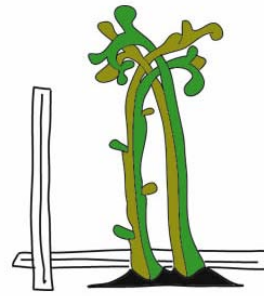




**Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Applied Life Sciences, Vienna**

Department für Bautechnik und
Naturgefahren
Department of Structural Engineering
and Natural Hazards



**Institut für Ingenieurbiologie
und Landschaftsbau**

Diplomarbeit

Laserscanning und 3D-Modellierung von ingenieurbiologischen Bauelementen

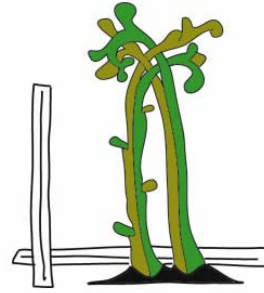
Martin Pflegerl





**Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Applied Life Sciences, Vienna**

Department für Bautechnik und
Naturgefahren
Department of Structural Engineering
and Natural Hazards



**Institut für Ingenieurbiologie
und Landschaftsbau**

Laserscanning und 3D-Modellierung von ingenieurbiologischen Bauelementen

Betreuer: O.Univ.Prof. Dr. **Florin Florineth**
Mitbetreuer: Univ.Ass. DI Dr. **Hans Peter Rauch**
Ass.Prof. DI Dr. **Erwin Heine (IVFL)**

eingereicht von

Martin Pflegerl

Wien, Februar 2008

Zusammenfassung

Laserscanning befindet sich derzeit auf der Überholspur und zieht an klassischen Vermessungsmethoden vorbei. Wohin die Richtung der Überholspur führt ist noch nicht klar. Viele Fachrichtungen bedienen sich dieser Aufnahmemethode, denn sie ist rasch durchführbar und hat Millionen von Punkten als Resultat. Doch bis zu einem Ergebnis ist noch ein weiter Weg. Für die Punkte allein gibt es noch kaum Analyse- und Vergleichsfunktionen.

Aber gerade diese Ausgangslage macht Laserscanning für die Ingenieurbiologie interessant. Beim Scannen können einzelne ingenieurblogische Bauwerke oder gleich ganze Hänge und Fließgewässerabschnitte aufgenommen werden. Die Messungen nehmen raumdeckend Informationen zur gesamten Oberfläche auf. Es muss also nicht vor Ort festgelegt werden, welche Bereiche später für die Auswertung benötigt werden.

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde eine Auswahl ingenieurblogischer Bauelemente getroffen. Kalksteine, eine Purpurweide und ein Ahorn-Wurzelstock wurden von einem terrestrischen Laserscanner millimetergenau gescannt. Mit unterschiedlichen Softwareprodukten wurden die Punktwolken gesäubert und gefiltert um anschließend eine Modellierung durchführen zu können. Hier wurden zwei Lösungswege verfolgt: zum Einen wurden Regelkörper in Form von Kegelstümpfen der Punktwolke angepasst und zum Anderen wurden die einzelnen Punkte zu einem Polygonmodell vermascht und über Freiformflächen wurde letztendlich eine Flächenrückführung vollzogen. In beiden Fällen entstanden Volumenkörper, die nun für den Einsatz in einer CAD-Software bereit stehen.

Da die Scanergebnisse des Wurzelstocks für die Modellierung nicht ausreichten, wurde er anschließend mit der Nahbereichsphotogrammetrie aufgenommen. Aber im Wirrwarr der Wurzeln ist eine Orientierung kaum möglich und die Auswertung ist somit sehr aufwendig.

In dieser Arbeit stand die Visualisierung der 3D-Objekte im Vordergrund, aber es gibt bereits neue interessante Einsatzmöglichkeiten. Bleibt Laserscanning auf der Überholspur gelingt es uns vielleicht bald, die ober- und unterirdische Biomasse von Gehölzen zu erfassen.

Schlüsselwörter: *Ingenieurbiologie, Laserscanning, 3D-Modellierung, Weide, Wurzelstock*

Abstract

Currently laserscanning is one of the most popular measurement systems. Because of its rapid and detailed survey a lot of fields operate with this new measurement method. The mapping results in million of points but up to date it is very difficult to interpret and analyze these points.

Laserscanning is interesting for soil-bioengineering. The possibility to measure small constructions like slopes and segments of watercourse, is unique for this technical field. After the scanning you get spatial information about the whole surface area and you can check what area you are interested in.

In this thesis three of the important soil-bioengineering construction elements are cite as an example. Four limestones, a willow and one maple-rootstock were scanned by a laserscanner. A range of software-products cleaned and filtered the result of the scans: the point cloud.

After this process we started the modelling of these 3D-objects. We pursued two different solution methods:

- Truncated cones were fitted to the point cloud of the small willow branch. And after this process we visualized this “volume-body”.
- Based on the point cloud of a limestone a polygon-model was created. The points were meshed to triangles and generated into NURBS.

The 3D-modelled objects are now ready for CAD!

We tried a close up photogrammetry of the rootstock to get more specific information. But it was too difficult to orient in the muddle of roots.

Besides visualization another aspect of using laserscanning in soil-bioengineering is getting important: the calculation of above- and underground biomass. But this will be part of other thesis!

Keywords: *soil-bioengineering, laserscanning, 3D-modeling, willow, rootstock, limestone*

INHALT

VORWORT UND DANKSAGUNG	7
1 EINLEITUNG	9
1.1 Problemstellung	9
1.2 Methodik	10
1.3 Ziel	11
2 GRUNDLAGEN DER INGENIEURBIOLOGIE	12
2.1 Ingenieurbiologie an Fließgewässern.....	12
2.2 Lebendes Pflanzmaterial	13
2.3 biologisch-technische Eigenschaften	15
2.4 Tote Materialien.....	19
3 LASERSCANNING ALLGEMEIN.....	21
3.1 Funktionsweise eines Laserscanners	21
3.2 Scannertypen	23
4 DATENERFASSUNG	29
4.1 Objekte.....	29
4.2 Der Scanner: RIEGL LMS-Z420i.....	34
4.3 Scannen der Objekte	38
4.4 Photogrammetrische Aufnahme.....	46
5 DATENAUSWERTUNG	49
5.1 Laserscan-Auswertung	49
5.2 Photogrammetrische Auswertung.....	57
6 MODELLIERUNG/ VISUALISIERUNG	59
6.1 Modellierung der Purpurweide.....	59
6.2 Modellierung des Kalksteines	66
6.3 Modellierung des Ahorn-Wurzelstocks.....	76
7 DISKUSSION	78
8 AUSBLICK.....	81
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	82
LITERATURVERZEICHNIS	84

Vorwort und Danksagung

Am Entstehen dieser Arbeit waren viele Personen beteiligt. Wenn also im Folgenden immer wieder die Rede von „wir suchten, uns gelang...“ sein wird, so meine ich all jene, die mich bei den einzelnen Aufnahmen unterstützten und ohne deren Hilfe die vorliegende Diplomarbeit nicht zu Stande gekommen wäre.

Ich habe in den letzten Jahren immer wieder danke gesagt, aber jetzt möchte ich die Gelegenheit nutzen und das auch im Rahmen dieser Diplomarbeit machen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und hier vor allem meinen Eltern. Denn sie haben mich in den Jahren (es waren viele) an der BOKU immer unterstützt und es mir unter anderem ermöglicht dort hinzugelangen, wo ich heute stehe: mitten in einem aufregenden und abwechslungsreichen Leben. Es gibt noch einige Familienangehörige, die Jüngste ist gerade mal neun Monate, aber bei denen bedanke ich mich jetzt in einem gemeinsamen Danke!

Ein großer Dank gilt aber auch den Freunden und Personen, die unmittelbar mit dieser Arbeit konfrontiert waren. Allen voran meinem direkten Betreuer Hans Peter Rauch. Ein Freund mit Weitblick und Forschergeist. Wir haben gemeinsam ein interessantes Thema aufgegriffen und bearbeitet. Ein Thema das noch viel Potential in sich trägt.

Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Florin Florineth. Vor allem die lässigen Exkursionen im In- und Ausland haben es geschafft, mich für diese Fachrichtung zu begeistern. Einen weiteren Zugang erhielt ich über einige Tutorienstellen am Institut.

Mit Clemens wurde viel besprochen. Ein Freund auf der Uni und ein Freund, wenn es darum geht, die Abende in Wien zu feiern. Zudem ein super Team-Kollege beim „Radln und Paddln 2007“!

Für die Internationalität möchte ich mich bei Fabricio, unserem Gaúcho bedanken. Ich freue mich schon auf einen Besuch in Südbrasilien und köstliches Churrasco.

Meine ersten Einsätze auf Baustellen verdanke ich Jörg Fricke. In seiner Garten- und Landschaftsbau Firma hatte ich genug Ablenkung zum sonst so theoretischen Uni-Alltag. Tolle ArbeitskollegInnen werden mich noch lange an eine schöne Zeit erinnern.

Und dann noch ein herzliches Danke, an alle InstitutsmitarbeiterInnen für die kulinarischen Köstlichkeiten, die fachliche Unterstützung und ein super Arbeitsklima.

Sollte ich noch jemanden vergessen haben: Danke!

Ich werde versuchen, die einzelnen Kapitel verständlich, einfach, aber ausreichend genug zu beschreiben. Es werden allgemeine Themen behandelt, aber in erster Linie möchte ich meine Erfahrungen und vieles mehr in diese Arbeit einfließen lassen. Diese Diplomarbeit soll somit eine Basis und Grundlage für weitere Projekte und Diplomarbeiten darstellen.

Weiters werde ich versuchen der Anleitung von Prof. Florin Florineth zur Verfassung einer Diplomarbeit, nahe zu kommen: *klar – prägnant – anschaulich*

Mir ist die offizielle Rechtschreibung von 1-D, 2-D und 3-D, mit einem Bindestrich zwischen der Ziffer und dem „D“ für Dimension, bekannt. Aus Gründen der Lesbarkeit, werde ich allerdings auf diesen Bindestrich verzichten. Meine Schreibweise wird wie folgt lauten: 1D, 2D und 3D.

1 Einleitung

Seit jeher wird die Erde unter die Lupe genommen und vermessen. Die technischen Hilfsmittel für die Aufnahmen reichen vom einfachsten mechanischen bis zum raffiniertesten Highend-Produkt. Die Genauigkeiten lagen anfangs im Meterbereich. Heute gibt sich die Forschung nicht mit Metergenauigkeiten zufrieden, sondern versucht bis in den Millimeterbereich vorzudringen. Damit verbunden ist auch der Begriff Laserscanning. In den letzten Jahren hat diese Aufnahmeart einen Aufschwung erlebt und wird seither angewandt, um detaillierte Aufnahmen von kleinen Objekten, großen Flächen oder sogar ganzen Landschaften zu bekommen.

Mit dieser Arbeit starteten wir den Versuch, Laserscanning in der Ingenieurbiologie einzusetzen. Denn die Vermessung stellt auch in dieser Disziplin die Grundlage für die Planung dar. In der Vergangenheit wurden ingenieurbiologische Bauelemente in Skizzenform dokumentiert, aber mit der Weiterentwicklung der CAD-Zeichensoftware gibt es nun auch die Möglichkeit, die einzelnen ingenieurbiologischen Bauwerke digital zu konstruieren.

Die Ingenieurbiologie hat als semi-technische Disziplin Nachholbedarf. In der Architektur, Freiraumgestaltung und Landschaftsplanung wird schon längst mit unterschiedlichen CAD-Softwareprodukten gearbeitet. Mit Erfolg, denn diese Produkte erleichtern die Datenverarbeitung enorm.

1.1 PROBLEMSTELLUNG

Im Sommer 2006 starteten wir den Versuch ingenieurbiologische Bauwerke in einer CAD-Zeichensoftware zu konstruieren. Ziel des Projekts war eine anschauliche 3D-Darstellung von den gängigsten Bautypen, die in der Ingenieurbiologie verwendet werden.

Mit relativ geringem Aufwand wurden die Bautypen aus einzelnen Regelementen zusammengefügt. Rundhölzer, Faschinen, Wurzelstöcke, Blocksteine, Raubbäume, usw. wurden dabei als Volumenkörper maßstabsgetreu konstruiert. Um eine möglichst

realitätsnahe Abbildung zu erzeugen wurde der Objektoberfläche, also dem Mantel, eine dementsprechende Materialoberfläche zugewiesen.

Beispiel: der Wurzelstock wurde aus vielen einzelnen Zylindern zusammengefügt. Im 2D kann eine Wurzel anschaulich konstruiert werden. Kommt jedoch die dritte Dimension hinzu, ist es sehr mühsam den Verlauf (Pfad) der einzelnen Wurzelabschnitte zu zeichnen.

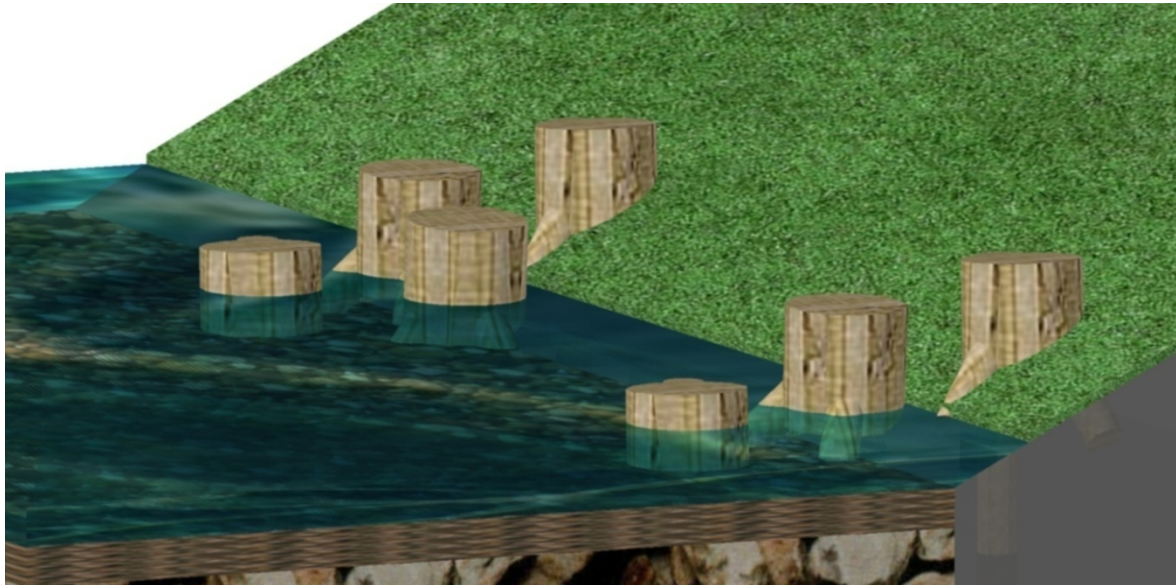


Abb. 1: Wurzelstöcke, modelliert mit der Software Autodesk Civil 3D 2006 (Autodesk, California, USA)

Das Ergebnis war für das Projekt ausreichend, aber für uns noch nicht zufriedenstellend. Die Bauelemente wirkten zu linear, ihre Formen waren zu regelmäßig und die Oberflächen zu monoton. Ein Großteil der Bautypen besteht aus lebenden Materialien und ist daher nur schwer abzubilden. Dies darzustellen ist nicht mehr mit relativ geringem, sondern mit maximalem Aufwand verbunden. Also suchten wir nach anderen Methoden.

1.2 METHODIK

Die Aufnahme mit Hilfe eines Laserscanners ist eine Möglichkeit Bauelemente zu erfassen. Dieser tastet das Objekt automatisch und berührungslos ab. Das Ergebnis ist eine Punktwolke von zigtausenden Punkten, die später in einer Software bearbeitet

werden. Somit gelingt es die unregelmäßigen Formen der Natur abzubilden und genaue Informationen über die Größe, die Oberfläche und das Volumen zu erhalten.

Zusätzlich wurden photogrammetrische Aufnahmen einzelner Bauwerke gemacht. Die Auswertungen sollen auch hier detaillierte Angaben zur Objektgröße und zum Verlauf von Ästen und Wurzeln geben.

1.3 ZIEL

Mit Laserscanning soll es gelingen, ingenieurblogische Bauelemente in allen drei Dimensionen zu erfassen und ausgehend von der 3D-Punktwolke den Schritt hin zu einem 3D-modellierten Objekt zu schaffen.

Das Ziel ist dann erreicht, wenn diese 3D-modellierten Objekte in der CAD-Software der ingenieurblogischen Detailplanung zu Verfügung stehen. Bei der ingenieurblogischen Detailplanung kommt es vor allem auf die Visualisierung der 3D-modellierten Objekte an.

Mit der räumlichen Erfassung der Pflanzengeometrie gelingt es in weiterer Folge aber auch einen Index für die Biomassenleistung ingenieurblogischer Systeme abzuleiten.

2 Grundlagen der Ingenieurbiologie

Die **Ingenieurbiologie (IB)** befasst sich mit der Technik, lebendes und totes Pflanzenmaterial mit technischen Hilfsmaterialien zu kombinieren. Neben Sicherungsmaßnahmen bei Naturgefahren übernimmt diese Art von Schutzbauten auch die Funktion von Strukturelementen. Diese ökologische Form zu bauen verbessert die Qualität eines Lebensraums um ein Vielfaches oder schafft überhaupt neue Lebensräume.

Die Ingenieurbiologie beschreibt Bauwerke, die als **Sicherungs- und Strukturmaßnahmen** an Fließgewässern, an Hängen, also im Erd- und Wasserbau, eingesetzt werden. Dabei sind sie aber kein Ersatz für klassische Schutzbauten sondern eine Ergänzung zu diesen.

Die Bauweisen besitzen am Anfang den Charakter von natürlichen Pionierstandorten. Die Pionierpflanzen, wie Weiden, Erlen, Eschen, usw. bieten optimale Voraussetzungen für das Wachstum nachfolgender Pflanzen. Anfangs übernehmen noch die Hilfskonstruktionen aus Holz und Stein die Stabilität, aber schon nach wenigen Vegetationsperioden werden die Pflanzen diese Aufgabe übernehmen. Nach der Vitalität der Pflanzen richtet sich im Laufe der Jahre und Jahrzehnte auch die Lebensdauer der ingenieurbiologischen Bauwerke.

Die IB ist eine Methode, die sich die letzten 2000 Jahre immer wieder weiterentwickelt hat, aber es erst in den letzten paar Jahrzehnten geschafft hat, ins Bewusstsein der Menschen vorzudringen. Mit der neuen Denkweise, Sicherungsmaßnahmen mit Strukturelementen zu verbinden, mit der zunehmenden Zahl an Naturkatastrophen und dem Einsatz von neuen Materialien hat sich die IB in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und wird in Zukunft den Platz einer nicht mehr wegzudenkenden Bau-Methode einnehmen.

2.1 INGENIEURBIOLOGIE AN FLIESSGEWÄSSERN

In der Vergangenheit wurde im Flussbau sehr hart verbaut, das bedeutet, dass die Bauweisen und die verwendeten Materialien für einen möglichst raschen Abfluss der

Wassermassen sorgten. Schutzwasserbauliche Maßnahmen standen im Vordergrund und auf die ökologische Funktionsfähigkeit des Systems wurde wenig Rücksicht genommen. Erst mit der zunehmenden Bewusstseinsbildung für den Schutz der Umwelt kam es zu einer ökologischen Aufwertung durch Renaturierung von Fließgewässern und zu einer landschaftsästhetischen Verbesserung.

Im Umgang mit ingenieurb biologischen Bauwerken und Bauelementen an Fließgewässern ist es nicht sinnvoll, gesamte Flussabschnitte damit auszustatten. Sie sollen nur abschnittsweise eingesetzt werden, dem Fließgewässer Platz für eine gewisse Eigendynamik lassen - also Gewässerstrukturen initiieren. Der Weg zum gewünschten Zustand soll, soweit möglich, der Natur überlassen werden.

2.2 LEBENDES PFLANZMATERIAL

Der lebende Baustoff wird in der IB auf unterschiedlichste Art und Weise eingesetzt. Dabei übernehmen die Pflanzen, über kurz oder lang, die Hauptaufgabe und sollten daher richtig ausgewählt werden. Jede Pflanzenart hat spezielle Eigenschaften, die auch in der IB genutzt werden. Das heißt, ein fundiertes Wissen über diese Eigenschaften ist entscheidend und die Erkenntnis darüber, die Voraussetzung dafür. Viele ingenieurb biologische Projekte und Versuche beschäftigen sich mit dem Einsatz von lebendem Baumaterial und zeigen die Grenzen der Belastbarkeit, Dauerhaftigkeit, Überstaubarkeit, usw. auf. Zudem muss auch in der IB die Herkunft des Materials eine übergeordnete Rolle spielen. Standorteigenes Material ist daher zu bevorzugen.

Pflanzen können auf unterschiedlichste Art und Weise gesetzt oder eingelegt werden. Abhängig von der Bauweise werden sie **wurzelackt**, als **Containerpflanzen**, als **Steckhölzer oder Setzstangen** verwendet. In welcher Form das Pflanzmaterial also verwendet wird, hängt von den Voraussetzungen und Anforderungen an die Pflanze ab. Wie groß Sträucher und Bäume und wie dicht später der Bestand sein soll, muss vorab geklärt werden. Damit zusammenhängend und oftmals vernachlässigt ist die Pflege des lebenden Materials. Oft noch vom Anwuchserfolg beeindruckt, sollte schon frühzeitig mit **Pflegemaßnahmen** begonnen werden. Pflegepläne gliedern diesen Prozess in einzelne Abschnitte über mehrere Vegetationsperioden hinweg. Eine umfassende und

ganzheitliche Planung beginnt also bei der Auswahl der geeigneten Pflanze, sorgt für eine passende Pflanzmethode und enthält eine Auflistung der notwendigen Pflegemaßnahmen.

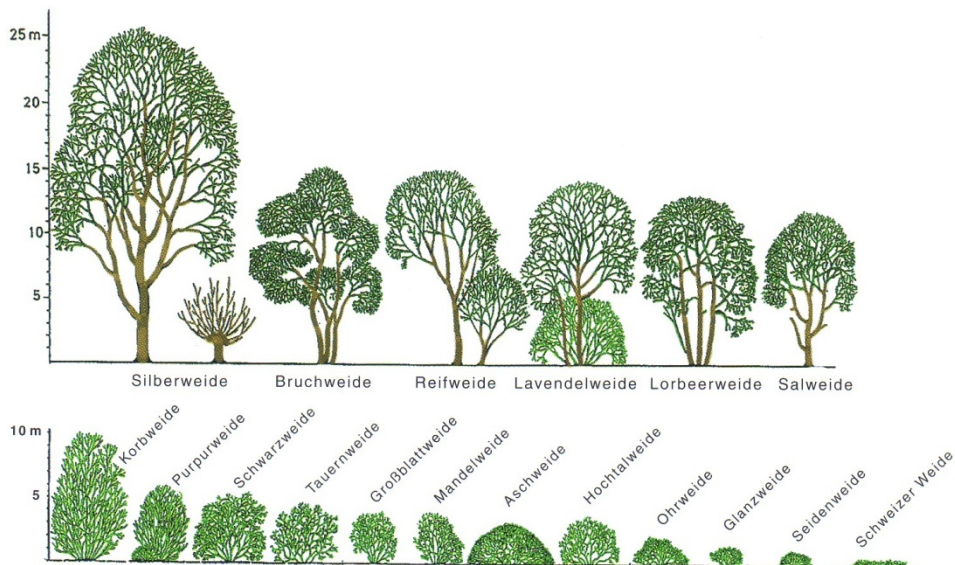


Abb. 2: Wuchsformen und -größen europäischer Baum- und Strauchweiden (Schiechtel/ Stern, 2002)

Welche Pflanzen kommen in der Ingenieurbiologie zum Einsatz?

Es sind meist Arten, die ein **schnelles Wurzelwachstum** besitzen, geringe Ansprüche an ihren Standort stellen und **leicht vermehrbar** sind. Eine wichtige Rolle spielt dabei die vegetative Vermehrbarkeit. Dabei entsteht aus lebendem Pflanzmaterial eine neue Pflanze. Aus Kostengründen und aufgrund ökologischer Überlegungen ist es sinnvoll, vegetativ vermehrbare Arten aus vorhandenen Beständen zu entnehmen. Pflegemaßnahmen haben also den Vorteil, dass sie Pflanzmaterial abgeben, das unmittelbar danach an anderen Standorten wiederverwendet werden kann (BAUMANN, et al., 2006).

Weiden und andere Arten

Diverse Weiden-**(Salix-) Arten** sind in der IB sehr beliebt. Eine Universalweide gibt es noch nicht, aber die Hoffnung unter circa 32 Weidenarten in Österreich, eine passende

Auswahl zu finden. Die Weide ist nicht die einzige Pflanze, die sich für den Einsatz in der IB eignet. Sie wird aber als vegetativ sehr gut vermehrbare Pflanze gern und hauptsächlich verwendet. Hier sei ein Buch erwähnt, das sämtliche in Österreich vorkommenden Weidenarten beschreibt, einen Bestimmungsschlüssel und detaillierte Abbildungen enthält und zusätzlich auf die Verwendung in der IB hinweist. „Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten“ (HÖRANDL, FLORINETH, HADACEK, 2002).

In Hinblick auf Biodiversität sollte über mögliche Weidenmonokulturen nachgedacht werden und eine gewisse Offenheit in Richtung Artenvielfalt vorhanden sein. Es gibt genug andere Gehölzarten, die als bewurzelte Pflanzen die Anforderungen für Hangbefestigungen oder Ufersicherungen erfüllen, aber gerne in Vergessenheit geraten: **Grau-, Schwarz-, Grünerle, Esche, Eberesche, Berg- und Feldahorn, Birke, Schwarz-, Silber- und Zitterpappel, Trauben-, Vogel- und Heckenkirsche, Haselnuss, roter und schwarzer Holunder, Liguster, Kreuzdorn, Berberitze, wilde Rosenarten, Schneeball, Hartriegel, Pfaffenhütchen, Faulbaum, Schlehdorn** und andere mehr (FLORINETH, 2004).

Die Gehölze werden nicht nur wegen ihrer Schönheit gepflanzt, sondern sie erfüllen mit ihrem Wurzelsystem eine wichtige Funktion für den Boden. Zum Einen wird die Pflanze über ihr **Wurzelsystem** mit Wasser und Nährstoffen aus dem Boden versorgt und zum Anderen verleiht sie ihren überirdischen Pflanzenteilen Halt und Stabilität. Das komplexe System von Grob- und Feinwurzeln sorgt für den Zusammenhalt von lockeren Bodenschichten. Die Summe der **bodenbefestigenden Eigenschaften** setzt sich zusammen aus Wurzelform, Dichte der Durchwurzelung, Wurzelmasse, Scherfestigkeit und der Aktivität von Bodenflora und Bodenfauna (FLORINETH, RAUCH, 2002).

2.3 BIOLOGISCH-TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN

Welche Bauwerke man „wo?“ errichtet und welche Maßnahmen man „wie?“ durchführt, hängt vom Standort, der Art des Gewässers, des Hanges und des zu schützenden Bereiches ab. Es gilt eine geeignete Pflanze und eine passende Methode zu finden, die eine optimale Schutzwirkung erfüllt. Um das Zusammenwirken von Pflanzen und Bodenverhältnissen besser verstehen zu können, werden am Institut für

Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der BOKU Wien laufend Untersuchungen durchgeführt.

Die biologisch-technischen Eigenschaften der Pflanzen stehen dabei im Vordergrund. Zu den **biologischen Eigenschaften** zählen die Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit, die vegetative Vermehrbarkeit, die Fähigkeit zur Sprosswurzelbildung, Überschütt- und Überstaubarkeit. Neben dem **Wurzelwachstum** nimmt auch das **Sprosswachstum** eine entscheidende Rolle ein. Hier geht es vor allem um die Fähigkeit einzelner Pflanzen, neue Sprosse auszubilden. Wichtig ist dabei auch die Wuchsform der Sträucher und Bäume.

Diese biologischen Fähigkeiten sind stark mit den **technischen Eigenschaften** von Pflanzen verbunden. Durchmesser, Länge, Verformbarkeit der Sprosse und Wurzeln sind Auszugswiderstandskennwerte, die eine Aussage über die Eignung von Pflanzen für bestimmte Schutzwirkungen, zulassen.

Um genaue Erkenntnisse über Wurzelsysteme zu erhalten, wurden am Institut Untersuchungen an Pflanzen bestehender ingenieurbiologischer Bauwerke durchgeführt. Dabei wurden Wurzelsysteme und Teile von ingenieurbiologischen Bauwerken freigelegt und ihre Ausdehnung und Biomasse erfasst und berechnet. Die Ausbreitung des Wurzelsystems war nicht leicht nachzuvollziehen, da durch das Freilegen viele Feinwurzeln abgetrennt wurden. Für die Bestimmung der Biomasse wurde das Trockengewicht aller Wurzeltriebe summiert. Das bedeutet, noch vor Ort wurde das Feuchtgewicht der Wurzeln ermittelt und anschließend über Referenzmessungen von getrockneten Proben, die gesamte Biomasse berechnet. Dabei wurde zusätzlich eine Unterscheidung nach den folgenden Wurzeldurchmesserkategorien getroffen:

- Feinwurzeln $\emptyset < 1\text{mm}$
- Schwachwurzeln $\emptyset 1\text{-}3\text{mm}$
- Mittelwurzeln $\emptyset 3\text{-}5\text{mm}$
- Grobwurzeln $\emptyset 5\text{-}10\text{mm}$
- Starkwurzeln $\emptyset > 10\text{mm}$

(ZENZ, 2006)

Fotoaufnahmen vervollständigten die Wurzeldokumentation. Ähnlich der Biomassenberechnung der unterirdischen Wurzelanlagen, sind auch die oberirdischen Sprosssteile erfasst worden. Dabei wurden Stamm und Äste getrennt von einander berechnet (WEINBACHER, 2007).

2.3.1 Wurzelsysteme

Tiefwurzelsystem:

Pfahlwurzelsystem

Eine senkrechte Hauptwurzel ist namensgebend für dieses Wurzelsystem. Im Anfangsstadium besitzen viele Baumarten ein Solches, bevor sie ihr artspezifisches Wurzelsystem ausbilden. Folgende Arten bleiben bei diesem System: Eiche, Tanne, Kiefer und Ulme.

Herzwurzelsystem

Die Form einer Halbkugel mit gleichmäßiger Durchwurzelung kennzeichnet dieses System, das Lärche, Birke und Schwarzerle ausbilden.

Flachwurzelsystem:

Senkerwurzelsystem

Von horizontal verzweigten Wurzeln führen sogenannte Senker vertikal nach unten (Senkwurzeln). Dazu zählen: Fichte, Grauerle und Pappel.

Herz-Senkerwurzelsystem

Eine Übergangsform, die nicht eindeutig zugeteilt werden kann, und unter anderem beim Bergahorn vorkommt.

Diese charakteristischen Ausbildungsformen können nur entstehen, wenn sie in ihrer Entfaltungsmöglichkeit nicht gehemmt werden. Treten Änderungen der Bodenverhältnisse oder des Wasserhaushalts im Boden auf, kann es zu Abweichungen bei

den typischen Ausbildungsformen der Wurzelsysteme kommen. Veränderungen im Boden haben somit einen großen Einfluss auf das Wachstum der Wurzeln. Das bedeutet aber auch, dass Pflanzen mit ihren Wurzeln in das Bodengefüge eingreifen.

2.3.2 Bodendurchwurzelung

Es gibt **Flach-, Tief-, Intensiv- und Extensivwurzler**. Alle haben eins gemeinsam: sie verankern die Pflanze im Boden und sorgen zusätzlich für Festigung von Bodenschichten. Diese Schichten können tief- oder flachgründig sein, lockeres Gefüge oder einen hohen Felsanteil aufweisen. Damit dieser Bodenkörper homogen durchwurzelt wird, ist darauf zu achten, dass Pflanzengesellschaften mit unterschiedlichen Wurzeltypen gepflanzt werden, bzw. die ideale Vegetationsdichte bestimmt wird. Ein Maß dafür ist das Wurzel-Spross-Verhältnis. Es vergleicht das Gewicht oder das Volumen zwischen den ober- und unterirdischen Pflanzenteilen und beschreibt die Wuchskraft der Pflanze und die Fähigkeit dieser, den Boden zu durchwurzeln (FLORINETH, 2004).

2.3.3 Vermehrbarkeit

Vegetative Vermehrung

Proventive und adventive Wurzel- und Sprossanlagen sind die Voraussetzung für diese Form der Vermehrbarkeit. Pflanzenteile, wie Äste, dünne Zweige, Wurzelabschnitte und Brutknospen, die in die Erde eingelegt werden, beginnen unmittelbar danach mit dem Spross- und Wurzelwachstum und es entstehen daraus neue, voll funktionstüchtige Pflanzen. **Proventive Spross- und Wurzelanlagen** entwickeln sich aus sogenannten schlafenden Knospen, die mit dem Mark verbunden sind und **adventive Spross- und Wurzelanlagen** entstehen durch Reize aus dem Kambium oder nach Verletzungen aus dem Wundkallus. Sie sind nicht mit dem Mark verbunden. FLORINETH (2004) zitiert FINK (1980).

Generative Vermehrung

Im Gegensatz zur vegetativen Vermehrbarkeit gibt es auch die generative Vermehrung. Hier entsteht neues Leben durch Vermehrung von **Samen**, also die klassische Form der Fortpflanzung, wie sie bei vielen anderen Pflanzen auftritt.

Fähigkeit zur Sprosswurzelbildung

Pflanzen, die diese Fähigkeit besitzen, können zusätzlich zum vorhandenen Wurzelsystem proventive und adventive Wurzelanlagen ausbilden. Diese Sprosswurzeln bilden sich aus überschütteten und mit Erdreich zugedeckten Stammabschnitten (BAUMANN et al., 2006).

2.3.4 Regenerationsfähigkeit

Werden Pflanzen durch mechanische Beanspruchung (Schneedruck, Hochwasser, Steinschlag) geknickt oder brechen überhaupt ganz ab, besitzen viele Laubbäume die Fähigkeit an der Stammbasis Sprosse auszubilden. Künstlich wird dieser Effekt hervorgerufen, wenn wir Bäume auf den Stock setzen oder Sträucher bis zur Basis zurück schneiden.

2.4 TOTE MATERIALIEN

Neben dem lebenden Baustoff Pflanze gibt es Bauelemente, die aus toter Materie bestehen. Im Folgenden wird aber nur auf zwei Bauelemente eingegangen: Steine und abgestorbene Wurzelstöcke.

2.4.1 Steine

Steine in allen Größen und Formen werden gern als Stützelemente verwendet. Als loser **Steinwurf** oder als **Steinschlichtung** können sie beliebig der Böschungsneigung und Böschungshöhe angepasst werden. Zudem ist dieses Material fast überall lokal verfügbar und relativ schnell mit einem dementsprechenden Bagger geschlichtet oder lose verlegt.

Trotzdem sollten Steine nur dort eingebaut werden, wo eine Schutzwirkung unbedingt erforderlich ist (BAUMANN, 2006).

Um eine Einteilung bezüglich Größe und Masse treffen zu können, werden im Wasserbau sechs Steinklassen unterschieden. Abhängig vom Verwendungszweck kommen die unterschiedlichen **Steinklassen** zum Einsatz.

Gewichtsbereich	Masse in kg	Abmessung in m bei annähernd kubischer Form
<i>Klasse I</i>	20 – 80	0,2 – 0,3
<i>Klasse II</i>	80 – 300	0,3 – 0,5
<i>Klasse III</i>	300 – 800	0,5 – 0,7
<i>Klasse IV</i>	800 - 1500	0,7 – 0,8
<i>Klasse V</i>	1500 – 2000	0,8 – 1,0
<i>Klasse VI</i>	2000 – 3000	> 1,0

Abb. 3: Steinklassen für den Flussbau

Quelle: Leistungsbeschreibung Flussbau Version 2; 09.2002; Herausgeber Arbeitskreis LB-FB; Druck und Verlagsverkauf Druckerei Hans Jentzsch & Co GesmbH.

2.4.2 Wurzelstock

Wurzelstöcke werden in der Ingenieurbiologie auch als tote Baustoffe eingesetzt. Dabei ist das Wurzelholz abgestorben und nicht mehr austreibfähig. Als Strukturmaßnahme an kleineren Gewässern sorgen sie für unterschiedliche Strömungsverhältnisse und schaffen somit neue Lebensräume, unter anderem für diverse Fischarten.

3 Laserscanning allgemein

Neben den klassischen Verfahren der geometrischen Punkt- und Objekterfassung, wie Tachymetrie und Photogrammetrie, steht seit circa 15 Jahren die Laserscantechnologie zur Verfügung. Eine neue Technologie, die es möglich macht Objekte in ihrer Lage, Größe, Orientierung und Form zu erfassen.

Laserscanner haben unterschiedliche Funktionsweisen, die Unterschiede in der Genauigkeit bewirken. Da wir die Aufnahmen mit nur einem Scanner durchführten, werde ich mich nicht näher mit den Vor- und Nachteilen anderer Scannermodelle befassen.

3.1 FUNKTIONSWEISE EINES LASERSCANNERS

Der Scanner ist ein **Analog-Digital-Wandler**, der Objekte automatisch und berührungslos abtastet. Je nach Gerätetyp erhält man auf diese Art 1D, 2D oder 3D-Informationen zum Objekt. Den einfachsten 1D-Laserscanner kennen wir alle. Es ist die Strichcode-Leseinheit an der Kassa. Der gewöhnliche PC-Scanner ist ein 2D-Scanner. Er erzeugt Abbilder von Fotos und Drucksachen in gewünschter Auflösung mit dementsprechender Farbinformation. 2D-Scanner eignen sich für all jene Dinge, die wir in 2D ablichten wollen: zum Beispiel das Herbarium oder die Urlaubsdias aus dem Jahr 1988.

Alle Scanner haben eines gemeinsam: eine Lichtquelle trifft auf ein Blatt Papier oder auf ein Objekt und wird von diesem wieder reflektiert. Dabei wird das Licht unterschiedlich stark reflektiert und anschließend von einem Sensor aufgenommen und digital verarbeitet (NIEMEIER, WILD, 1995).

Der Laserscanner tastet Objekte und Landschaften in einem definierten Winkelraster ab. Als Lichtquelle dient ihm ein **gebündelter Laserstrahl**, der die Oberfläche flächenhaft erfasst. Dabei wird der Strahl über teils rotierende Spiegelsysteme in die horizontale und vertikale Richtung abgelenkt. Das Ganze erfolgt berührungslos und ergibt eine

Punktwolke, die im ersten Moment schon ganz anschaulich wirken mag. Sie kann bis zu mehrere Millionen Scanpunkte umfassen und hängt von der Auflösung des Scans und der Größe des Objekts ab.

In der Tachymetrie wurden Objekte bisher durch **repräsentative Punkte**, wie Kanten und Eckpunkte vermessen, was Vorteile hat, aber für die Aufnahme von gekrümmten Oberflächen ungeeignet ist (NIEMEIER, THOMSEN, SCHÄFER, 2002).

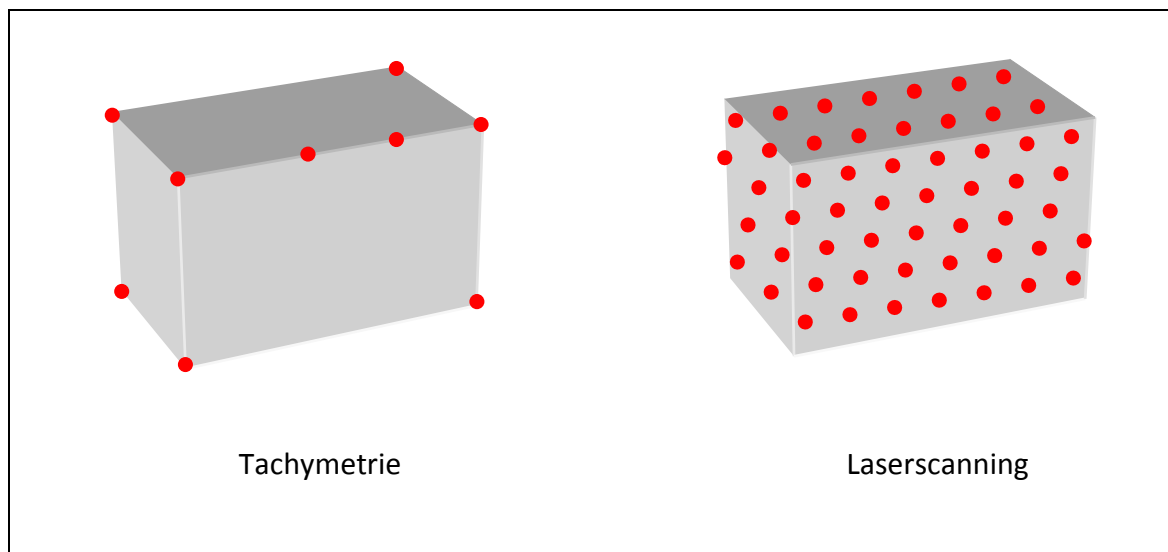


Abb. 4: Erfassung repräsentativer Punkte (Ecken, Kanten) und der gesamten Fläche, mittels Laserscanner

Der Laserscanner erfasst bei jeder Messung den Horizontal- und Vertikalwinkel, sowie die Entfernung zum Objekt. Mit zwei Richtungen und einer Distanz arbeitet er also nach dem Prinzip der Polaraufnahme und gibt die erfassten Punkte in **kartesischen Koordinatenwerten (x,y,z)** wieder. Die Entfernungsmessung wird mittels Impuls- oder Phasenvergleichsverfahren durchgeführt. Generell erfolgt bei elektrooptischen Entfernungsmessung die Distanzmessung aber mit elektromagnetischen Wellen.

3.2 SCANNERTYPEN

3.2.1 Einteilung nach der Messmethode

Die Streckenmessung erfolgt bei beiden Verfahren mittels elektromagnetischer Wellen.

Phasenvergleichsverfahren (phase-shift-technology)

Bei diesem Verfahren werden vom Scanner kontinuierlich elektromagnetische Wellen mit gleichbleibender Wellenlänge und einem eindeutigen Phasenwinkel ausgesandt. Die elektromagnetischen Wellen werden von dem zu messenden Objekt reflektiert und erreichen den Empfänger mit einer **Phasenverschiebung**. Diese Verschiebung kann durch den Vergleich beider Phasenwinkel (Phasenvergleich) ermittelt werden und wird Phasendifferenz genannt. Eine Phasenmehrdeutigkeit verhindert zunächst noch die genaue Distanzberechnung, aber mit dem Einsetzen unterschiedlicher Maßstäbe kann eine Mehrfachmessung durchgeführt werden, die einen ganzzahligen Phasenwert ergibt. Somit ist eine präzise Streckenmessung möglich. Die Messung dauert jedoch länger, als beim folgenden Laufzeitverfahren.

Impulslaufzeitverfahren (time-of-flight)

Das Impulslaufzeitverfahren bestimmt die **Laufzeit** („Flugzeit“), die ein Laserimpuls vom Lasersender bis zum reflektierenden Objekt und wieder zurück zum Sensor benötigt. Bei diesem Verfahren wird durch eine hohe Punktdichte eine flächige, nicht selektive Oberfläche erfasst. Zusätzlich wird mit einer hohen Aufnahmegeschwindigkeit und Genauigkeit gemessen.

Die Genauigkeiten der Scanner werden in Strecken- und Winkelgenauigkeit angegeben. Es gilt: [mm] für die Strecke und [mgon] für den Winkel.

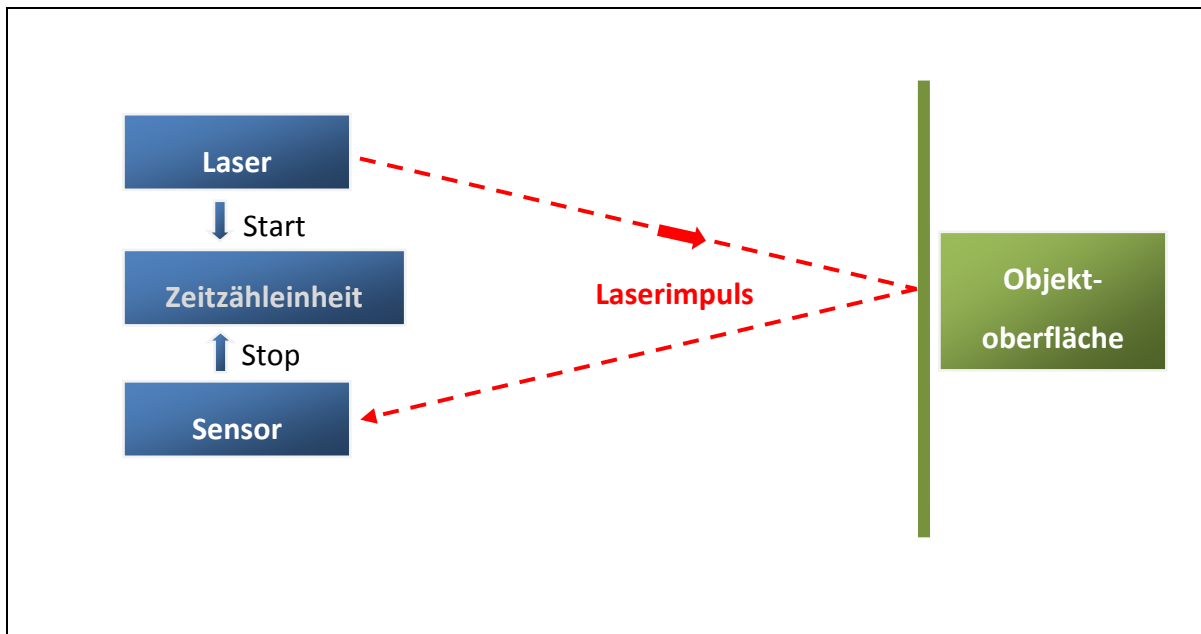


Abb. 5: Distanzmessung mit Laserscanner

Bei der Laufzeitmessung erhält man die gemessene Distanz direkt aus der zurückgelegten Zeit:

$$D = \frac{c * t}{2}$$

D ... Distanz

c ... Lichtgeschwindigkeit ($\sim 300.000 \text{ km/s}$)

t ... Zeit

Für eine exakte Berechnung der Zeit wird, gleichzeitig mit dem Aussenden des Laserstrahls, ein Impuls an eine Zähleinheit weiter gegeben (siehe Abbildung oben).

Der Laserscanner funktioniert in einem ausgedehnten Temperaturbereich, muss allerdings auf die Umgebungstemperatur kalibriert werden. Lichtverhältnisse spielen eine unbedeutende Rolle. Theoretisch kann auch in absoluter Dunkelheit gescannt werden. Die Feuchte des Materials ist entscheidend für die **Reflexionsintensität** eines Laserstrahls. Bei Niederschlag in Form von Regen oder Schnee, sowie bei schlechter Sicht durch Nebel können keine Aufnahmen gemacht werden. Schlecht reflektierende Flächen werden im Laserscan schwarz und helle, gut reflektierende Flächen, weiß abgebildet.

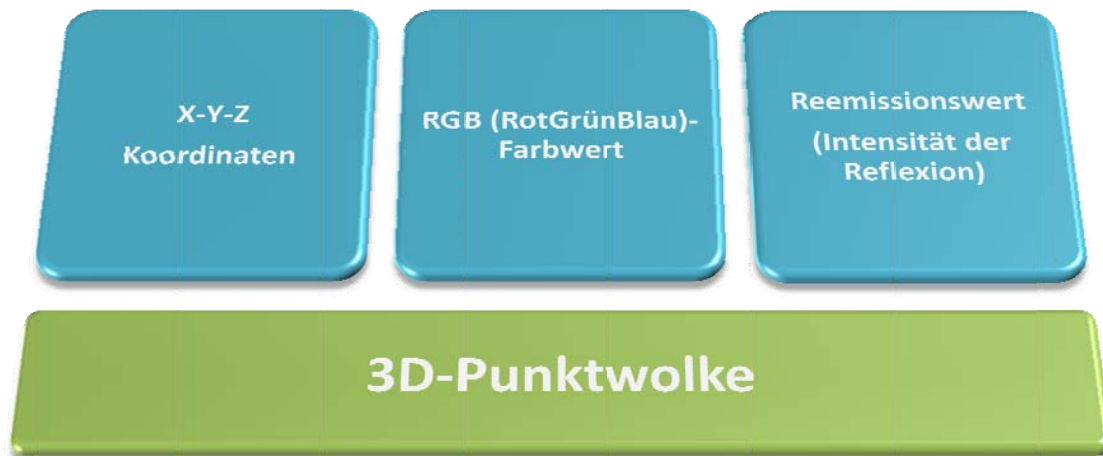


Abb. 6: Ergebnis eines Laserscans

3.2.2 Unterscheidung nach der Strahlablenkung

Laserscanner können also nach ihrem jeweiligen Messverfahren unterschieden werden, aber auch bezüglich ihres Sichtfeldes.

Dabei unterscheiden wir zwei Klassen. Zum einen, die der Panorama- und zum anderen, die Klasse der Kamerascanner. Der Name verrät schon, dass **Panoramascanner** den gesamten Horizont erfassen können. Dabei können sie in vertikaler Richtung bis zu 180° messen und eignen sich somit für Innenaufnahmen von Gebäuden, wobei ein Mindestabstand zum Objekt eingehalten werden muss. Dies gilt auch für **Kamerascanner**, die in erster Linie für Fassadenscans verwendet werden, da sie direkt auf die zu erfassende Oberfläche ausgerichtet werden können (NIEMEIER, THOMSEN, SCHÄFER, 2002). Neben den zwei genannten Klassen, gibt es auch noch **Hybrid-Scanner**.

3.2.3 Unterscheidung nach Aufnahmeort

Beim Laserscanning unterscheiden wir weiter, ob der Scanner vom Boden aus Aufnahmen macht, oder ob die Objekte von der Luft aus gescannt werden. Stammen die Aufnahmen

vom Boden, sprechen wir von „**terrestrischem Laserscanning**“, wird der Scanner von einem Flugobjekt getragen von „**airborne Laserscanning**“.

Airborne Laserscanning (ALS)

Seit Anfang der 1990er Jahre hat sich das Laserscanning als Alternative zur klassischen Luftbildphotogrammetrie entwickelt und etabliert. Mit dem sogenannten „airborne Scannen“ gelang es erstmals, die Geländeoberfläche in kürzester Zeit und mit einem enorm hohen Detaillierungsgrad zu erfassen. Dabei wird im Überflug mittels Tragflächenflugzeug oder Helikopter die Oberfläche rasterförmig aufgenommen. In Österreich wird diese Methode bereits praktiziert. Im Zeitraum von 2002 bis 2005 wurde in einem Pilotprojekt das gesamte Bundesland Vorarlberg flächendeckend **aus der Luft gescannt** (RIEGER, et al., 2005).

Diese Airborne-Scans dienen in weiterer Folge als Grundlage für digitale Höhenmodelle, dokumentieren Wald- und Verkehrsflächen und wenn sie regelmäßig durchgeführt werden, können Veränderungen in der Landschaft festgehalten werden.

Aus der 3D-Punktwolke kann ein **digitales Geländemodell (DGM)** und ein **digitales Oberflächenmodell (DOM)** erstellt werden. Für die Berechnung des DGMs werden die „last-echo“-Daten verwendet. Dies sind jene Scanpunkte, die direkt vom Boden reflektiert werden. Im Gegensatz dazu werden „first-echo“-Daten gleich vom Kronendach der Bäume reflektiert. Diese Scanpunkte bilden die Grundlage für das DOM. Die Differenz der beiden Oberflächen ergibt das normalisierte Oberflächenmodell (nDOM).

$$\mathbf{nDOM = DOM - DGM}$$

Dieser Bereich ist vor allem für die Forstwirtschaft interessant, da er das Kronenmodell beschreibt und somit Aufschluss über die Waldstruktur gibt (MAIER, HOLLAUS, 2007).

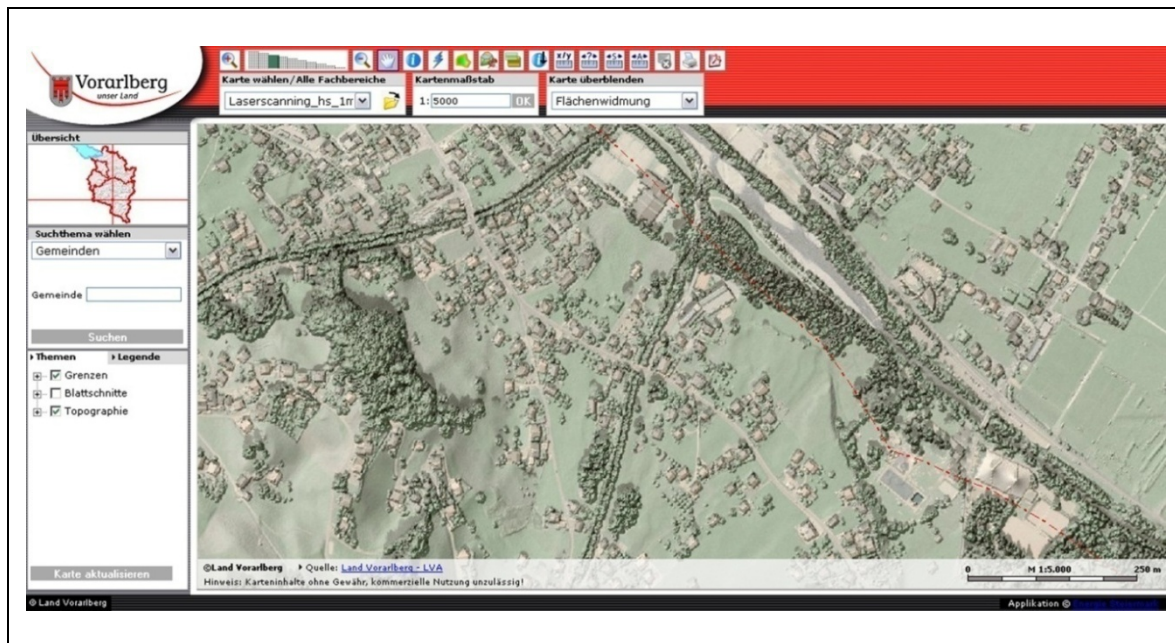


Abb. 7: Airborne Scan von Schruns-Tschaguns (Quelle: Land Vorarlberg, VoGIS, 2007)

Terrestrisches Laserscanning (TLS)

In den letzten Jahren entwickelte sich zum Airborne Scanning eine weitere interessante Aufnahmeart: das terrestrische Laserscanning. Wie der Name schon verrät wird diese Aufnahmemethode **vom Boden aus** durchgeführt. Dabei scannt der Laserscanner in wenigen Minuten die gesamte Umgebung von einem oder mehreren Standorten aus.

Kinematisches Laserscanning (k-TLS)

Eine Weiterentwicklung der stationären Methode wird in den letzten Jahren verstärkt eingesetzt. Dabei wird ein terrestrischer Laserscanner auf ein Fahrzeug montiert und während des Fahrens werden entlang der Verkehrswege ganze Städte gescannt. Bekannt ist diese Scanmethode als „**city modelling**“.

Gleiches gilt für den Einsatz mit Boote und Schienenfahrzeuge, also von allen mobilen Untersätzen, deren Weg während der Messung genau aufgezeichnet werden kann. Die sogenannte **Trajektorie** beschreibt die genaue Position des Fahrzeugs im Raum. Sie wird mittels GPS, Neigungsmesser und anderen Sensoren genau bestimmt, um die

Orientierung des Scanners nachvollziehen zu können. Veränderungen in einem kurzen Zeitraum, können so festgehalten werden (HESSE, NEUMANN, 2007).

Klassische **Einsatzgebiete** des terrestrischen Laserscanning sind:

- die **Archäologie**, die schon seit längerer Zeit ihre historischen Stätten mit diesem Verfahren aufnimmt.
- der **Industrieanlagenbau**, der ebenfalls von dieser schnellen und berührungslosen Methode der Bestandsaufnahme Gebrauch macht.
- die **Architektur**, die die As-Built Dokumentation von Gebäuden als einen großen Fortschritt in der Gebäudevermessung sieht. Hier werden sowohl Fassadenaufnahmen, als auch Innenaufnahmen gemacht.
- die **Ingenieurvermessung**, die dieses innovative Messverfahren, als Ergänzung zur Tachymetrie und Photogrammetrie aufnimmt und sich über ein neues Geschäftsfeld freut.

4 Datenerfassung

Die ersten Vorbereitungen für die Datenerfassung wurden im Dezember 2006 im Versuchsgarten des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) in Wien/ Eßling, durchgeführt. Mehrere Kalksteine, eine Purpurweide (*Salix purpurea*) und ein Ahorn-Wurzelstock wurden für die nachfolgende Messung vorbereitet, wobei die Weide und der Wurzelstock erst gerodet werden mussten. Für die Unterstützung und Mithilfe bei den Rodungsarbeiten möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Versuchsgartens Gerald Eggenberger und Ibrahim Akcan bedanken.

4.1 OBJEKTE

4.1.1 Purpurweide

Die Purpurweide wurde samt Wurzelballen händisch ausgegraben. Auf den Verbleib der Feinwurzeln am Wurzelballen musste nicht geachtet werden, da sie für unsere späteren Aufnahmen keine Relevanz hatten. Die Weide befand sich gerade in Vegetationsruhe und war daher laubfrei. Ein wichtiger Faktor, denn mit Laub wäre eine Aufnahme der Aststruktur mittels Laserscanner nahezu unmöglich.



Abb. 8: Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006)



Abb. 9: Ausgraben der Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006)



Abb. 10: Transport der Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006)

Die Purpurweide (*Salix purpurea*) stellt eine typische Strauchweide dar, wie sie von der Ingenieurbiologie gern verwendet wird. Mit circa 3-4 m Höhe und einem Astdurchmesser von maximal 4 cm, ist sie noch elastisch.

4.1.2 Steine

Die Auswahl der Steine erfolgte aus praktischen Gründen auf eher kleine, handliche Steinblöcke mit circa 20 kg. Die von uns gescannten Exemplare waren aus Kalkstein. Als Überbleibsel einer zuvor errichteten Trockensteinmauer zählen sie als einzige zu jenen Objekten, die für die Verwendung an Fließgewässern wohl eine Nummer zu klein sind. Hier sollen sie aber beispielhaft für ihre massigeren Vertreter gescannt werden.



Abb. 11: Kalksteine mit Drahtbefestigung zum Abhängen von der Deckenkonstruktion (12.2006)

4.1.3 Wurzelstock

Der Wurzelstock entstammt einem circa 35 Jahre alten Ahorn aus dem Versuchsgarten. Der Baum wurde gefällt und anschließend der Wurzelteller auf circa zwei Meter im Durchmesser freigelegt. Somit war der Großteil des Feinwurzelaanteils auch hier entfernt worden. Für unsere Messungen ist der Verbleib der Starkwurzeln aber ausreichend.

Anfängliche Versuche, den Wurzelstock mit einem Hochdruckreiniger zu säubern, mussten wir bald einstellen. Entscheidend war nicht der Druck des Wasserstrahls, sondern die Wassermenge. Also probierten wir es mit einem normalen Gartenschlauch – diesmal erfolgreich!



Abb. 12: Freilegen des Wurzelstocks,
Versuchsgarten Eßling (12.2006)



Abb. 13: zu schwer für den „Traktor“,
Versuchsgarten Eßling (12.2006)



Abb. 14: Hochdruckreinigung – nicht ideal,
Versuchsgarten Eßling (12.2006)



Abb. 15: Abspülen ohne Hochdruck hat
funktioniert, Versuchsgarten Eßling (12.2006)

4.2 DER SCANNER: RIEGL LMS-Z420I

Für unsere Aufnahmen verwendeten wir einen Laserscanner der Marke RIEGL.

Da die BOKU Wien nicht selbst über einen Laserscanner verfügt, wurde er vom Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Wien ausgeliehen. Den Kontakt hat Dr. Erwin Heine vom Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (IVFL) der BOKU Wien hergestellt. Die Aufnahmen vorgenommen hat Dr. Wolfgang Neubauer. Er arbeitet tagtäglich mit diesem Scanner und konnte aufgrund seiner Erfahrung bestmögliche Messergebnisse erzielen.

Die Auswahl des **RIEGL LMS-Z420i** erfolgte allerdings nicht nach leistungsspezifischen Anforderungen an das Gerät selbst, sondern aufgrund des Kontakts. Ob das Gerät auch unseren Anforderungen entsprach, wird sich im Folgenden zeigen.

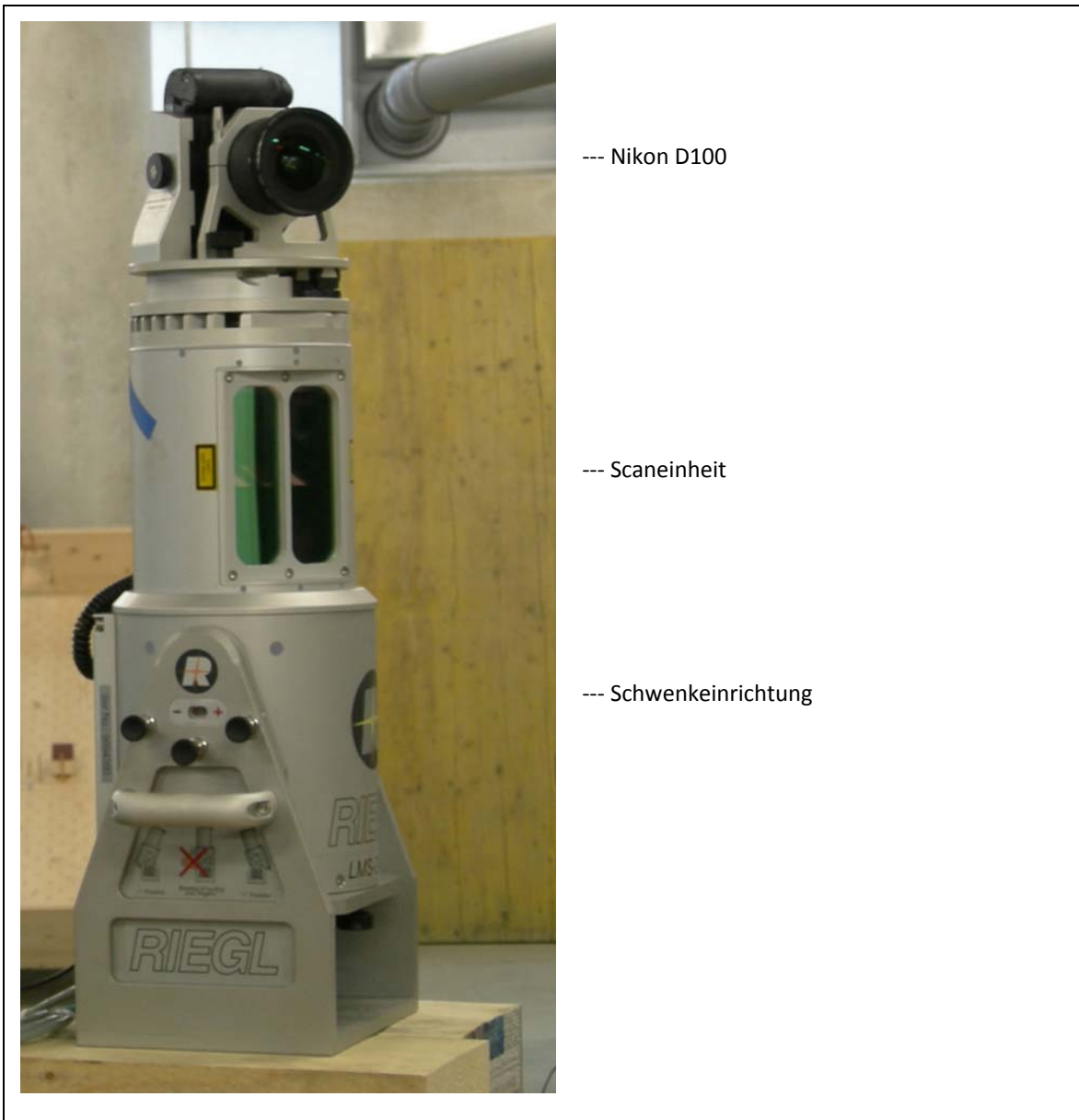


Abb. 16: Laserscanner RIEGL LMS-Z420i im Einsatz, Technikum/ Schwackhöferhaus BOKU (12.2006)

- Messbereich: **360°(horizontal) x 80°(vertikal)**
- Distanzmessgenauigkeit: **8mm** bei einer **Reichweite von 2-800m**
- Gewicht: **16kg**
- Digitalkamera **NIKON D100** für die Farbaufnahme (Objektiv: Sigma Ex 20mm)
- dieses Scannermodell wird seit 2003 von der Firma RIEGL LMS GmbH (Horn, Österreich) vertrieben

Abb. 17: Datenblatt RIEGL LMS-Z420i (Quelle: Firma RIEGL LMS GmbH)

Als Ergebnis liegen anschließend **Objektpunkte** in einem scannerbezogenen Koordinatensystem **in x-y-z-Richtung**, vor. Beim Scanvorgang werden also Polarkoordinaten erfasst und in rechtwinkelige Koordinaten umgerechnet.

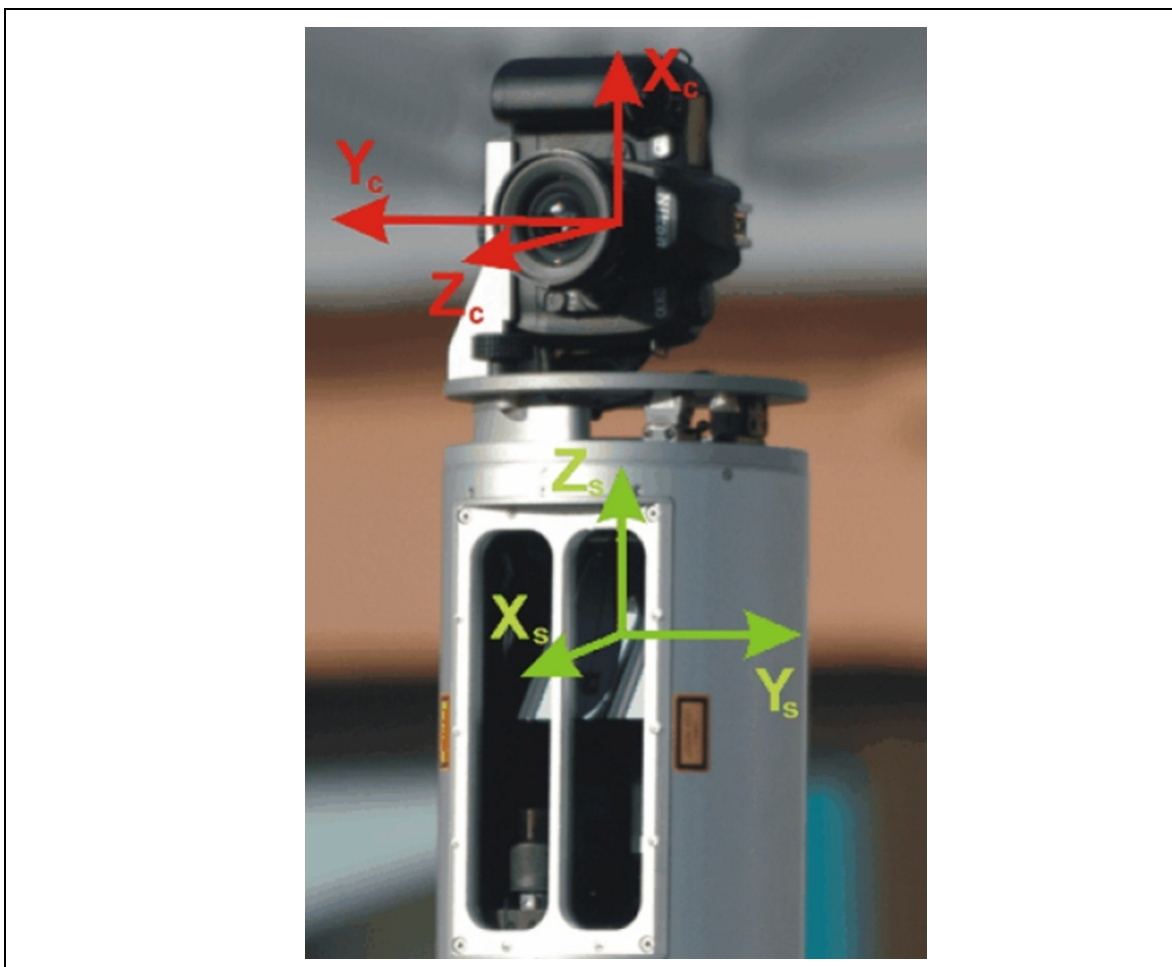


Abb. 18: Orientierung der Koordinatensysteme Scanner – Kamera (RIEGL 2005)

Zusätzlich nimmt eine handelsübliche, **digitale Spiegelreflexkamera** für jeden Scanbereich Fotos auf, die es ermöglichen, den gescannten Punkten einen Farbwert zuzuordnen. Dies geschieht über Rückprojektion der Punkte ins Foto. So entsteht ausgehend vom Grautonbild, der Scanner erkennt nur die Intensität der Reflexion, eine eingefärbte Punktwolke, die einem die Orientierung wesentlich erleichtert.

Als **Schnittstelle zum Scanner** wurde bei unseren Aufnahmen ein Notebook verwendet, mit dem einerseits sämtliche Voreinstellungen am Scanner vorgenommen werden und andererseits Punktdaten gespeichert und weiterverarbeitet werden. Die Software dafür wird von RIEGL LMS selbst angeboten: **RiSCAN PRO 1.2.1b9**. RiSCAN PRO übernimmt somit die Steuerung des Scanners und legt für jeden Objektscan ein Projekt an, das gut strukturiert ist und für die Weiterbearbeitung bereit steht.

4.3 SCANNEN DER OBJEKTE

Die Datenerfassung, also das Laserscannen der ingenieurb biologischen Bauelemente, erfolgte in Räumlichkeiten der BOKU Wien, im Dezember 2006. Wir hätten auch direkt vor Ort die Aufnahmen machen können, aber um gleichbleibend gute Verhältnisse für die Dauer der Messungen garantieren zu können, wählten wir den Innenraum. Die Aufnahmen wurden daher im Technikum des Schwachhöferhauses durchgeführt. Störfaktoren, wie wechselnde Lufttemperatur und Wind, der vor allem die Purpurweide beunruhigen hätte können, wurden somit beseitigt. Nicht zuletzt war es auch fürs Aufnahmeteam angenehmer, indoor zu arbeiten und nicht bei Minusgraden die Isolierfähigkeit der alten Handschuhe zu testen.

Zu den optimalen Voraussetzungen mussten vorab noch ein paar Vorbereitungen getroffen werden. Die Bauwerke wurden in Szene gesetzt. Wir haben versucht die Steine, den Ahorn-Wurzelstock und die Purpurweide so zu positionieren, dass wir mit möglichst wenigen Scans, gute Aufnahmen erreichten. Zu diesem Zweck wurden die Elemente von der Decke abgehängt und „schwebend“ im Raum in Position gebracht. Dies mag bei 20 kg Steine noch kein Problem sein, weil sie einfach mit Draht und Kunststoffseile befestigt werden können. Beim frisch ausgegrabenen Wurzelstock, der in den kleinen Zwischenräumen noch feuchte Erde verbarg, mussten wir den Draht auf die Seite legen. Für die circa 200 bis 300 kg Gewicht kamen robuste Rundschlingen zum Einsatz und das Heben des Wurzelstocks erledigte eine Elektro-Seilwinde. Am Boden rangierten wir den Wurzelstock mit einem Hubwagen.

Sind die Bauelemente einmal in Position gebracht, bei uns dauerte das einen halben Tag, sollten sie diesen Zustand bis zum Ende der Messung nicht mehr verändern. Zudem mussten wir auch darauf achten, dass wir den Laserscanner in einem ausreichend großen Abstand zu den Objekten frei bewegen konnten. Hier wurde der Mindestabstand zwar immer eingehalten, aber ein wenig mehr Platz und Bewegungsfreiheit hätte die Auswahl der Scanstandorte ein wenig flexibler gestaltet.

Der **Aufbau des Scanners** benötigt circa eine halbe Stunde. Dabei muss der 16 kg schwere Scanner mit sämtlichen Kabeln verbunden, und die Digitalkamera am Scannerkopf montiert werden. Der Umgang mit dem hochsensiblen Gerät muss sorgsam erfolgen und unter Anleitung eines Profis. Denn die Übersicht des gesamten Equipments geht schnell verloren und zudem wird hier mit einem kostspieligen Messinstrument hantiert. Der Kostenpunkt der gesamten Scananlage liegt bei circa EUR 120.000,-. Da ist Vorsicht geboten!

Wir haben den Scanner auf einen mobilen Untersatz (einen Rollwagen) gestellt, um ihn frei im Raum bewegen zu können. Die Verbindung des Scanners mit dem Notebook wurde über W-LAN hergestellt. Gerade hier können Probleme auftreten, wenn ein anderes drahtloses Netzwerk die **Verbindung zwischen Scanner und Notebook** stört. Oft befinden sich Standorte fernab von drahtlosen Netzwerken, aber in unserem Fall schaffte es das BOKU-Netzwerk zumindest anfangs, die Verbindung zwischen Notebook und Scanner zu blockieren. Eine drahtlose Verbindung ist heute schon Standard und ermöglicht ein freies Bewegen des Scanners, unabhängig vom Notebook. Die Stromversorgung kann entweder über eine 12V Autobatterie oder wie in unserem Fall über 230V Netzstrom erfolgen.

Für die Orientierung des Scanners im Raum wird ein eigenes, scannerbezogenes Koordinatenbezugssystem eingerichtet. Dabei werden **Passpunkte (Targets)** von einer Totalstation genau eingemessen. Diese Passpunkte haben eine stark reflektierende Oberfläche und müssen horizontal und vertikal im Raum verteilt werden. Es sollten von jeder möglichen Scanposition mehrere Punkte sichtbar sein, mindestens drei. Diese Passpunkte können entweder in Zylinderform (RIEGL Cylinder Ø 5cm, height 5cm) aufgestellt werden oder als flache Scheiben (RIEGL Flat Ø 5cm) direkt auf die Wand geklebt werden.

Bevor also mit dem Scannen begonnen werden konnte, wurden alle 14 Passpunkte mit einer Leica-Totalstation eingemessen. Die Koordinaten wurden anschließend in die Scannersoftware RiSCAN PRO als „.csv“-Datei eingelesen.

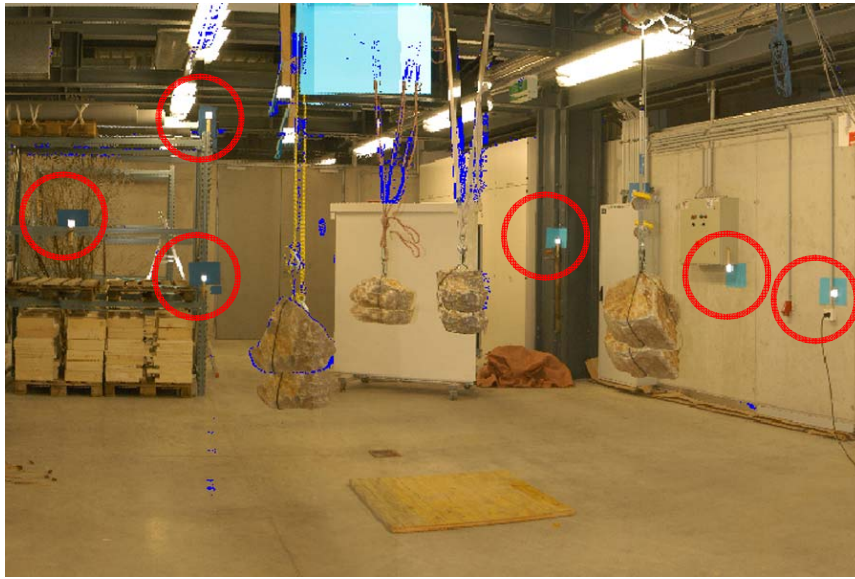


Abb. 19: gut reflektierende Passpunkte, tachymetrisch eingemessen, Technikum BOKU (12.2006)

Wichtig ist, dass alle, in Sichtweite des Scanners befindlichen Reflektoren an Fahrrädern und Fahrzeugen weggeschafft oder mit einem Blatt Papier überklebt werden. Wird der Laserstrahl von einem dieser Reflektoren reflektiert und zurück zum Scanner geleitet, kann das vorerst der letzte Einsatz des Scanners sein. Hier gilt also Vorsicht, um Schäden am Scanner zu vermeiden, und weniger die StVO.

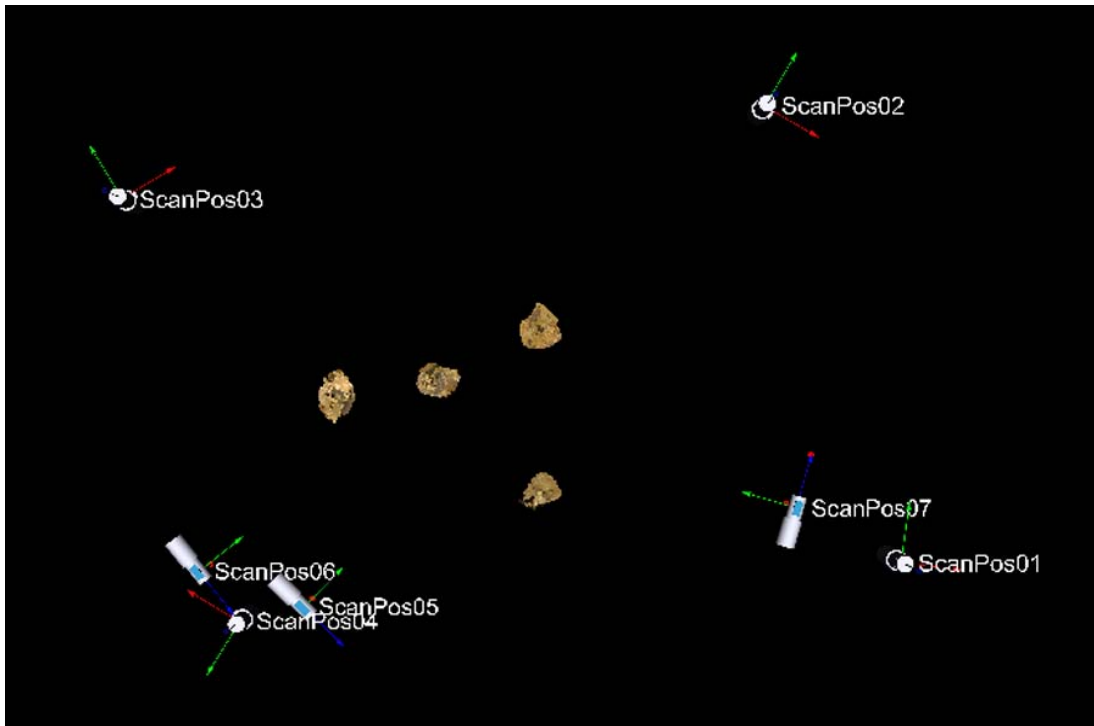
Vor dem eigentlichen Scan wird bei diesem Scanner-Modell ein kurzer **Vorscan (Prescan)** durchgeführt. Hier sucht der Scanner automatisch nach den verfügbaren Passpunkten. Es gibt aber auch die Möglichkeit, die Passpunkte im „Graum-Bild“ manuell auszuwählen.

Der nächste Arbeitsschritt beinhaltet dann den eigentlichen **Scanvorgang**. Dieser dauert je nach Scanauflösung wesentlich länger. Es ist sehr schwer Zeitangaben hierzu zu machen, da der Scanfortschritt nicht nur von der Auflösung (wir scannten mit einer Auflösung von 0,08 Grad), sondern auch vom Ausschnitt des Scanbereichs abhängt. Bei unseren Objekten wurden verhältnismäßig kleine Scanbereiche ausgewählt, die in wenigen Minuten gescannt waren. Im Gesamten dauerte das Einrichten des Scanners am Standort länger und nahm mehr Zeit in Anspruch, als der eigentliche Scan.

Ist die Punkterfassung abgeschlossen, wird mit der **Digitalkamera** eine 360° Panoramaaufnahme gemacht. Die **Farbaufnahmen** sind, bei aufrechter Position des Scanners, im Hochformat. Mit dem 20 mm Fixbrennweite-Objekt werden Fotos mit einer Überlappung von 10% angestrebt. Die Steuerung der Kamera erfolgt über das Notebook. Abhängig von den jeweiligen Lichtverhältnissen werden die Fotos mit oder ohne Blitzgerät aufgenommen. Die Qualität der Farbinformation ist also vom Tages- oder Kunstlicht abhängig. Wird in der Nacht oder in dunklen Räumen gescannt, was ja durchaus funktioniert, aber selten gemacht wird, muss auf die Farbwerte verzichtet werden.

Während die Kamera beim RIEGL LMS-Z420i extern am Scannerkopf angebracht wird, besitzen manche Modelle anderer Hersteller integrierte Digitalkameras. Der zusätzliche Arbeitsschritt mit der Aufnahme der Fotos entfällt hierbei und die Scandauer kann somit verringert werden. Zudem muss die externe Kamera nach mehrmaligem Aufsetzen auf den Scannerkopf neu kalibriert werden, um die Farbwerte den einzelnen Punkten, möglichst genau zuordnen zu können.

Die folgenden Abbildungen zeigen eine Übersicht, wie die **Scannerpositionen** um die Objekte verteilt waren. Eine hohe Anzahl von Standorten bedeutet nicht immer eine Verbesserung der Scanergebnisse, da beim Zusammenfügen der Einzelscans Ungenauigkeiten auftreten können. Mehr dazu aber im Kapitel Datenauswertung.



4 Kalksteine | Scanpunkte: 76.499 points

7 Scannerpositionen (4 aufrechte, 3 liegende)

Abb. 20: Aufnahmepositionen des Scanners und Kalksteine (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007)

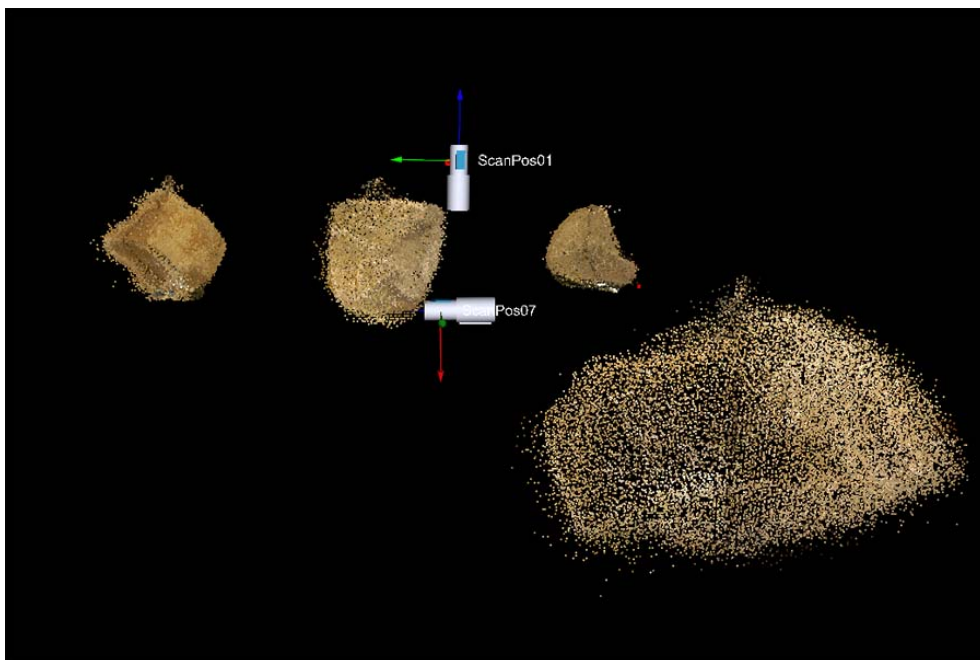
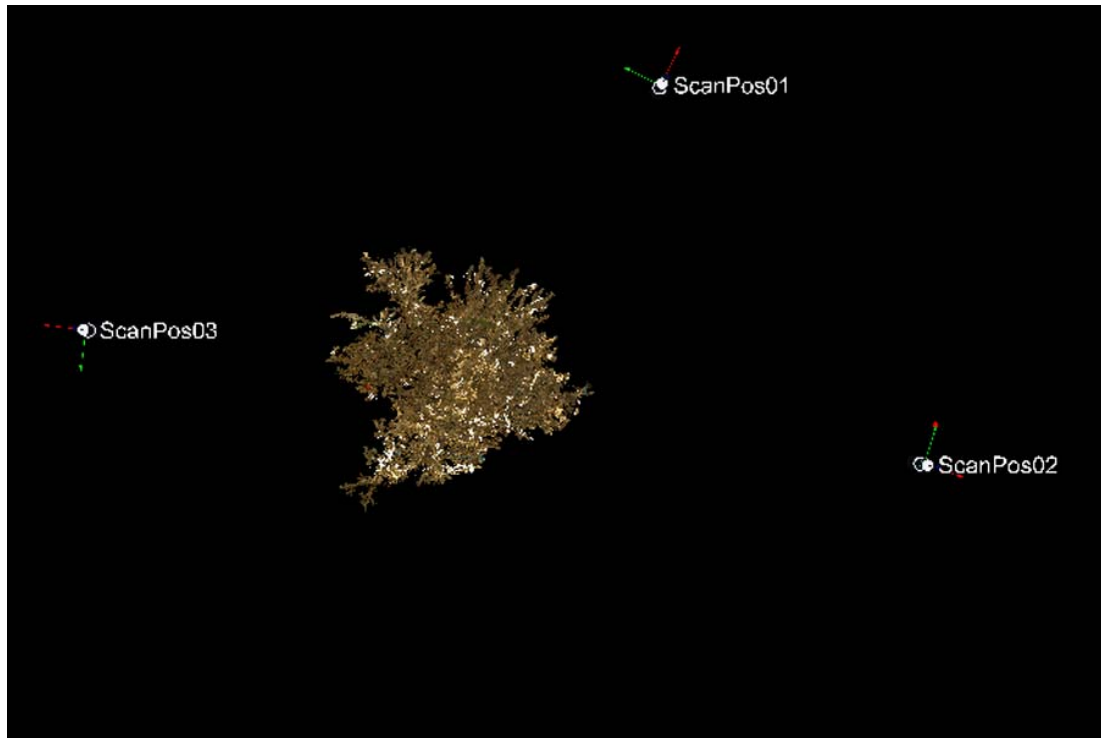


Abb. 21: Aufnahmepositionen des Scanners und Kalksteine (Ansicht), RiSCAN PRO (2007)



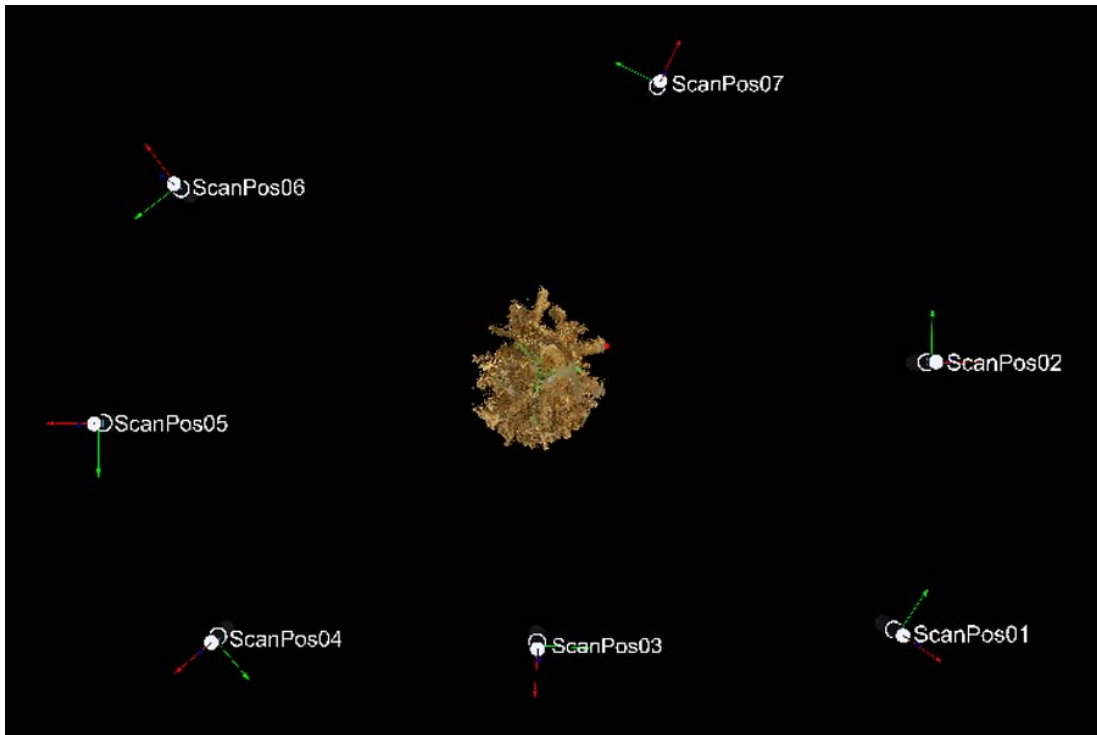
Purpurweide | Scanpunkte: 269.167 points

3 Scannerpositionen (alle aufrecht)

Abb. 22: Aufnahmepositionen des Scanners und Purpurweide (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007)



Abb. 23: Aufnahmepositionen des Scanners und Purpurweide (Ansicht), RiSCAN PRO (2007)



Ahorn-Wurzelstock | Scanpunkte: 188.155 points

7 Scannerpositionen (alle aufrecht)

Abb. 24: Aufnahmepositionen des Scanners und Ahorn-Wurzelstock (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007)

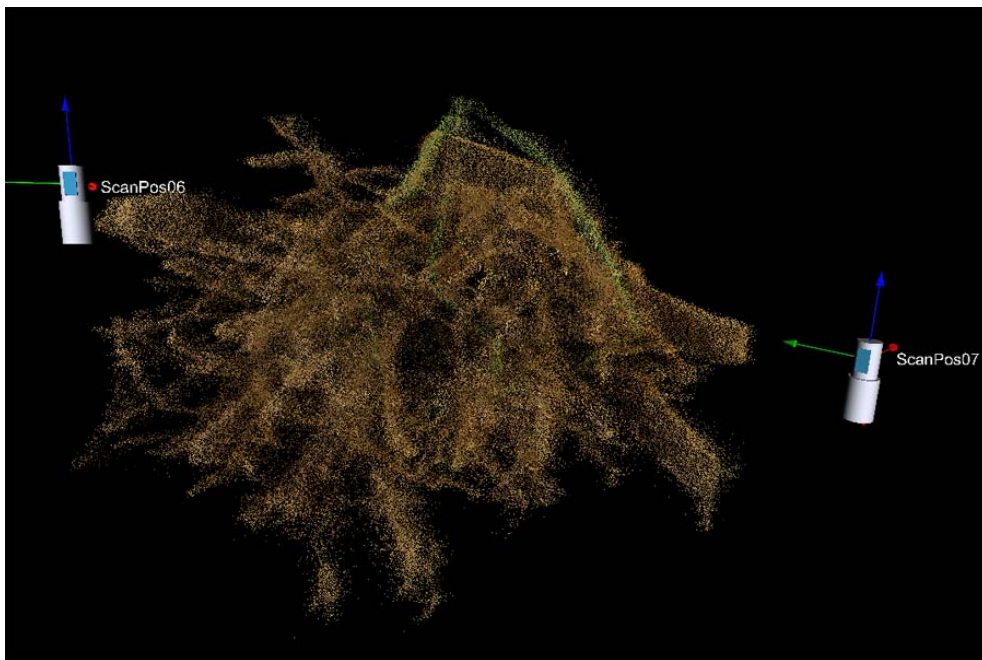


Abb. 25: Aufnahmepositionen des Scanners und Ahorn-Wurzelstock (Ansicht), RiSCAN PRO (2007)

Wir waren überrascht, dass alle hängenden Objekte während des Scanvorgangs ihre Lage beibehielten. Vor allem bei den relativ kleinen Steinen hätten wir nicht damit gerechnet. Hätte sich einer der Steine oder der Wurzelstock um wenige Zentimeter gedreht, hätten wir mit dem Scannen von vorne beginnen müssen.

Unsere Objekte wurden im Nahbereich gescannt, das heißt sie wurden auf maximal acht Meter Entfernung millimetergenau vermessen. Die hohe Auflösung wurde vor allem bei der Weide benötigt, um die Feinäste erfassen zu können. Hier stießen wir dann an die Grenzen des RIEGL LMS-Z420i.

4.4 PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHME

Das Scannen der feinen Weidenäste war mit dem RIEGL LMS-Z420i zwar noch möglich, aber für eine exakte Abbildung der Feinäste waren zu wenige Scanpunkte vorhanden. Ähnliche Probleme traten beim Wurzelstock auf. Durch die komplexe Wuchsform des Wurzelstocks kam es zu starkem Rauschen in der Punktwolke und einzelne Wurzelachsen waren nicht mehr nachvollziehbar.

Ergänzend zum Laserscanning wurde bei der Purpurweide und dem Wurzelstock eine klassische Aufnahmemethode angewandt. Mit Hilfe der Nahbereichsphotogrammetrie sollte es gelingen, die feingliedrigen Äste und Wurzeln abzubilden, um diese in weiterer Folge modellieren zu können.

Auf eine genaue Beschreibung des photogrammetrischen Aufnahmeprozesses wird hier nicht näher eingegangen. Es gibt ausreichend Literatur darüber, aber im Speziellen möchte ich auf ein Buch hinweisen, das die aktuelle Thematik Photogrammetrie und/ oder Laserscanning beschreibt: **„Photogrammetrie und Laserscanning“** Anwendung für die As-Built-Dokumentation und Facility Management. Herausgeber ist Thomas Luhmann und erschienen ist dieses Buch im Herbert Wichmann Verlag (Heidelberg).

Die Photogrammetrische Aufnahme wurde auch hier in Zusammenarbeit mit dem Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (IVFL) der BOKU Wien durchgeführt. Dr. Alice Patikova und Dr. Erwin Heine machten die Aufnahmen und anschließend wurden Bildpaare erzeugt, die dann für die Stereoauswertung bereit standen.



Abb. 26: photogrammetrische Aufnahme – Purpurweide, Technikum BOKU (02.2007)



Abb. 27: photogrammetrische Aufnahme – Ahorn-Wurzelstock, Technikum BOKU (02.2007)



Abb. 28: photogrammetrische Aufnahme mit Nikon D2X, 28mm Objektiv, Technikum BOKU (02.2007)

5 Datenauswertung

5.1 LASERSCAN-AUSWERTUNG

Genaueres Arbeiten am Monitor wird hier vorausgesetzt, aber auch ein gutes 3D-Vorstellungsvermögen und nicht zuletzt ein wenig Kreativität sind bei den einzelnen Arbeitsschritten ganz hilfreich. Die Pixelsuche kann also beginnen.

Wir hatten von der Datenaufnahme zigtausende Punkte vorliegen. Im Vergleich zu Projekten, wo ganze Landschaftsbereiche gescannt und mehrere Millionen Punkte gemessen werden, hatten wir es aber mit einer überschaubaren Menge von Punkten zu tun.

Ob die nun folgende Registrierung (zusammenfügen von einzelnen Scanstandorten) noch zur Datenaufnahme oder schon zur Datenauswertung gezählt wird, bleibt jedem selbst überlassen. Die Registrierung erfolgt bei der RiSCAN PRO Software zwar unmittelbar nach dem Scannen, also noch vor Ort, aber trotzdem behandle ich diesen Prozess der Scan-Zusammenführung in der Auswertung. Die Datenaufnahme stellt für mich rein das Scannen der Objekte dar.

5.1.1 Registrierung - Zusammenfügen der Einzelscans

Die 3D-Punktwolke eines Scans befindet sich im relativen Koordinatensystem des Messinstruments. Dieses wird auch als **SOCS (Scanner Own Coordinate System)** bezeichnet. Werden von einem Objekt, wie in unserem Fall, mehrere Scans gemacht, müssen die einzelnen Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem (**PRCS = Project Coordinate System**) transformiert werden. Dieses Zusammenfügen der Scans wird als Registrierung bezeichnet. Wie schon oben erwähnt werden normalerweise stark reflektierende und mit einer Totalstation eingemessene Passpunkte (Targets) verwendet, die eine direkte Transformation der Scans in ein **absolutes Koordinatensystem** (GLCS = Global Coordinate System) möglich machen. Wird das globale Koordinatensystem nicht benötigt, kann auf das Einmessen der Passpunkte verzichtet werden. In zwei

aufeinanderfolgenden Scans müssen dann aber mindestens vier Passpunkte sichtbar sein, um die beiden Scans relativ zueinander registrieren zu können (NEUBAUER, k.A.).

Stehen keine Passpunkte zu Verfügung, gibt es über die sogenannte **SDM - Methode (Squared-Distance Minimization)** die Möglichkeit, durch manuelles Identifizieren von drei korrespondierenden Bereichen, zwei benachbarte Scans zu verknüpfen (RESSL, k.A.).

Bei unseren Aufnahmen wurden die Passpunkte tachymetrisch eingemessen. Die Punkte wurden von der Scansoftware automatisch erkannt und konnten zusätzlich, um die Lagegenauigkeit zu präzisieren, hochauflösend gescannt werden.

Als Ergebnis erhielten wir eine zusammengefügte Punktwolke.

5.1.2 Säubern der Punktwolke

Beim Säubern geht es darum, all jene Bereiche im Scan zu definieren, die außerhalb des Untersuchungsgebiets liegen, beziehungsweise nichts mit dem Objekt zu tun haben. Abhängig von der Software gibt es die Möglichkeit, einzelne Punkte oder ganze Punktgruppen auszuwählen und anschließend zu löschen. Beim Weidenscan war es anfangs, vor allem im oberen Bereich unüberschaubar, da die Weidenäste bis in die Deckenkonstruktion des Labors reichten. Es wurden bei diesem Arbeitsschritt aber auch Bereinigungen direkt am Objekt vorgenommen. Ich versuchte dabei die Drähte, Rundschlingen und Seile, die wir für die Befestigung der Objekte benötigten, zu entfernen. Liegen sie dabei direkt am Objekt auf, wird es schwer sie freizustellen. Ein Löschen könnte einen Verlust von wichtigen Oberflächenpunkten bedeuten, daher wurde vorerst keine Säuberung vorgenommen. Eine dezente Farbe für die Rundschlinge und andere Befestigungsutensilien ist also ratsam.

Trotzdem konnten wir bei diesem Schritt, die Punktwolke und somit auch die Datenmenge um ein Vielfaches reduzieren.

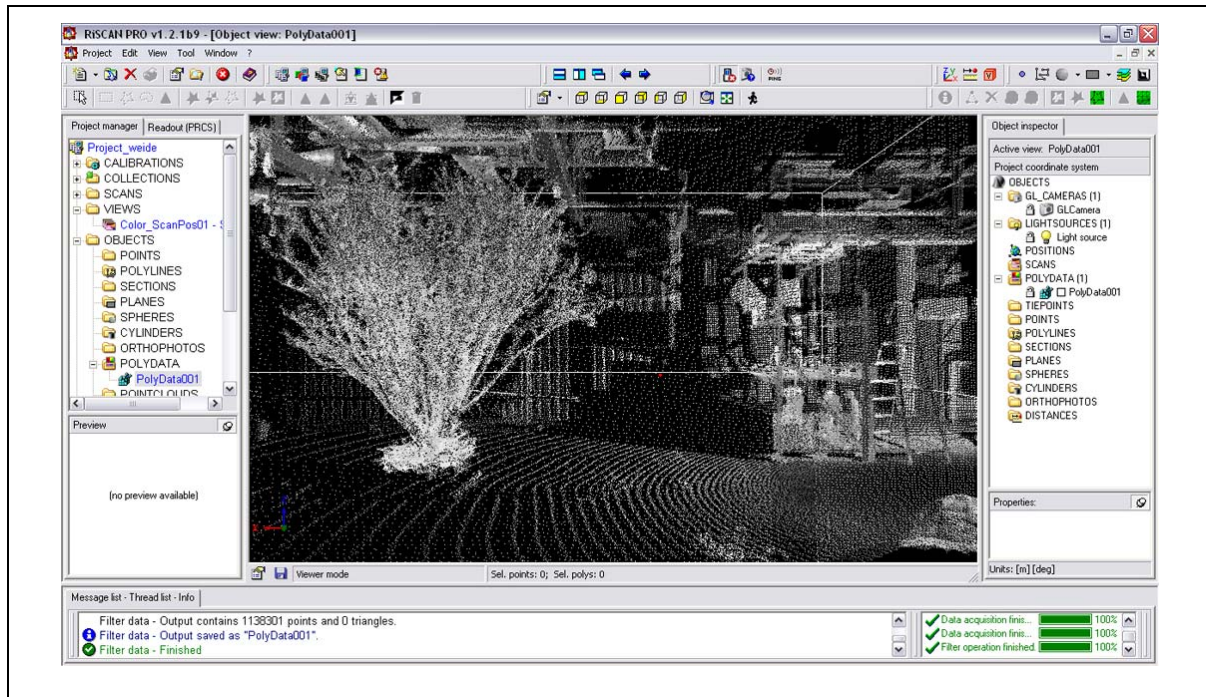


Abb. 29: Ergebnis des Laserscans – zusammengefügte Punktwolke, RiSCAN PRO (2007)



Abb. 30: Ergebnis des Laserscans – isolierte Punktwolke der Purpurweide, RiSCAN PRO (2007)

Die Registrierung und das Säubern der Punktwolke wurden noch in RiSCAN PRO durchgeführt. Für alle weiteren Vorhaben wurden die Punkte im „ASCII“-Format oder als

„.dxf“-File exportiert. Eine geeignete Modellierungssoftware ist **Geomagic Studio 9** (Geomagic, North Carolina, USA). Die folgenden Filterprozesse wurden in dieser Software durchgeführt.

5.1.3 Punktwolke filtern

Absurd mag es dem ein oder anderen vorkommen, wenn in den folgenden Punkten, die Rede von Datenreduktion sein wird. Denn einerseits erfreut man sich über die immer genauer messenden Laserscanner und andererseits wird nach der Aufnahme die Punktwolke wieder reduziert, um geringere Datenmenge zu erhalten. Die Filterung der Daten hängt somit stark vom gewünschten Detailierungsgrad ab. Diesen Bereich gilt es für jedes gescannte Objekt zu finden.

Ausreißer wählen

Mit dem Befehl „Ausreißer wählen“ werden von Geomagic Punkte erkannt, die sich nicht zuordnen lassen, bzw. zu weit von der zu modellierenden Oberfläche entfernt sind. Durch den Wegfall dieser Punkte wird die Oberfläche eines Objekts überschaubarer und einheitlicher.

Rauschen verringern

Als Rauschen bezeichnen wir die Streuung von Punkten im Bereich der Objektoberfläche. Einerseits kommt dieses Rauschen durch Fehlmessungen des Laserscanners zu Stande und andererseits durch Fehler bei der Registrierung der einzelnen Scans.

Das Rauschen kann mit dieser Filterfunktion zum Großteil beseitigt werden. Es kommt dabei zu einer Glättung der Punktwolke und die Oberfläche des Körpers wird homogener. Gerade dieser Filter ist aber für den oben angesprochenen Detailierungsgrad verantwortlich. Wird er zu stark eingesetzt gehen sämtliche Details verloren.

Gleichmäßige Reduktion

Dabei wird die Punktwolke regelmäßig gefiltert. Wird sie mit einem Pixelbild verglichen, verstehen wir darunter die Auflösung eines Bildes. Angegeben wird sie im 2D mit einer bestimmten Pixelanzahl pro Flächeneinheit, also Pixel pro Zoll oder Zentimeter.

Im 3D bezieht sich die Anzahl der Punkte nicht auf Flächeneinheiten, sondern auf Raumeinheiten. Bei dieser Filterfunktion kann ein bestimmter Wert an Punkten angegeben werden, der dann auf diesen reduziert wird.

Diese Art der Punktereduktion ist vor allem für die Überlappungsbereiche zweier oder mehrerer Scans sinnvoll, da sich hier eine hohe Punktdichte bilden kann. Wenn wir bedenken, dass bei der folgenden Triangulation pro Scanpunkt vier Dreiecke gebildet werden, dann bedeutet dies bei einer Punktwolke mit fünf Millionen Punkte, 20 Millionen Dreiecke. Große Datenmengen wären die Folge und die Rechenzeit des Computers wäre enorm.

Auch wenn Filterfunktionen Oberflächen glätten und diese anschaulicher machen, dürfen wir nicht vergessen, dass sie mit einer Reduktion von Messpunkten verbunden sind und zu einem Informationsverlust führen. Der Umgang mit diesen Filtern sollte also gut überlegt sein.

Mit diesen Filtermöglichkeiten kommen wir zum Ende der Punktphase.

5.1.4 Punkte vermaschen

Kanten bilden Oberflächen und Oberflächen begrenzen Volumenkörper!

Unser Ziel ist es 3D-Objekte darzustellen. Was wir bisher von unseren gescannten Objekten besitzen sind 3D-Punkte. Um daraus ein 3D-Modell generieren zu können, müssen diese Punkte untereinander verbunden werden.

Theoretisch könnten wir wenige Punkte durch Dreieckbildung manuell verbinden. Da wir es aber mit großen Punktmengen zu tun haben, kann dieser Prozess nur mehr automatisch abgewickelt werden.

Bisher wurde die Vermaschung von Punkten ausschließlich bei digitalen Geländemodellen angewandt. Diese Modelle sind 2,5D-Modelle und keine ausgesprochenen 3D-Modelle. Der Unterschied ist folgender: Im 2,5D gibt es für einen Lagepunkte (X,Y), nur einen Höhenwert (Z). Die Triangulation erfolgt also in der 2D-Fläche und der Höhenwert (Z) wird erst danach den Punkten zugeordnet. Daher sprechen wir hier nicht von einer vollkommenen 3D-Triangulation, sondern nur von einer 2,5D-Triangulation.

Handelt es sich um Scanpunkte von Geländeoberflächen, können diese nach wie vor 2,5D ausgewertet werden. Bei komplexen Körpern funktioniert die 2,5D-Auswertung nicht, da es Punkte mit denselben X,Y-Koordinaten, aber unterschiedlichen Z-Werten geben kann.

Flächentriangulation 3D

Aus drei benachbarten Punkten wird ein Dreieck erzeugt. Dabei muss der Abstand der Punkte geringer sein, als ein vorgegebener Grenzwert. Dieser Grenzwert verhindert zu große Dreiecke, die unter Umständen sich selbst schneiden und kreuzende Flächen bilden können. Die Lage der Dreiecke zueinander wird ebenfalls über einen bestimmten Grenzwert definiert, wobei dieser den Winkel beschreibt, den die Flächennormalen benachbarter Dreiecke nicht überschreiten dürfen.

Werden diese Grenzwerte richtig gewählt, kommt es bei der Triangulation zu guten Ergebnissen. (ROHRBERG, 2006)

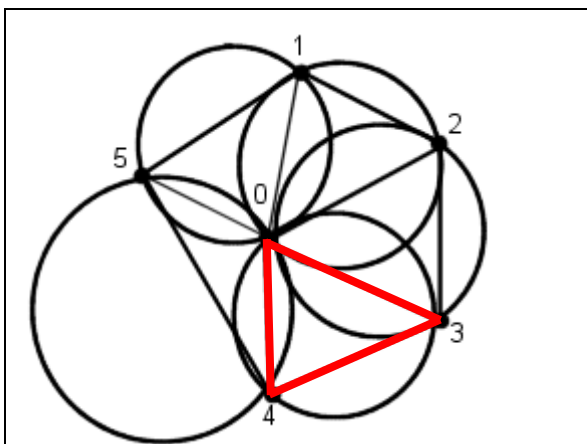


Abb. 31: Delaunay Triangulation

Volumentriangulation:

Eine weitere Möglichkeit der Triangulation, ist die Bildung von Tetraedern aus vier benachbarten Punkten. Für die maximale Seitenlänge wird wiederum ein Grenzwert festgelegt, der nicht überschritten werden darf. Bei dieser Methode ist aber mit einem schlechteren Ergebnis zu rechnen, als bei der 3D-Flächentriangulation (ROHRBERG, 2006).

Bevor es mit der Korrektur der Flächenfehler weiter geht, möchte ich auf Folgendes hinweisen. Es gibt die Möglichkeit erst nach der Triangulation die einzelnen Scans zusammen zufügen. Dies soll vor allem dann erfolgen, wenn die Einzelscans gute Ergebnisse aufweisen, bei der Registrierung der Scans aber große Ungenauigkeiten auftreten. Sind die Überlappungsbereiche der Scans sehr groß und inhomogen, braucht man sich aber auch mit dieser Methode keine all zu großen Hoffnungen machen.

Korrektur von Flächenfehlern:

Nach der Vermaschung der Punktwolke kann festgestellt werden, ob die Grenzwerte richtig gewählt wurden. Es können aber auch andere Fehler bei der Dreiecksbildung auftreten.

Mögliche Fehler nach (ROHRBERG, 2006):

- **Löcher in den Flächen:** dabei liegen die Dreiecksflächen nicht Kante an Kante, sondern bilden eine Lücke zwischen den Dreiecken.
- **Kreuzende Flächen:** diese treten dann auf, wenn die Länge der Dreiecksseite den angegebenen Grenzwert überschreitet.
- **Falsche Normalenrichtung:** dieser Fehler kann leicht behoben werden, indem die Ausrichtung der abweichenden Flächennormalen korrigiert wird.
- **Falsche Dreiecksverbindungen:** wenn mehr als zwei Kanten ident sind. Zwei benachbarte Dreiecke bilden eine gemeinsame Kante und drei Dreiecke haben einen gemeinsamen Eckpunkt. Alle Abweichungen von diesen Regeln müssen als Fehler angesehen werden.

Das Beheben der Fehler und Defizite ist Voraussetzung für die Bildung eines **„wasserdichten“ Modells**. Dieses fehlerfreie Modell wird deshalb als dicht betrachtet, da es keine Lücken in der Vermaschung aufweist. Eine Berechnung des Volumens kann somit erstmals durchgeführt werden.

Nach der Punktphase ist jetzt auch die Polygonphase abgeschlossen. Das **fertige Polygonmodell** stellt das Produkt der Datenauswertung dar und bildet die Grundlage für die folgende Modellierung. Sie ist nach der Datenerfassung und der Datenauswertung, der vorerst letzte Schritt im Ablaufprozess „von der Punktwolke zum 3D-Modell“.

5.2 PHOTOGRAMMETRISCHE AUSWERTUNG

Die Basis für die Auswertung unserer photogrammetrischen Aufnahmen stellten mehrere Bildpaare dar. Das Ergebnis erhielten wir durch ein **Stereobildauswerteverfahren**.

Mit einer geeigneten Software, einem Röhrenmonitor und einer speziellen Brille wurden am Monitor beide Bilder in unterschiedlicher Frequenz projiziert, sodass das menschliche Gehirn, einen räumlichen Eindruck vom Objekt erhält. Durch diese „3D-Darstellung“ am Monitor konnte im nächsten Schritt die Digitalisierung der einzelnen Wurzel- und Sprossachsen vorgenommen werden. Begonnen wurde mit der Erfassung der Spross- und Wurzelachsen in den Randbereichen. In den weiter innenliegenden Bereichen war eine Orientierung, wegen der im Vordergrund befindlichen Wurzeln und Sprosse, fast unmöglich.

Das Ergebnis der Digitalisierung wurde in einem .shp-File abgespeichert. Um dann wie bei Punkt 6.1 „Modellierung der Purpurweide“ fortfahren zu können, müssen die Polylinien in Splines umgewandelt werden.

Aufgrund der Komplexität beider Objekte hätte eine vollständige Auswertung nur mit enorm hohem Zeitaufwand bewältigt werden können. Es wurden daher nur wenige, gut ersichtliche Wurzeln und Sprosse digitalisiert, aber zu wenige, um daraus einen 3D-Körper zu modellieren, jedoch genug, um die Leistungsfähigkeit dieser Methode für dieses Anwendungsgebiet beurteilen zu können.

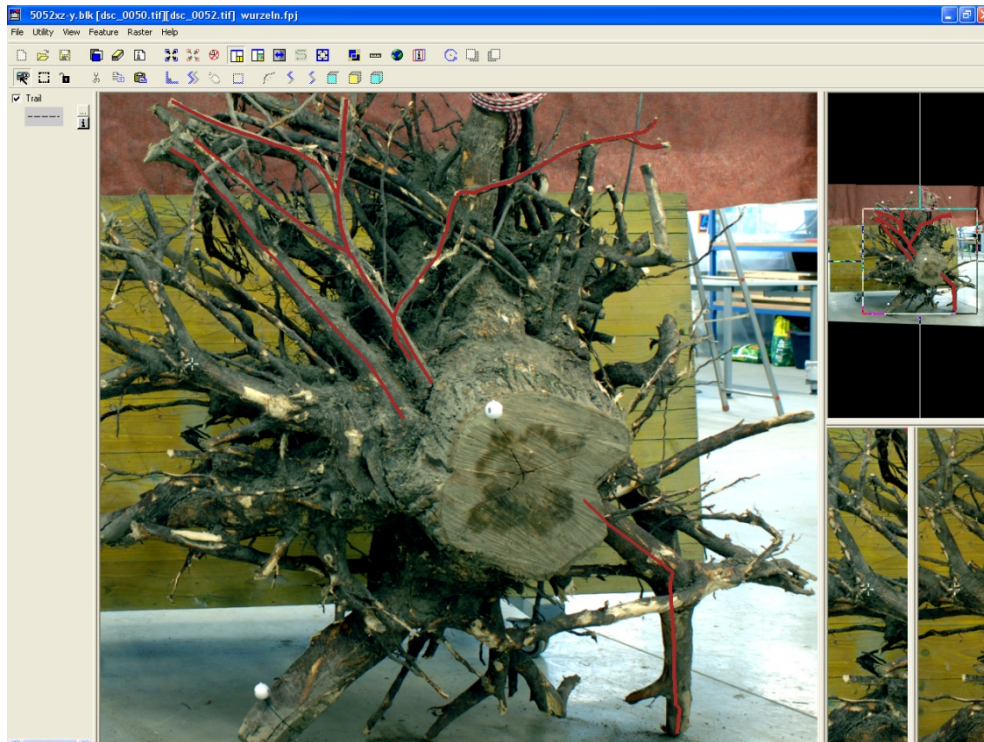


Abb. 32: Stereobildauswertung in ERDAS Imagine 9.1 von Leica Geosystems (2007)

6 Modellierung/ Visualisierung

Es gibt eine Vielzahl von Modellen, aber allesamt sind sie eine mathematische oder visuelle, einfache oder hochkomplexe Abstraktion der Realität (NIEMEIER, 2005).

Anhand der Purpurweide und eines Kalksteins möchte ich im Folgenden zwei unterschiedliche Lösungswege demonstrieren, die schlussendlich zum selben Ziel führen: ein **3D-modelliertes ingenieurbilogisches Bauelement**.

Die erste Methode wird sich mit einem Lösungsweg befassen, der an eine klassische Digitalisierung von Achsen und Kanten erinnert. Als Grundlage dient jedoch kein Foto, sondern die vom Laserscanner aufgenommene Punktwolke. Ein großer Vorteil, denn die Punkte liegen bereits in 3D-Koordinaten vor.

Den zweiten Abschnitt, also die Modellierung des Steins, wird ein Begriff dominieren: NURBS. Was sie sind, wie sie entstehen, warum sie überhaupt benötigt werden, wird im Folgenden beantwortet. Der Stein wird in der Modellierungssoftware Geomagic Studio 9 (Geomagic, North Carolina, USA) bearbeitet.

6.1 MODELLIERUNG DER PURPURWEIDE

Exemplarisch für die gesamte Weide, wurde ein Ast aus der Punktwolke isoliert. Die Weide wurde von Anfang an in **Autodesk Civil 3D 2007** (Autodesk, California, USA), modelliert. Da es sich um eine kleine Punktwolke mit circa 3.200 Punkten handelt, konnte diese direkt in Civil 3D 2007 importiert werden. Für Punktwolken mit mehreren Millionen Punkten gibt es eigene Applikationen, die die CAD-Software bei der Darstellung und Auswertung unterstützen.

6.1.1 Ansicht festlegen

Nachdem eine Scanposition eine besonders gute Ansicht lieferte, wurde sie als Blickrichtung festgelegt. Aus dieser Richtung war kaum ein Messrauschen erkennbar und vereinzelte Ausreißer mussten nicht entfernt werden.



Abb. 33: Ansicht des Purpurweidenastes mit minimalem Messrauschen, Civil 3D (2007)

6.1.2 Splines definieren

Im nächsten Schritt wurden entlang des Astverlaufes Linien konstruiert. Diese sogenannten Splines besitzen entlang ihres Pfades Kontrollpunkte. Die Kontrollpunkte werden vom Bearbeiter definiert und sollten vor allem in starken Krümmungsbereichen kürzere Abstände aufweisen. Im Gegensatz zu Polylinien, diese bestehen aus Geraden, besitzen Splines Krümmungsradien und eignen sich daher für den Verlauf von Astachsen. Die Spline-Kurve hat ihren Ausgangspunkt an der Astbasis und verläuft entlang eines Astes bis in den Feinast-Bereich. Alle weiteren Pfade entspringen in einer Astgabel und enden wiederum im Feinastbereich. Die oben angesprochenen Kontrollpunkte wurden an bereits existierenden Punkten der Punktwolke geknüpft. Da in unserem Fall die

Modellierung und Visualisierung im Vordergrund stand war es nebensächlich ob die Kontrollpunkte genau auf der Mittelachse des Astes lagen oder etwas daneben.

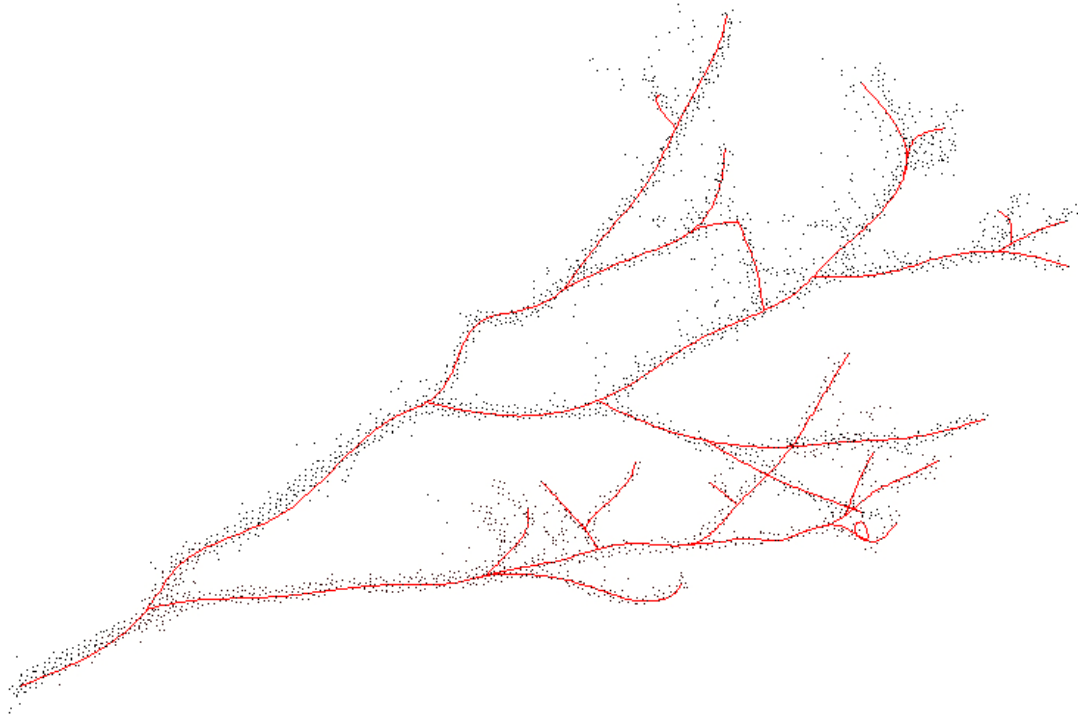


Abb. 34: Ansicht des Purpurweidenastes – Definition von Splines, Civil 3D (2007)

6.1.3 Zuweisung eines Regelkörpers

Entlang dieser Pfade erfolgte die Zuweisung eines Regelkörpers. Wenn wir davon ausgehen, dass der Astquerschnitt kreisrund ist, eignet sich dafür die Form eines Zylinders. Mit der sogenannten „Sweep“-Funktion ist es möglich, den Zylinder entlang des Pfades entstehen zu lassen. Der Astdurchmesser kann am Objekt selbst ermittelt werden, oder er wird einfach der Punktwolke angepasst.

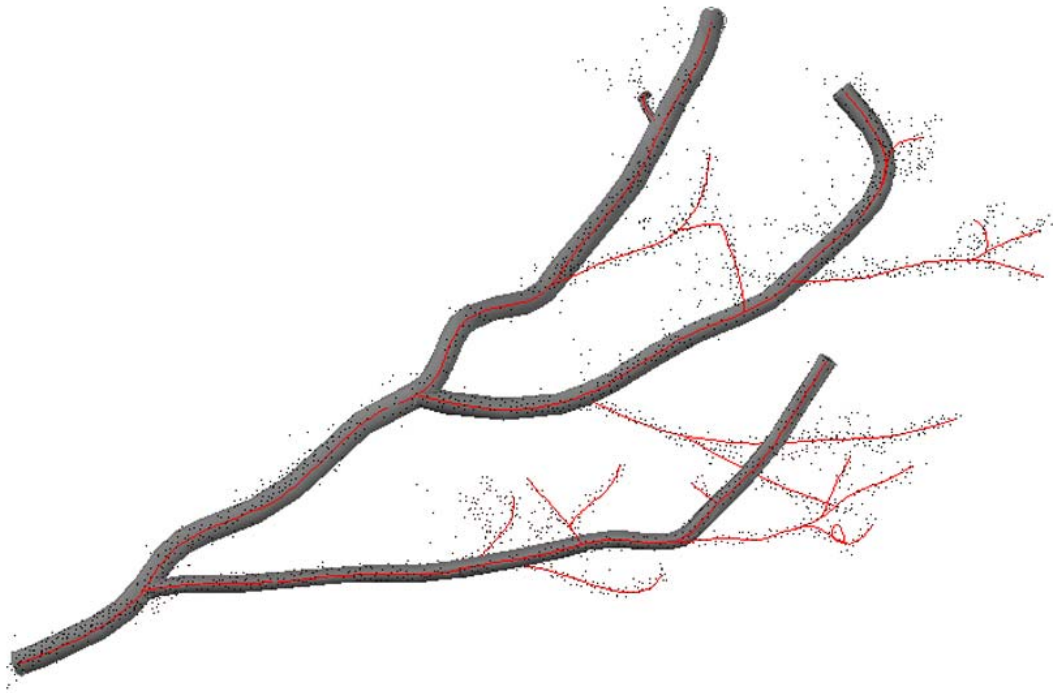


Abb. 35: Ansicht des Purpurweidenastes – Erstellung von Zylindern entlang der Splines, Civil 3D (2007)

6.1.4 Verjüngung des Zylinders

Wurden im letzten Arbeitsschritt die Zylinder zugewiesen, so geht es jetzt darum, diese entlang ihres Verlaufs zu verjüngen.

In Civil 3D 2007 gibt es zwar keine Funktion, die einem das Einstellen eines Anfangs- und Endradius ermöglicht, dafür gibt es die Möglichkeit entlang des Pfades eine Skalierung vorzunehmen. Für den Verlauf des Zylinders kann also ein Skalierfaktor angegeben werden. Im Folgenden wird der nunmehr als Kegelstumpf bezeichnete Volumenkörper, wieder der Punktwolke angepasst, wobei der Anfangsradius nicht mehr verändert wird, da er bereits im vorherigen Schritt definiert wurde.

Der Weidenast hat Form angenommen und damit ist die Modellierung abgeschlossen.

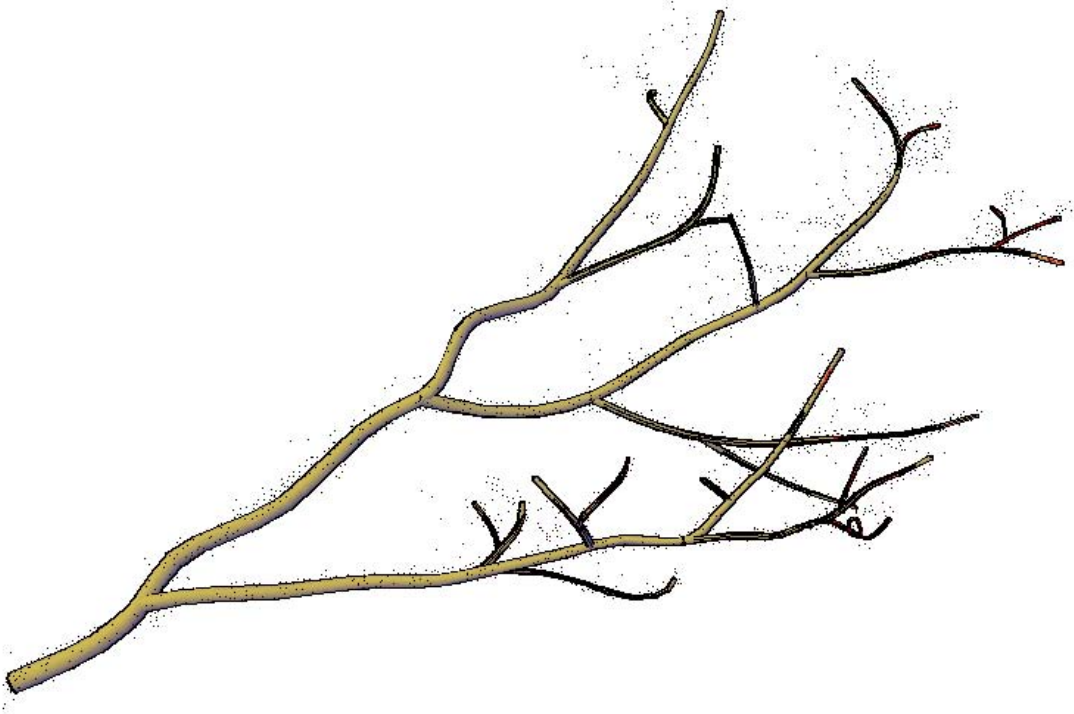


Abb. 36: Ansicht des Purpurweidenastes – Verjüngung der Zylinder in Wuchsrichtung, Civil 3D (2007)

6.1.5 Textur zuweisen

Das 3D-Modell erhält jetzt noch den Feinschliff. Um es realistisch darzustellen wurde der Oberfläche ein Material zugewiesen. Dafür wurde mit einer handelsüblichen Digitalkamera eine Detailaufnahme vom Weidenast gemacht. Es soll ein Bereich der Borke fotografiert werden, der repräsentativ für den ganzen Ast ist. Nach einer Bearbeitung in einem Fotobearbeitungsprogramm wurde das Pixelbild in Civil 3D 2007, der Oberfläche als Material zugewiesen.

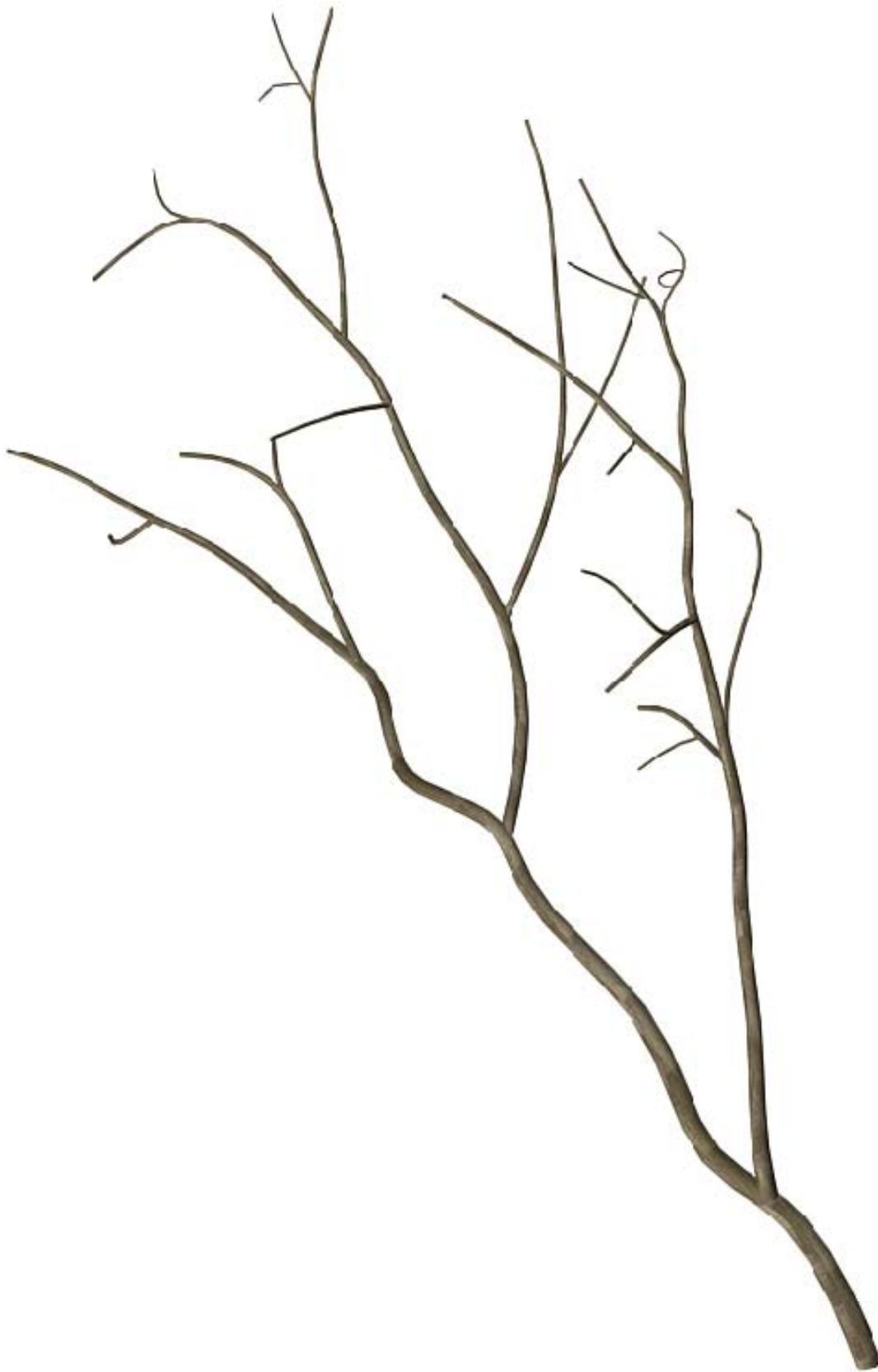


Abb. 37: Ansicht des Purpurweidenastes – 3D-modelliertes Endergebnis mit Textur, Civil 3D (2007)

Mit diesem letzten Schritt wurde nach der Modellierung die Visualisierung abgeschlossen und der Weidenast ist bereit für den Einsatz als 3D-modelliertes, ingenieurbilogisches Bauelement. Als Bauelement wäre der kleine Ast aber vorerst noch zu klein, also wird er skaliert und somit groß gemacht. Dies soll zeigen, dass es die Möglichkeit gibt, die Bauelemente in ihrer Größe zu verändern.



Abb. 38: Implementierung des 3D-modelliertes Weidenastes in ein digitales Geländemodell, Civil 3D (2007)

Einen letzten Schritt gäbe es jetzt allerdings noch: die Modellierung der gesamten Purpurweide!

6.2 MODELLIERUNG DES KALKSTEINES

Der Weg von der Punktwolke zum 3D-modellierten Stein ist hier ein Anderer, wie beim Weidenast. Der Punktwolke wird diesmal kein Regelkörper angepasst, sondern die Flächenrückführung wird mit der Vernetzung oder Vermaschung der gescannten Punkte erreicht.

Alle unten beschriebenen Aktionen wurden in **Geomagic Studio 9** (Geomagic, North Carolina, USA) durchgeführt. Obwohl die eigentliche Modellierung erst mit der Vermaschung beginnt, werden zunächst die vorab durchgeführten Filterschritte erläutert.

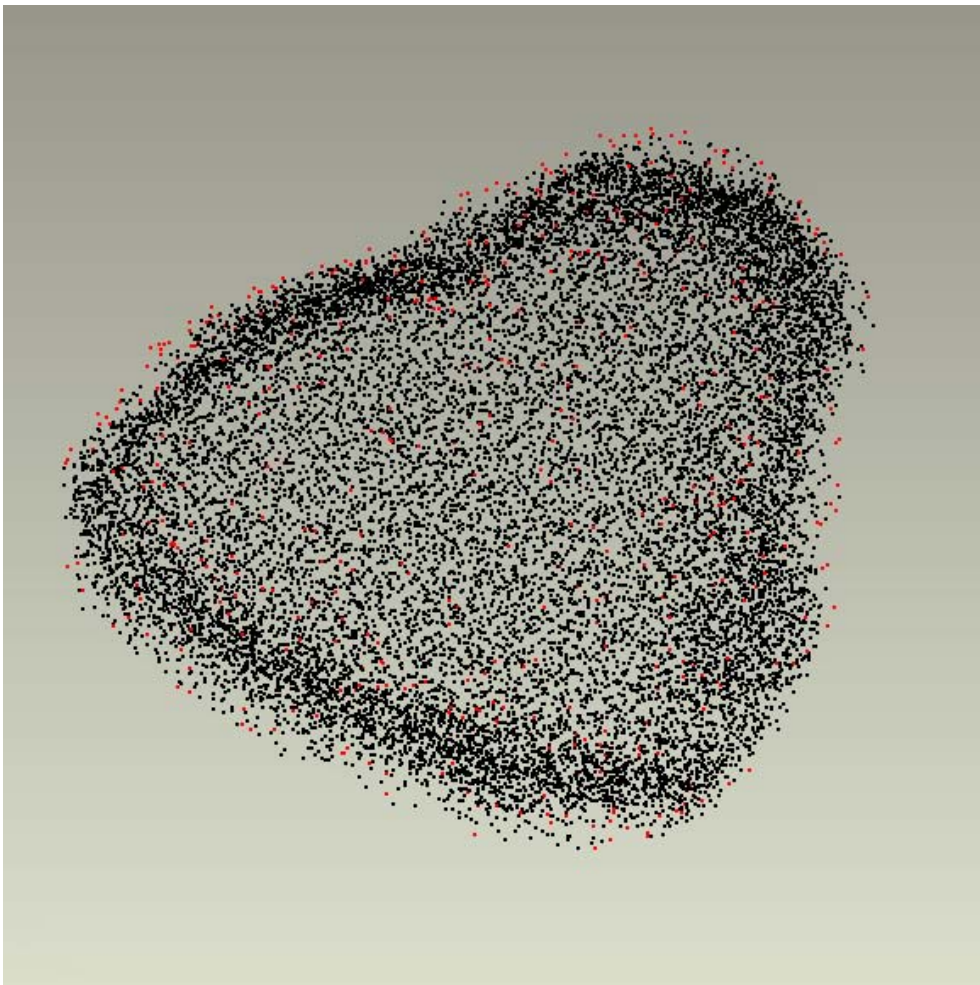


Abb. 39: Ansicht des Kalksteines mit Messrauschen, 16.700 Punkte, Geomagic (2007)

In der Abbildung ist die stark rauschende Oberfläche gut zu erkennen. Sie wird einerseits durch eine schlechte Scanauflösung und andererseits durch Fehler bei der Registrierung erzeugt. Die „wahre“ Oberfläche des Steins muss also durch Filterung und Glättung erst ermittelt werden.

6.2.1 Punktwolke säubern

Vorerst wird die ungefilterte Punktwolke (16.700 Punkte) von sogenannten Ausreißern gesäubert. Die Anzahl der Punkte kann über eine Empfindlichkeitseinstellung im Programm festgelegt werden. Wie alle weiteren Filterfunktionen, reduziert sie die Punkteanzahl.

6.2.2 Rauschen verringern

Hier wird das oben angesprochene Rauschen reduziert. Dabei werden alle Punkte zu einer Ebene zusammengezogen. Es findet eine Annäherung an die eigentliche reale Oberfläche statt. Bei dieser Verdichtung bleibt die Anzahl der Punkte gleich, sie werden nicht gelöscht.

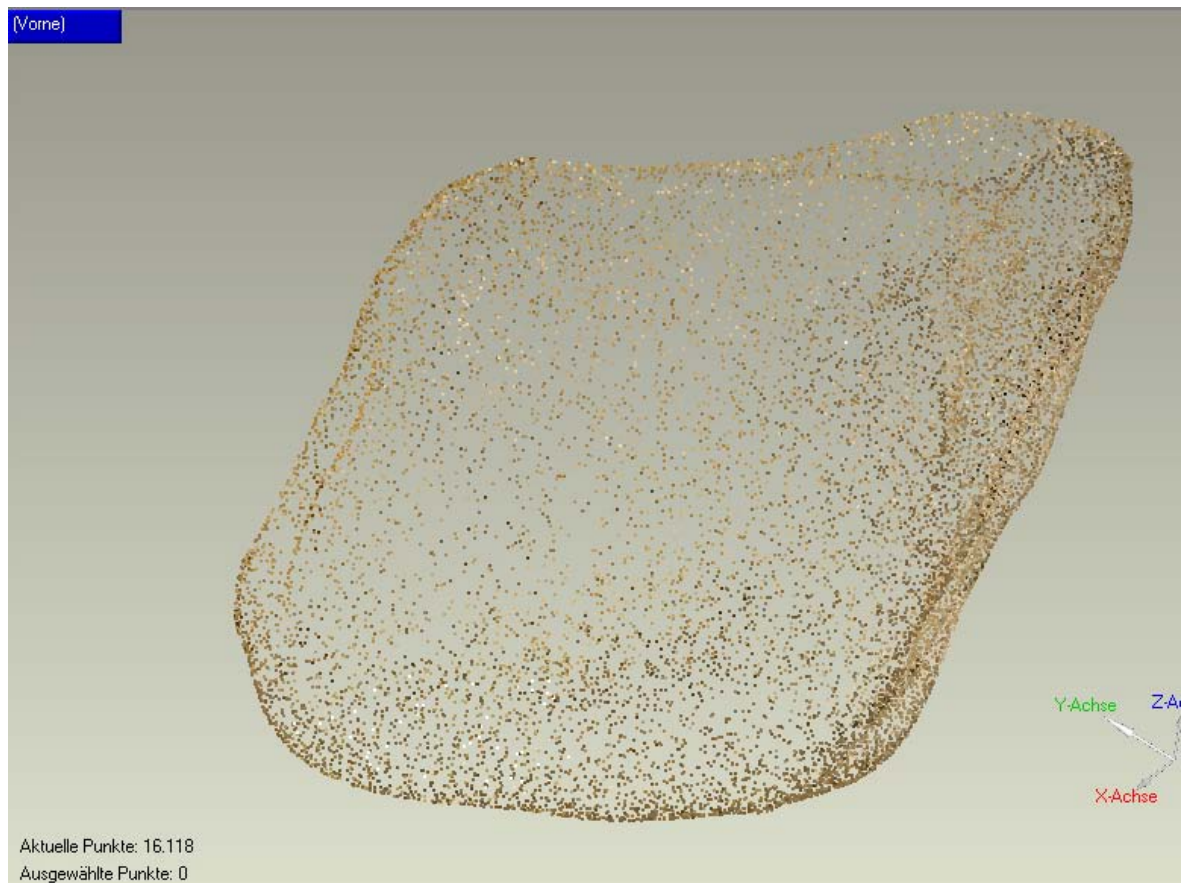


Abb. 40: Ansicht des Kalksteines – gesäuberte Punktwolke, Geomagic (2007)

Ist die Glättungsstufe zu niedrig, können vereinzelt Punkte überbleiben (siehe unten), die noch gelöscht werden müssen, um später eine tadellose Triangulation durchführen zu können.

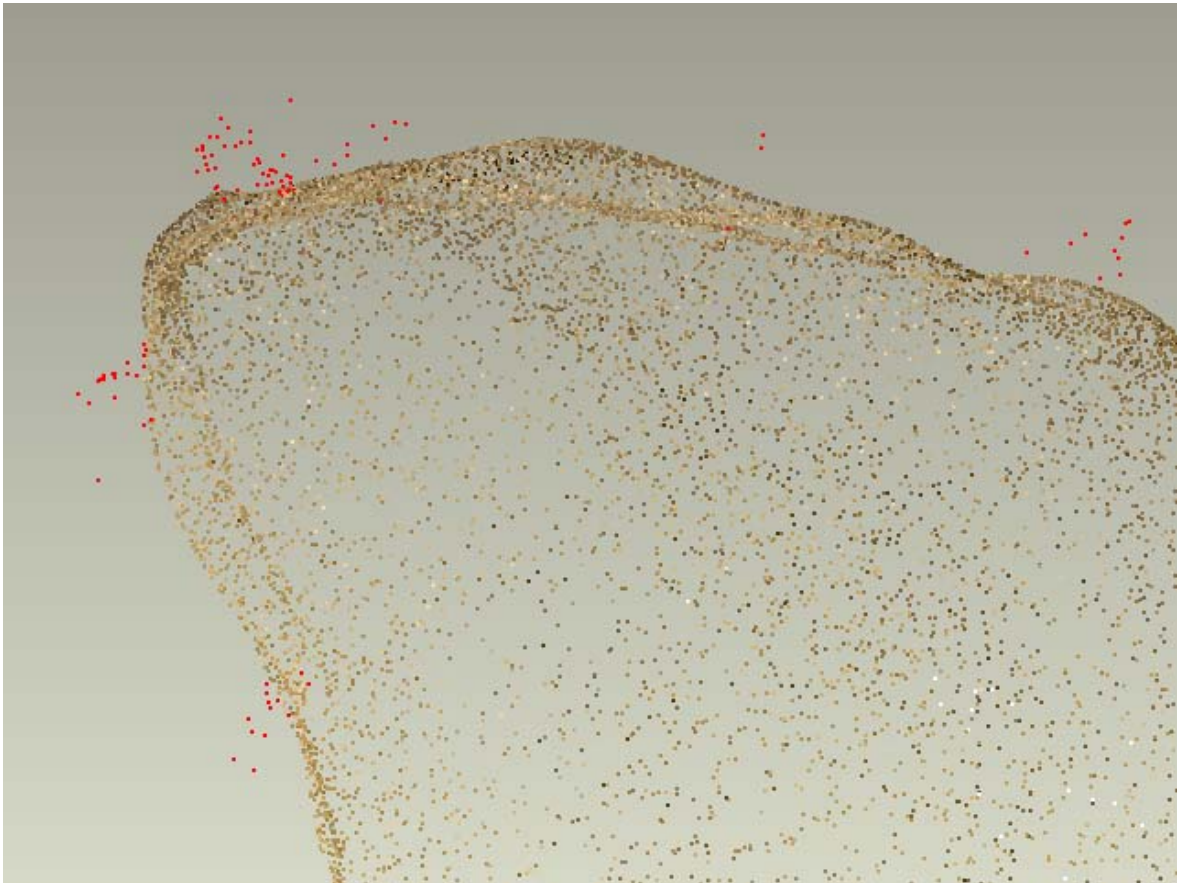


Abb. 41: Ansicht des Kalksteines – Punkte, die nicht zur Oberfläche gehören sind rot eingefärbt, Geomagic (2007)

6.2.3 Gleichmäßige Reduktion

Abhängig vom Detaillierungsgrad wird jetzt eine Reduktion der Punkte vorgenommen. Diese darf bei großen, unstrukturierten Oberflächen stark, bei Objekten mit vielen Details nur schwach ausgeführt werden. Unterschiedliche Reduktionseinstellungen ermöglichen unter anderem die Definition einer Obergrenze von Punkten.

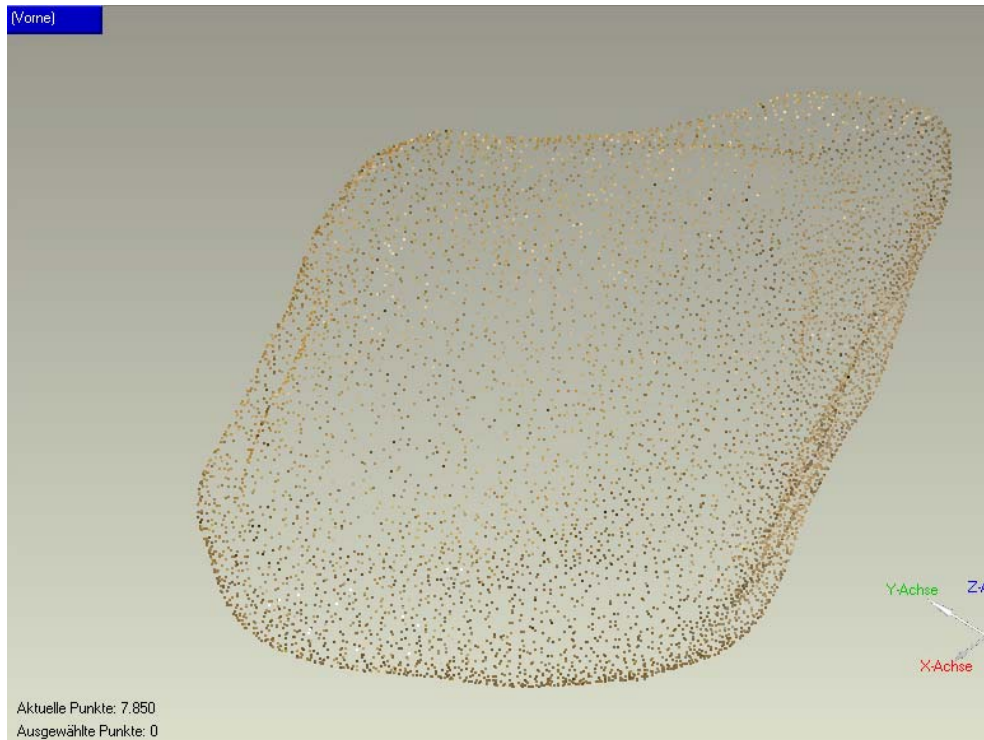


Abb. 42: Ansicht des Kalksteines – Obergrenze von 8.000 Punkten, Geomagic (2007)



Abb. 43: Ansicht des Kalksteines – Reduktion auf 2.200 Punkte, Geomagic (2007)

6.2.4 Punkte triangulieren – Vermaschung

Nachdem sämtliche Filter- und Reduktionsfunktionen an der Punktwolke durchgeführt wurden, ist der nächste Schritt die Triangulation der Punkte. Eine genaue Beschreibung dieser Flächenbildung befindet sich im Kapitel Datenauswertung.

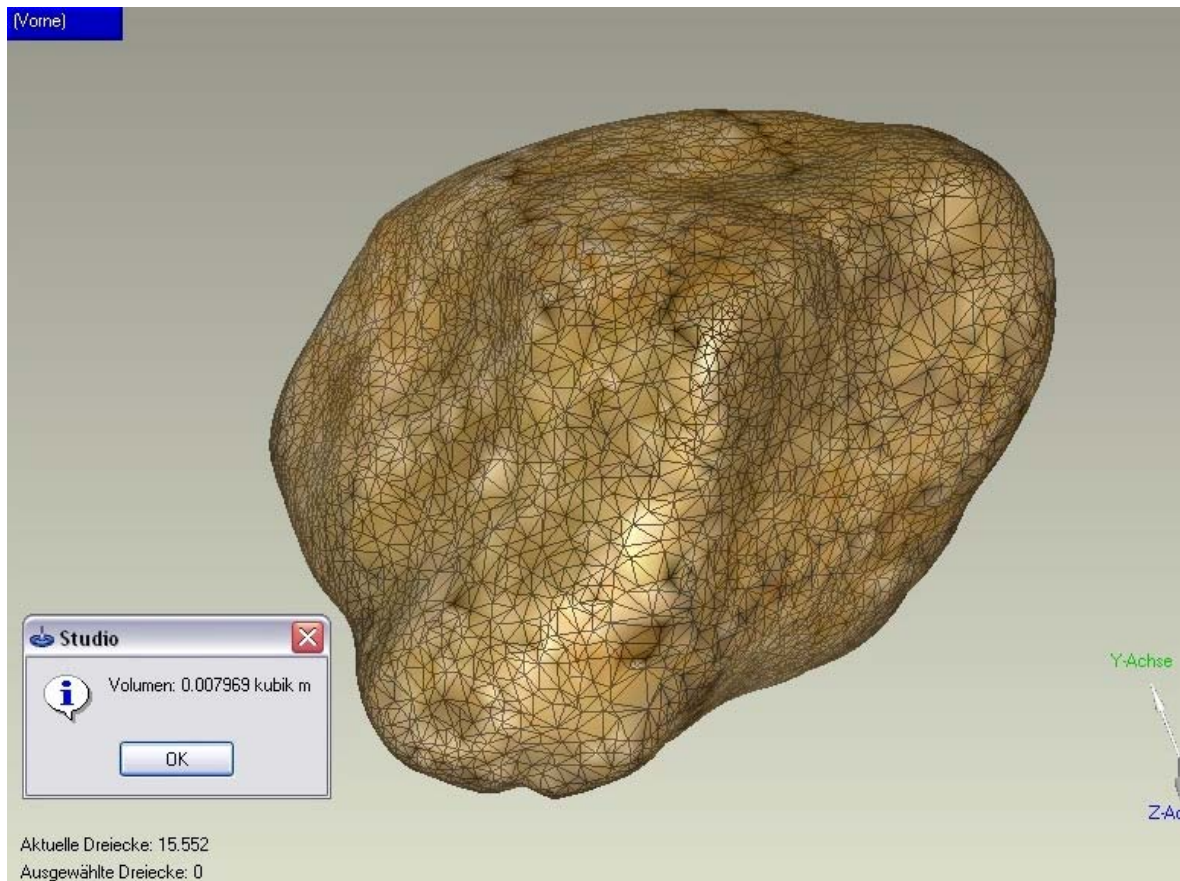


Abb. 44: Ansicht des Kalksteines – triangulierte Oberfläche, Geomagic (2007)

Die Abbildung oben zeigt die über 15.000 Dreiecksflächen, überlagert mit den Farbwerten der einzelnen Punkte. Nach der sorgfältigen und fehlerfreien Vermaschung kann erstmals das Volumen des Körpers berechnet werden. Das Modell wird daher auch als „wasserdicht“ bezeichnet.

6.2.5 Flächenrückführung mittels NURBS

NURBS ist die Abkürzung für **Non-Uniform Rational B-Splines**.

Die sogenannten **Freiformflächen** sind immer durch **vier Kanten** begrenzt, wobei die Kanten als B-Splines (Basis-Splines) definiert sind. **B-Splines** sind wiederum glatte, 3D-Kurven mit einem Anfangs- und einem Endpunkt.

Diese vier Kanten spannen ein Viereck auf, das durch zwei Parameter (u, v) in ein Flächengitter mit Kontrollpunkten unterteilt wird. Mit den Kontrollpunkten an den Rändern lassen sich Randbedingungen erfüllen. Dazu zählen Steigung und Krümmung der Kanten, die für einen nahtlosen und sanften Übergang zwischen zwei benachbarten NURBS sorgen.

Prinzipiell kann mit NURBS jede in der Natur vorkommende oder technisch hergestellte Form dargestellt, abgebildet oder konstruiert werden. Diese Freiformflächen sind vor allem bei komplexen Strukturen notwendig, um die einzelnen Flächen und Körper mathematisch beschreiben zu können. Es können mit dieser aber auch einfache Regelkörper, wie Kugel, Zylinder und Kegel dargestellt werden.

Eine genaue Beschreibung der Freiformfläche hat somit den Vorteil, dass dieses **mathematische Modell** verändert werden kann. Die Kurven können geglättet und fast beliebig an Oberflächen angepasst werden. Ein hervorragendes Modellierungswerkzeug, mit dem alle Möglichkeiten der Modellierung offen stehen. In unserem Fall benötigen wir dieses Werkzeug um Flächen rückzuführen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, auf diese Art komplexe 3D-Körper zu erstellen, die in einem weiteren Schritt animiert werden können. Viele Zeichentrickfiguren werden aus solchen NURBS modelliert.

Der Übergang von Polygonflächen zu NURBS ergibt daher folgende **Vorteile**:

- **Reduktion der Datenmenge**
- Lokale Verformungen
- Verzerrung an Raumflächen
- **gängiges Austauschformat** für CAD-Programme
- **Analysen** sind möglich (Krümmung der Fläche)

(ROHRBERG, 2007)

Neben einer Reduktion der Datenmenge, dem Durchführen von Analysen, zählt aber auch der visuelle Eindruck. Die Freiformflächen geben dem Objekt ein realistisches Aussehen und beinhalten Oberflächendetails.

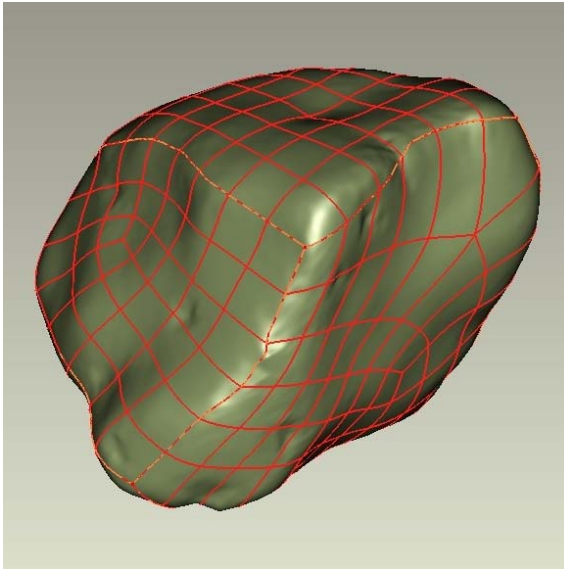


Abb. 45: NURBS-Modell des Kalksteines – 226 NURBS-Flächen, Geomagic (2007)

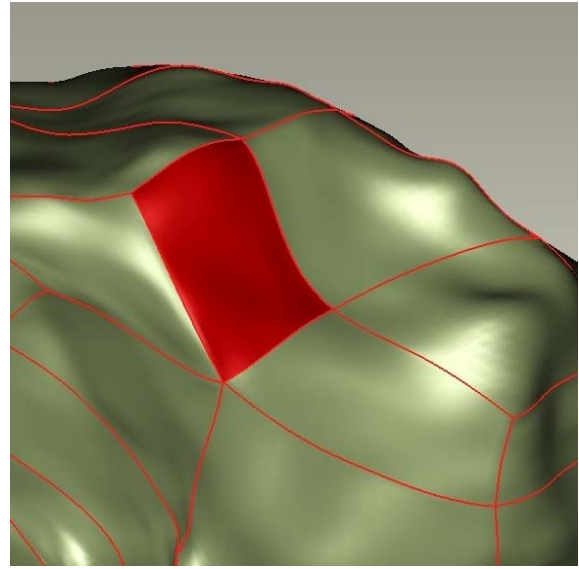


Abb. 46: NURBS-Modell des Kalksteines – einzelne NURBS-Fläche, Geomagic (2007)

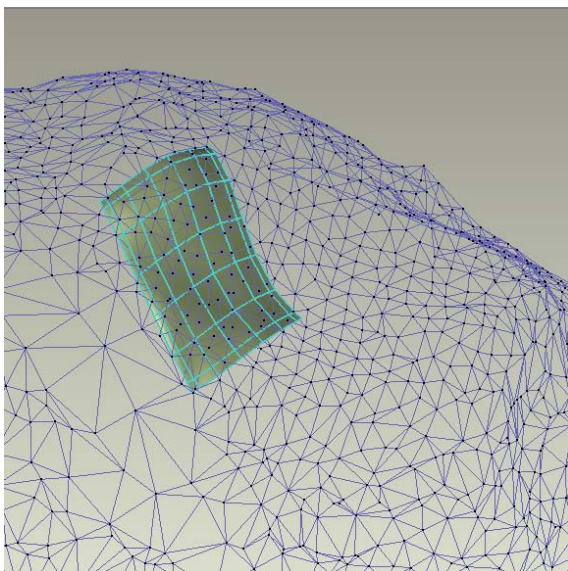


Abb. 47: NURBS-Modell des Kalksteines – Polygonnetz mit überlagerter NURBS, Geomagic (2007)

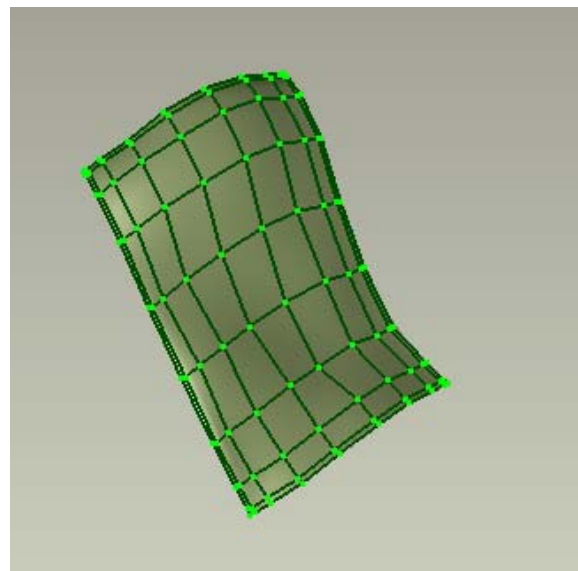


Abb. 48: NURBS-Modell des Kalksteines – NURBS mit Kontrollpunkte, Geomagic (2007)

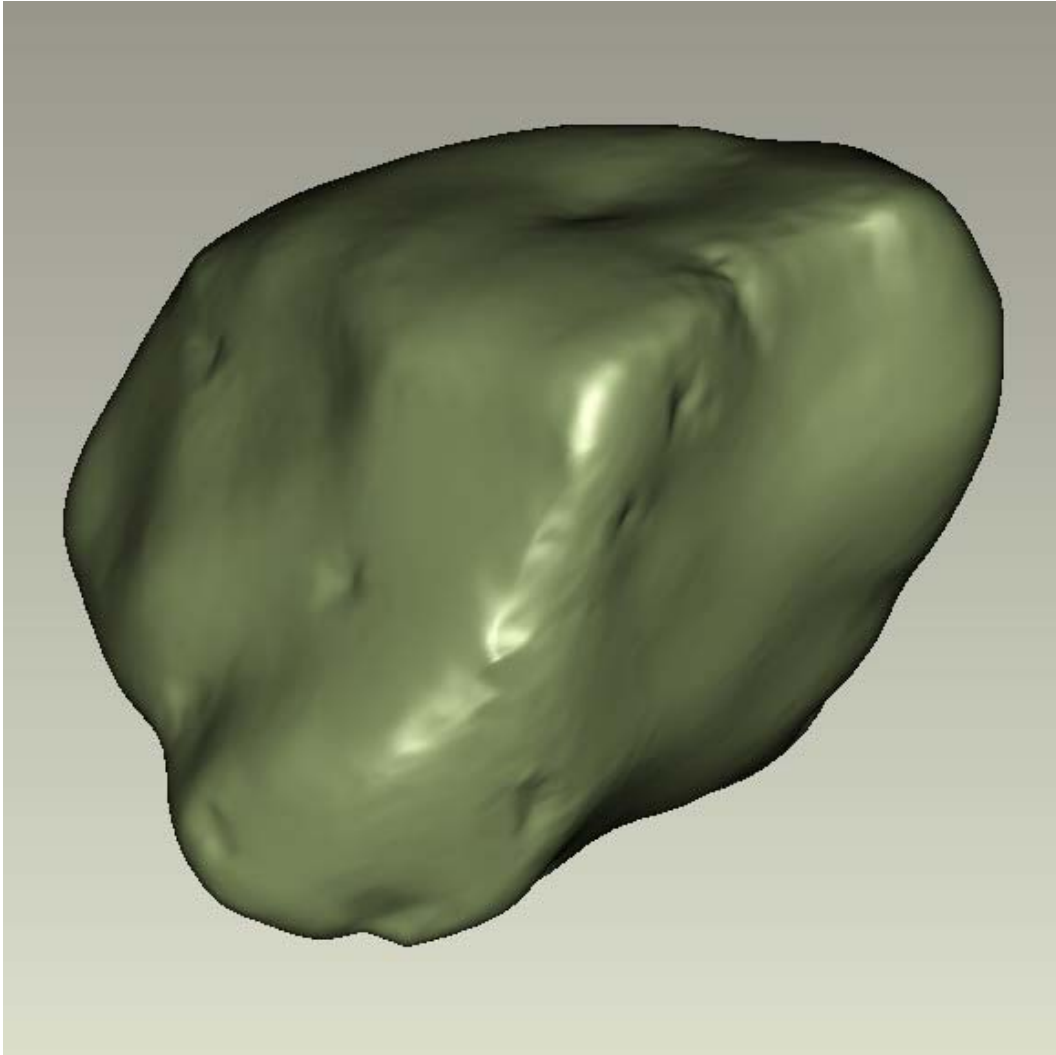


Abb. 49: NURBS-Modell des Kalksteines, Geomagic (2007)

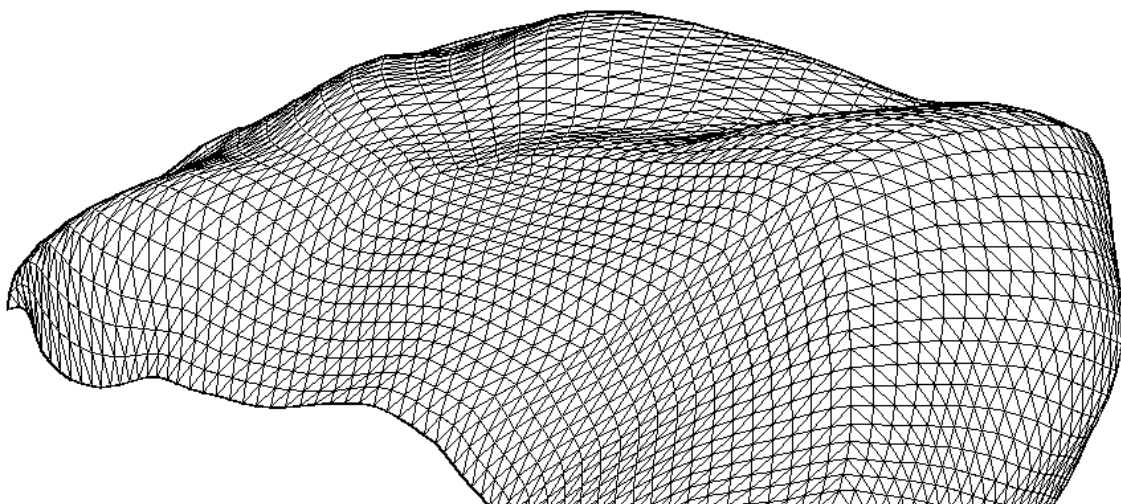


Abb. 50: Polygonmodell des Kalksteines – importiert als NURBS-Modell in Autodesk Civil 3D (2007)



Abb. 51: Polygonmodell des Kalksteines – texturiert in Autodesk Civil 3D (2007)

6.3 MODELLIERUNG DES AHORN-WURZELSTOCKS

Die Modellierung des Ahorn-Wurzelstocks konnte nicht vollständig durchgeführt werden. Das Messrauschen war im Gesamten zu groß, um Details am Wurzelstock abbilden zu können. Die Modellierung wurde wie beim Kalkstein in Geomagic Studio 9 durchgeführt. Die Abbildung unten zeigt, dass auch nach großzügiger Filterung der Punktwolke nur wenige Starkwurzeln eindeutig definiert werden konnten.

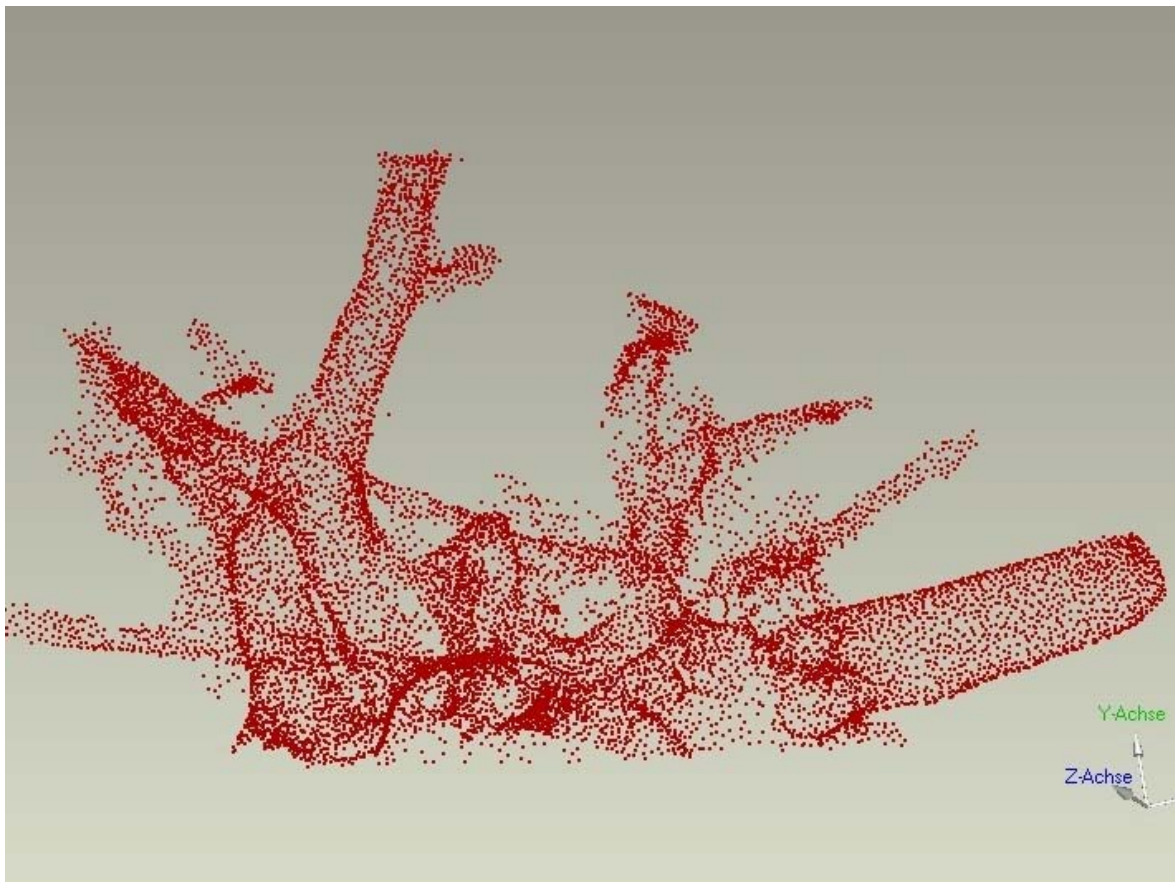


Abb. 52: Ansicht des Ahorn-Wurzelstockes – Reduktion der Scanpunkte, Geomagic (2007)

Die einzelnen Starkwurzeln konnten zwar modelliert werden, der Rest wurde aber wild vermascht und somit war es unmöglich, einen 3D-Körper zu modellieren.

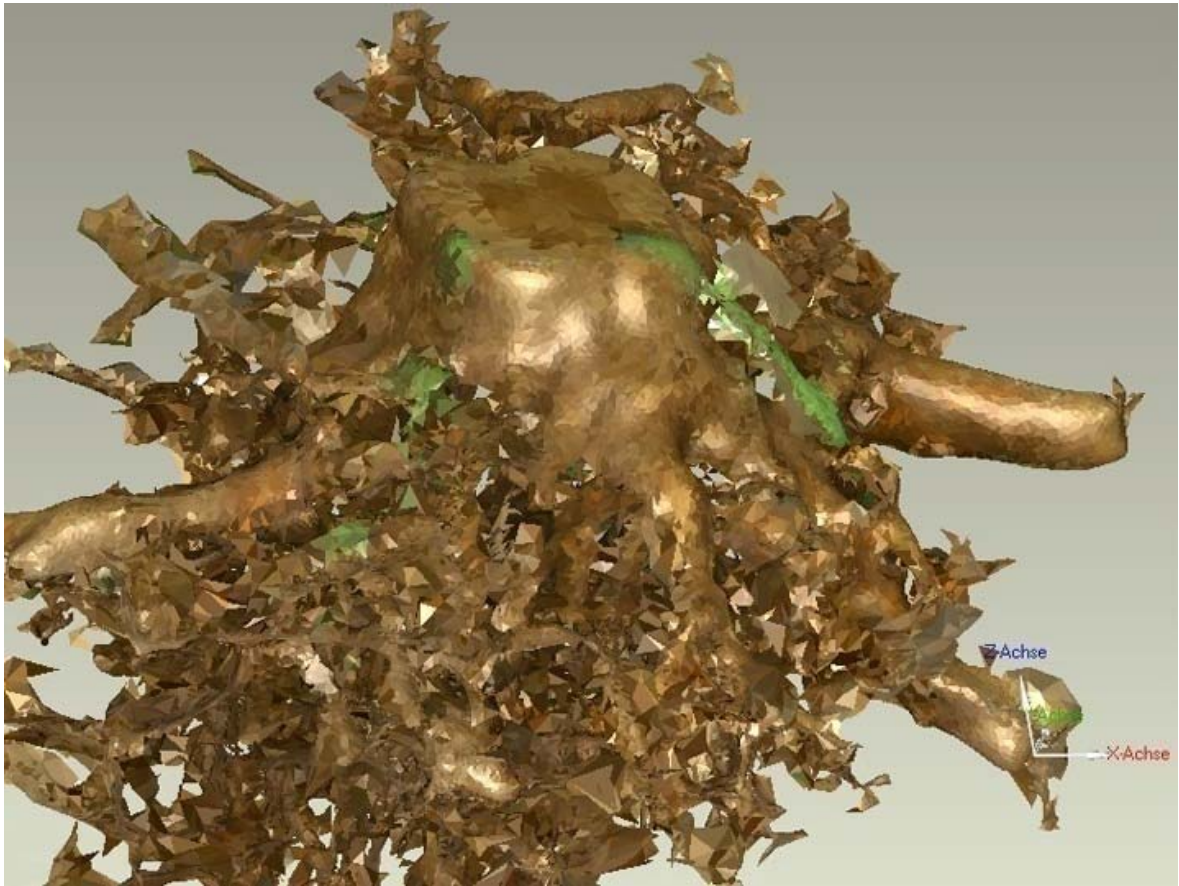


Abb. 53: Ansicht des Ahorn-Wurzelstockes – trianguliert, Geomagic (2007)

7 Diskussion

Diese Diplomarbeit verfolgte das Ziel, ingenieurbioologische Bauelemente in allen drei Dimensionen zu erfassen, um daraus 3D-Modelle zu generieren, die anschließend in einer CAD-Software verwendet werden können.

Anfangs stand noch die Visualisierung der ingenieurbioologischen Bauelemente im Vordergrund, doch uns wurde bald bewusst, dass der Aufwand dafür sehr groß ist. Viel entscheidender wurde der Aspekt der **Massenberechnung**. So gibt die Verteilung von Wurzeln Aufschluss über die Verbundwirkung von Boden und Vegetation, und ist daher ein Maß für die Stabilität von ingenieurbioologischen Bauwerken. Bei hydraulischen Berechnungen und Modellen ist die Biomasse der überirdischen Sprosse eine wichtige Einflussgröße. Sie gibt unter anderem Auskunft über die Rauigkeit von Geländeoberflächen.

Der **Faktor Zeit** ist für den gesamten Prozess, von der Datenaufnahme bis hin zur Datenauswertung und zur Modellierung, sehr entscheidend. Er klärt mitunter auch die Frage, ob Laserscanning oder die Nahbereichsphotogrammetrie in diesem Bereich überhaupt wirtschaftlich durchführbar sind.

Die reine **Datenaufnahme** mit dem Laserscanner und die photogrammetrischen Aufnahmen nehmen, bezogen auf den gesamten Prozess, am wenigsten Zeit in Anspruch. Der Aufbau der Messinstrumente und die Messungen können von einem eingespielten Team rasch durchgeführt werden.

Die aufwendige **Inszenierung der Objekte** hat bei unseren Untersuchungen viel Zeit benötigt, hätte aber noch umfangreicher ausfallen können, zum Beispiel mit einer Markierung unterschiedlicher Sektoren am Objekt selbst. Diese Vorbereitungen entfallen Großteils, wenn vor Ort gescannt oder photogrammetrisch aufgenommen wird.

Entscheidend für die vollständige Erfassung der Objekte ist die Auswahl der Scanner- und Kamerastandorte. Sie setzt viel Erfahrung voraus, da möglichst wenige Scanner- und Kamerastandorte eine optimale Aufnahme garantieren.

Im Vergleich zum folgenden **Postprocessing** stellen die bisherigen Prozessabläufe aber einen geringen Zeitaufwand dar. Dabei wurden zwei Lösungswege beschrieben. Ausgangslage war bei Beiden die Selbe – eine **Punktwolke**. Die Isolierung einzelner Bereiche in den Punktwolken des Wurzelstockes und der Purpurweide hat die Orientierung erleichtert.

Einer der beiden Lösungswege beschrieb die **Modellierung des Weidenastes** in der Zeichensoftware Civil 3D 2007. Hier wurden auf mehr oder weniger einfache Weise, Regelkörper erstellt. Die Werkzeugpalette der Software reichte dafür vollkommen aus. Die Erstellung der Regelkörper hat jedoch viel mit „Handarbeit“ zu tun und ist aus diesem Grund sehr zeitintensiv.



Bei der **Modellierung des Kalksteines** war die Software gefordert. Von der Scan-Software RiSCAN PRO mussten wir Abschied nehmen und auf Geomagic Studio 9 umsteigen, denn RiSCAN PRO war nicht im Stande eine 3D-Vermaschung durchzuführen. Diese Software unterstützt lediglich eine 2,5D-Triangulation, wie sie bei digitalen Höhenmodellen vorkommt. In Geomagic Studio 9 können Objekte 3D modelliert werden und zudem ist die Software auf große Datenmenge ausgelegt und besitzt viele nützliche Filterfunktionen. Hier ist also weniger „Handarbeit“ notwendig.



Probleme bereitete uns der **Wurzelstock**. Hier war es nicht möglich ein wasserdichtes Modell zu erstellen, da die Punktwolke ein zu großes Rauschen aufwies.

Die photogrammetrischen Aufnahmen sorgten für die gewünschte Genauigkeit, hätten aber wiederum viel „Handarbeit“ zur Folge. Zudem war die Orientierung in manchen Sektoren der Weide und des Wurzelstockes extrem schwierig. Aus diesem Grund wurde die Auswertung nicht vollendet.

Beim Laserscanning erreicht das **Verhältnis** von **Messdauer zu Datenverarbeitung** schnell einen Faktor von **1:15** oder höher (PETERSEN, 2006). Dieser Faktor ist dafür ausschlaggebend, dass viele Ingenieurbüros zwar die Scanaufnahmen durchführen und die Punktwolken säubern, aber dann als solche dem Kunden verkaufen. Die Datenauswertung wird vom Kunden selbst vorgenommen. Eine vollständige Modellierung wird nur selten gemacht.

8 *Ausblick*

In der Ingenieurbiologie kann Laserscanning als präzise Aufnahmemethode zwei wichtige Funktionen übernehmen:

- die Grundlage für ingenieurbiologische Planungen darstellen und
- bereits fertig ausgeführte Bauwerke in ihrem Bestand aufnehmen

Ein Vergleich der Aufnahmedaten von Geplantem mit Daten der Bestandsaufnahme kann Mängel in der Bauausführung aufzeigen oder Schäden nach Hochwasserereignissen dokumentieren. Zudem können mit kontinuierlichen Messungen (Monitoring) Aussagen über das Wachstum der oberirdischen Biomasse getroffen werden und Veränderungen dahingehend, notwendige Pflegemaßnahmen aufzeigen.

Die Berechnung der unter- und oberirdischen Biomasse von Pflanzen verlangt nach einem raffinierten Aufnahmeverfahren. Ob Laserscanning, Nahbereichsphotogrammetrie oder eine Kombination aus Beidem die ideale Aufnahmemethode ist, wird noch einige Forschungsprojekte beschäftigen und soll die Zusammenarbeit der beiden Institute IVFL und IBLB weiterführen.

Neben der technischen Fragestellung, welches Messverfahren sich am besten eignet, stellt sich hier auch die wirtschaftliche Frage: reicht es wenn hier anfangs kostendeckend gearbeitet wird, oder steht der gewinnbringende Faktor immer ganz oben?

Beim Weidenast und beim Kalkstein ist es uns gelungen einen 3D-Körper zu modellieren, ihn zu visualisieren und zusätzlich Information über sein Volumen zu erhalten. Der Schritt zur Biomassenberechnung ist also nur mehr ein Kleiner.

Aber das ist eine andere Geschichte...

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wurzelstöcke, modelliert mit der Software Autodesk Civil 3D 2006 (Autodesk, California, USA)	10
Abb. 2: Wuchsformen und -größen europäischer Baum- und Strauchweiden (Schiechtel/ Stern, 2002)	14
Abb. 3: Steinklassen für den Flussbau.....	20
Abb. 4: Erfassung repräsentativer Punkte (Ecken, Kanten) und der gesamten Fläche, mittels Laserscanner	22
Abb. 5: Distanzmessung mit Laserscanner.....	24
Abb. 6: Ergebnis eines Laserscans.....	25
Abb. 7: Airborne Scan von Schruns-Tschaguns (Quelle: Land Vorarlberg, VoGIS, 2007)	27
Abb. 8: Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006)	30
Abb. 9: Ausgraben der Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006).....	30
Abb. 10: Transport der Purpurweide im Versuchsgarten Eßling (12.2006)	31
Abb. 11: Kalksteine mit Drahtbefestigung zum Abhängen von der Deckenkonstruktion (12.2006)	32
Abb. 12: Freilegen des Wurzelstocks, Versuchsgarten Eßling (12.2006)	33
Abb. 13: zu schwer für den „Traktor“, Versuchsgarten Eßling (12.2006)	33
Abb. 14: Hochdruckreinigung – nicht ideal, Versuchsgarten Eßling (12.2006)	33
Abb. 15: Abspülen ohne Hochdruck hat funktioniert, Versuchsgarten Eßling (12.2006)	33
Abb. 16: Laserscanner RIEGL LMS-Z420i im Einsatz, Technikum/ Schwackhöferhaus BOKU (12.2006)	35
Abb. 17: Datenblatt RIEGL LMS-Z420i (Quelle: Firma RIEGL LMS GmbH).....	36
Abb. 18: Orientierung der Koordinatensysteme Scanner – Kamera (RIEGL 2005)	36
Abb. 19: gut reflektierende Passpunkte, tachymetrisch eingemessen, Technikum BOKU (12.2006).....	40
Abb. 20: Aufnahmepositionen des Scanners und Kalksteine (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007)	42
Abb. 21: Aufnahmepositionen des Scanners und Kalksteine (Ansicht), RiSCAN PRO (2007).....	42
Abb. 22: Aufnahmepositionen des Scanners und Purpurweide (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007).....	43
Abb. 23: Aufnahmepositionen des Scanners und Purpurweide (Ansicht), RiSCAN PRO (2007)	43
Abb. 24: Aufnahmepositionen des Scanners und Ahorn-Wurzelstock (Draufsicht), RiSCAN PRO (2007)	44
Abb. 25: Aufnahmepositionen des Scanners und Ahorn-Wurzelstock (Ansicht), RiSCAN PRO (2007)	44
Abb. 26: photogrammetrische Aufnahme – Purpurweide, Technikum BOKU (02.2007)	47
Abb. 27: photogrammetrische Aufnahme – Ahorn-Wurzelstock, Technikum BOKU (02.2007)	47
Abb. 28: photogrammetrische Aufnahme mit Nikon D2X, 28mm Objektiv, Technikum BOKU (02.2007)	48
Abb. 29: Ergebnis des Laserscans – zusammengefügte Punktwolke, RiSCAN PRO (2007)	51
Abb. 30: Ergebnis des Laserscans – isolierte Punktwolke der Purpurweide, RiSCAN PRO (2007)	51
Abb. 31: Delaunay Triangulation.....	54
Abb. 32: Stereobildauswertung in ERDAS Imagine 9.1 von Leica Geosystems (2007).....	58
Abb. 33: Ansicht des Purpurweidenastes mit minimalem Messrauschen, Civil 3D (2007).....	60
Abb. 34: Ansicht des Purpurweidenastes – Definition von Splines, Civil 3D (2007)	61
Abb. 35: Ansicht des Purpurweidenastes – Erstellung von Zylindern entlang der Splines, Civil 3D (2007)	62

Abb. 36: Ansicht des Purpurweidenastes – Verjüngung der Zylinder in Wuchsrichtung, Civil 3D (2007)	63
Abb. 37: Ansicht des Purpurweidenastes – 3D-modelliertes Endergebnis mit Textur, Civil 3D (2007).....	64
Abb. 38: Implementierung des 3D-modelliertes Weidenastes in ein digitales Geländemodell, Civil 3D (2007)	65
Abb. 39: Ansicht des Kalksteines mit Messrauschen, 16.700 Punkte, Geomagic (2007)	66
Abb. 40: Ansicht des Kalksteines – gesäuberte Punktwolke, Geomagic (2007)	68
Abb. 41: Ansicht des Kalksteines – Punkte, die nicht zur Oberfläche gehören sind rot eingefärbt, Geomagic (2007)	69
Abb. 42: Ansicht des Kalksteines – Obergrenze von 8.000 Punkten, Geomagic (2007)	70
Abb. 43: Ansicht des Kalksteines – Reduktion auf 2.200 Punkte, Geomagic (2007)	70
Abb. 44: Ansicht des Kalksteines – triangulierte Oberfläche, Geomagic (2007)	71
Abb. 45: NURBS-Modell des Kalksteines – 226 NURBS-Flächen, Geomagic (2007)	73
Abb. 46: NURBS-Modell des Kalksteines – einzelne NURBS-Fläche, Geomagic (2007).....	73
Abb. 47: NURBS-Modell des Kalksteines – Polygonnetz mit überlagerter NURBS, Geomagic (2007).....	73
Abb. 48: NURBS-Modell des Kalksteines – NURBS mit Kontrollpunkte, Geomagic (2007)	73
Abb. 49: NURBS-Modell des Kalksteines, Geomagic (2007)	74
Abb. 50: Polygonmodell des Kalksteines – importiert als NURBS-Modell in Autodesk Civil 3D (2007)	74
Abb. 51: Polygonmodell des Kalksteines – texturiert in Autodesk Civil 3D (2007).....	75
Abb. 52: Ansicht des Ahorn-Wurzelstockes – Reduktion der Scanpunkte, Geomagic (2007).....	76
Abb. 53: Ansicht des Ahorn-Wurzelstockes – trianguliert, Geomagic (2007)	77

Literaturverzeichnis

BAUMANN Norbert, et al. (2006): **Fließgewässer erhalten und entwickeln – Praxisfibel zur Pflege und Instandhaltung**. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

FINK Siegfried (1980). **Anatomische Untersuchungen über das Vorkommen von Spross- und Wurzelanlagen im Stammbereich von Laub- und Nadelbäumen**. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. Heft 9 und 10.

FLORINETH Florin (2004): **Pflanzen statt Beton**. Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek. Platzer Verlag. Berlin-Hannover.

FLORINETH Florin, RAUCH Hans Peter (2002): **Studienblätter zur Vorlesung Ingenieurbiologie**. Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie, Arbeitsbereich Ingenieurbiologie und Landschaftsbau. Universität für Bodenkultur Wien.

HESSE Christian, NEUMANN Ingo (2007): **Automatische Objekterfassung und Modellierung durch kinematisches Laserscanning**, Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Thomas Luhmann, Christina Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag. Heidelberg.

HÖRANDL Elvira, FLORINETH Florin, HADACEK Franz (2002): **Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten**. Eigenverlag des Arbeitsbereiches Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie. Universität für Bodenkultur Wien.

LUHMANN Thomas (2002): **Photogrammetrie und Laserscanning**, Anwendung für die As-Built-Dokumentation und Facility Management. Herbert Wichmann Verlag. Heidelberg.

MAIER Bernhard, HOLLAUS Markus (2007): **Der dreidimensionale Wald**. Die kleine Waldzeitung Nr.3/07. Vorarlberger Waldverein. Dornbirn.

NEUBAUER Wolfgang (k.A.): **Test-Dokumentation Laser Scanner: Leipzig – Petersstraße 33**, Grabung L 103, Karstadt Areal, Bericht an das Sächsische Landesamt für Archäologie, VIAS – Vienna Institute for Archaeological Science.

NIEMEIER Wolfgang (2005): **Modellierung – Ableitung geometrischer Informationen aus Punktwolken**, Terrestrisches Laserscanning (TLS), Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 48. Wißner-Verlag. Augsburg.

NIEMEIER Wolfgang, THOMSEN Sven, SCHÄFER Markus (2002): **3-D-Geometrierfassung mit terrestrischen Laserscannern**, Photogrammetrie und Laserscanning, Anwendung für die As-Built-Dokumentation und Facility Management. Thomas Luhmann (Hrsg.). Herbert Wichmann Verlag. Heidelberg.

PETERSEN Michael (2006): **Ist Laserscanning wirtschaftlich einsetzbar?** Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 51. Wißner-Verlag. Augsburg.

RESSL Camillo (k.A.): **Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen und Nahbereichs – Laserscannings**, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.

RIEGER Wolfgang et al. (k.A.): Landesweite Datenerhebung mit **ALS: Technologische Herausforderungen und vielseitige GIS-Anwendungen**, Erstellung eines Laser-DHM für Vorarlberg 2002-2005. http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/cb_agit_2005.pdf

ROHRBERG Klaus (2006): **Reale 3D-Modelle aus 4D-Punktwolken**, Referat FH Oldenburg, Download von <http://www.3dreal.de/>, Windhager 3D-real GmbH, letzter Zugriff: 20.01.2008

ROHRBERG Klaus (2007): **Modellextraktion von Flächen und Körpern aus Punktwolken**, Vortrag bei den 6.Oldenburger 3D-Tagen, Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laser-Scanning. Oldenburg.

WEINBACHER Patrick (2007): **Weidenspreitlagen in Südtirol**, Diplomarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, BOKU Wien.

ZENZ Walter (2006): **Heckenbuschlagen in Südtirol**, Diplomarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, BOKU Wien.