINER & STROBL, 2005 und BLW, 1984).

Das Bayrische Landesamt für Wasserwirtschaft (BLW) begrüßt in „Hinweise zur standortgemäßen Bepflanzung von Flussdeichen, Stauhaltungsämmen und Vorländern“ (1984) die Bepflanzung von Dämmen mit Gehölzen aufgrund der positiven Auswirkungen auf Naturhaushalt und Landschaftsbild, weist aber ebenfalls auf den Vorrang der Sicherheit der Bevölkerung vor landschaftsästhetischer oder ökologischer Belange hin. Neben denselben Bedingungen wie jenen der DIN-Norm (1997) gibt das Bayrische Landesamt für Wasserwirtschaft an, dass Binnenböschungen mit einer geringeren Neigung als 1:3 und statisch überdimensionierte Dämme großzügiger bepflanzt werden dürfen. Außerdem wird der Einsatz blütenreicher Gehölze als Bienenweide sowie fruchtetragender und dorniger bzw. stacheliger Arten als Nahrungsquelle und Schutz für Tiere empfohlen. (BLW, 1984)

Bewuchs auf überbreiten und überhohen Dämmen

Das Merkblatt „Standsicherheit für Dämme an Bundeswasserstraßen“ (2011) der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beinhaltet Regeln, die von der DIN-Norm abweichen, da es um Bewuchsregelungen für Stauhaltungsdämme an Bundeswasserstraßen geht. Sie können aber auch auf nur bei Hochwasser belastete Dämme angewandt werden.

Überbreite und überhohe Dämme sind Dämme, deren Querschnitt über den Mindestquerschnitt (vgl. Kapitel 2.2.3 „Linienführung und Standsicherheit“) hinausgeht. Die Bundesanstalt für Wasserbau unterteilt diese Dämme in fünf Zonen, die je nach Lage und vorhandener Dichtung unterschiedliche Bestimmungen zur Bepflanzung mit Gehölzen haben.

(BAW, 2011)

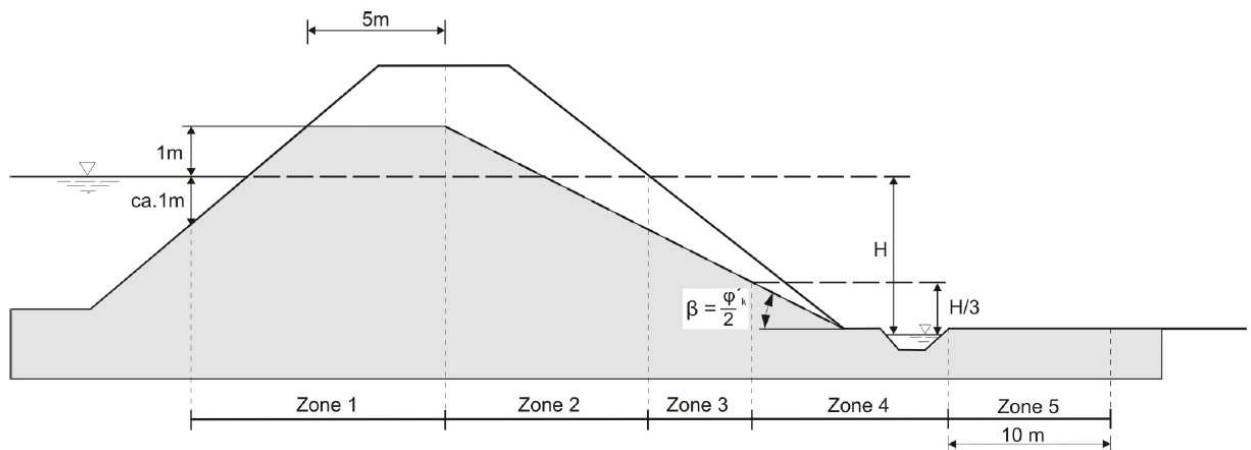


Abb. 30: Bewuchszonen überbreiter oder überhoher Dämme (BAW, 2011)

Weiters beinhaltet das BAW-Merkblatt eine Gehölzliste, welche Bäume und Sträucher in folgende Kategorien einteilt:

- „Tabelle 1: Für Dämme und für das landseitige Dammvorland (alle Zonen) nicht zulässige Bäume
- Tabelle 2: Für Dämme zulässige Sträucher bei innenliegender Dichtung und Dämmen ohne Dichtung (Zone 1)
- Tabelle 3: Für Dämme zulässige Bäume und Sträucher bei Dammüberbreiten > 1m mit Einzelgehölzen und Gehölzgruppen (Zone 2 und 3)
- Tabelle 4: Für einen 10 m breiten Streifen landseitig der luftseitigen Oberkante des Seitengrabens zulässige Bäume und Sträucher (Zone 5)“ (BAW, 2011)

Zone 1 verläuft circa 1 m unterhalb der Wasserlinie bis zur luftseitigen Böschungsschulter des Mindestquerschnittes. In diesem Abschnitt ist bei Dämmen mit Oberflächendichtungen kein Bewuchs mit Gehölzen oder Röhricht zulässig. Dämme ohne Dichtung oder mit Innendichtung dürfen Röhricht und einzelne Strauchgruppen mit einer maximalen Höhe von 4 m aufweisen, bei Dämmen mit durchwurzelungssicherer Innendichtung dürfen bestehende Gehölze erhalten bleiben.

Zone 2 befindet sich luftseitig der Dammkrone des Mindestquerschnitts und darf mit Bäumen und Sträuchern nach Gehölzliste Tabelle 3 mit einer erwartenden Wuchshöhe von bis zu 25 m bewachsen sein. Die Wurzeln dürfen nicht in den Mindestquerschnitt hineinwachsen.

Zone 3 erstreckt sich über die oberen zwei Drittel der luftseitigen Dammböschung. Hier ist wie in Zone 2 eine Bepflanzung mit Bäumen und Sträuchern mit Arten nach Gehölzliste Tabelle 3 zulässig. Zur Gewährleistung der Dammbesichtigung darf die Flächendeckung durch Gehölze maximal 50 % betragen. Bei Nichteinhaltung dieser Regelung müssen Gehölze entfernt werden.

Zone 4 ist das untere Drittel der luftseitigen Böschung und darf nicht mit Gehölzen bepflanzt werden, da dies der Bereich potenzieller Sickerlinienaustritte ist. Auch die Gräser-Kräuter-Vegetation ist durch regelmäßiges Mähen kurz zu halten, um eine uneingeschränkte Dammbesichtigung zu gewährleisten.

Zone 5 erstreckt sich bis 10 m landseitig des Seitengrabens. In dieser Zone sind Bäume und Sträucher nach Tabelle 4 zulässig.

Gehölze sind laut dem BAW-Merkblatt somit nur zulässig, wenn der Dammquerschnitt über den definierten Mindestquerschnitt hinausgeht.

Natürlich aufkommende und abgestorbene beziehungsweise zu entfernende Gehölze sind einschließlich ihres Wurzelstocks und großer Wurzeln zu entfernen und die Rodungslöcher zu füllen und zu verdichten, um einen Austrag von Bodenmaterial zu verhindern.
(BAW, 2011)

3.1.4 Ertüchtigungsmaßnahmen am Damm

HASELSTEINER (2011) beschreibt Maßnahmen zur Ertüchtigung von Dämmen. Generell unterscheidet er zwischen der Verlegung oder Erhöhung des Damms sowie der Verbesserung seiner Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit durch diverse Maßnahmen. Durch die Auswahl passender Gehölze und den Einsatz von Sicherungsmaßnahmen ist es möglich, Gehölze regelkonform auf Dämmen zu platzieren. Diese Maßnahmen sind die Schüttung von Überprofilen, der Einbau von Wurzelhemmschichten und statisch wirksamer Dichtungen sowie die Einzelsicherung von Bäumen.

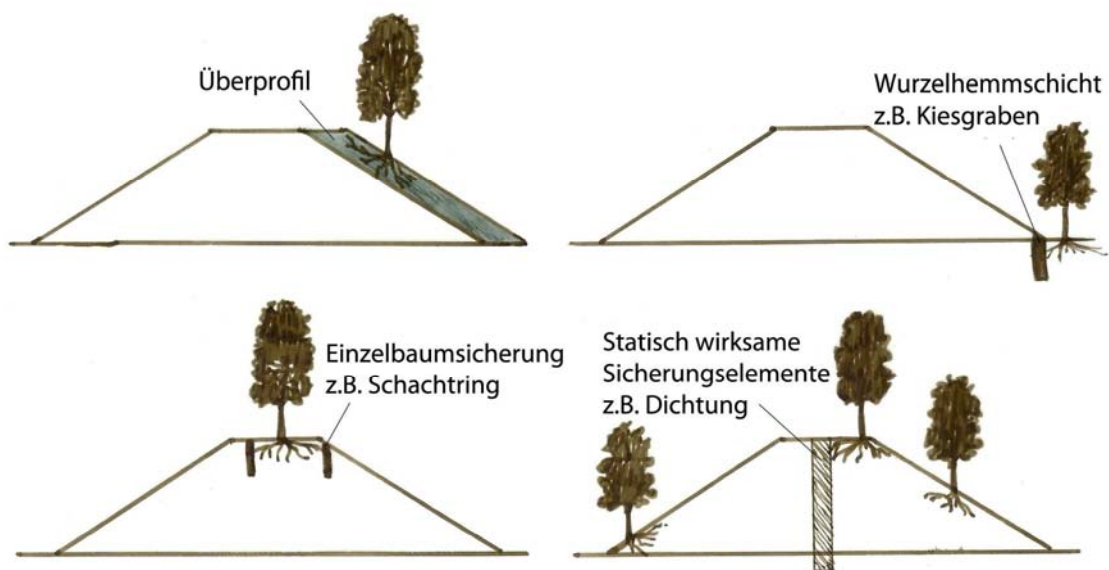


Abb. 31: Ertüchtigungsmaßnahmen für Dämme mit Gehölzbewuchs (nach HASELSTEINER, 2011)

Vor allem statisch wirksame Sicherungselemente wie etwa Stahlspundwände, Schlitzwände, Bohrpfehlwände oder die Bodenvermörtelung werden verstärkt eingesetzt (HASELSTEINER, 2011).

Bei der Bodenvermörtelung wird mit Hilfe von Maschinen eine Abdichtwand direkt in den Damm eingebaut. Hierbei wird das Bodengefüge im Damm zerstört und mit einer Bentonit-Zement-Suspension vermischt, die anschließend erhärtet. (HASELSTEINER, 2007)

Abbildung 32 auf der folgenden Seite zeigt das Bodenvermörtelungsverfahren mittels Fräs-Misch-Injektions-Maschine.

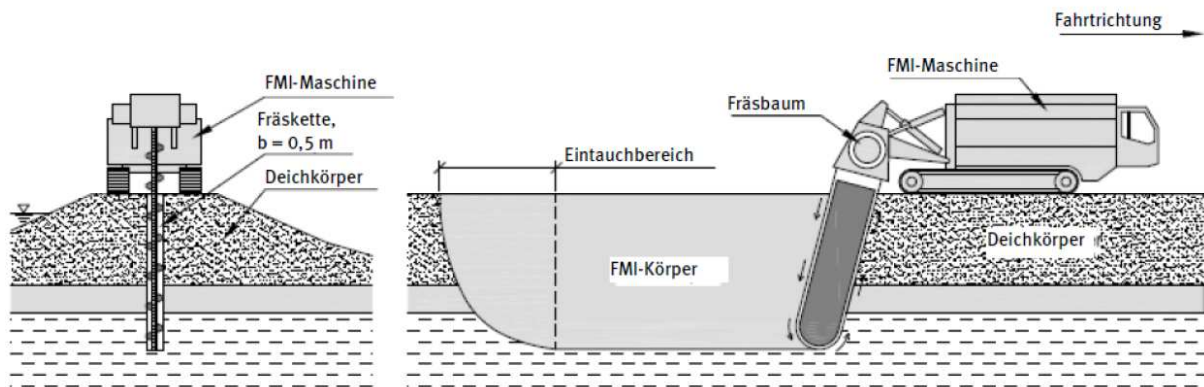


Abb. 32: Einbau einer Abdichtwand (KLEBER-LERCHBAUMER, 2012)

Untersuchungen an einer 18 Jahre alten, 46 cm dicken Zement-Bentonit-Wand an einem Damm am Sacramento River in Kalifornien zeigten, dass auch eine solche Abdichtungswand keine vollständige Barriere für Wurzeln oder Wühltierbauten darstellt.

Auf der Dammkrone befand sich ein Nussbaum (*Juglans regia*), dessen Wurzeln bei der Konstruktion der Mauer abgeschnitten und abgebrochen worden waren. Wie die Ausgrabung der Wand zeigte, konnten sich allerdings im Laufe der Zeit viele Wurzeln regenerieren. Sie drangen einige Zentimeter in die Wand ein und teilten sich dann in kleinere Abzweigungen, die seitlich entlang wanderten und vermutlich Feuchtigkeit aus der Wand, die einen hohen Wassergehalt aufwies, absorbierten. Manche Wurzelstränge wanderten sogar mehr als 3 m seitwärts. Die Mauer wies kleine, vertikale Risse auf, die teilweise von kleinen Wurzeln durchwachsen waren. Alle vorgefundenen Wurzeln, die in die Mauer eingedrungen waren, taten dies ausschließlich über diese Risse.

2010, ein Jahr nach den ersten Untersuchungen, wurde an einer anderen Stelle eine weitere Ausgrabung entlang derselben Mauer durchgeführt. An diesem Standort war die Mauer etwa 33 cm breit. Zwischen 15 und 30 m von der Mauer entfernte Pappeln (*Populus fremontii*) wurzelten, ähnlich den Beobachtungen aus 2009, durch kleine vertikale Risse in die Mauer. Zwei Eichen (*Quercus lobata*), die sich circa 1,20 m unter der Dammkrone auf der landseitigen Böschung befanden, durchwurzelten die Mauer nicht.

In 1 bis 1,80 m unterhalb der Dammkrone wurden Zieselbauten mit Durchmessern zwischen 5 und 25 cm gefunden, die in einer Tiefe von circa 4,50 bis 6 m 1,20 und 1,70 m weit in den Damm und sogar in die Mauer selbst reichten. Ein Bau verlief von oben herab Richtung Mauer und dann im Zickzack etwa 90 cm in das Mauermaterial hinein. Dass das Ziesel so weit in der Mauer gegraben hat, obwohl diese nur 33 cm breit war, lässt darauf schließen, dass das Material der Mauer gegenüber dem Dammmaterial bevorzugt wurde. Ein Grund hierfür könnte sein, dass das härtere Material der Mauer weniger leicht zusammenstürzt.

(HARDER et al., 2010 und HARDER et al., 2011)

Die Untersuchungen zeigten, dass die Wurzelinteraktionen mit der Mauer stark mit den Baumarten variierten. Die Pappelwurzeln wuchsen länger und tiefer als die des Nussbaumes oder der Eiche und durchwuchsen die Mauer. Außerdem liegt die Vermutung nahe, dass die Mauer durch ihre Feuchtigkeit die Wurzeln anlockte. Das Auftreten von Wühltierbauten in der Mauer und so tief innerhalb des Dammes bestärkt die Annahme, dass Wühltiere eine ernstzunehmende Gefahr für die Standsicherheit bedeuten. (HARDER & KROLL et al., 2010 und HARDER & KROLL et al., 2011)

3.1.5 Wurzelausbreitung von Gehölzen auf Dämmen

Das Bayrische Landesamt für Wasserwirtschaft dokumentiert in seinem Informationsbericht „Gehölze auf Deichen“ (BLW, 1990) die Ergebnisse von Wurzelauflösungen an Dämmen und Windwurf von Gehölzen in Bayern.

Wie bereits in Kapitel 2.3.6 „Genetik und Umwelteinfluss der Wurzelformen“ beschrieben, bestätigen auch die Untersuchungen in Bayern, dass arttypische Wurzelsysteme durch Standortbedingungen modifiziert werden.

Bei Wassermangel, verursacht durch geringe Niederschläge und niedrige Wasserkapazität des Bodens wie es häufig bei Dämmen mit kiesigen Substraten der Fall ist, hatten die Gehölze flache Wurzelteller im oberen Bodenbereich mit geringer Verzweigung und wenigen Feinwurzeln.

Auf Dämmen, wo es in tieferen Schichten wasserhaltende Substrate gab, trat genau der gegenteilige Effekt auf. Vor allem Pfahlwurzler durchwurzelten die trockenen Bereiche, bis sie das Wasserangebot in der Tiefe erreichten.

In Böden mit Stauwasserhorizonten (Pseudogley), wo durch die Dichtelagerung des Bodens starke Schwankungen im Wasser- und Luftaushalt gegeben waren, wurzelten sauerstoffbedürftige Gehölze eher im Oberboden. Die Erschließung des Unterbodens war sehr unterschiedlich und artabhängig. Beispielsweise wurzelte die Fichte flach, Lärche, Birke oder Rotbuche mitteltief und Tanne, Stieleiche und Schwarzerle tief.

Hatte der Boden einen dauernden Überschuss an Wasser (Stagnogley), so fand das Wurzelwachstum nur auf den oberen, nicht durchnässten Horizonten statt. Die Wurzeln mancher Arten wie zum Beispiel Weide, Erle und Ulme konnten in den Grundwasserhorizont hinein wachsen. Stagnierendes, sauerstoffarmes Grundwasser wurde jedoch gemieden. Dadurch fanden sich häufig büschelartige ebene Wurzelverzweigungen über dem Grundwasserspiegel.

(BLW, 1990)

Bei dichten Sand-, Lehm- oder Tonböden wandelten sich die ursprünglichen Wurzelformen oft in einen Senkwurzeltyp um, bildeten also eine größere Anzahl von Horizontalwurzeln, eine stärkere Verzweigung und flachere Ausbreitung der Vertikalwurzeln. Bei extrem verdichteten Böden kam es bei allen Gehölzen zu einem gestauchten Wurzelsystem. Waren nur die obersten Bodenschichten stark verdichtet, kam es vor allem bei jungen Pflanzen zur Ausbildung flacher Wurzelsysteme, die sich jedoch im Laufe der Zeit auch weiter nach unten ausdehnen können.

Das Richtungswachstum der Wurzeln richtete sich vor allem nach dem Vorkommen organischer Substanz. So kam es im Oberboden zur Anreicherung von feinen Wurzeln, da dieser oft einen höheren Humusgehalt aufweist. Bei Böden mit geringer Nährstoffversorgung wuchsen die Wurzeln weitläufiger und waren weniger stark verzweigt.

(BLW, 1990)

Auch HASELSTEINER beschreibt, dass bei Dämmen an der Donau, der Loisach und am Lech die Durchwurzelung von Schwarzpappel, Weide, Grauerle und Ahorn bevorzugt in der Oberbodenschicht stattfand. Teilweise wurden von einzelnen Wurzeln aber auch ungünstige Bodenschichten oder Dichtungen durchdrungen. Generell wiesen die Bäume, gegen ihre genetisch bedingten Wurzelformen, hauptsächlich flache Wurzelsysteme auf. (HASELSTEINER, 2007)

ZANETTI untersuchte 350 Bäume an 11 unterschiedlichen Standorten in Frankreich und bestätigte ebenfalls, dass Struktur, Volumen und Wurzelverzweigung hauptsächlich von der Bodentextur und der Wasserverfügbarkeit beeinflusst wurden. Die Umweltbedingungen hatten einen größeren Einfluss auf die Ausbildung des Wurzelsystems als die Genetik der Bäume.

(ZANETTI, 2012)

Bei Untersuchungen von Pappeln (*Populus fremontii*) und Eichen (*Quercus lobata*) an drei Hochwasserschutzdämmen in Kalifornien stellte man fest, dass 80 % des Wurzelsystems in der Oberschicht (30 cm bis 1 m) lagen. Die Wurzeln wuchsen verstärkt horizontal und gleichmäßig parallel zur Böschungsoberfläche entlang des Hanges, statt in die Tiefe einzudringen. Böschungsabwärts hatten die meisten Bäume eine größere Wurzel ausbreitung, mehr Biomasse und eine höhere Wurzelanzahl. Es gab also hangabwärts mehr Wurzeln als hangaufwärts.

(BERRY & CHUNG, 2012 und CLVRP, 2011)

Untersuchungen des Forschungsprojekts „Gehölstrukturen an Dämmen und Deichen“ über die Wurzelentwicklung von Spreitlagen aus Purpur-Weiden (*Salix purpurea* L.) im Vergleich zu einer Gräser-Kräuter-Vegetation auf einem stark verdichteten Versuchsdamm zeigten, dass es bei der Gräser-Kräuter-Begrünung in der ersten Vegetationsperiode eine sehr hohe Wurzelkonzentration in der obersten Bodenschicht, vor allem in 5-10 cm Tiefe gab. Die Wurzelkonzentration war bei der Weidenbepflanzung deutlich geringer, aber gleichmäßiger bis in tiefere Schichten verteilt.

(LAMMERANNER & OBRIJETAN, 2011)

In der dritten Vegetationsperiode wiesen die Weiden Sprosslängen von durchschnittlich 60 cm mit Durchmessern von 16 mm auf, und hatten ein 70 cm tief reichendes Wurzelwerk mit größtenteils unter 2 mm großen Wurzeldurchmessern (LAMMERANNER & OBRIJETAN, 2010).

3.1.5.1 Einfluss der Lage

Untersuchungen des US Army Engineer Research and Development Center (ERDC) zeigten, dass neben der Architektur des Wurzelsystems auch die Position des Baumes am Damm vor allem durch den Einfluss seines Gewichtes eine große Rolle für die Standsicherheit spielt. In Modellberechnungen wurde festgestellt, dass aufgrund der zusätzlichen Gewichtsbelastung und Übertragung von Scherkräften, die Standsicherheit leicht zurück ging, wenn sich die Bäume auf der Krone oder Mitte der landseitigen Böschung befanden. War der Baum am Böschungsfuß, trat sowohl auf der landseitigen, als auch der wasserseitigen Böschung ein positiver Effekt auf, da der Baum wie ein Anker fungierte und ein Gegengewicht für Hangrutsche darstellte. Allerdings wurde bei dieser Studie die Möglichkeit eines Windwurfs nicht mit einberechnet. Ein umgestürzter Baum am Böschungsfuß verursacht die größten Schäden. Ab einer angenommenen Windstärke von 65 km/h verringerte sich in den Berechnungen jedoch überall die Sicherheit, egal an welcher Stelle sich die Bäume am Damm befanden.

(ERDC, 2011 a und CORCORAN, 2012)

Weiters war der negative Effekt auf die Durchsickerung des Dammes am größten, wenn sich der Baum am Dammfuß befand, wobei dieser Effekt davon abhängig war, wie stark der Baum in den Berechnungen die Bodendurchlässigkeit des Dammes veränderte. Bäume, die sich auf der Böschung über dem Grundwasserspiegel befanden, hatten einen hemmenden Einfluss auf die Durchsickerung des Dammes. Der durch die Wurzelzone gehemmte Wasserstrom und die daraus resultierende geringe Durchlässigkeit führten zu einem Anstieg des hydraulischen Gradienten. Generell ergaben die Berechnungsmodelle, dass die Wurzeln nur das Fließfeld in ihrer unmittelbaren Umgebung beeinflussten und keine Änderung im gesamten Fließfeld verursachten.

(ERDC, 2011 b)

3.1.5.2 Wurzelsystem der Silber-Weide (*Salix alba*)

Da sowohl am Hochwasserschutzdamm der Zaya als auch am Donauufer in Hainburg die Wurzelwerke von Silber-Weiden (*Salix alba*) untersucht wurden, wird nun die in der Literatur beschriebene Wurzelarchitektur erläutert.

Die Silber-Weide wird zwischen 15 und 30 m hoch und bevorzugt nasse, periodisch überschwemmte, nährstoffreiche, sandig-kiesige Ton- oder Schlickböden. An diesen Standorten bildet sie Pfahlwurzel- bis Herz-Pfahlwurzelssysteme aus. Junge Weiden haben eine einfache, senkrecht abwärts wachsende Pfahlwurzel, die mit dem Alter immer breiter wird und intensive Seitenwurzeln ausbildet. Weiden können an feuchter Luft oder Erde Adventivwurzeln bilden und Erdwurzeln in Wasserwurzeln umwandeln.

(BLW, 1990)

KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) beschreiben die räumliche Verteilung der Wurzelmasse auch als breit verkehrt kegelförmig. Die folgende Abbildung zeigt eine junge Silber-Weide in einer südseitigen, sickerfeuchten Hangmulde mit durchlässigem, sandigem Boden.

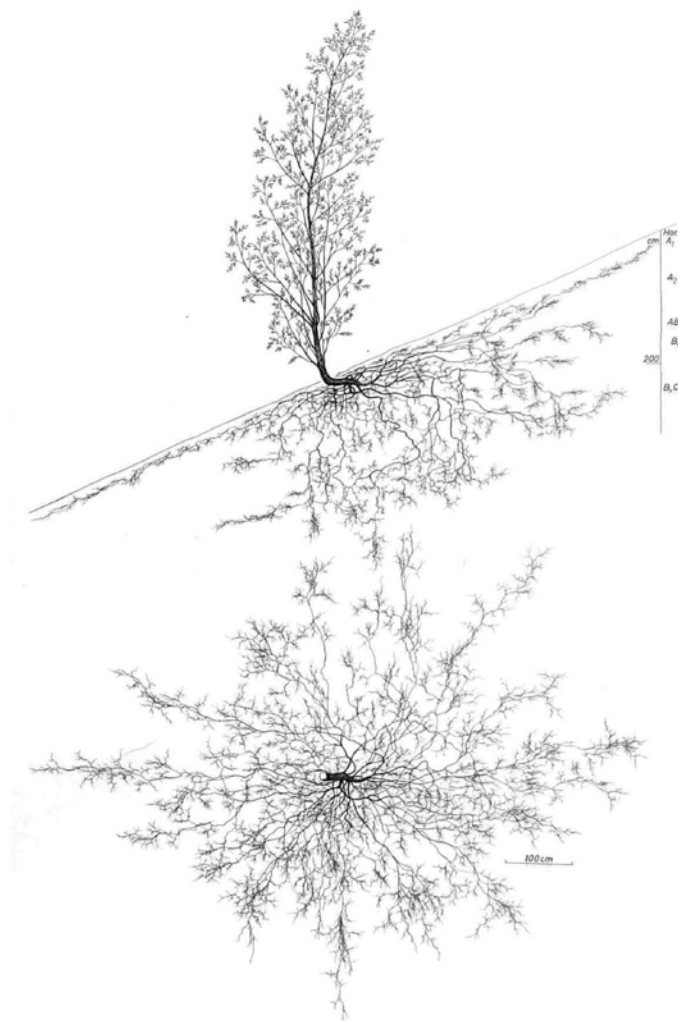


Abb. 33: typisches Wurzelsystem von *Salix alba* (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

Abbildung 34 zeigt eine 19 m hohe, 25 Jahre alte Silber-Weide mit einem Kronendurchmesser von 9 m auf einem Hochwasserschutzdamm in Bayern. Sie ist dreistämmig und weist Stammdurchmesser von 25, 35 und 47 cm auf. Sie wurzelt an der Böschungsmitte. Ihr Wurzelwerk erstreckt sich mit weitläufigen Flachwurzeln cirka 11 m weit und ist durchschnittlich 20 bis 50 cm und maximal 2,5 m tief. Es gibt zwei kräftige Pfahlwurzeln, die bis in den Deichkern reichen, und Horizontalwurzeln, die sich über die Böschung hinaus ins Hinterland erstrecken.

(BLW, 1990)

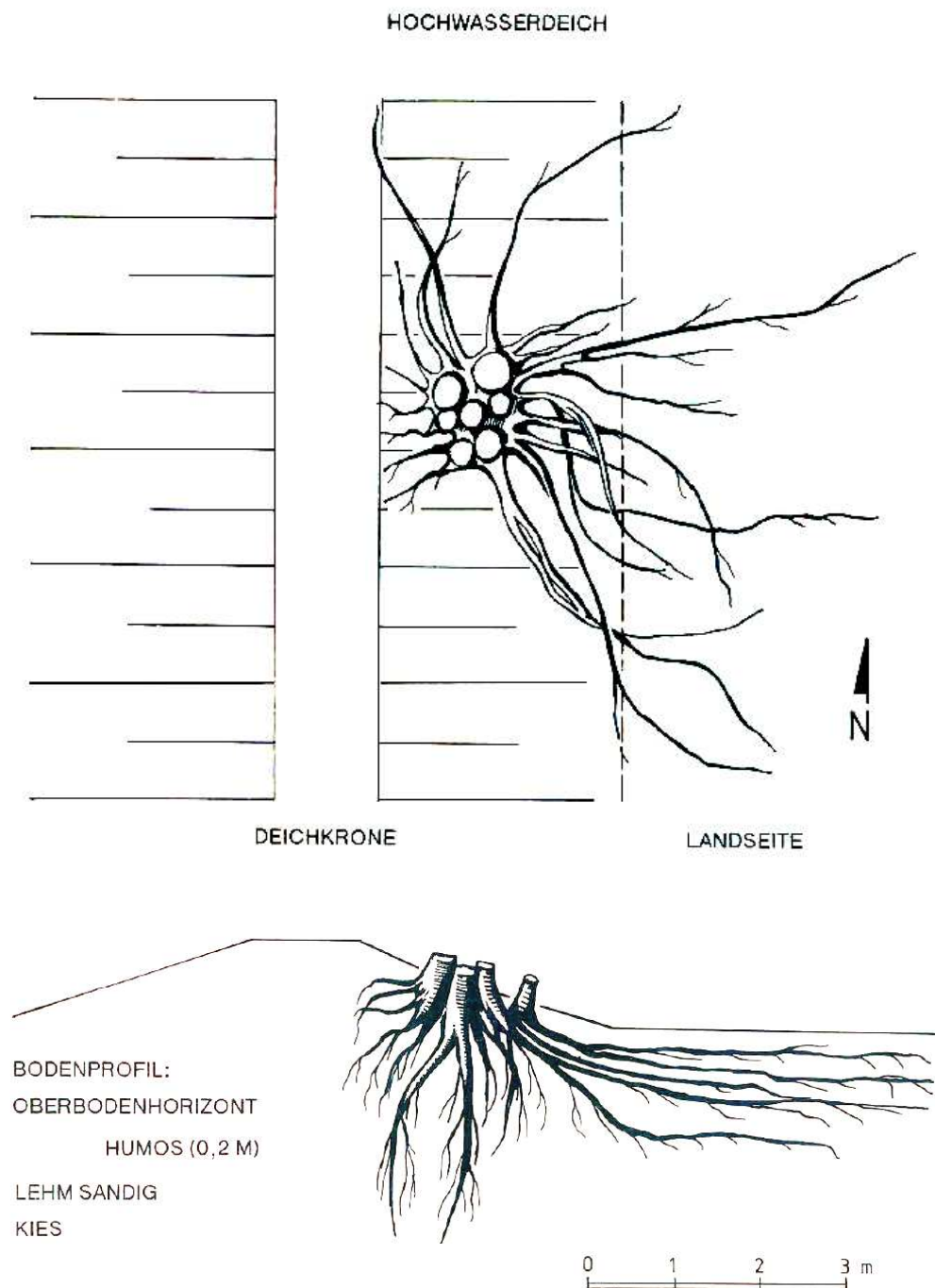


Abb. 34: *Salix alba* mit Herz-Pfahlwurzelsystem und weitreichenden Horizontalwurzeln (BLW, 1990)

Abbildung 35 zeigt die Wurzel Ausbildung einer weiteren Silber-Weide auf einem Hochwasserschutzdamm. Sie wächst nahe der Dammkrone, ist 35 Jahre alt, 13 m hoch und hat einen Kronendurchmesser von 9 m. Sie ist zweistämmig mit Durchmessern von 28 und 37 cm. Es handelt sich um ein weitreichendes Flachwurzelsystem mit einer Horizontalausdehnung von 11 und einer Vertikalausdehnung von 3 m. Auch im Bereich der Dammkrone verlaufen weitreichende Horizontalwurzeln, die 10 cm bis 2,5 m tief wachsen, es gibt eine ausgeprägte Pfahlwurzel.

(BLW, 1990)

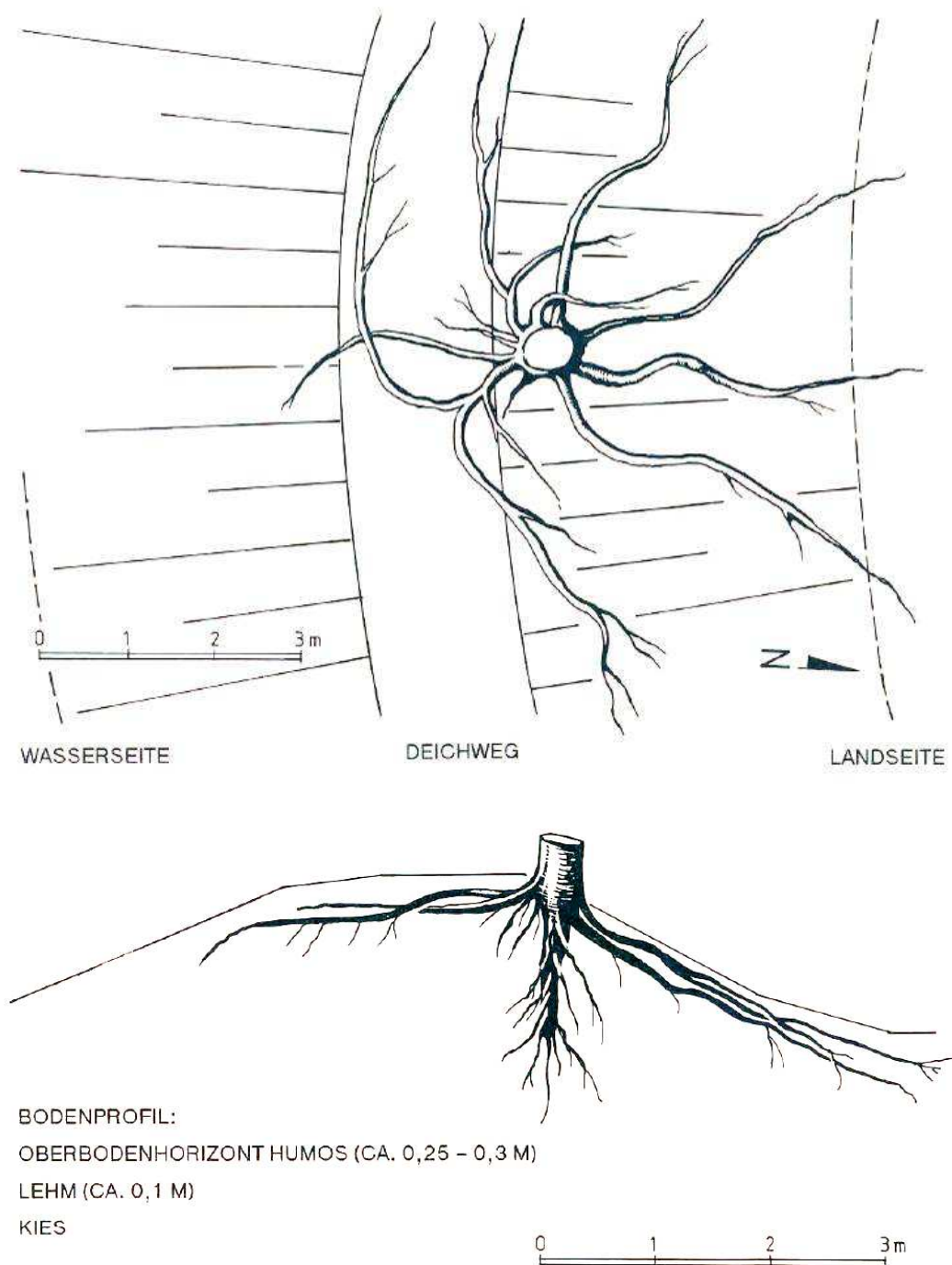


Abb. 35: *Salix alba* mit Pfahlwurzelsystem und weitreichenden Horizontalwurzeln (BLW, 1990)

4 FELDAUFNAHMEN AN DER ZAYA

In den folgenden Kapiteln werden die durchgeführten Arbeiten an der Silber-Weide am Hochwasserschutzdamm der Zaya beschrieben.

Im Kapitel 4.1 „Grundlagen“ werden zunächst in der Literatur recherchierte Informationen wie Niederschlagsverhältnisse, Einzugsgebiet und Abflussregime der Zaya, die historische Entwicklung des Flusses und die Vegetation des Dammes beschrieben, sowie das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Die weiteren Kapitel beruhen nicht mehr auf der Literaturrecherche, sondern beschreiben die durchgeführten Arbeiten. Im Kapitel 4.2 „Aufnahmemethodik“ wird die Vorgangsweise bei der Ausgrabung, den Bodenuntersuchungen und der Wurzelaufnahme erläutert, und schließlich in 4.3 „Ergebnisse“ die Resultate der Bodenuntersuchung, die Verteilung des Wurzelwerks sowie Zustand, Länge und Durchmesser der Wurzeln beschrieben und anhand von Skizzen und Fotos dargestellt.

Im Auftrag des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung Abteilung Wasserbau, des Bundesamtes für Land- und Forstwirtschaft und des Zaya Wasserverbandes begann 1997 die Planung für das Pflegekonzept Zaya. Ausgearbeitet wurde das Konzept von Dipl.-Ing. Ernst GRAND und Dipl.-Ing. Heinz WIESBAUER.

Die Umsetzung startete im Jahr 2000. Im Frühjahr 2012 wurden die geplanten Maßnahmen im Bereich Bullendorf und Wilfersdorf (NÖ) abgeschlossen. Im Zuge der Aufweitung und Renaturierung des Flussbettes wurde auch der bestehende Hochwasserschutzdamm abgetragen.

Dies bot die Möglichkeit, einen alten, im Damm verbliebenen Wurzelstock zu untersuchen. Es handelt sich um eine Silber-Weide (*Salix alba*), die in den 90er-Jahren gefällt wurde. Die Ergebnisse der Freilegung sind in Kapitel 4.3 „Ergebnisse“ angeführt.

4.1 GRUNDLAGEN

Die folgenden Informationen über den Hochwasserschutzdamm an der Zaya stammen, sofern nicht anders angegeben, aus dem „Pflegekonzept Zaya - wasserwirtschaftliche und naturräumliche Bearbeitung“ von WIESBAUER & FRÖSCHL & LAZOWSKI (1999).

In ihrem ursprünglichen Zustand vor den ersten Regulierungsmaßnahmen gegen Ende des 19. Jahrhunderts hatte die Zaya einen mäandrierenden Charakter mit landschaftsästhetisch und ökologisch hochwertigen Habitatstrukturen wie Kies- und Feinsedimentbänke, ausgedehnte Stillgewässerzonen sowie bewachsene und unbewachsene, rasch und langsam fließende Bereiche. Die Hoch- und Grundwasserdynamik prägte die flussnahe Landschaft und es hatten sich charakteristische Auengesellschaften entwickelt.

Im Zuge von Regulierungsmaßnahmen wurde der Fluss gestreckt und das Gefälle vereinheitlicht. Aufgrund der dadurch entstandenen höheren Fließgeschwindigkeiten kam es zu Seitenerosion und Sohleneintiefung, welche wiederum zu Uferabbrüchen führten, die auch die Standsicherheit der Dämme gefährdeten.

Bis zur Durchführung der Renaturierungsmaßnahmen im Jahr 2012, reichte die Gerinnekapazität an manchen Stellen für ein hundertjähriges Hochwasser (HQ 100) nicht aus, in einigen Abschnitten nicht einmal für ein HQ 30. Die Zaya war in diesem Abschnitt ein durchgehend reguliertes Gerinne mit Trapezregelpprofil und beidseitigen Hochwasserschutzdämmen.

Durch die Umsetzung des Pflegekonzeptes sollen ausgedehnte Retentionsräume geschaffen werden, welche die umliegenden Gemeinden vor einem HQ 100 schützen. Weiters wird der aquatische Lebensraum durch die Strukturierung mit alternierenden Ufervorschüttungen, bereichsweisen Aufweitungen und den dadurch entstehenden unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit- und Substratbedingungen wesentlich aufgewertet. Außerdem werden Feuchthäuser und Auenwälder erhalten und ausgedehnt.

Einige alte Mühlgänge werden an das Hauptgewässer angebunden und durch den Umbau schwer passierbarer Schwellen wird wieder ein Fließgewässerkontinuum bis zur March geschaffen. Entlang der Zaya werden die Nutzungen extensiviert und standortgerechte Gehölze gepflanzt.

(WIESBAUER et al., 1999)

4.1.1 Einzugsgebiet

Die Zaya entspringt in den Leiser Bergen. Sie hat ein Einzugsgebiet von 630,5 km² und ist 71 km lang. Im Bereich der Gemeinde Drösing mündet sie in die March.



Abb. 36: Übersichtskarte Zaya (nach ÖBV, 2012)

Mit einer Seehöhe von etwa 350 m an der Quelle und 148 m an der Mündung hat die Zaya ein durchschnittliches Gefälle von 2,8‰.

4.1.2 Niederschlagsverhältnisse

Das Klima im Zayatal ist mitteleuropäisch und pannonisch beeinflusst. Charakteristisch sind warme, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter.

Die mittleren jährlichen Niederschläge betragen 508 mm (ZAMG, 2012).

Im Winterhalbjahr sind die Niederschläge am geringsten, in den Sommermonaten am höchsten. Diese verhältnismäßig starken Regenfälle können dann zu Überflutungen führen.

4.1.3 Abflussregime

Die Zaya ist ein sommerwarmes Gewässer mit einem pluvio-nivalen, also einem regen-schneegespeisten Regimetyp. Der größte Abfluss ist meist im März zu verzeichnen.

Der mittlere Abfluss am Pegel Asparn an der Zaya beträgt 0,11 m³/s und erhöht sich auf 0,72 m³/s beim Pegel Niederabsdorf (Zeitraum 1982 – 2009).

Das Mittel der jährlichen Hochwasser liegt bei 3,04 m³/s in Asparn an der Zaya und 6,71 m³/s in Niederabsdorf (Zeitraum 1982-2009).

Im Juni 1989 gab es ein Hochwasser mit einer Abflussspitze von $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Asparn an der Zaya). Dieser Wert stellt den größten gemessenen Hochwasserabfluss zwischen 1982 und 2009 dar.

(BMLFUW, 2011)

Tabelle 2 zeigt charakteristische Durchflüsse an der Zaya bei HQ100-, HQ50-, HQ30-, und HQ10-Ereignissen und dem Mittleren Abfluss MQ (Zeitraum 1981 bis 1990).

Standort	HQ100	HQ50	HQ30	HQ10	MQ	E
	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]	[l/s]	[km^2]
Ortsbeginn von Asparn an der Zaya	25,5	20,3	17,3	12,2	0,09	69,5
nach der Mündung Schletzerbach	26,3	21	18	12,7	0,1	79,1
Mündung Ebendorfer Mühlbach	40,5	32,4	27,4	18,2	0,38	290,9
nach der Mündung Eibesbach	41,3	33	28	18,6	0,39	308,8
nach der Mündung Kettlasbach	42,9	34,2	29,2	19,5	0,44	346,1
nach der Mündung Seiherbach	45,1	35,9	30,9	20,6	0,5	394,4
vor der Mündung Poybach	45,9	36,6	31,6	20,9	0,52	410,6

Tab. 2: Charakteristische Durchflüsse (nach WIESBAUER et al., 1999)

4.1.4 Historische Entwicklung

Die ersten umfangreicheren flussbaulichen Maßnahmen an der Zaya wurden im Hochmittelalter durchgeführt. Durch die Gründung von Mühlen mussten die Ufer gesichert und Wehranlagen, Mühlbäche und Überströmstrecken errichtet werden.

Aufgrund von Karten und Regulierungsunterlagen können flussbauliche Eingriffe lediglich für die letzten beiden Jahrhunderte rekonstruiert werden. In der Josefinischen (1773-1781) und Franziszeischen Landesaufnahme (1809-1836) ist die Zaya noch als mäandrierender Fluss festgehalten. In der Karte des K.u.k. militär-geographischen Institutes aus dem Jahre 1905 ist ein weitgehend gestrecktes Gerinne vorzufinden. Der Hauptteil der flussbaulichen Maßnahmen dürfte zwischen 1870 und 1880 stattgefunden haben. Sie hatten die Entwässerung des Talbodens zum Ziel, um die Hochwassergefahr für umliegende Siedlungen zu bannen und gleichzeitig hochwertige Ackerflächen zu schaffen. Hierfür wurde der Flusslauf der Zaya gestreckt.

Mit der Aufgabe der Nutzung der Mühlen wurden auch die Mühlbäche verfüllt, um landwirtschaftliche Flächen zu gewinnen. Die alten Mühlbäche haben heute Retentionspotential für den Hochwasserabfluss, sind strukturreiche, ökologisch wichtige Flächen und kulturhistorisch bedeutsam.

(WIESBAUER et al., 1999)

4.1.5 Dammaufbau

Über den genauen Aufbau des Hochwasserschutzdammes an der Zaya ist sehr wenig bekannt. Es lässt sich jedoch festhalten, dass er aus relativ homogenem Material errichtet wurde und in dem von uns untersuchten Abschnitt die in Abbildung 37 angegebenen Maße hat. Der Damm ist insgesamt 13 m und die Dammkrone 2,20 m breit. Die landseitige Böschung ist 90 cm hoch und hat eine Neigung von circa 1:4. Die wasserseitige Böschung ist steiler und hat im oberen Bereich eine Neigung von 1:3 und im unteren sogar von 1:1.

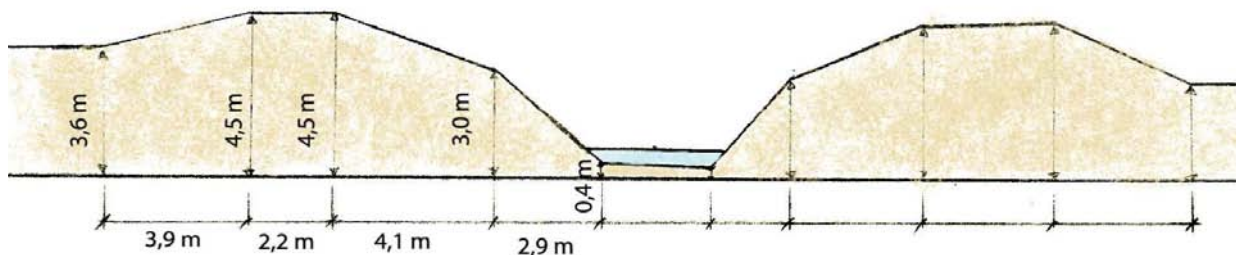


Abb. 37: Zaya-Damm (Zaya, 2012)

Zusammensetzung und Verdichtung des Dammmaterials sind im Ergebnisteil dieser Arbeit (Kapitel 4.3 „Ergebnisse“) beschrieben.

4.1.6 Vegetation

WIESBAUER & FRÖSCHL & LAZOWSKI (1999) haben vegetationsökologische Untersuchungen an der Zaya vorgenommen und die Ergebnisse im Pflegekonzept Zaya beschrieben. Die Pflanzengesellschaften wurden nach der pflanzensoziologischen Methode von BRAUN-BLANQUET aufgenommen.

Die Böschungen und Dämme der Zaya weisen eine geringe Strukturvielfalt auf. Es dominieren Glatthaferwiesen (*Tanacetum-Arrhenatheretum*). Weiters finden sich flussnahe Hochstauden-Säume, bodenfrische bis mäßig trockene Wiesen an den Innenseiten und Oberkanten der Böschungen sowie Schilfbestände. Durch die geringe Dammhöhe auf der Landseite und dem starken Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft ist die Ausbildung von Trockenstandorten an den Dammflächen nicht möglich. An Oberkante und Innenseite der Dämme dominieren Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) und Wehrlose Trespe (*Bromus inermis*). Außerdem gibt es Würz-Kälberkropf (*Chaerophyllum aromaticum*) in Ufersaum und Böschungsflanken, Gemeine Quecke (*Elymus repens*) vor allem an der Oberkante sowie Zwerg-Holunder (*Sambucus ebulus*) und Sommer-Adonisröschen (*Adonis aestivalis*).

Gemeine Schafgarbe (<i>Achillea collina</i>)	Geruchlose Strandkamille (<i>Tripleurospermum inodorum</i>)
Giersch (<i>Aegopodium podagraria</i>)	Wiesen-Bocksbart (<i>Tragopogon orientalis</i>)
Gemeiner Beifuß (<i>Artemisia vulgaris</i>)	Echter Beinwell (<i>Symphytum officinale</i>)
Schwarznessel (<i>Ballota nigra</i>)	Bunte Kronwicke (<i>Securigera varia</i>)
Scabiosen-Flockenblume (<i>Centaurea scabiosa</i>)	Taubenkropf-Leimkraut (<i>Silene vulgaris</i>)
Ackerwinde (<i>Convolvulus arvensis</i>)	Weißes Lichtnelke (<i>Silene latifolia</i>)
Gewöhnliches Knäuelgras (<i>Dactylis glomerata</i>)	Steppen-Salbei (<i>Salvia nemorosa</i>)
Gemeine Quecke (<i>Elymus repens</i>)	Kratzbeere (<i>Rubus caesius</i>)
Acker-Schachtelhalm (<i>Equisetum arvense</i>)	Spitzwegerich (<i>Plantago lanceolata</i>)
Esels-Wolfsmilch (<i>Euphorbia esula</i>)	Pastinak (<i>Pastinaca sativa</i>)
Schaf-Schwingel (<i>Festuca rupicola</i>)	Klatschmohn (<i>Papaver rhoeas</i>)
Weißes Labkraut (<i>Galium mollugo</i> agg.)	Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i>)
Echtes Labkraut (<i>Galium verum</i>)	Echtes Leinkraut (<i>Linaria vulgaris</i>)
Wiesen-Storchschnabel (<i>Geranium pratense</i>)	Wiesen-Platterbse (<i>Lathyrus pratensis</i>)
Wiesen-Bärenklau (<i>Heracleum sphondylium</i>)	Gefleckte Taubnessel (<i>Lamium maculatum</i>)
Echtes Johanniskraut (<i>Hypericum perforatum</i>)	Stachel-Lattich (<i>Lactuca serriola</i>)
Acker-Wittwenblume (<i>Knautia arvensis</i>)	

Tab. 3: Auswahl der vorkommenden Pflanzenarten (nach WIESBAUER et al., 1999)

Die krautige Vegetation der Dämme ist wenig auffällig und typisch für das pannonische Gebiet. Abgesehen von folgenden seltenen, teils gefährdeten Pflanzen, weisen sie keine schutzwürdigen Bereiche auf.

Sommer-Adonisrösschen (<i>Adonis aestivalis</i>) (RL 3)	Straßen-Gänsefuß (<i>Chenopodium urbicum</i>) (RL 3)
Stockrose (<i>Alcea biennis</i>) (RL 1)	Drüsenblättrige Kugeldistel (<i>Echinops sphaerocephalus</i>)
Kohl-Lauch (<i>Allium oleraceum</i>)	Rutenförmige Wolfsmilch (<i>Euphorbia virgata</i>)
Runder Lauch (<i>Allium rotundum</i>) (RL 3)	geflügeltes Johanniskraut (<i>Hypericum teraopterum</i>)
Gewürz-Kälberkopf (<i>Chaerophyllum aromaticum</i>)	Behaartfrüchtige Platterbse (<i>Lathyrus hirsutus</i>) (RL 2)

Tab. 4: Vorkommende gefährdete und pflanzengeographisch charakteristische Arten (nach WIESBAUER et al., 1999)

An wenigen Stellen wie beispielsweise bei Olgersdorf, Wilfersdorf-Hobersdorf und zwischen Ebendorf und Rohrmühle befinden sich artenreiche, heterogen strukturierte Gehölzbestände auf den Uferböschungen. Bestandesbildend sind Feldulmen (*Ulmus minor*), Eschen (*Fraxinus pennsylvanica*, *Fraxinus americana* und *Fraxinus excelsior*), Erlen (*Alnus glutinosa*) und Weiden (*Salix alba*, *Salix x rubens*, *Salix fragilis*, *Salix triandra*, *Salix cinerea* und *Salix caprea*). Neben den beiden Eschen-Neophyten kommen auch Robinie (*Robinia pseudacacia*) und Eschenahorn (*Acer negundo*) vor.

Die Strauchweiden engen das Abflussprofil stark ein, die dadurch hervorgerufenen Bettverlagerungen wären zwar ökologisch zu begrüßen, verursachen aber erhebliche wasserbauliche Schäden. Die Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) wurzeln teilweise direkt an der Wasseranschlaglinie und festigen durch die dichten Wurzelgeflechte das Ufer vor Erosion. Begleitarten sind: Liguster (*Ligustrum vulgare*), Roter Hartriegel (*Cornus sanguinea*), Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*), Feldahorn (*Acer campestre*), Eingriffeliger Weißdorn

(*Crataegus monogyna*), Walnuss (*Juglans regia*) und Zwetschke (*Prunus domestica* ssp. *domestica*). Zwischen Olgersdorf und Asparn an der Zaya befinden sich gepflanzte, einzeilige Baumreihen von Kulturpappel.

Im Bereich der heute großteils trocken liegenden Mühlgängen finden sich nur kleinräumig Auwälder. Meist ist die Robinie (*Robinia pseudacacia*) bestandesbildend. In der Krautschicht kommen vor allem nitrophile Arten wie beispielsweise Brennnessel (*Urtica dioica*), Giersch (*Aegopodium podagraria*), Kletten-Labkraut (*Galium aparine*), Duftveilchen (*Viola odorata*), Gefleckte Taubnessel (*Lamium maculatum*), Schwarznessel (*Ballota nigra*) und Schöllkraut (*Chelidonium majus*) vor.

Bei den wenigen noch durchflossenen Mühlgängen gibt es jedoch artenreiche Bestände mit Schwarzerle (*Alnus glutinosa*), Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Feldahorn (*Acer campestre*), Eschenahorn (*Acer negundo*), Eschen, Weiden, Traubenkirsche (*Prunus padus*), Silber-Pappel (*Populus alba*), Schwarzpappel (*Populus nigra*) und Robinien (*Robinia pseudacacia*). In der Strauchschicht finden sich unter anderem Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*), Zwetschke (*Prunus domestica* ssp. *domestica*), Flieder (*Syringa vulgaris*), Heckenkirsche (*Lonicera* sp.), Feldulme (*Ulmus minor*) sowie Staudenknöterich (*Fallopia japonica*) und Bocksdorn (*Lycium barbarum*). Die offenen Flächen in diesem strukturreichen Bereich beinhalten attraktive Uferhochstauden wie beispielsweise Zottige Weidenröschen (*Epilobium hirsutum*), Sumpf-Schwertlilie (*Iris pseudacorus*), Sumpf-Gänsedistel (*Sonchus palustris*), Geflügelte Braunwurz (*Scrophularia umbrosa*), Gewöhnlicher Blutweiderich (*Lythrum salicaria*) und Echtes Mädesüß (*Filipendula ulmaria*).

(WIESBAUER et al., 1999)

4.1.7 Untersuchungsgebiet

In der Marktgemeinde Wilfersdorf im Bezirk Mistelbach (Niederösterreich) erstreckt sich von Bullendorf bis Ebersdorf jener Abschnitt des Zaya-Hochwasserschutzdammes, der im Frühling 2012 renaturiert wurde.

Hierbei wurde der Damm teilweise abgetragen und die alten, im Damm verbliebenen Wurzelstöcke der in den 90er Jahren gefälltten Bäume entfernt. Im Zuge der Renaturierungsarbeiten konnte der Wurzelstock einer Silber-Weide (*Salix alba*) freigelegt und untersucht werden.

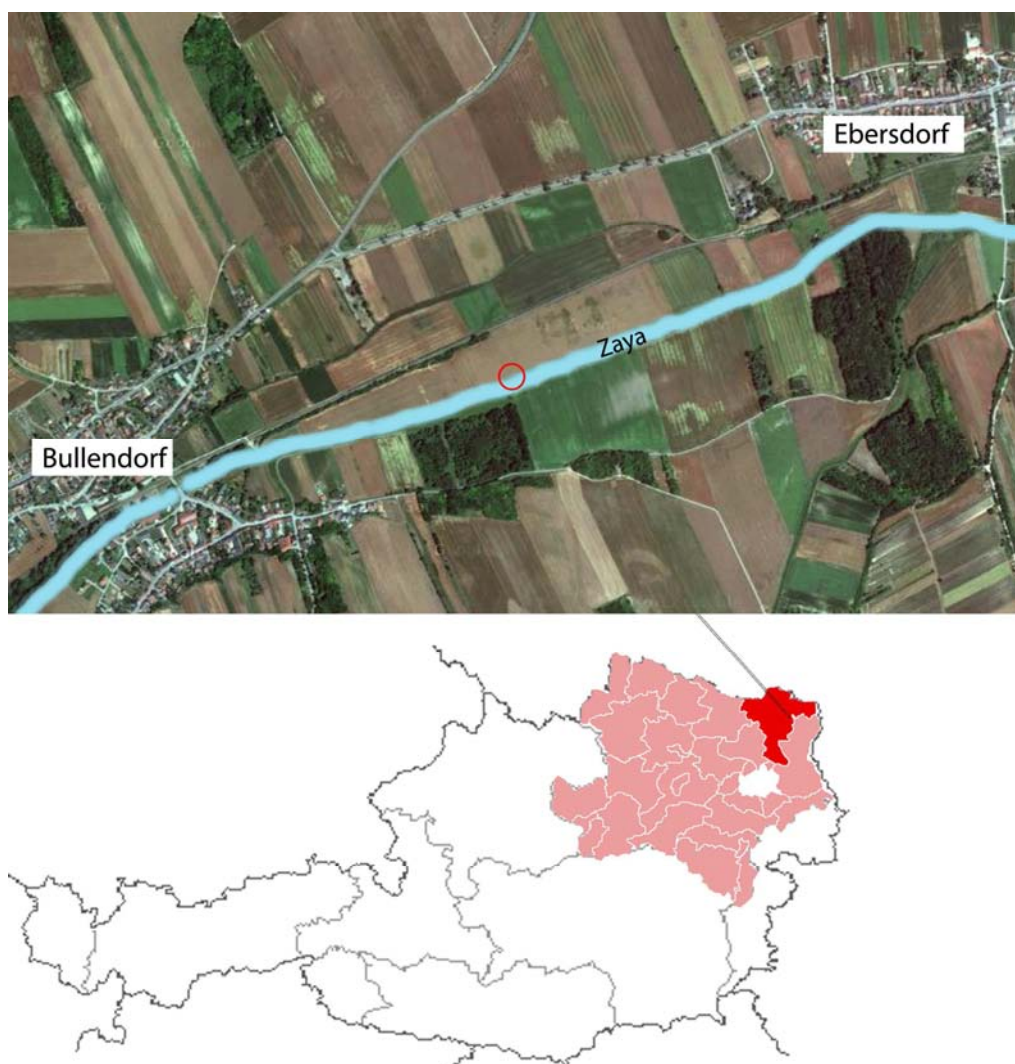


Abb. 38: Übersichtskarte (nach google maps, 2012)



Abb. 39: alter Zayadamm mit bereits abgetragener Grasnarbe auf der Dammkrone (Zaya, April 2012)

4.2 AUFNAHMEMETHODIK

In den folgenden Kapiteln werden die Freilegung des Wurzelstocks, die Durchführung der Bodenuntersuchung und die Aufnahme der Wurzeln beschrieben.

4.2.1 Freilegung des Wurzelstockes

Mit Hilfe des Baggers wurden zunächst Grasnarbe und oberste Bodenschicht abgetragen (ca. 1 m). Mit Spitzhacke, Schaufel und Wasserstrahl wurde der Wurzelstock bis in eine Tiefe von ungefähr 3 m freigelegt. Um in einem größeren Radius nach Wurzeln zu suchen, grub erneut der Bagger das den Wurzelstock umgebende Dammmaterial bis zum Grundwasserspiegel aus, um das Freilegen von der Seite her zu erleichtern.

Die Wurzeln konnten nur bis zum Grundwasserspiegel freigelegt werden. Anschließend wurden Länge, Durchmesser, Wurzeltiefe und Zustand aufgenommen.

Zusätzlich wurden Bodenproben für eine Korngrößenanalyse zur Bestimmung des Bodensubstrates entnommen und die Dichte mit Hilfe von Penetrologger-Messungen und Stechzylinderentnahmen gemessen.



Abb.40: Freischaufeln des Wurzelstocks mit Hilfe des Baggers (Zaya, April 2012)



Abb. 41: Freischaufeln von Hand (Zaya, April 2012)



Abb. 42: Freispritzen der Wurzeln (Zaya, Mai 2012)



Abb. 43: Ausmessen des freigelegten Wurzelsystems (Zaya, Mai 2012)

4.2.2 Bodenuntersuchung

An sechs in verschiedenen Tiefen des Dammes gelegenen Bodenabschnitten wurden mittels Stechzylinder Bodenproben zur Bestimmung der Trockendichte entnommen. Gleichzeitig wurde für viele Stechzylinderproben auch eine Penetrologger-Messung durchgeführt, um den Eindringwiderstand zu messen. Dieser Widerstand ist ebenfalls ein Maß für die Verdichtung und Tragfähigkeit des Bodens. Zusätzlich wurden an drei Probenflächen auch Bodenproben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung entnommen.

Die Abbildung 44 auf der folgenden Seite zeigt die räumliche Verteilung der Bodenabschnitte (1-6) im Damm. Sie unterscheiden sich nicht nur durch ihre unterschiedliche Tiefe, sondern auch durch ihre Entfernung zum Wurzelstock.

A, B und C kennzeichnen die drei Bodenstellen, an denen Proben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung entnommen wurden. Die Bodenabschnitte, an denen Stechzylinderproben entnommen oder Penetrologger-Messungen durchgeführt wurden, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet und von 1 bis 18 durchnummeriert.

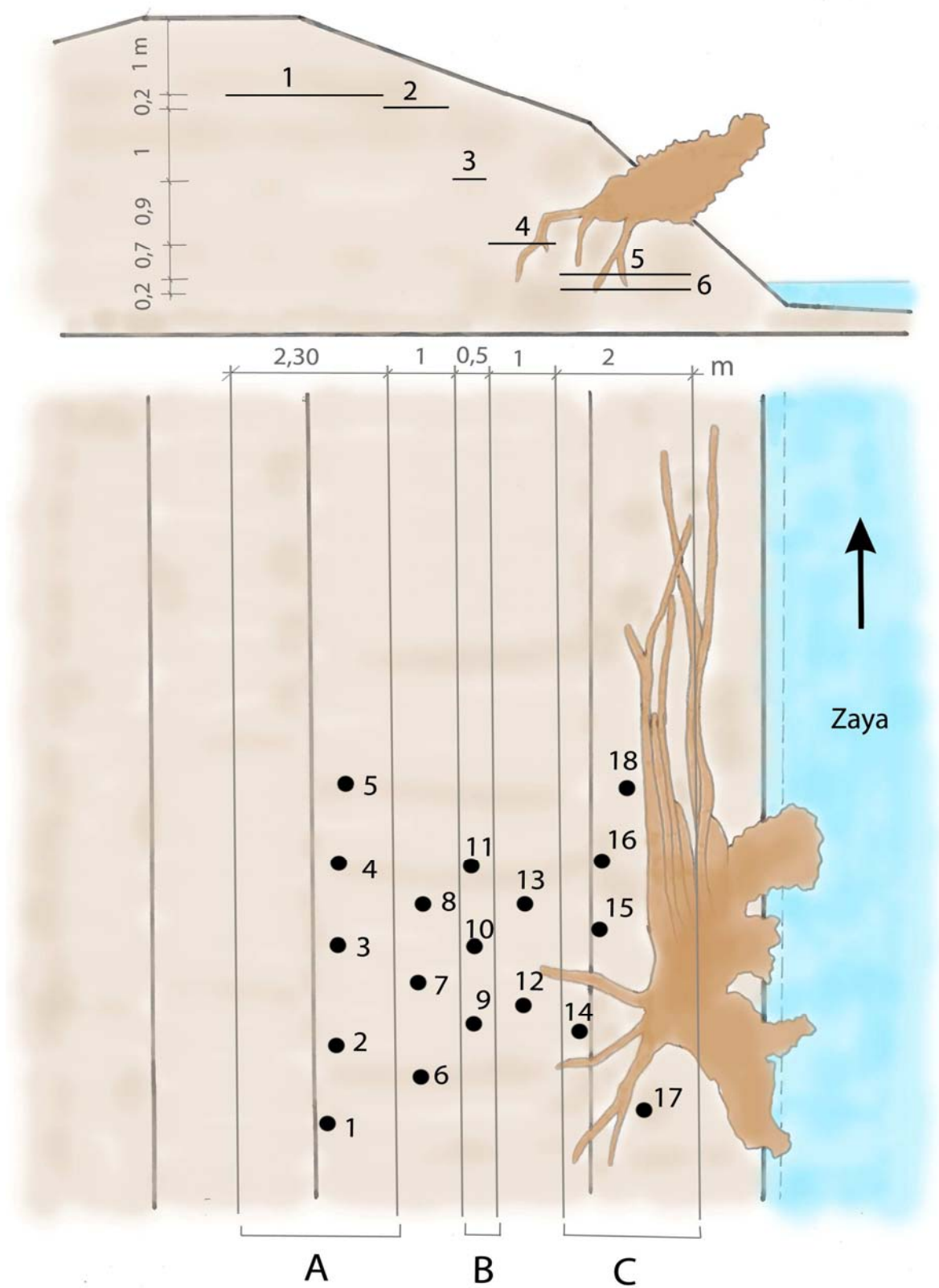


Abb. 44: räumliche Verteilung der Bodenuntersuchungen (Zaya, 2012)

Bodenabschnitt	1	2	3	4	5	6
Tiefe	1 m	1,20 m	2,20 m	3,10 m	3,80 m	4 m
Stechzylinderproben	x	x	x	x	x	
Penetrologger-Messung	x		x		x	x
Korngrößenverteilung	A		B			C

Tab. 5: Verteilung der Untersuchungsmethoden (Zaya, 2012)

Tabelle 5 zeigt, welche Untersuchungen in welchem Bodenabschnitt durchgeführt wurden.

Im Bodenabschnitt 1 in 1 m Tiefe wurden fünf Stechzylinderproben (Punkte 1-5 in Abbildung 44) genommen und an denselben Stellen ebenso viele Penetrologger-Messungen durchgeführt sowie die Bodenprobe A für die Bestimmung der Korngrößenverteilung entnommen.

Bodenabschnitt 2 befindet sich in 1,20 m Tiefe. Hier wurden drei Stechzylinderproben (Punkte 6-8) entnommen.

Im Bodenabschnitt 3 in 2,20 m Tiefe wurden drei Stechzylinderproben (Punkte 9-11) genommen und ebenso viele Penetrologger-Messungen wie im Abschnitt 1 durchgeführt sowie die Bodenprobe B für eine Korngrößenverteilung entnommen.

Bodenabschnitt 4 liegt in 3,10 m Tiefe. Hier wurden nur zwei Stechzylinderproben (Punkte 12-13) entnommen.

Die Punkte 14 – 16 liegen im Abschnitt 5. Hier sind Stechzylinderproben und Penetrologger-Messungen unternommen worden.

An den Punkten 17 und 18 im Abschnitt 6 wurden nur Messungen mit dem Penetrologger durchgeführt und die Bodenprobe C für die Korngrößenverteilung entnommen.

Wie in Abbildung 44 bzw. Tabelle 5 ersichtlich, wurden zur Bestimmung des Bodengefüges drei Bodenproben in 1 m, 2,20 m und 4 m Tiefe entnommen und im Labor des Geotechnik-Institutes der BOKU mit Hilfe von Sieb- und Schlämmanalysen sowie Aräometerversuchen ausgewertet.

Zunächst wurden die Proben gewogen, bei 70°C im Trockenschrank über Nacht getrocknet und anschließend wieder gewogen. Danach wurden sie ausgeschlämmt und jener Anteil, der größer als 0,5 mm war getrocknet und in der Grob- und Mittelsiebung mit Hilfe von Sieben wieder in unterschiedliche Korngrößen aufgeteilt. Diese wurden ebenfalls einzeln gewogen. Mit dem übrigen Feinmaterial wurden dann die Aräometerversuche durchgeführt, um auch den Anteil der Bestandteile unter 0,2 mm festzustellen.

Anhand der Anteile der Kornfraktionen an der Gesamtprobe konnte nun die Bodenbezeichnung festgestellt werden.

Bei der Bestimmung der Dichte mittels Stechzylinder ist die Bodendichte (ρ_b) die Masse der Probe minus der Masse des Zylinders durch das Volumen des Zylinders (HARTGE & HORN, 2009).

Die Stechzylinderproben wurden noch in ihrem Zylinder bei 105°C getrocknet und dann gewogen. Anschließend wurde das Gewicht der leeren Zylinder gewogen und vom Gewicht der Probe abgezogen. Dieses Ergebnis wurde durch das Volumen des Zylinders dividiert. Die Messung der Eindringwiderstände wurde mit dem Penetrologger der Firma Eijkelkamp durchgeführt und mit dem dazugehörigen Programm PenetroViewer ausgewertet.

4.3 ERGEBNISSE

Die folgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse der Bodenuntersuchung des Dammes an der Zaya und der Dokumentation des Wurzelstocks.

4.3.1 Boden

Die im Hochwasserschutzdamm der Zaya an allen Probestellen vorgefundene Bodenart ist toniger Schluff. Dies bestätigt einen Dammaufbau aus relativ homogenem Material. Die folgenden Abbildungen zeigen die Korngrößenverteilungskurven der Bodenproben in 1 m Tiefe (Abb. 45), in 2,20 m (Abb. 46) und in 4 m Tiefe (Abb. 47). Die detaillierten Ergebnisse der Bodenuntersuchung finden sich im Anhang.

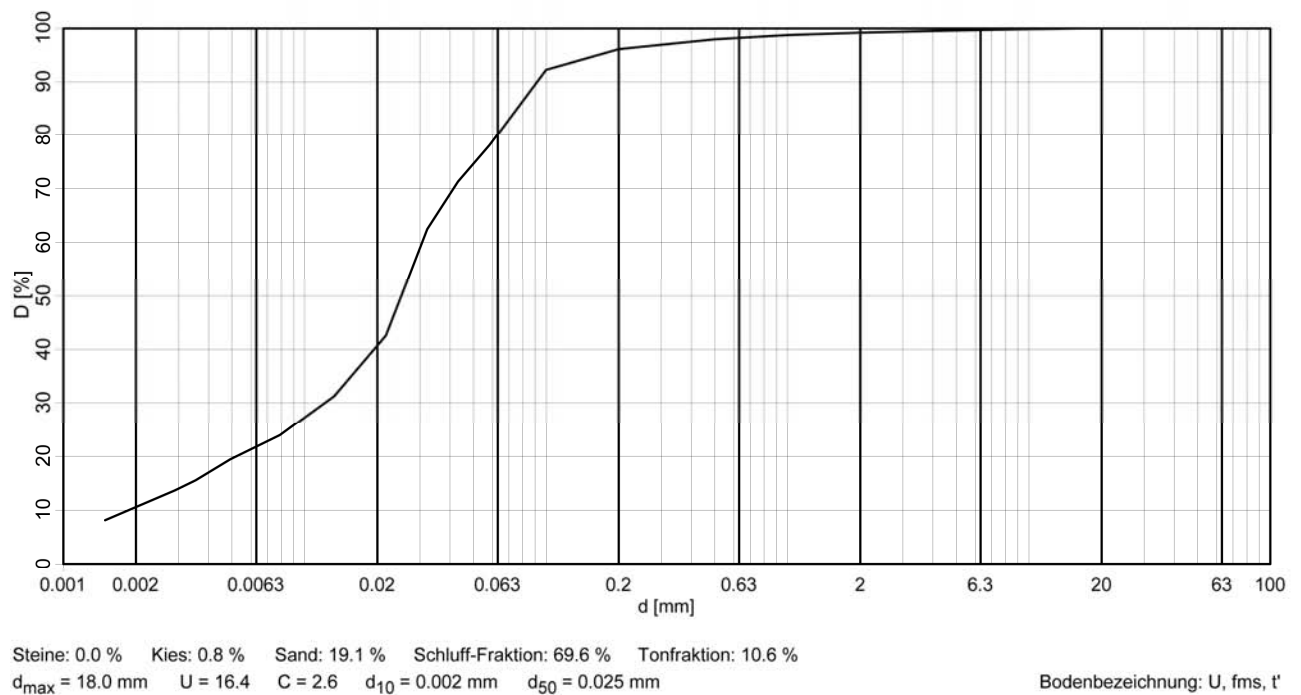


Abb. 45: Korngrößenverteilung Bodenprobe A (Zaya, 2012)

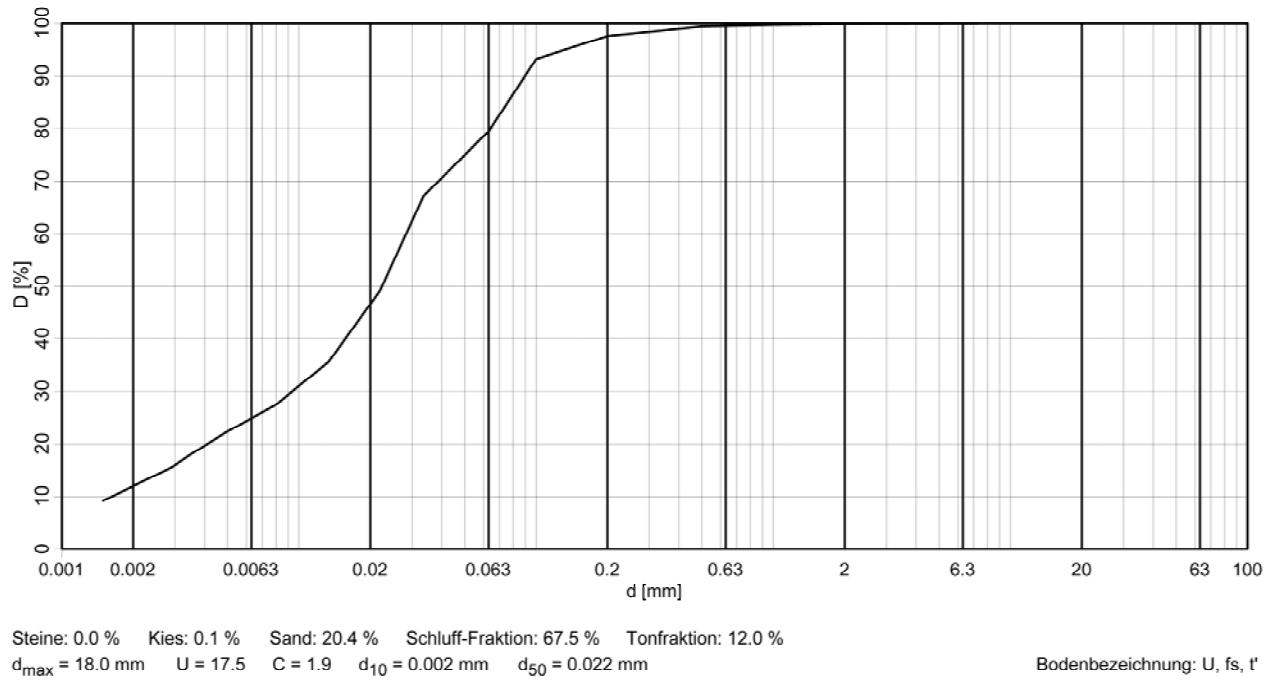


Abb. 46: Korngrößenverteilung Bodenprobe B (Zaya, 2012)

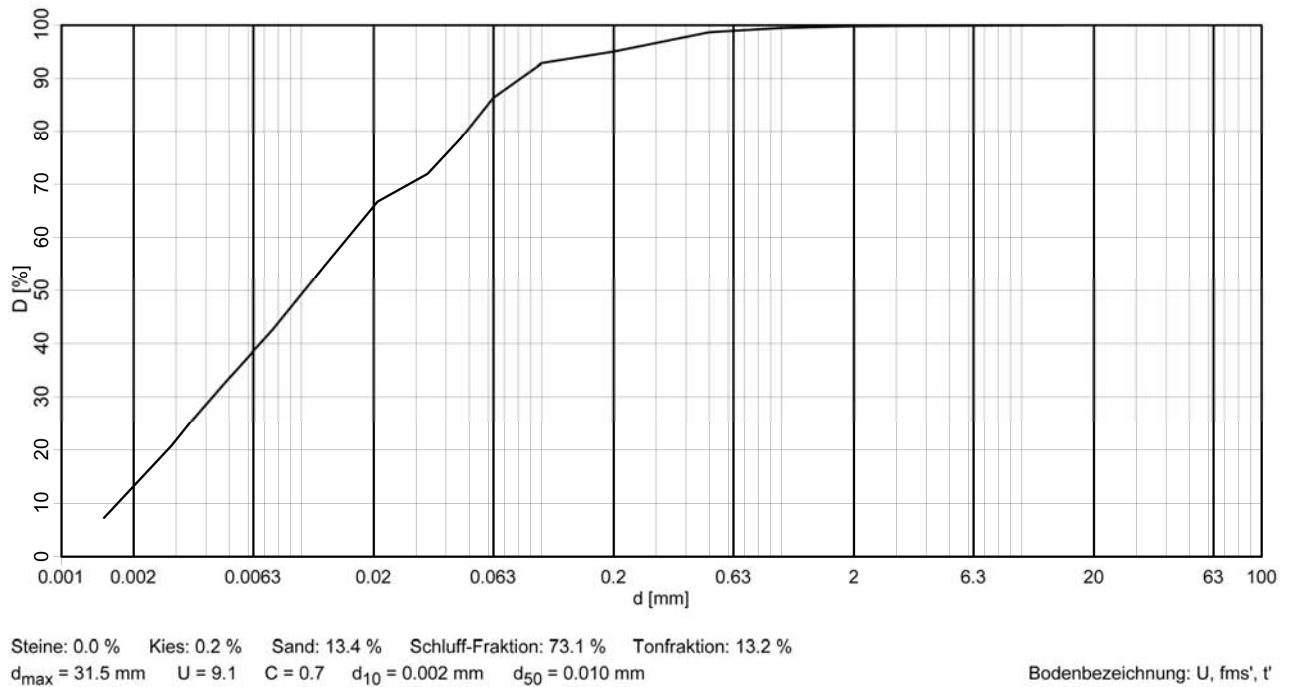


Abb. 47: Korngrößenverteilung Bodenprobe C (Zaya, 2012)

Tiefe	Trockendichte Ø
1,00 m	1,37 g/cm ³
1,20 m	1,50 g/cm ³
2,20 m	1,69 g/cm ³
3,10 m	1,62 g/cm ³
3,80 m	1,63 g/cm ³

Tab. 6: Durchschnittliche Bodendichte (Zaya, 2012)

Die Bodendichte variierte zwischen 1,34 g/cm³ und 1,86 g/cm³. Tabelle 6 zeigt die durchschnittlichen Dichtewerte in unterschiedlichen Bodentiefen. Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Stechzylinderproben sind dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Oberboden nicht sehr stark verdichtet und der Boden in 2 m Tiefe am stärksten verdichtet ist. In den folgenden Bodenschichten sind relativ gleichmäßige Dichtewerte von um die 1,60 g/cm³ zu finden. Der Hochwasserschutzdamm hat einen nicht besonders stark, aber doch relativ verdichteten Boden.

HASELSTEINER (2007) gibt eine Bodendichte von mehr als 1,8 g/cm³ als sehr stark verdichteten Boden, der nur noch extrem schwer zu durchwurzeln ist, an. Für Tonböden gilt bereits eine Dichte von 1,4 g/cm³ als Grenzwert für die Durchwurzelbarkeit.

FLORINETH (2012) gibt eine generelle maximale Bodendichte von 1,4 g/cm³ an, die wegen des fallenden Luftporenvolumens nicht überschritten werden darf.

Die Eindringwiderstände der Penetrologger-Messungen liegen zwischen 1,7 und 6,3 MPa.

1,8 MPa ist der Grenzwert für die Durchwurzelbarkeit von Gehölzwurzeln. Da diese aber um Hindernisse herum wachsen und sich den leichtesten Weg suchen, kann man von einer Obergrenze von 2,5 MPa für das Wurzelwachstum ausgehen (LIEBHARD et al., 1995).

In den Abbildungen 48 und 49 auf der folgenden Seite sind die durchschnittlichen Eindringwiderstände an unterschiedlichen Messtiefen in Diagrammen dargestellt.

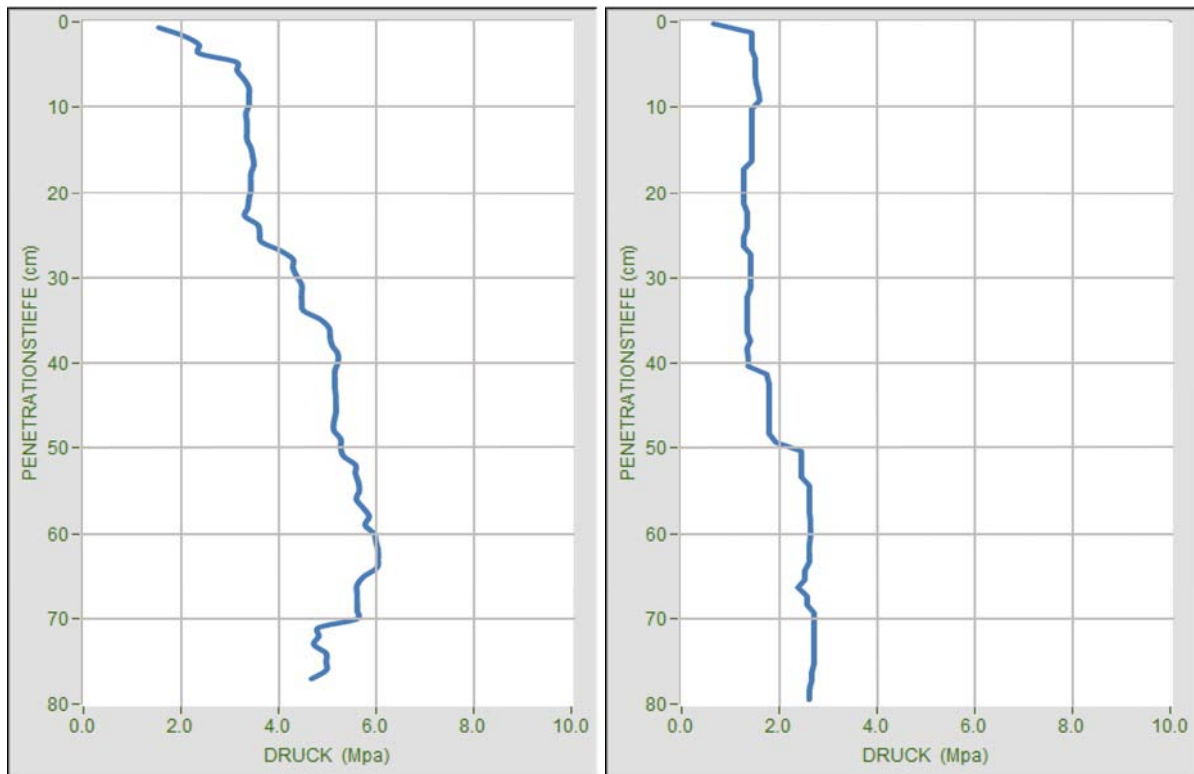


Abb. 48: Durchschnittlicher Eindringwiderstand in 1m (links) und in 2,20m Tiefe (rechts) (Zaya, 2012)

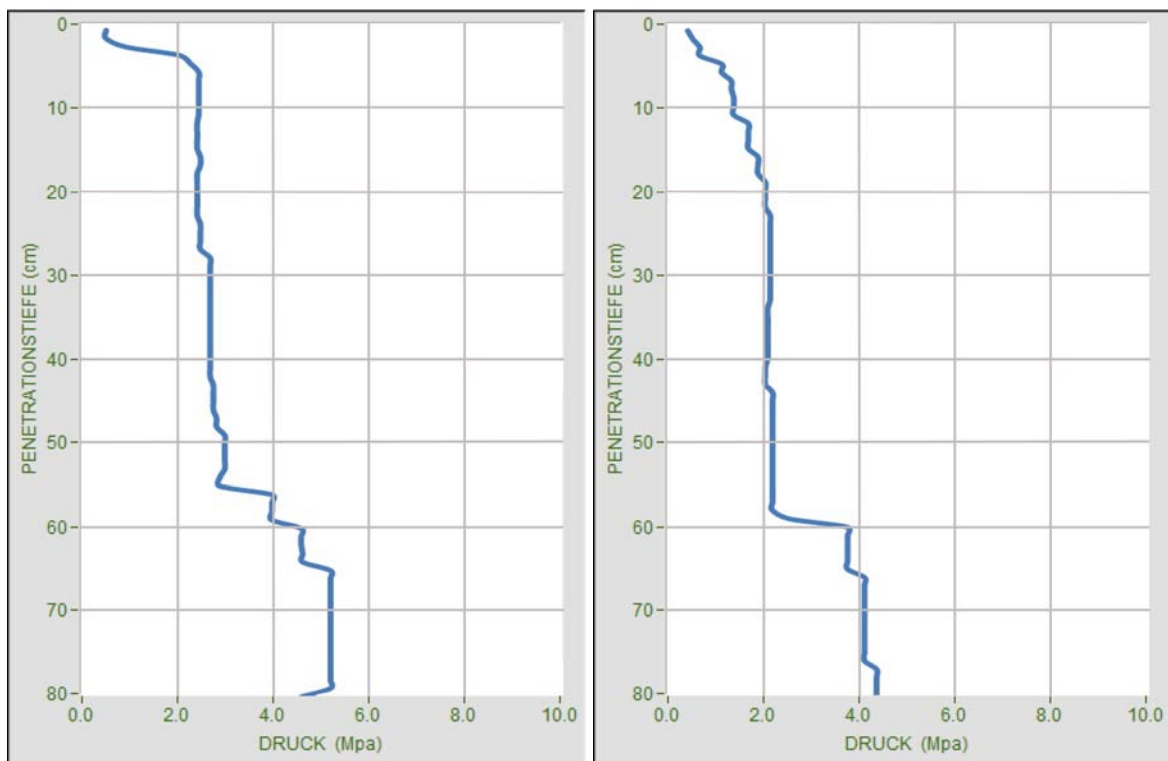


Abb. 49: Durchschnittlicher Eindringwiderstand in 3,80m (links) und 4m Tiefe (rechts) (Zaya, 2012)

4.3.2 Durchwurzelung

Der Wurzelstock der Silber-Weide befand sich im unteren Drittel des wasserseitigen Böschungsfußes und wies eine sehr asymmetrische Verteilung des Wurzelsystems auf.

In der Oberbodenschicht befand sich auf der flussaufwärts gelegenen Seite des Wurzelstocks der Feinwurzelbereich mit circa 2 m Durchmesser. Entlang des unteren Bereichs der Böschung verliefen mit der Fließrichtung der Zaya mächtige Horizontalwurzeln mit bis zu 5 m Länge und Wurzeldurchmessern von bis zu 18 cm. Nur drei Wurzeln wuchsen Richtung Dammmitte, strebten aber nach circa 1,50 m abrupt nach unten oder waren abgebrochen. Vermutlich verläuft auch eine große Pfahlwurzel nach unten. Der dreistämmige Wurzelstock hat eine ungefähre Ausdehnung von 5,30 m, inklusive der Seitenwurzeln von 10,9 x 2,6 m.

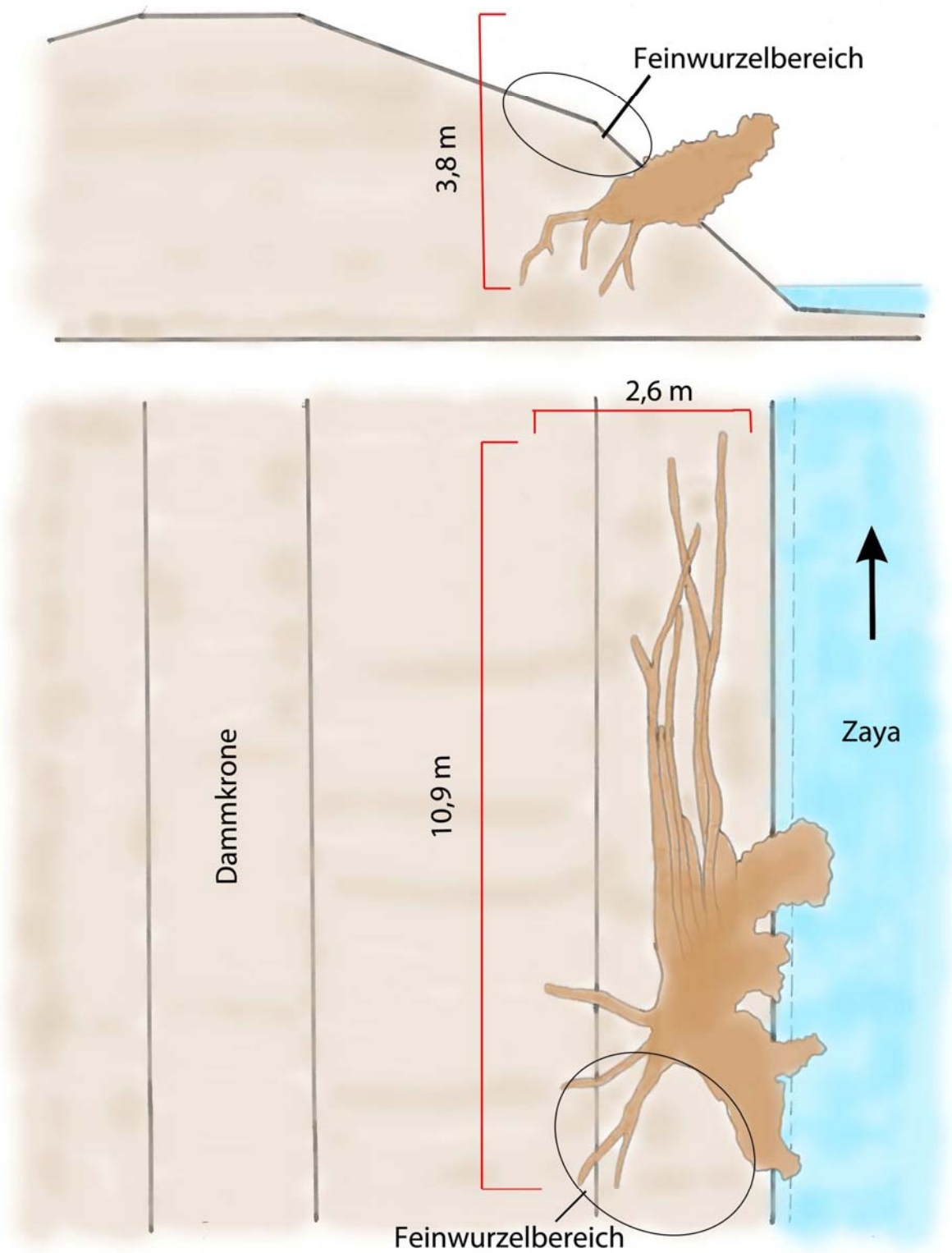


Abb. 50: *Salix alba* Wurzelstock am Damm (Zaya, 2012)

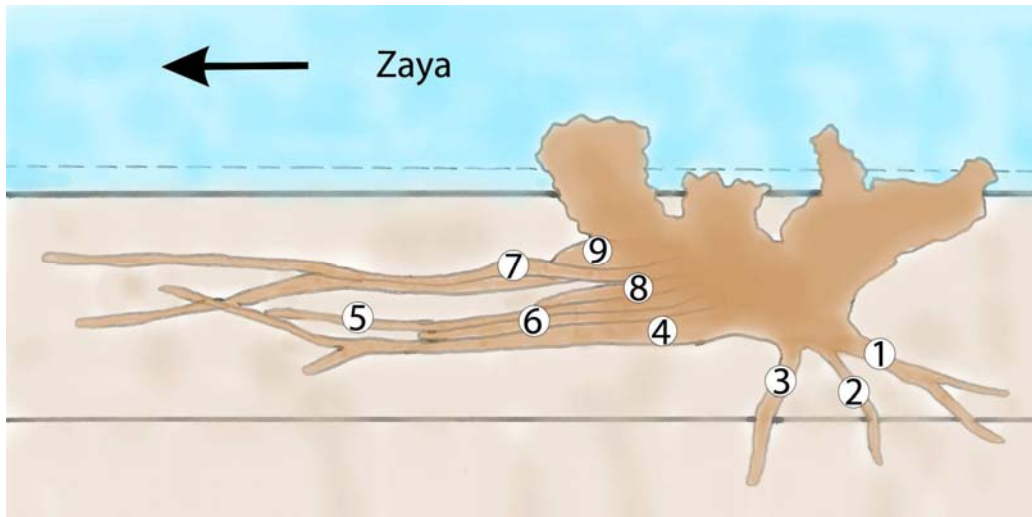


Abb. 51: Wurzelübersicht (Zaya, 2012)

Abbildung 51 zeigt die an der Silber-Weide freigelegten Wurzeln. Die folgende Tabelle gibt Länge und Durchmesser der Wurzeln sowie deren Lage im Damm an. Die Tiefe wurde jeweils am Wurzelanfang und -ende gemessen und gibt den Abstand zur Dammkrone an.

Nr	Länge [m]	Durchmesser [cm]	Tiefe [m]	
			Wurzelanfang	Wurzelende
1	1,20	9,0	2,35	2,60
2	0,80	5,5	1,80	2,50
3	2,00	10,0	2,00	2,50
4	2,70	8,0	2,10	2,40
5	1,70	11,0	1,90	2,20
6	1,10	11,0	2,10	2,30
7	5,20	16,0	1,90	2,20
8	0,60	5,0	2,00	1,60
9	1,50	18,0	2,20	2,30

Tab. 7: Wurzelbeschreibung (Zaya, 2012)

Alle freigelegten Wurzeln oder Wurzelteile sind morsch und brüchig und liegen in 1,60 bis 2,60 m Tiefe. Hohle Gänge alter Wurzeln wurden nicht gefunden.

Wurzel Nr. 3 hat einen Durchmesser von 10 cm und ist bei einer Länge von 2 m abgebrochen. Sie könnte aufgrund ihrer zum Damm verlaufenden Wuchsrichtung eventuell auch weiter in den Damm gewachsen sein. An der Bruchstelle ist sie 6 cm dick. Auch Wurzel Nr. 1 ist abgebrochen und könnte weiter in den Damm eingewachsen sein. Sie hat einen Durchmesser von 9 cm.

Wurzel Nr.7 ist mit 5,20 m die längste. Sie wird sehr schmal und verzweigt. Wurzel Nr. 8 hat als einzige einen nach oben gerichteten Wuchs. Die übrigen Wurzeln verlaufen nach unten, Nr. 2, 5, 6 und 9 gehen am Ende sehr abrupt nach unten.



Abb. 52: Freigelegter Wurzelstock (Zaya, Mai 2012)



Abb. 53: Freigelegter Wurzelstock vom anderen Ufer aus gesehen (Zaya, Mai 2012)

5 FELDAUFNAHMEN AN DER DONAU IN HAINBURG

Dieses Kapitel unterteilt sich in 5.1 „Grundlagen“, in welchem kurz die Lage des Untersuchungsgebietes beschrieben wird, 5.2 „Aufnahmemethodik“ und 5.3 „Ergebnisse“.

5.1 GRUNDLAGEN

In Hainburg (NÖ) wurden am Ufer der Donau die Wurzelstöcke einiger Bäume durch Hochwasserereignisse teilweise vom Wasser freigespült. Dies bot die Möglichkeit, den oberen bis mittleren Bereich des Wurzelwerks weiterer Silber-Weiden (*Salix alba*) zu dokumentieren.

Abbildung 54 zeigt den Standort der Weiden am Donauufer nordöstlich vom Stadtgebiet Hainburg.



Abb. 54: Übersichtskarte Hainburg (nach google maps, 2012)

5.2 AUFNAHMEMETHODIK

Es handelt sich um insgesamt vier lebende, meist mehrstämmige Silber-Weiden (*Salix alba*) und ein umgestürztes Exemplar. Sie wurden fotografiert, sowie ihre Höhe, Stammdurchmesser und die Maße des sichtbaren Wurzelstocks aufgenommen und skizziert.

5.3 ERGEBNISSE

Die durch Hochwasserereignisse freigespülten Wurzelwerke der Silber-Weiden befanden sich nicht auf einem Damm, sondern am Saum eines Auwaldes am Ufer. Sie zeigten allerdings häufig ein auffällig asymmetrisches Wurzelsystem mit langen Horizontalwurzeln.



Abb. 55: an diesem Standort auffällig häufig vorgefundene, mit der Fließrichtung der Donau verlaufende, lange Horizontalwurzeln (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)



Abb. 56: mehrstämmige Weiden mit umgestürzter Weide (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)

Abbildung 56 zeigt die nebeneinander stehende dreistämmige und sechsstämmige Silber-Weide sowie eine daneben liegende umgestürzte Weide. Die folgende Abbildung 57 stellt die Skizzierung der Weiden und ihrer Wurzelsysteme dar.

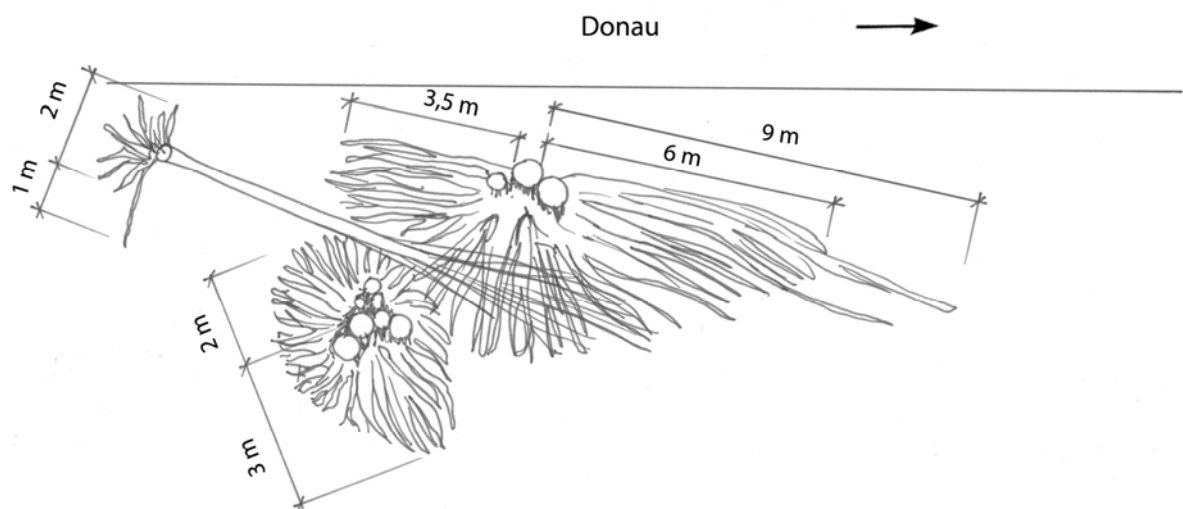


Abb. 57: Skizze der Weidengruppe I (Donau bei Hainburg, 2012)

Die dreistämmige Weide ist etwa 15 m hoch und zeigt Stammdurchmesser von 33, 50 und 55 cm. Der Wurzelkörper hat eine Ausbreitung von größtenteils 3,5 m Durchmesser. Allerdings finden sich auf der in Fließrichtung gelegenen Seite lange Horizontalwurzeln mit durchschnittlichen Längen von 6 m und einer längsten Wurzel mit 9 m. Auch Richtung Ufer verlaufen einige dicke Wurzeln, die aber höchstens 4 m lang sind. Dies kann allerdings auch damit zusammenhängen, dass hier schon die Stämme der dahinter gelegenen, sechsstämmigen Weide beginnen. Diese Weide ist ebenfalls circa 15 m hoch und hat Stammdurchmesser von 30 bis 35 cm sowie je einen Stamm mit 40 und einen mit 20 cm Durchmesser. Es lässt sich der Beginn einer dicken Pfahlwurzel nach unten erkennen. Der Großteil der restlichen Wurzeln ist eher in Richtung Ufer orientiert und durchschnittlich 3 m lang. Die Wurzeln entlang des Ufers sind 2 m lang.

Es befindet sich eine tote, umgestürzte Weide flussaufwärts der oben beschriebenen dreistämmigen Weide und kreuzt diese. Sie ist 7 m lang und hat einen Stammdurchmesser von 30 cm. Bei diesem bereits verrottenden Baum konnten keine Aussagen über die Durchwurzelung getroffen werden, weil die Wurzeln morsch und abgebrochen waren. Ein eventuelles Vorhandensein und Maße einer Pfahlwurzel konnten an dem brüchigen Wurzelstock nicht festgestellt werden.

Abbildung 58 zeigt eine weiter entfernt vom Wasser gelegene, frei gespülte Gruppe von Weiden (Gruppe II), die circa 12 m hoch sind. Es sind 9 Stämme mit Durchmessern zwischen 20 und 50 cm. Sie befinden sich weiter oben am Ufer und nicht mehr so nah am Wasser. Der Wurzelbereich ist nur circa 2 m breit und weist Richtung Ufer mehr Wurzeln auf als Richtung Wasser. Die Wurzeln gehen abrupt nach unten.



Abb. 58: weiter entfernt vom Wasser gelegene Weidengruppe II (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)

Weiter flussaufwärts befindet sich eine mehrstämmige Weide mit 7 Stämmen mit Durchmessern zwischen 35 und 40 cm und einem Stamm mit 25 cm Durchmesser. Durchschnittliche 5 m lange Wurzeln und eine 7 m lange verlaufen schräg Richtung Ufer. Nahe dem Wasser gibt es 3 m lange, starke Wurzeln. In der Skizze in Abbildung 59 ist ersichtlich, dass der Baum, neben der stark ausgeprägten Durchwurzelung Richtung Ufer, ebenfalls gebogene Horizontalwurzeln entlang des Wassers hat.

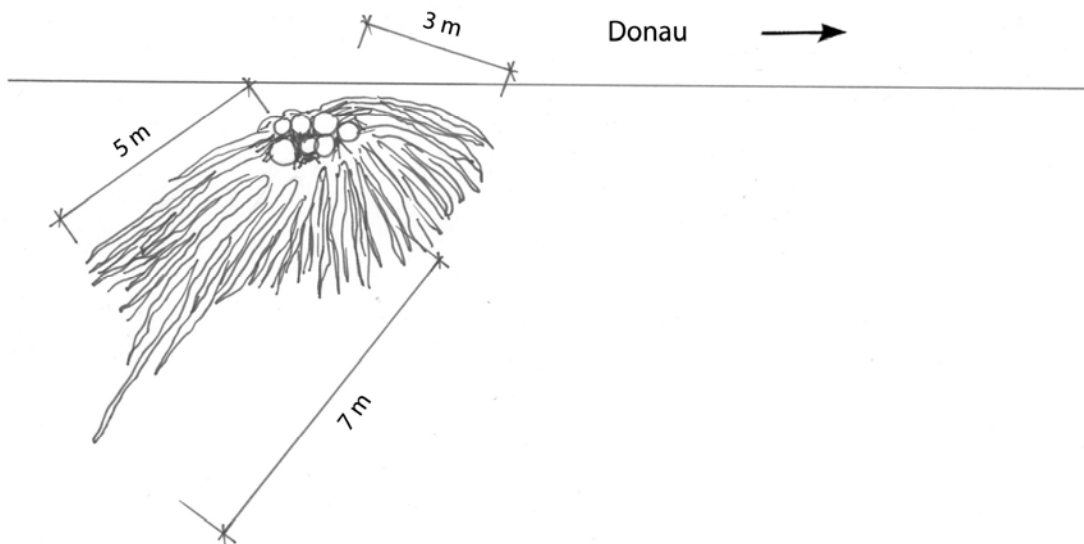


Abb. 59: Skizze Weide III (Donau bei Hainburg, 2012)

6 DISKUSSION UND VORSCHLÄGE FÜR DIE PRAXIS

Wie in Kapitel 3 „Gehölze und Wurzelausbreitung auf Dämmen“ ersichtlich, sind die Aussagen in der Literatur oft sehr gegensätzlich.

Einerseits ist von Bodenlockerung durch Wurzelbewegungen die Rede (DVWK, 1986 und HASELSTEINER & STROBL, 2005), andererseits werden bodenstabilisierende Effekte durch Gewichtsverminderung, Entwässerung und die Durchwurzelung von Scherfugen und Gleitflächen beschrieben (HASELSTEINER, 2007 und FLORINETH, 2012). Die Sickerlinie kann durch Pumpeffekte bei Bewegung des Baumes erhöht (HASELSTEINER, 2007) oder durch die Saugspannung der Wurzeln gesenkt werden (SEETHALER, 1999). Durch Gehölze können Schäden bei Aufstau, Verklausung und Wellenschlag entstehen (HASELSTEINER, 2007). Gehölze können aber auch die Strömung vermindern und Schutz vor Eis und Treibgut bieten (HASELSTEINER, 2011). Durch das Umlegen flexibler Vegetationsbestände bei Überströmung kann die Dammoberfläche außerdem vor Erosion geschützt werden (FLORINETH, 2012). Durch verrottete Wurzeln sollen Hohlräume im Damm verbleiben, die als bevorzugte Sickerwege fungieren können (HASELSTEINER & STROBL, 2005). Andererseits wird beschrieben, dass alte Wurzelgänge von neuen Wurzeln durchwachsen werden und dadurch keine Hohlräume im Damm bleiben (PFLUG & STÄHR, 1999).

Diese Diskrepanz kommt vor allem daher, dass unterschiedliche Gehölzstrukturen untersucht wurden und nicht jeder Bewuchs die gleichen Eigenschaften hat. Nur ein Bewuchs mit passenden Arten und korrektem Aufbau auf einem überbreiten oder überhohen Damm aus stark verdichtetem, homogenem Material und eventuellen Dichtungen und Dräns kann auch seine stabilisierenden und erosionsmindernden Eigenschaften entfalten.

Eine Spreitlage mit Strauchweiden wie sie seit langem für ingenieurbioologische Bauweisen in der Ufersicherung eingesetzt wird, stellt eine passende Vegetationsform für gut verdichtete Dämme dar. Strauchweiden wie die auf einem Versuchsdamm untersuchte Purpur-Weide (*Salix purpurea* L.) entwickeln ein dichtes Wurzelsystem nahe an der Oberfläche und bilden einen dichten Bestand dünner und flexibler Stämme (LAMMERANNER, 2012). Die Weidenspreitlagen zeigten in Untersuchungen ein schnelles und dichtes Spross- und Wurzelwachstum und boten durch ihre Äste einen sofortigen Erosionsschutz bei Überströmung (LAMMERANNER & MEIXNER, 2008). Nach heutigem Stand haben sie keinen signifikanten Einfluss auf die Sickerlinie, aber sehr positive Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt (LAMMERANNER, 2012). Außerdem benötigten sie weniger Pflege als die Gräser-Kräuter-Vegetation, die ein bis zweimal pro Jahr gemäht werden muss (LAMMERANNER & MEIXNER, 2008).

Die Wurzelausgrabung an der Zaya bestätigt die Ergebnisse der Literaturrecherche, dass bei Bäumen auf Dämmen ein hohes Feinwurzelvorkommen im Oberboden, eine verstärkt horizontale Wuchsrichtung und hangabwärts mehr Wurzeln als hangaufwärts zu finden sind.

Auffallend ist, dass sowohl beim Wurzelstock am Hochwasserschutzdamm der Zaya als auch bei den freigespülten Weiden an der Donau in Fließrichtung des Wassers deutlich längere und flache Wurzeln zu finden waren, als auf der entgegen der Fließrichtung gelegenen Seite des Baumes. Die Ausprägung dieser Asymmetrie der Horizontalwurzeln nahm bei den an der Donau vorgefundenen Weiden auch mit steigendem Abstand zum Wasser ab.

Mit einer 2,20 m breiten Dammkrone entspricht der Hochwasserschutzdamm an der Zaya nicht dem Mindestquerschnitt der DIN-Norm (3 m) oder des BAW-Merkblattes (5 m). Auch die Böschungsneigung ist mit 1:1 im unteren Bereich steiler als die in der DIN-Norm empfohlene Neigung von 1:3 oder flacher. Da sich der Baum auf der wasserseitigen Böschung eines nicht überhöhten oder überbreiten Damms ohne Innendichtung befand, war er somit an diesem Standort nach DIN-Norm und BAW-Merkblatt nicht zulässig.

Inwiefern die Silber-Weide in ihrem ausgewachsenen Zustand als auch in Form des verbliebenen Wurzelstocks bei einem Hochwasserereignis die Funktionsfähigkeit und Standsicherheit des Damms an der Zaya beeinträchtigt hätte, wird nun anhand der in dieser Arbeit beschriebenen Versagensursachen von Dämmen bewertet.

Da Wuchshöhe und Kronendurchmesser der Weide nicht bekannt sind, ist es schwer abzuschätzen, wie stark der Baum bei Windbelastung bewegt worden wäre. Bei einem lebenden Baum mit gesunden Wurzeln ist aber davon auszugehen, dass es eine bessere Verankerung im Boden gegeben hätte als bei dem vorgefundenen verrottenden und brüchigen Wurzelsystem. Durch die Lage des Baumes am wasserseitigen Böschungsfuß hätte der entstehende Wurzelkrater bei einem Windwurf jedenfalls katastrophale Auswirkungen auf die Standsicherheit des Damms. Bei dieser Position am Damm ist es zudem ziemlich wahrscheinlich, dass ein Schwingen des Baumes im Wind zu Aufpumpen von Wasser entlang der Wurzelkanäle und somit zur Erhöhung der Sickerlinie geführt hätte. Allerdings ist die Intensität dieses Effektes schwer abzuschätzen, da nur drei relativ schmale Wurzeln Richtung Damminnen verliefen und die restlichen Wurzeln horizontal entlang des Böschungsfußes wuchsen.

Da sich die Weide auf der Wasserseite des Damms befand, hätte es bei Hochwasser durch Treibzeug zu Verkläuerungen und Aufstau der Strömung kommen können. Dies wäre sowohl beim vollständigen Baum als auch beim Wurzelstock möglich gewesen, wenn auch nicht in diesem Ausmaß. Auch die Dammverteidigung, -überwachung und -unterhaltung

hätte eine ausgewachsene Silber-Weide erschwert, wobei der Wurzelstock vor allem bezüglich der Dammunterhaltung mit Mähmaschinen ebenfalls eine Behinderung dargestellt hätte.

Bei den Untersuchungen wurden keine Hohlräume alter Wurzelgänge gefunden, obwohl vor allem die kleineren Wurzeln schon sehr morsch und brüchig waren. Es konnten auch keine Hinweise für das Vorkommen von Wühltieren beobachtet werden. Allerdings könnten durch die Art der Freilegung auch alte, hohle Wurzelgänge oder Wühltierbauten übersehen worden oder zusammengebrochen sein. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Durchsickerung des Dammes bei diesem morschen Wurzelstock höher wäre als bei einem gesunden Baum.

Wie bereits erwähnt gibt es noch vergleichsweise wenige Untersuchungen über die Auswirkung von Gehölzbewuchs auf die Dammstabilität. Aber die ersten positiven Ergebnisse des in der Literatur beschriebenen Forschungsprojekts in Deutsch-Wagram und die Tatsache, dass das Wuchsverhalten von Gehölzen und ihrer Wurzeln sehr stark von den Standortbedingungen abhängt und dadurch in gewisser Weise vorhersehbar und beeinflussbar ist, zeigen, dass es doch einiges an Potential gibt, um, mit richtiger Ausführung, die positiven Effekte von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen zu nutzen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

BAW (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau. Online: <http://dnb.info/1015682715/34> (13.09.2012)

BERRY, A.; CHUNG, S.M. (2012): Tree root architectural patterns & geotechnical roles in levees. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012%20Symposium_Speaker_Berry_Presentation.pdf (16.09.2012)

BLUM, W.E.H. (2007): Bodenkunde in Stichworten. Gebr. Borntraeger, Stuttgart. 6.Auflage.

BLW (1984): Hinweise zur standortgemäßen Bepflanzung von Flußdeichen, Stauhaltungsdämmen und Vorländern. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.

BLW (1990): Gehölze auf Deichen. Dokumentation von Baumwurzelaufgrabungen und Windwurf von Gehölzen. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.

BMLFUW (2011): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2009. 117.Band. Abteilung VII 3 – Wasserhaushalt, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien

BRAUNE, W.; LEMAN, A.; TAUBERT, H. (2002): Pflanzenanatomisches Praktikum I. Zur Einführung in die Anatomie der Samenpflanzen. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin. 8. Auflage.

CLVRP (2011): Informational Circular No. 2: Summary of Research Completed to Date December 12, 2011. California Levee Vegetation Research Program. Online: http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/CLVRP.info.fallcircularno.2_2011.pdf (09.10.2012)

CORCORAN, M. (2012): Overview of ERDC research. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012%20Symposium_Speaker_Corcoran_Presentation_Tues.pdf (17.09.2012)

DIN-Norm (1997): 19712 Flussdeiche. Deutsches Institut für Normung.

DÖSCHER, H. D. (1999): Die Standsicherheit von Flussdeichen und –dämmen unter Berücksichtigung der Vegetationsdecke. In: Ingenieurbiologie Flussdeiche und Flusssdämme – Bewuchs und Standsicherheit. Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V., Aachen.

DVWK (1986): Flussdeiche. Merkblatt 210. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Parey, Hamburg & Berlin.

EBNER, E. (2008): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Durchsickerung. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

ERDC (2011 a): Initial research into the effects of woody vegetation on levees. Engineer research and development center. U.S. Army Corps of Engineers. Washington DC. Online: http://wri.usace.army.mil/documents/woody_vegetation_report/Vol_IV-Summary_of_Results_and_Conclusions.pdf (29.09.2012)

ERDC (2011 b): Review & Summary of: Initial Research into the Effects of Woody Vegetation on Levees. Volumes I-IV. US Army Corps of Engineers, Engineer Research & Development Center. Online: http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/CLVRP.ERDCResearchReportSynopsisFinalDec052011.pdf (11.10.2012)

FLORINETH, F. (2012): Pflanzen statt Beton - sichern und gestalten mit Pflanzen. Patzer Verlag, Berlin, Hannover. 2.Auflage.

FLORINETH, F.; KLOIDT, F., LEITNER, Ch. (2012/13): Studienblätter zur Vorlesung Vegetationstechnik. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

GROSS, M. J. (1991): Consequences of the activity of roots in soil. In: Plant Root Growth – an ecological perspective. Oxford Blackwell Scientific Publications.

HÄHNE, K. (1999): Wurzeluntersuchungen an einem neuen Damm und zwei alten Deichen an der Donau bei Regensburg; In: Ingenieurbiologie Flussdeiche und Flusssdämme – Bewuchs und Standsicherheit. Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. Aachen.

HARDER, L. F.; KROLL, R.; CLAASSEN, V.; BUCK, P.; BERRY, A. (2010): Investigation of Tree Root Penetration Into a Levee Soil-Cement-Bentonite-Slurry Cutoff Wall – Part I. California Levee Research Program. Online: http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/SlurrycutoffwallsandrootsPart1.pdf (30.10.2012)

HARDER, L. F.; KROLL, R.; BUCK, P.; INAMINE, M.; BERRY, A. (2011): Investigation of Tree Root Penetration Into a Levee Soil-Cement-Bentonite-Slurry Cutoff Wall – Part II. California Levee Research Program. Online:

http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/Slurrycut%20offwallsandrootspart2.pdf (30.10.2012)

HARTGE, K.H.; HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 3.Auflage.

HARTGE, K.H.; HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 4.Auflage.

HASELSTEINER, R.; STROBL, Th. (2005): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Deichsanierung. Endbericht. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Technische Universität München. Online: <http://www.dr-haselsteiner.de/reports/Report001.pdf> (25.09.2012)

HASELSTEINER, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Dissertation. Technische Universität München. Online: http://www.dr-haselsteiner.de/papers/Haselsteiner_paper022_diss.pdf (01.10.2012)

HASELSTEINER, R. (2011): Maßnahmen zur Ertüchtigung von Flussdeichen. Flussdeiche - Bemessung, Dichtungssysteme und Unterhaltung. DWA, Hennef. Online: <http://www.dr-haselsteiner.de/start.htm?veroeffentlichungen.htm> (17.09.2012)

HIETZ, P.; KIKUTA, S.; KARTUSCH, B.; KÖNIGSHOFER, H.; TREMETSBERGER, K. (2009): Bau der Pflanze. Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung VU 831.106. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung, Institut für Botanik.

HOLZAPFEL, G. (2008): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Überströmbarkeit. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

KABIR, N.; BEAN, F. (2011): The Influence of Levee Past Performance – a Review of Historic Data Based on the Levee Evaluation Program Database. URS Corporation. Im Auftrag von Department of Water Resources, Division of Flood Management. Sacramento, Kalifornien. Online:

http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/Influenceofvegetationonleveepastperformance.pdf (07.10.2012)

KLÄRING, A. (2012): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen. Simulation des Bodenwasserhaushalts in Lysimetern mit dem Modell HYDRUS-2D. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

KLEBER-LERCHBAUMER, U. (2012): German levee regulations with regard to vegetation theory and practice. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online:

http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012%20Symposium_Speaker_Kleber-Lerchbaumer_Presentation.pdf (13.09.2012)

KRAYCHNIKOVA, D. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Durchsickerungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E. (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Morphologie. 6.Band der Wurzelatlas-Reihe. Leopold Stocker Verlag. Graz – Stuttgart.

LAMMERANNER, W. & MEIXNER, H. (2008): Gehölzstrukturen an Dämmen und Deichen. Auswirkungen auf Standsicherheit und Instandhaltung. Endbericht Projektphase I. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft; Amt der niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Wasser, Abteilung Wasserwirtschaft und Abteilung Wasserbau. Projektleitung: FLORINETH, F. & RAUCH, H. P. .

LAMMERANNER, W. & OBRIJETAN, M. (2010): Gehölzstrukturen an Dämmen und Deichen. Auswirkungen auf Standsicherheit und Instandhaltung. Endbericht Projektphase II. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft; Amt der niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Wasser, Abteilung Wasserwirtschaft und Abteilung Wasserbau. Projektleitung: FLORINETH, F. & RAUCH, H. P. .

LAMMERANNER, W.; OBRIJETAN, M (2011): Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Durchwurzelung unter einem Gehölzbestand (*Salix purpurea* L.) im Vergleich zu einer Gräser-Kräuter-Narbe. In Bericht 1.Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung, Pflanzenwurzel im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (Seite 75-80). Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Online: <http://www.lebensministerium.at/suchergebnisse.html?queryString=geh%C3%B6lzstrukturen+an+hochwasserschutzd%C3%A4mmen> (01.11.2012)

LAMMERANNER, W. (2012): The Impact of Woody Vegetation on Levees – Research Experiences from Austria. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012_Symposium_Lammeranner_Presentation.pdf

LESZCZYNSKI, J. (2011): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Weidengehölzen an Hochwasserschutzdämmen. Masterarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

LIEBHARD, P.; EITZINGER, J.; KLAGHOFER, E. (1995): Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur, Wien. Online: <http://www.boku.ac.at/diebodenkultur/volltexte/band-46/heft-1/liebhard1.pdf> (12.12.2012)

OBRIJETAN, M. (2010): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen. Einfluss von Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

ÖBV (2012): Österreichischer Bundesverlag, freytag & berndt Schulatlas online. Physische Karte Wien, Niederösterreich, Oberösterreich M 1:750 000. Online: http://www.freytagberndt.at/schulatlas/menue/arbeitsblaetter/karten_pdf/010_WNO_PHY_Karte.pdf (09.12.2012)

PETERSON, Ch. (2012): Tree windthrow on california levees. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012_Symposium_Peterson_Presentation.pdf

PFLUG, W.; STÄHR, E. (1999): Wald auf und an Flussdeichen. Ingenieurbiologie Flussdeiche und Flusssdämme – Bewuchs und Standsicherheit. Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. Aachen.

RAIJIC, F. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Überströmungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

ROLOFF, A. (2008): Baumpflege. Baumbiologische Grundlagen und Anwendung. Ulmer Verlag, Stuttgart.

SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHNABEL, P. et al. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 16.Auflage.

SCHOPFER, P.; BRENNICKE, A. (2010): Pflanzenphysiologie. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 7.Auflage.

SEETHALER, L. (1999): Wurzelausbreitung von Gehölzen auf Flussdeichen. Flussdeiche und Flusssdämme - Bewuchs und Standsicherheit. Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. Aachen.

SHRIRO, M. (2012): Effects of live and decomposing tree roots on levee seepage. Observations of full-scale field testing. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online:
http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012%20Symposium_Speaker_Shriro_Presentation_Tues.pdf (12.09.2012)

SHRIRO, M.; COBOS-ROA, D.; BRAY, J.; SITAR, N.; LICHTER, J.; EVANS, R.; KROLL, R. (2011): Study of Levee Seepage and Slope Stability in Relation to Roots. California Levee Vegetation Program. Online:
http://www.safca.org/documents/leveevegsymposium2012/clvrp_studies_now_available/SlopestabilityandrootsCalExpo.pdf (10.10.2012)

SOKOPP, M. (2012): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen. Auswirkungen von Weiden- und Gräser/Kräuter-Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen. Masterarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.

VAN VUREN, D.H. (2012): Burrowing mammal habitat associations and burrow dimensions. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012%20Symposium_Speaker_Van-Vuren_Presentation_Wed.pdf (12.09.2012)

WESSOLLY, L. (2002): Bäume auf Deichen – unverträglich oder nützlich? Verkehrssicherheit von Bäumen und Deichen. Baumstatik. Tagungsband Westdeutsche Baumpflegetage 30.10.2002. Institut für Baumdiagnose Köln, Stuttgart.

WIESBAUER, H.; FRÖSCHL, G.; LAZOWSKI, W. (1999): Pflegekonzept Zaya. Im Bereich zwischen Ebersdorf und Olgersdorf. Flusskilometer 22,4 bis 43,3. Bericht Wasserwirtschaftliche und Naturräumliche Bearbeitung.

ZAMG (2012): Klimadaten Poysdorf 1971-2000. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Online: http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (05.07.12)

ZANETTI, C. (2012): Characterising the development and decomposition of woody root systems in french earthen dikes. Presentation Levee Research Symposium, Kalifornien, 28.08.2012 - 30.08.2012. Online: http://www.safca.org/symposium_2012_documents/2012_Symposium_Zanetti_Presentation.pdf (12.09.2012)

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Einteilung der Bodenarten (BLUM, 2007).....	11
Abb. 2: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser (BLUM, 2007)	12
Abb. 3: Formen des Wassers im Boden (BLUM, 2007)	13
Abb. 4: Begriffe eines Dammes (DVWK, 1986)	14
Abb. 5: Möglicher Dammaufbau (DVWK, 1986).....	15
Abb. 6: Vollkommene Dichtungen (nach HASELSTEINER, 2007)	16
Abb. 7: Unvollkommene Dichtungen (nach HASELSTEINER, 2007).....	17
Abb. 8: Auflastdrän (nach BAW, 2011)	18
Abb. 9: Innenliegender Drän (nach BAW, 2011)	18
Abb. 10: Freibord (DVWK, 1986).....	19
Abb. 11: Materialtransport im Boden (BAW, 2011)	21
Abb. 12: Die Entwicklung der Wurzel (HIETZ et al., 2009)	24
Abb. 13: Wurzel Aufbau im Querschnitt (HIETZ et al., 2009).....	24
Abb. 14: Wurzelzonen (HIETZ et al., 2009).....	26
Abb. 15: (v.l.n.r.) Pfahlwurzeltyp, Herzwurzeltyp und Flachwurzeltyp (ROLOFF, 2008)	27
Abb. 16: Zylinderförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).....	28
Abb. 17: Verkehrt zylinderförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)	28
Abb. 18: Scheibenförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).....	28
Abb. 19: Hantelförmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).....	29
Abb. 20: T-förmiger Wurzeltyp (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)	29
Abb. 21: Beginn des sekundären Wachstums und Bildung einer Seitenwurzel (HIETZ et al., 2009).....	31
Abb. 22: Allorhizie (l.) bei Dikotylen und Homorhizie (r.) bei Monokotylen (HIETZ et al., 2009)	32
Abb. 23: Sedimentation der Statolithen (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010)	34
Abb. 24: Verrottende Wurzeln nach Absterben des Baumes (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)	37
Abb. 25: Durchwurzelung einer natürlichen Oberflächendichtung (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005).....	38
Abb. 26: In den Dränkörper eingewachsene Wurzeln (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)	39
Abb. 27: Bodenlockerung durch Gehölzbewegung am Damm (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)	39

Abb. 28: Ausbruchtrichter durch Windwurf eines Baumes (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)	40
Abb. 29: Durch Baumbewegung erhöhte Sickerlinie (nach HASELSTEINER & STROBL, 2005)	40
Abb. 30: Bewuchszonen überbreiter oder überhoher Dämme (BAW, 2011).....	45
Abb. 31: Ertüchtigungsmaßnahmen für Dämme mit Gehölzbewuchs (nach HASELSTEINER, 2011)	47
Abb. 32: Einbau einer Abdichtwand (KLEBER-LERCHBAUMER, 2012)	48
Abb. 33: typisches Wurzelsystem von Salix alba (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)	52
Abb. 34: Salix alba mit Herz-Pfahlwurzelsystem und weitstreichenden Horizontalwurzeln (BLW, 1990)	53
Abb. 35: Salix alba mit Pfahlwurzelsystem und weitstreichenden Horizontalwurzeln (BLW, 1990)	54
Abb. 36: Übersichtskarte Zaya (nach ÖBV, 2012)	57
Abb. 37: Zaya-Damm (Zaya, 2012)	59
Abb. 38: Übersichtskarte (nach google maps, 2012)	62
Abb. 39: alter Zayadammit mit bereits abgetragener Grasnarbe auf der Dammkrone (Zaya, April 2012)	63
Abb.40: Freischaufeln des Wurzelstocks mit Hilfe des Baggers (Zaya, April 2012)	64
Abb. 41: Freischaufeln von Hand (Zaya, April 2012)	65
Abb. 42: Freispritzen der Wurzeln (Zaya, Mai 2012)	65
Abb. 43: Ausmessen des freigelegten Wurzelsystems (Zaya, Mai 2012)	66
Abb. 44: räumliche Verteilung der Bodenuntersuchungen (Zaya, 2012)	68
Abb. 45: Korngrößenverteilung Bodenprobe A (Zaya, 2012).....	71
Abb. 46: Korngrößenverteilung Bodenprobe B (Zaya, 2012)	72
Abb. 47: Korngrößenverteilung Bodenprobe C (Zaya, 2012).....	72
Abb. 48: Durchschnittlicher Eindringwiderstand in 1m (links) und in 2,20m Tiefe (rechts) (Zaya, 2012).....	74
Abb. 49: Durchschnittlicher Eindringwiderstand in 3,80m (links) und 4m Tiefe (rechts) (Zaya, 2012)	74
Abb. 50: Salix alba Wurzelstock am Damm (Zaya, 2012)	76
Abb. 51: Wurzelübersicht (Zaya, 2012)	77
Abb. 52: Freigelegter Wurzelstock (Zaya, Mai 2012).....	78
Abb. 53: Freigelegter Wurzelstock vom anderen Ufer aus gesehen (Zaya, Mai 2012)	78
Abb. 54: Übersichtskarte Hainburg (nach google maps, 2012).....	79
Abb. 55: an diesem Standort auffällig häufig vorgefundene, mit der Fließrichtung der Donau verlaufende, lange Horizontalwurzeln (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)	80

Abb. 56: mehrstämmige Weiden mit umgestürzter Weide (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)	81
Abb. 57: Skizze der Weidengruppe I (Donau bei Hainburg, 2012)	81
Abb. 58: weiter entfernt vom Wasser gelegene Weidengruppe II (Donau bei Hainburg, Oktober 2012)	82
Abb. 59: Skizze Weide III (Donau bei Hainburg, 2012)	83

9 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Einteilung der Kornfraktionen (nach BLUM, 2007)	10
Tab. 2: Charakteristische Durchflüsse (nach WIESBAUER et al., 1999).....	58
Tab. 3: Auswahl der vorkommenden Pflanzenarten (nach WIESBAUER et al., 1999)	60
Tab. 4: Vorkommende gefährdete und pflanzengeographisch charakteristische Arten (nach WIESBAUER et al., 1999)	60
Tab. 5: Verteilung der Untersuchungsmethoden (Zaya, 2012)	69
Tab. 6: Durchschnittliche Bodendichte (Zaya, 2012)	73
Tab. 7: Wurzelbeschreibung (Zaya, 2012).....	77

10 ANHANG

10.1 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE A

10.2 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE B

10.3 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE C

10.4 STECHZYLINDERPROBEN

10.5 PENETROLOGGER-MESSUNGEN

10.1 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE A

Projekt VE1923.98

Siebversuch

Siebsatz A

$R_{\ddot{U}} = 0.0 \%$

$D_{\max, \ddot{U}} = 18.000 \text{ mm}$

$m_s = 4127.00 \text{ g}$

$d_{\max} = 18.000 \text{ mm}$

$d_{\min} = 0.100 \text{ mm}$

$d_{\min, G} = 8.000 \text{ mm}$

$d_{\min, M} = 0.500 \text{ mm}$

$D'(d_{\min, G}) = 86.00 \text{ g}$

$D'(d_{\min, M}) = 10.00 \text{ g}$

$m_{s, F} = 54.49 \text{ g}$

	d [mm]	R [g]	D [%]
G	16.00	0.00	100.00
	8.00	8.00	99.81
M	4.00	12.00	99.52
	2.00	13.00	99.20
	1.00	18.00	98.76
F	0.50	33.00	97.96
	0.20	1.02	96.13
	0.10	2.15	92.27

Aräometerversuch

Aräometer 3

$\rho_s = 2.750 \text{ g/cm}^3$

$m_{s, A} = 51.07 \text{ g}$

$K_M = 0.3 \text{ cm}$

$K_D = 3 \text{ g}$

$K_A = 1.4 \text{ g}$

$D(d_{0.02}) = 40.76 \%$

t [min]	T [°C]	d [mm]	R' [-]	D [%]
0.5	23.6	0.0583	28.00	78.12
1.0	23.6	0.0431	25.60	71.30
2.0	23.6	0.0321	22.50	62.50
5.0	23.6	0.0217	15.50	42.62
15.0	23.6	0.0132	11.50	31.27
45.0	23.6	0.0079	8.90	23.88
120.0	23.7	0.0049	7.30	19.41
240.0	23.8	0.0035	5.90	15.50
360.0	24.0	0.0029	5.20	13.65
1440.0	23.4	0.0015	3.40	8.13

10.2 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE B

Projekt VE1923.98

Siebversuch

Siebsatz A

$R_{\ddot{U}} = 0.0 \%$

$D_{\max, \ddot{U}} = 18.000 \text{ mm}$

$m_s = 3229.00 \text{ g}$

$d_{\max} = 18.000 \text{ mm}$

$d_{\min} = 0.100 \text{ mm}$

$d_{\min, G} = 8.000 \text{ mm}$

$d_{\min, M} = 0.500 \text{ mm}$

$D'(d_{\min, G}) = 19.00 \text{ g}$

$D'(d_{\min, M}) = 2.00 \text{ g}$

$m_{s, F} = 45.35 \text{ g}$

	d [mm]	R [g]	D [%]
G	16.00	0.00	100.00
	8.00	1.00	99.97
M	4.00	1.00	99.94
	2.00	1.00	99.91
F	1.00	5.00	99.75
	0.50	10.00	99.44
	0.20	0.83	97.62
	0.10	2.00	93.24
	0.10	0.00	93.24

Aräometerversuch

Aräometer 3

$\rho_s = 2.750 \text{ g/cm}^3$

$m_{s, A} = 42.36 \text{ g}$

$K_M = 0.3 \text{ cm}$

$K_D = 3 \text{ g}$

$K_A = 1.4 \text{ g}$

$D(d_{0.02}) = 46.65 \%$

t [min]	T [°C]	d [mm]	R' [-]	D [%]
0.5	23.6	0.0632	23.50	79.61
1.0	23.6	0.0460	21.70	73.38
2.0	23.6	0.0335	19.90	67.15
5.0	23.6	0.0219	14.70	49.16
15.0	23.6	0.0133	10.80	35.67
45.0	23.6	0.0079	8.40	27.37
120.0	23.7	0.0049	6.90	22.26
240.0	23.8	0.0035	5.70	18.19
360.0	24.0	0.0029	4.90	15.59
1440.0	23.4	0.0015	3.20	9.21

10.3 KORNGRÖßENVERTEILUNG BODENPROBE C

Projekt VE1923.98

Siebversuch

Siebsatz A

$R_{\ddot{U}} = 0.0 \%$

$D_{\max, \ddot{U}} = 31.500 \text{ mm}$

$m_s = 3452.00 \text{ g}$

$d_{\max} = 18.000 \text{ mm}$

$d_{\min} = 0.100 \text{ mm}$

$d_{\min, G} = 8.000 \text{ mm}$

$d_{\min, M} = 0.500 \text{ mm}$

$D'(d_{\min, G}) = 45.00 \text{ g}$

$D'(d_{\min, M}) = 1.00 \text{ g}$

$m_{s, F} = 41.93 \text{ g}$

	d [mm]	R [g]	D [%]
G	16.00	0.00	100.00
	8.00	2.00	99.94
M	4.00	2.00	99.88
	2.00	3.00	99.80
F	1.00	11.00	99.48
	0.50	28.00	98.67
	0.20	1.56	95.00
	0.10	0.92	92.83
	0.10	0.00	92.83

Aräometerversuch

Aräometer 3

$\rho_s = 2.750 \text{ g/cm}^3$

$m_{s, A} = 39.39 \text{ g}$

$K_M = 0.3 \text{ cm}$

$K_D = 3 \text{ g}$

$K_A = 1.4 \text{ g}$

$D(d_{0.02}) = 65.86 \%$

t [min]	T [°C]	d [mm]	R' [-]	D [%]
0.5	23.6	0.0629	23.80	86.35
1.0	23.6	0.0460	21.70	78.57
2.0	23.6	0.0335	19.90	71.90
5.0	23.6	0.0207	18.50	66.71
15.0	23.6	0.0126	15.30	54.86
45.0	23.6	0.0076	12.00	42.64
120.0	23.7	0.0048	9.30	32.72
240.0	23.8	0.0035	7.30	25.41
360.0	24.0	0.0029	6.00	20.77
1440.0	23.4	0.0015	2.50	7.27

10.4 STECHZYLINDERPROBEN

Bodenabschnitt	NR	Trockengewicht Probe mit Stechzylinder [g]	Gewicht Stechzylinder [g]	Trockengewicht Probe [g]	Volumen Probe [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
1	1	250,956	112,714	138,242	100	1,382
1	2	245,669	111,519	134,150	100	1,342
1	3	247,168	112,145	135,023	100	1,350
1	4	246,629	112,660	133,969	100	1,340
1	5	255,538	112,071	143,467	100	1,435
2	6	256,805	111,729	145,076	100	1,451
2	7	263,658	112,226	151,432	100	1,514
2	8	253,159	111,658	141,501	100	1,415
3	9	267,036	111,154	155,882	100	1,559
3	10	296,480	110,900	185,580	100	1,856
3	11	278,121	111,787	166,334	100	1,663
4	12	274,549	112,290	162,259	100	1,623
4	13	274,514	112,781	161,733	100	1,617
5	14	272,871	111,539	161,332	100	1,613
5	15	274,788	111,888	162,900	100	1,629
5	16	278,078	111,994	166,084	100	1,661

Durchschnittliche Trockendichte	
Bodenabschnitt 1	1,37 g/cm³
Bodenabschnitt 2	1,50 g/cm³
Bodenabschnitt 3	1,69 g/cm³
Bodenabschnitt 4	1,62 g/cm³
Bodenabschnitt 5	1,63 g/cm³

10.5 PENETROLOGGER-MESSUNGEN

Eindringwiderstand [MPa]

Bodentiefe [cm]	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Messung 11	Messung 12	Messung 13
	in 1 m Tiefe					in 2,20 m Tiefe			in 3,80 m Tiefe			in 4 m Tiefe	
1	1,30	0,50	0,50	3,00	2,60	1,10	0,40	0,70	0,50	0,60	0,70	0,50	0,50
2	1,30	1,40	2,20	3,00	2,60	1,20	2,40	1,00	0,50	0,60	0,70	0,70	0,50
3	2,10	2,10	2,20	3,00	2,60	1,20	2,40	1,00	0,50	1,20	1,30	0,70	0,80
4	2,10	2,10	2,20	3,00	2,60	1,20	2,40	1,00	2,30	2,30	1,70	0,70	0,80
5	2,30	2,60	2,20	4,10	4,60	1,20	2,60	1,00	2,30	2,60	2,10	1,00	1,40
6	2,40	2,60	2,20	4,10	4,60	1,20	2,60	1,00	2,30	2,60	2,60	1,00	1,40
7	2,70	3,00	2,20	4,10	4,60	1,20	2,60	1,00	2,30	2,60	2,60	1,00	1,80
8	2,70	3,50	2,20	4,10	4,60	1,30	2,60	1,00	2,30	2,60	2,60	1,00	1,80
9	2,70	3,50	2,20	4,10	4,60	1,30	2,70	1,00	2,30	2,60	2,60	1,10	1,80
10	2,70	3,50	2,20	4,10	4,60	1,40	2,70	1,00	2,30	2,60	2,60	1,10	1,80
11	2,70	3,20	2,20	4,10	4,60	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,60	1,10	1,80
12	2,50	3,50	2,20	4,10	4,60	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,50	1,70	1,80
13	2,50	3,50	2,20	4,10	4,60	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,50	1,70	1,80
14	2,50	3,50	2,20	4,10	4,60	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,50	1,70	1,80
15	2,50	3,50	2,20	4,10	5,00	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,50	1,70	1,80
16	2,50	3,50	2,20	4,10	5,20	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,70	1,70	2,20
17	2,50	3,50	2,20	4,10	5,30	1,40	2,20	1,00	2,30	2,60	2,70	1,70	2,20
18	2,20	3,50	2,20	4,10	5,30	1,40	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,70	2,20
19	2,20	3,50	2,20	4,10	5,30	1,40	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,70	2,50
20	2,20	3,50	2,30	4,10	5,20	1,40	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,70	2,50
21	2,20	3,50	2,30	4,10	5,00	1,40	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,70	2,50
22	2,10	3,50	2,30	4,10	5,00	1,40	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,70	2,50
23	2,50	2,90	2,30	4,10	4,90	1,60	1,60	1,10	2,30	2,60	2,50	1,90	2,50
24	2,80	2,90	3,30	4,10	4,90	1,60	1,60	1,10	2,30	2,80	2,50	1,90	2,50
25	3,00	2,90	3,30	4,10	4,90	1,60	1,60	1,10	2,30	2,80	2,50	1,90	2,50
26	3,30	2,90	3,30	4,00	4,90	1,60	1,60	0,90	2,30	2,80	2,50	1,90	2,50
27	3,70	2,90	3,30	5,20	5,20	1,60	1,60	0,90	2,30	2,80	2,50	1,90	2,50
28	4,00	2,90	4,30	5,20	5,20	1,60	1,60	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
29	4,30	2,60	4,30	5,20	5,20	1,60	1,60	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
30	4,50	2,60	4,50	5,20	5,20	1,60	1,60	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
31	4,10	2,60	5,80	5,20	4,80	1,60	1,60	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
32	4,10	2,60	5,80	5,20	4,80	1,60	1,60	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
33	4,10	2,60	5,80	5,20	4,80	1,60	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,90	2,50
34	4,30	2,60	5,80	5,20	4,80	1,60	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
35	4,30	2,60	5,80	5,20	6,50	1,60	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
36	4,30	2,60	5,80	5,20	7,40	1,60	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
37	4,40	2,60	5,80	5,20	7,40	1,60	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
38	4,60	2,60	5,80	5,20	7,40	1,80	1,40	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
39	4,60	2,40	5,80	5,20	8,20	1,80	1,20	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
40	4,60	2,40	5,80	5,20	8,20	1,90	1,20	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,50
41	4,50	2,30	5,80	5,10	8,20	1,90	1,20	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,40
42	4,50	2,30	5,80	5,10	8,20	3,00	1,20	1,30	2,30	3,40	2,50	1,80	2,40
43	4,50	2,30	5,80	5,10	8,20	3,00	1,40	1,30	2,30	3,40	2,70	1,80	2,40
44	4,80	2,10	5,80	5,10	8,20	3,00	1,40	1,30	2,30	3,40	2,70	1,80	2,70
45	4,80	2,10	5,80	5,10	8,20	3,00	1,60	1,10	2,30	3,40	2,70	1,80	2,70
46	4,80	2,10	5,80	5,10	8,20	3,00	1,60	1,10	2,30	3,40	2,70	1,80	2,70
47	5,10	1,90	5,50	5,10	8,20	3,00	1,70	1,00	2,30	3,40	2,90	1,80	2,70
48	5,10	1,90	5,50	5,10	8,20	3,00	1,70	1,00	2,30	3,40	2,90	1,80	2,70
49	5,20	2,50	5,50	5,10	8,20	3,00	1,70	1,00	2,30	3,40	3,40	1,80	2,70
50	5,20	2,50	5,50	5,10	8,20	3,00	1,70	1,40	2,30	3,40	3,40	1,80	2,70
51	5,30	2,70	5,50	5,10	8,20	3,00	2,00	2,70	2,30	3,40	3,40	1,80	2,70
52	5,30	3,00	5,50	5,10	8,50	3,00	2,00	2,70	2,30	3,40	3,40	1,80	2,70
53	5,20	4,00	5,50	5,10	8,20	3,00	2,00	2,70	2,30	3,40	3,40	1,80	2,70
54	5,20	4,30	5,50	5,10	8,20	3,00	2,00	2,70	2,30	3,40	3,10	1,80	2,70
55	5,20	4,50	5,50	5,10	8,10	3,00	2,50	2,70	2,30	3,40	3,10	1,80	2,70
56	5,20	4,50	5,50	5,10	7,80	3,00	2,50	2,70	5,50	3,40	3,10	1,80	2,70
57	5,20	5,20	5,50	5,10	7,80	3,00	2,50	2,70	5,50	3,40	3,10	1,80	2,70
58	5,20	5,20	5,50	5,70	7,80	3,00	2,50	2,70	5,50	3,40	3,10	1,80	2,70
59	5,20	4,80	5,50	5,70	7,80	3,00	2,60	2,70	5,50	3,40	3,10	2,50	2,70
60	5,20	5,80	5,50	5,70	7,70	3,00	2,60	2,70	5,50	3,40	4,90	2,50	5,10
61	5,20	5,80	5,50		7,60	3,00	2,60	2,70	5,50	3,40	4,90	2,50	5,10
62	5,20	5,40			7,60	3,00	2,50	2,70	5,50	3,40	4,90	2,50	5,10
63	5,20	5,40			7,60	3,00	2,50	2,70	5,50	3,50	4,90	2,50	5,10
64	5,20	5,30			7,60	2,90	2,50	2,80	5,50	3,50	4,90	2,50	5,10
65	5,20	4,50			7,60		2,50	2,80	5,50		4,90	2,50	5,10
66	5,20	4,50			7,20		2,50	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
67	5,20	4,50			7,20		2,20	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
68	5,20	4,50			7,20		2,60	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
69	5,20	4,50			7,20		2,60	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
70	5,20	4,50			7,20		2,60	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
71	5,20	4,50			7,20		2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
72	5,20	4,50					2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
73	5,20	4,50					2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
74	5,00	4,50					2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
75	5,00						2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
76	5,00						2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
77	5,00						2,90	2,80	5,50		4,90	3,20	5,10
78	4,70						2,90	2,70	5,50		4,90	3,70	5,10
79							2,90	2,70	5,50		4,90	3,70	5,10
80							2,90	2,60	5,50		4,90	3,70	5,10
81							2,90	2,60	5,50		3,70	3,70	5,10
82							2,70	0,00	5,50		3,70		5,80
Mittelwert (MPa)	4,03	3,33	4,11	4,65	6,26	2,02	2,09	1,70	3,26	2,99	3,18	2,03	3,04
Cone Index (CI)	3,20	2,40	4,00	4,40	5,20	1,80	1,90	1,10	1,80	2,50	2,20	1,50	2,00
MITTELWERT	4,48					1,94			3,14			2,54	

durchschnittlicher Eindringwiderstand [MPa]

Bodentiefe [cm]	in 1 m Tiefe	in 2,20 m Tiefe	in 3,80 m Tiefe	in 4 m Tiefe
1	1,58	0,73	0,60	0,50
2	2,10	1,53	0,60	0,60
3	2,40	1,53	1,00	0,75
4	2,40	1,53	2,10	0,75
5	3,16	1,60	2,33	1,20
6	3,18	1,60	2,50	1,20
7	3,32	1,60	2,50	1,40
8	3,42	1,63	2,50	1,40
9	3,42	1,67	2,50	1,45
10	3,42	1,70	2,50	1,45
11	3,36	1,53	2,50	1,45
12	3,38	1,53	2,47	1,75
13	3,38	1,53	2,47	1,75
14	3,38	1,53	2,47	1,75
15	3,46	1,53	2,47	1,75
16	3,50	1,53	2,53	1,95
17	3,52	1,53	2,53	1,95
18	3,46	1,37	2,47	1,95
19	3,46	1,37	2,47	2,10
20	3,46	1,37	2,47	2,10
21	3,42	1,37	2,47	2,10
22	3,40	1,37	2,47	2,10
23	3,34	1,43	2,47	2,20
24	3,60	1,43	2,53	2,20
25	3,64	1,43	2,53	2,20
26	3,68	1,37	2,53	2,20
27	4,06	1,37	2,53	2,20
28	4,32	1,50	2,73	2,20
29	4,32	1,50	2,73	2,20
30	4,40	1,50	2,73	2,20
31	4,50	1,50	2,73	2,20
32	4,50	1,50	2,73	2,20
33	4,50	1,43	2,73	2,20
34	4,54	1,43	2,73	2,15
35	4,88	1,43	2,73	2,15
36	5,06	1,43	2,73	2,15
37	5,08	1,43	2,73	2,15
38	5,12	1,50	2,73	2,15
39	5,24	1,43	2,73	2,15
40	5,24	1,47	2,73	2,15
41	5,18	1,47	2,73	2,10
42	5,18	1,83	2,73	2,10
43	5,18	1,90	2,80	2,10
44	5,20	1,90	2,80	2,25
45	5,20	1,90	2,80	2,25
46	5,20	1,90	2,80	2,25
47	5,16	1,90	2,87	2,25
48	5,16	1,90	2,87	2,25
49	5,30	1,90	3,03	2,25
50	5,30	2,03	3,03	2,25
51	5,36	2,57	3,03	2,25
52	5,60	2,57	3,03	2,25
53	5,60	2,57	3,03	2,25
54	5,66	2,57	2,93	2,25
55	5,68	2,73	2,93	2,25
56	5,62	2,73	4,00	2,25
57	5,76	2,73	4,00	2,25
58	5,88	2,73	4,00	2,25
59	5,80	2,77	4,00	2,60
60	5,98	2,77	4,60	3,80
61	6,03	2,77	4,60	3,80
62	6,07	2,73	4,60	3,80
63	6,07	2,73	4,63	3,80
64	6,03	2,73	4,63	3,80
65	5,77	2,65	5,20	3,80
67	5,63	2,65	5,20	4,15
68	5,63	2,50	5,20	4,15
69	5,63	2,70	5,20	4,15
70	5,63	2,70	5,20	4,15
71	5,63	2,85	5,20	4,15
72	4,85	2,85	5,20	4,15
73	4,85	2,85	5,20	4,15
74	4,75	2,85	5,20	4,15
75	5,00	2,85	5,20	4,15
76	5,00	2,85	5,20	4,15
77	5,00	2,85	5,20	4,15
78	4,70	2,80	5,20	4,40
79		2,80	5,20	4,40
80		2,75	5,20	4,40
81		2,75	4,60	4,40
82		1,35	4,60	5,80