



Utveckling av metod för sprickanalys

VIKTOR DAVIDSSON and JENS LANNÉR

Geotechnical Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--25/5075--SE (1-37) | ISSN 0349-4977 MASTER'S DISSERTATION

ANISOTROPT SUBGLACIALT SEDIMENT Utveckling av metod för sprickanalys

VIKTOR DAVIDSSON and JENS LANNÉR

Supervisor: ERIKA TUDISCO, Associate Professor, Geotechnical Engineering, LTH, Lund. Assistant Supervisors: SVEN LUKAS, Senior Lecturer, Faculty of Science / Dept. of Geology, LU together with YOHANEZ ARMEDIAZ, MSc, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund. Examiner: SUSANNE HEYDEN, Associate Professor, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund.

> Copyright © 2025 Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden. Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, February 2025 (*Pl*).

For information, address: Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden. Homepage: www.geoteknik.lth.se

Abstract

In order to make models and predict our surroundings, underlying theories with empirical data are often required. Subglacial sediments have long been covered by glaciers and are often inaccessible for investigation. As glaciers melt away and crevasses within the glacier provide access to subglacial sediment, we utilise a rare opportunity to study this material, produce empirical data, and test existing theories.

The hydraulic and mechanical properties are fundamental for determining the sediment's ability to support infrastructure and buildings or planning interventions against the spread of environmentally hazardous substances in the event of accidents. To improve the knowledge of subglacial sediments and connect disciplines such as hydrology, geotechnics and glaciology, undisturbed sediment samples that have not been affected by postglacial processes will be examined. The methods used in this work are triaxial tests and image analysis. To examine the effect of anisotropy in subglacial sediments, the shear strength is analyzed using the triaxial test, a common method for geotechnical investigations. Cracks within the sediment are studied through scanned images of the test samples, allowing an analysis of their internal structures. The scan is performed using an X-ray computed tomography device. This structure is then analysed, and the orientation of the cracks is calculated.

Sediment samples enclosed in rubber membranes were mounted in the triaxial test equipment. An ambient pressure created by water simulated conditions at a certain depth. The internal water pressure in the test samples, relative to the surrounding pressure indicated how well the samples were water saturated. To mimic conditions beneath a glacier, a water-saturated sample was essential. However, at the start of the testing there were problems with air pockets in the system and unreasonable timeframes for achieving saturation. The triaxial tests were therefore not completed.

The analysis of scanned images involved several steps. Different image processing algorithms were applied to the scanned images in order to ultimately isolate cracks and calculate orientation. The result showed a plane fitted to points included along a crack which describes the orientation of the same crack.

In order to improve the knowledge of subglacial sediments and the ability to determine the characteristics of sediments in different areas, there are opportunities to revise the method for the use of the triaxial test. The image analysis gives an indication of how the fracture structure is orientated in the sediment. The extent to which it represents the larger geological body can be investigated further. The calculations performed to analyse the scanned images can be further developed, which can make the method more effective in providing a better understanding of the sediment's internal structure and an indication of its geotechnical and hydrological properties.

Sammanfattning

För att göra modeller och förutsäga vår omgivning krävs det ofta bakomliggande teorier med empiriska data. Subglacialt sediment har länge varit täckt av glaciärer och oåtkomliga att undersöka. Då glaciärer smälter bort och raviner i glaciärer ger åtkomst till subglaciala sediment finns det nu möjlighet att studera materialet och ta fram empiriska data, samt testa befintliga teorier.

De hydrauliska och mekaniska egenskaperna för subglacialt sediment är grundläggande för att avgöra dess förmåga att bära infrastruktur och byggnader eller planera insatser mot spridning av miljöfarliga ämnen i marken vid olyckor. För att förbättra kunskapen om subglaciala sediment och koppla samman discipliner som hydrologi, geoteknik och glaciologi ska ostörda sedimentprover av sediment undersökas, vilka inte har påverkats av postglaciala effekter. De metoder som i detta arbete används är triaxialtest och bildanalys. För att undersöka effekten av anisotropin i det subglaciala sedimentet skall skjuvhållfastheten undersökas med triaxialtest, en vanlig metod för geotekniska undersökningar. Sprickor i sedimentet studeras med hjälp av skannade bilder på provkropparna som ger möjligheten att se den inre strukturen. Skanningen genomförs i en röntgendatortomograf. Denna struktur analyseras sedan och orienteringen av sprickorna beräknas.

Jordproverna omsluts med ett gummimembran innan de monterades i utrustningen för triaxialtest. Ett omgivande tryck från vatten efterliknar förhållanden på ett visst djup. Det inre vattentrycket i provkroppen i förhållande till det omgivande trycket indikerar hur väl vattenmättat provet är. För att efterlikna förhållanden under glaciären önskas ett vattenmättat prov. Vid starten av testet uppstod problem med luftfickor i systemet och orimliga tidsperioder för att få proverna vattenmättade. Försöken slutfördes därför inte.

Analysen av de skannade bilderna skedde i ett antal steg. Olika bildbehandlingsalgoritmer applicerades på de scannande bilderna för att slutligen kunna separera sprickorna och beräkna orienteringen. Resultatet visar ett plan som passas till de punkter som ingår i en spricka och beskriver orienteringen av sprickan.

För att förbättra kunskapen om subglacialt sediment och möjligheten att fastställa sedimentens egenskaper i olika områden finns det möjligheter att revidera metoden för användningen av triaxialtest. Bildanalysen ger en indikation om hur sprickstrukturen i sedimentet är orienterad. Hur väl det representerar den större geologiska kroppen kan undersökas vidare. De beräkningarna som utförs för att analysera de skannade bilder kan utvecklas vidare, vilket kan göra metoden mer effektiv för att ge en bättre förståelse av sedimentets inre struktur och en indikation på dess geotekniska och hydrologiska egenskaper.

Förord

Detta examensarbete har varit en del utav ett större forskningsprojekt där målet varit att bidra med kunskap till glaciologi, geoteknik och hydrologi. För att knyta samman ämnesområdena och ge möjlighet till bättre geotekniska modeller. Projektet tog vara på den mark som blivit tillgänglig för undersökning då den inte längre täcks av glaciärer.

Vi vill tacka vår handledare Erika Tudisco som med stort engagemang och tålamod handlett oss genom arbetet. Det är inte alltid så enkelt att återuppta ett projekt, samt att ta klivet ut på ny utforskad mark. Vi vill också tacka vår biträdande handledare Sven Lukas på vid Lunds universitet för tillhandahållandet av material och kunskaper inom glaciologi.

Utöver expertkunskapen från institutionen vill vi även rikta ett stort tack till vår goda vän Eric Lyckegård Finn som har stöttat oss med kloka insikter.

Därutöver vill jag, Viktor, passa på och tacka min kära partner Sofia som har stöttat mig i med och motgång under arbetets gång. Nu ser jag framemot att uppleva kommande kapitel av livet.

Lund, december 2024

Viktor Davidsson & Jens Lannér

Notation

Latinska bokstäver

- c_u Odränerad skjuvhållfas
thet
- \boldsymbol{u}_0 Initialt porvatt entryck
- \boldsymbol{z} Djupet
- c Kohesion
- c^\prime Effektiv kohesion

Grekiska bokstäver

- $\sigma_{z0}=$ Ínitial total vertikalspänning
- σ_{z0}' Initial effektiv vertikalspänning
- γ Tungheten av jordmaterialet
- σ_c^\prime Konsolideringstryck
- τ Skjuvspänning
- τ_f Skjuvhållfas
thet
- $\sigma_1',\,\sigma_3'$ Huvudspänningar
- φ Friktionsvinkel
- φ' Effektiv friktionsvinkel

Innehåll

A	bstra	\mathbf{ct}							Ι
Sa	umma	anfattn	ing						III
Fö	örord								\mathbf{V}
N	otati	on							VII
In	nehå	11							X
1	Inle	dning							1
	1.1	Bakgrı	ınd						 1
	1.2	Syfte .							 2
	1.3	Metod							 2
	1.4	Dispos	ition \ldots	•		•	•	•	 3
2	Tria	xiella	tester av sediment						5
	2.1	Mekan	iska egenskaper hos jord						 5
		2.1.1	Friktions- och kohesionsjordar						 5
		2.1.2	Anisotropi i subglaciala sediment						 6
		2.1.3	In situ spänningar						 6
		2.1.4	Konsolidering						 7
		2.1.5	Överkonsolidering						 7
		2.1.6	Skjuvhållfasthet						 7
		2.1.7	Triaxiellt test						 11
	2.2	Metod							 12
		2.2.1	Insamling av prover						 12
		2.2.2	Genomförande av triaxialtest						 12
	2.3	Result	at	•	•	•	•	•	 14
3	Bild	lanalys	av sprickor						15
	3.1	Datort	omografi och digital bildanalys						 15
		3.1.1	Identifiera sprickor i sediment						 15
		3.1.2	Röntgen mikro datortomografi						 15
		3.1.3	Digitala bilder						 16
		3.1.4	Binarisering						 17
		3.1.5	Segmentering						 18
		3.1.6	Erodering och utvidgning av binariserade bilder .						 18
	3.2	Framta	agning av sprickanalysprogram						 18
		3.2.1	Data som analyseras						 18

		3.2.2	Förbehandling av röntgenbilderna	18
		3.2.3	Orienteringsvärde av en pixel	20
		3.2.4	Gruppera orienteringsvärden till sprickor	22
		3.2.5	Identifiering av enskilda sprickor	22
	3.3	Result	at av bildanalysprogrammet	23
4	Disl	cussior	n och slutsats	29
	4.1	Triaxia	altest	29
	4.2	Bildan	alys	29

1 Inledning

1.1 Bakgrund

När det ska anläggas byggnadskonstruktioner i eller ovanpå mark genomförs alltid en undersökning av rådande förhållanden i marken inför byggnationen. En felaktig analys av markförhållanden kan potentiellt leda till katastrofala konsekvenser, så som exempelvis skred och oväntade sättningar, som kan skada byggnader och människor. Därför är det viktigt att ha god kännedom om markens egenskaper.

Det finns dock en brist i kunskapsbanken angående subglaciala sediment där bristen på empiriska data gör att befintliga modeller är ofullständiga. Egenskaperna i sedimenterad jord är också komplexa eftersom sedimenterad jord naturligt får en anisotropi under bildningsprocessen, vilket innebär att egenskaper, som skjuvhållfasthet och konduktivitet, varierar mellan materialets olika orienteringar (Al-Karni och Al-Shamrani, 2000). Även om det är ett komplext material vars egenskaper är beroende av sammansättning och belastningshistorik, kan information om dess mekaniska egenskaper för det specifika området tas fram. Detta är nödvändigt för att kunna applicera kunskapen på byggprojekt som sker på glaciala jordarter då ca 97% av sveriges mark har bildats vid avsmältningen av inlandsisen.

Då glaciärer smälter bort mer hastigt med klimatförändringarna och de höjda temperaturerna i fjällområden är det nu möjligt att undersöka sediment som tidigare varit täckta av glaciärer (Hugonnet m. fl., 2021). Möjligheten att undersöka ostörda glaciala sediment som enbart varit utsatt för spänningar och rörelser från glaciärer bör tas tillvara på för att samla empiriska data, då subglaciala avlagringar och erosionsfenomen förstörs snabbt vid postglaciala förhållanden (Menzies och van der Meer, 2018).

För att få nya insikter i subglacialt sediment inom geoteknik, hydrogeologi och glaciologi har ett projekt kring fältundersökningar och laboratorieförsök på subglacialt sediment genomförts på Lunds universitet. Bildningsprocesser av subglaciala sedimentet kan utredas med analyser som röntgentomografi, bildanalys och skjuvhållfasthetstest ge en bättre bild av förhållandet mellan anisotropin hos sediment och glaciärers rörelse. För att undersöka anisotropins påverkan på de mekaniska egenskaperna hos subglacialt sediment, kan ett triaxialt kompressionstest genomföras som efterliknar förhållandet som provet befann sig i vid insamlingsplatsen. Genom att ta prover i olika riktningar vid insamlingsplatsen kan tester genomföras för att undersöka hållfastheten i sedimentets olika orienteringar.

Genom att studera geologiska kroppar med röntgentomografi kan bilder och modeller av provkroppens inre struktur tas fram. Röntgenstrålar och datorteknik kombineras för att producera bilder med en hög upplösning. Detta är en icke förstörande metod som blir allt vanligare inom geomekanik (Liu m. fl., 2020). När Röntgentomografi idag genomförs på Avdelningen för hållfasthetslära på Lunds Tekniska Högskola, används manuella metoder för att identifiera sprickor. I detta arbete är avsikten att försöka arbeta fram en automatiserad metod som med hjälp av bildanalys automatiskt kan identifiera sprickor och deras orientering i sediment. Sprickor har en betydande effekt på en jords egenskaper, då de bland annat sänker jordens hållfasthet och ökar permabiliteten i sprickans riktnng (Feng m. fl., 2021).

De digitala bilder som framställs med tomografi kan även tillsammans med triaxialtest förbättra precisionen för analyser av deformationer genom digital bildkorrelation (*Digital Image Correalation, DIC*, på engelska). Metoden analyserar deformationer inom provkroppen genom att identifiera förflyttningar mellan aggregat av korn, vilket kan tillhandahålla viktig information om de mekaniska egenskaperna. Skanningen av provet kan antingen ske under deformationsförloppet eller enbart före och efter deformationen (Tudisco m. fl., 2015). Detta ger en potential för geotekniska undersökningar inom brottgräns och inhomogena deformationer (Wang m. fl., 2020).

Ett annat möjligt användningsområde för bilderna som tagits fram vid röntgentomografi är att analysera sprickorna i provet. Det är möjligt att studera sprickors utbredning i sediment i fält, där man passar in ett plan mot sprickan och analyserar dess lutning och orientering i sedimentet. Med bilderna från tomografin skulle det kunna vara möjligt att utveckla ett autonomt verktyg som objektivt identifierar sprickorna i jordprover och ta fram ett plan som beskriver sprickans utbredningsvinklar.

1.2 Syfte

Examensarbetet syftar till att bidra till de större projekt som undersöker subglaciala sediment för att knyta samman kunskapsbanken inom flera discipliner. Detta arbete fokuserar på att genomföra triaxiella test på ett antal subglaciala sedimentprover för att öka mängden empirisk data och undersöka deformationen av proverna genom digital bildkorrelation och undersöka skjuvhållfastheten i x, y och z-led, samt utveckla en automatiserad metod för att identifiera och särskilja sprickor, samt beräkna deras orientering och lutning genom att anpassa plan till sprickorna. Följande frågor kommer att besvaras i det här examensarbetet. Vilken effekt har anisotropin i subglacialt sediment på skjuvhållfastheten? Hur ser förutsättningarna ut för att identifiera sprickor genom bildanalys i sedimenten?

1.3 Metod

I det här arbetet har den ursprungliga planen varit att undersöka skjuvhållfasthet hos subglacialt sediment genom odränerade konsoliderade triaxiella tester och jämföra deformationen före och efter testet genom DIC-analys. Detta har inte varit möjligt inom tidsramen för ett examensarbete då proverna behövde vattenmättats för att efterlikna det naturliga förhållandet under glaciären innan testerna kunde genomföras vilket visade sig ta för lång tid. Därför skiftades fokus till att i stället undersöka provkropparnas inre strukturer. Proverna skannades i en röntgentomograf. Genom att binarisera röntgenbilderna har ett bildanalysprogram utvecklas i beräkningsprogrammet MATLAB. Programmet har som funktion att analysera röntgenbilderna genom att identifiera och separera sprickor och ta fram deras orientering.

1.4 Disposition

Rapporten har strukturerats enligt följande disposition:

Kapitel 2 - Triaxiella tester av subglaciala sediment - I det här kapitlet redovisas bakomliggande teorier för jordmekanik. Därefter beskrivs genomförandet av de triaaxiella försöken och resultaten från dessa.

Kapitel 3 - Analys av sprickor - I detta kapitel beskrivs teorier om röntgendatortomografi och bildanalys. Därefter beskrivs övergripande hur ett bildanalysprogram för att identifiera och separera sprickor, och ta fram deras orientering har tagits fram. kapitlet avslutas med att redovisa vilka kommandon som har använts och vilka problem som har uppstått i uppbyggandet av programmet. Därefter redovisas resultatet från bildanalysen på röntgenbilderna som har tagits i röntgendatortomografin.

Kapitel 4 - Diskussion och slutsats - Här diskuteras och analyseras resultaten från triaxiella testen och bildanalysen från fallstudien. De problem som har uppkommit genom arbetets gång tas upp och diskuteras, därefter lämnas förslag på vidare studier.

2 Triaxiella tester av sediment

I det här kapitlet beskrivs bakomliggande teori för geomekanik, samt genomförandet och resultatet från det genomförda triaxiella testet.

2.1 Mekaniska egenskaper hos jord

Ett geografiskt område präglas kraftigt av dess geologiska förutsättningar. En plats kan vara direkt olämpligt för byggnation. Det översta lagret av marken består av berg eller olika jordlager. Jordlagret är ett material bestående av fasta partiklar av korn med olika mineralsammansättningar och hålrum mellan kornen, dess porer innehåller vatten eller luft. Dessa tre delar kan variera i förhållande till varandra, hur varje komponent ter sig påverkar de geomekaniska egenskaperna i jorden. Storleken av kornen kan variera från fina lerpartiklar till grus, sten eller block. Fördelning av de olika kornfraktionerna i kombination med packningsgraden för jorden bestämmer hur mycket hålrum jorden innehåller (Knappett och Craig, 2019).

2.1.1 Friktions- och kohesionsjordar

Det finns olika fysikaliska fenomen som håller samman material, i en jord är det främst friktionen eller kohesionen mellan kornen. För korn som är större än 0,063 mm är det primärt friktionen och normalkrafterna mellan kornen som håller ihop jordens struktur och ger jorden dess mekaniska egenskaper. Jorden beskrivs då som en friktionsjord, sammansättning av olika kornfraktioner och kornformer ger jorden dess mekaniska egenskaper. För att beskriva den mekaniska hållfastheten används en viss vinkel (ϕ), vid vilken friktionen mellan kornens kontaktyta överstigs och kornen kan röra sig i förhållande till varandra vilket leder till att ras uppstår (Svensson, 2012).

Då kornen i en jord är mindre än 0,063 mm är ytan mellan kornen så pass stor i förhållande till dess massa att det är övervägande kohesionen mellan kornen som håller ihop partiklarna. Det beror också på att kornen är rundade av en film av vatten, vilket innebär att kornen inte är i direkt kontakt med varandra. Kohesion är molekylära krafter mellan kornen. Kohesionskraftens förmåga att hålla ihop aggregat av partiklar, ökar då storleken av partiklarna minskar. Kohesionskraften är starkt relaterad till jordens vattenkvot, då sammansättningen kan börja flyta likt en välling vid höga vatteninnehåll eller spricka vid låga vattenkvoter (Svensson, 2012).

Subglacialt sediment är ett material som har eroderat från den underliggande berggrunden. Materialet är en morän innehållandes alla kornstorlekar, med en stor andel silt och lerpartiklar (Earle och Panchuk, 2019).

2.1.2 Anisotropi i subglaciala sediment

Definitionen av anisotropi i material är att de har olika fysikaliska egenskaper i olika riktningar, till exempel hållfasthet eller permeabilitet. I jordar uppstår anisotropi naturligt via sedimentation och konsolidering, vilket ger jorden en heterogen struktur (Al-Karni och Al-Shamrani, 2000). Subglaciala sediment blir också anisotropt som konsekvens av den ovanliggande glaciärens rörelser. Analyser av sedimentprover vid retirerande glaciärer visar tydliga tecken på deformation av skjuvning från glaciärers rörelser, där skjuvningen ger upphov till en omlagring av de översta lagren. (Altuhafi m. fl., 2010). Deformationen som orsakas av glaciärens rörelser är inte homogen i sedimentlagren trots att materialuppsättningen i lagren är relativt homogen. Vattenhalten är högre närmre gränsen mellan sedimentet och glaciärens rörelser där materialet en lägre hållfasthet och materialet påverkas mer av glaciärens rörelser där materialet trycks med i glaciärens rörelseriktning. Sedimentet påverkas av glaciären i varierande grad beroende på djup (Evans m. fl., 2006). (se figur 2.1). I figuren presenteras den generella påverkan utav glaciären där den sammanlagda rörelsen summeras till en rörelse, denna process sker i flera cykler och bygger successivt upp sedimentet.



Figur 2.1: Ett förenklad diagram över zonindelning av ett relativt homogent subglacialt deformerat material och dess förhållande till dilation, förflyttning, volym, kohesionstyrka, kontaktyta och porvattentryck med djupet (Evans m. fl., 2006).

2.1.3 In situ spänningar

De vertikala spänningarna i ett jordlager på ett godtyckligt djup, z från markytan påverkas av tyngden av ovan liggande jordmassa, och av ett eventuellt vertikalt spännings tillskott (Knappett och Craig, 2019).

$$\sigma_{z0} = \gamma \cdot z \tag{2.1}$$

där σ_{z0} är den totala spänningen på djupet, z är avstånd från markytan och γ är tunghet av jordmaterialet. Effektivspänningen är ett centralt begrepp inom jordmekanik och definieras som den genomsnittliga spänningen i kornskelettet.

$$\sigma_{z0}' = \sigma_{z0} - u_0 \tag{2.2}$$

där σ'_{z0} är effektiva vertikalspänningen och u_0 är initialt porvattentryck. Porvattentrycket har en stark inverkan på den effektiva spänningen (Knappett och Craig, 2019).

Porvattentrycket kan antas bero linjärt på vattnets tunghet enligt

$$u_0 = \gamma_v \cdot z_v \tag{2.3}$$

där γ_v är tunghet av vatten och z_v är avståndet från grundvattenytan till aktuell punkt (positiv neråt). Ekvationen gäller för porvattentrycket under grundvattenytan och ovan grundvattenytan där vattenmättade förhållanden råder på grund av kapillära stighöjden.

2.1.4 Konsolidering

Vid ett lasttillskott, exempelvis tyngden av en glaciär, på en vattenmättad jordprofil blir porvattentrycket detsamma som spänningstillskottet. Det ökade porvattentrycket ger upphov till en hydraulisk gradient som får vattnet att lämna jorden och ger upphov till en volymminskning. Den last som burits av porvattenövertrycket minskas och överförs i stället till kornskelett i form av effektivtryck. Efter en tid har jorden konsoliderats och porvattentrycket är lika stort som det var innan lasttillskottet (Larsson, 2008).

2.1.5 Överkonsolidering

Förkonsolideringstrycket, σ'_c , avser den historiskt största vertikala effektivspänningen som en jordprofil blivit utsatt för. Om rådande vertikal effektivspänning hos en jordprofil är lika stor som förkonsolideringstrycket är jordprofilen normalkonsoliderad. Om den vertikala effektivspänningen överstiger förkonsolideringstrycket uppstår plastiska deformationer i jorden. Vid spänningar som är lägre än förkonsolideringstrycket sker elastiska deformationer och jorden är överkonsoliderad (Larsson, 2008). Då subglaciala sediment oftast är överkonsoliderade från tyngden av glaciären behöver proverna, innan de mekaniniska egenskaperna kan undersökas, konsolideras för att efterlikna förhållandena under en glaciär (Menzies och van der Meer, 2018).

2.1.6 Skjuvhållfasthet

Skjuvhållfastheten är en vanlig parameter för att beskriva hållfasthet hos jord. En jords skjuvhållfasthet påverkas av olika faktorer, bland annat av de spänningar en jord historiskt har påverkats av, lagerföljder, konsolideringstryck, konsolideringskvoten (OCR) och hur snabbt jorden deformeras under skjuvning.

Konsolideringskvoten (OCR), bestäms genom förhållandet mellan konsolideringstrycket, σ'_c och nuvarande vertikal effektivspänning, σ'_{z0} (Budhu, 2007).

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z0}} \tag{2.4}$$

I tabell 2.1 beskrivs indelningen av konsolideringsgraden.

Konsolideringsgrad	OCR
Normal eller lätt överkonsoliderad	1 - 1,5
Överkonsoliderad	1,5 - 10
Starkt överkonsoliderad	> 10

 Tabell 2.1: Indelning av konsolideringsgrad med avseende på konsolideringskvoten OCR (Larsson, 2008).

Skjuvhållfastheten, τ_f , påverkas också av om det råder dränerande eller odränerade förhållanden, vilket bland annat beror på geologiska förhållanden, kornstorleksfördelningen och permeabilitet. Permabilitet beror på storleken av porerna och därmed av storleken på kornen i jorden. Den höga permeabiliteten hos friktionsjordar får jorden att dräneras och den förlorar därmed porvattentrycket vid belastning. Friktionsjordar antas därmed vara dränerade. Kohesionsjordar har en lägre permeabilitet och beroende på tidshorisont kan en lera eller silt anses vara odränerad eller dränerad, eftersom det kan ta lång tid för jorden att förlora det tillgängliga porvattentrycket vid belastning (Budhu, 2007).

Ett jordelement som påverkas av huvudspänningarna σ_1 och σ_3 , se figur 2.2, går till brott när skjuvspänningen, τ , i något plan, överstiger skjuvhållfastheten, τ_f .



Figur 2.2: Normal-, skjuv- och huvudspänningar för ett jordelement inspirerat av (Knappett och Craig, 2019).

Mohrs cirkel visar spänningsförhållandet mellan normal- och skjuvspänning i ett godtyckligt plan, vilket visas i figur 2.3. I Mohrs cirkel är σ'_1 och σ'_3 huvudspänningar. I cirkeln kan normalspänningen σ'_n för ett godtyckligt plan med vinkeln α relativt vertikalriktningen avläsas.



Figur 2.3: Mohrs cirkel

Skjuvhållfastheten för dränerade förhållanden kan bestämmas enligt Mohr-Coulombs brottkriterium (Knappett och Craig, 2019).

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi' \tag{2.5}$$

Därc' är effektiva kohesionen och σ'_n är effektiv normalspänning och φ' är den effektiva friktionsvinkeln. Mohr-Coulombs brottkriterium illustreras i figur 2.4 .



Figur 2.4: Mohr-Coulombs brottkriterium för dränerade förhållanden, redovisad som en rät linje som ges av $\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi'$

Brott för dränerade förhållanden sker när Mohrs cirkel tangerar Mohr-Coulombs brottkriterium, som illustreras i figur 2.5.



Figur 2.5: Mohr-Coulombs brottkriterium som tangeras av Mohrs cirkel - brott.

Kohesionsjordar antas vara odränerade på grund av den låga permeabiliteten som får porvattentrycket att jämnas ut långsamt vid belastning av jorden (Knappett och Craig, 2019). Detta gör att skjuvhållfastheten hos kohesionsjordar beror på kohesionen mellan partiklarna i jorden.

$$\tau_f = c_u \tag{2.6}$$

där c_u är den odränerade skjuvhållfastheten.

Brott vid odränerade förhållanden för kohesionsjordar, se figur 2.6, uppstår då Mohrs cirkel tangerar skjuvhållfastheten c_u .



Figur 2.6: Mohr-Coulombs brottkriterium för kohesionsjord.

2.1.7 Triaxiellt test

Triaxiellt test används för att bestämma styvheten och skjuvhållfastheten hos jordar. Testet gör det möjligt att kontrollera dräneringen och mäta porvattentrycket på jordprover. Olika parametrar går att utläsa beroende på vilken typ av triaxiellt test som utförs. Det finns fyra huvudsakliga typer av triaxiellt test, okonsoliderat dränerat, okonsoliderat odränerat, konsoliderat odränerat, konsoliderat dränerat, för att testa jordens respons under olika förhållanden (Rees, u. å.). Om testet utförs under dränerade förhållanden kan porvattnet lämna provet, vilket leder till att provets volym minskas, men portrycket förblir konstant. Vid odränerade förhållanden kan vattnet inte lämna provet, vilket leder till att portrycket ökar eller minskar beroende på om provet dilaterar eller komprimerar. Testet utförs antingen som ett aktivt eller passivt test. Vid ett aktivt test utsätts provet för en högre last i vertikalriktning jämfört med den horisontella. Vid passiva försök är förhållandet det omvända (Sveriges Geotekniska Förening, 2012).

Ett triaxiellt försök börjar med att ett cylindriskt jordprov omsluts av ett gummimembran och därefter placeras provet i en större cell som fylls med vatten. Dränering av provet sker genom filterstenar. Vertikala laster regleras genom en laststång som går genom toppen av cellen. Radiell spänning kontrolleras genom att trycksätta vattnet i cellen. Innan testet kan genomföras konsolideras provet för ett förutbestämt spänningstillstånd. Provningen sker antingen genom att vertikala lasten ökar eller minskas beroende på om ett aktivt eller passivt försök genomförs (Larsson, 2008).

För att kontrollera att provet är tillräckligt vattenmättat genomförs ett saturationstest som kallas för B-test. För att vattensaturationen ska anses vara tillräcklig bör B-testet ge ett värde högre än 95% beroende på jordart. Testet genomförs genom att celltrycket höjs till ett förutbestämt tryck, medan portrycket är oreglerat, med stängda ventiler vilket innebär att odränerade förhållanden råder. Tanken är att porvattentrycket ska öka lika mycket som celltrycket, så att effektivspänningen förblir densamma. B-värdet är förhållandet mellan förändringen i porvattentrycket och celltrycket (Rees, u. å.).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \tag{2.7}$$

Mätningarna av följande parametrar genomförs kontinuerligt under testet, applicerad vertikal kraft, celltryck, portryck och förflyttning. Utifrån dessa parametrar kan följande parametrar tas fram radiella, σ_r , axialspänningar, σ_a , axiala töjningar ϵ_a och volymändringen ϵ_v (Sveriges Geotekniska Förening, 2012).

I triaxiella förhållanden är axial - och radialspänning huvudspänningar eftersom ytorna de verkar mot är fria från skjuvspänningar. Spänningarna vid brotttillfället kan åskådliggöras som spänningscirklar i Mohr-Coulombs brottkriterium, för att få fram brottegenskaper som kohesion, effektiv friktionsvinkel φ' och den odränerade skjuvhållfasten c_u (Sveriges Geotekniska Förening, 2012).

2.2 Metod

2.2.1 Insamling av prover

Proverna är insamlade cirka 800 meter nedströms glaciärfronten vid storglaciären, lokalen ligger i bergskedjan Skanderna. Vid varje insamlingsplats togs tre separata prover. Prov togs från totalt 5 olika platser där smältvatten har skapat en skreva i den tidigare glaciärs bädden. För att få ut proverna pressades plastcylindrar in i sedimentet från tre olika orienteringar (se figur 2.7). Provplatserna fick individuella löpnummer, till denna undersökning användes prov SGL-11 samt SGL-12. Detta resulterade i totalt sex sedimentprover. De fick namnen SGL-11A, B och C och SGL-12A, B och C beroende på dess plats och orientering. Proven A är tagna ner i djupet av marken, B-proven är tagna i motsatt riktning mot isen och C-proven är tagna vinkelrätt mot isens rörelse i horisontellt plan.



Figur 2.7: En skiss av i vilka riktningar som proverna har tagits i. A-proven har tagits ner i djupet av marken. Notera att B-proven har tagits i motsatt riktning av is rörelsen och att C-proven har tagits in i bilden.

2.2.2 Genomförande av triaxialtest

Syftet med att genomföra triaxiella tester på provkropparna är att ta reda på skjuvhållfastheten i olika riktningar för de subglaciala sedimenten.

Tre ostörda jordprover från provplats SGL-11 lades i ett vattenbad under en månads tid för att vattenmättas. Under den här processen förstördes jordprovet SGL-11A. Då det fanns tillgång till prover som hade tagits vid andra platser på lokalen beslutades det om att gå vidare med de två andra proverna som hade tagits vid SGL-11.

Innan de triaxiala försöken kunde genomföras behövde proverna röntgas för att möjliggöra undersökning av deformationen genom digital bildkorrelation. Detta gjordes genom att placera proverna i micro datortomgrafen RX Solutions EasyTom150 som tillhandahölls av 4D Imaging Lab, en del av Avdelningen för hållfasthetslära vid Lunds universitet. Proverna fördes därefter in i ett gummimembran med filterstenar på än-

darna av proven och placerades därefter i den triaxiella maskinen och cellen fylldes med vatten (se figur 2.8). För att förhindra läckage användes o-ringar mellan kopplingarna.



Figur 2.8: Uppsättning av triaxiellt test med jordprovet i en vattenfylld cell.

Först genomfördes undersökning av provkropp SGL-11C. Provet konsoliderades med celltrycket 160 kPa och portrycket 50 kPa. vilket resulterade i en effektivspänning på 110 kPa för konsolideringstrycket. Effektivspänningen på 110 kPa var för att efterlikna det största trycket som sedimentet utsatts för från glaciären. Konsolideringen bedömdes vara klar redan efter ett par timmar.

För att försäkra att provet var vattenmättat behövde ett B-test genomföras innan det triaxiella försöket.

Vid genomförandet av B-testet höjdes celltrycket, $\sigma_c,$ från 160 till 310 kPa. Detta fick portrycket inne i provet att stiga till 82 kPa

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} = \frac{82 - 50}{310 - 160} = 21\%$$
(2.8)

Resultatet av B-testet visade att provet inte var tillräckligt vattenmättat för att gå vidare med testningen.

För att skynda på saturationsproccesen beslutades det att behålla celltrycket på 310

kPa och porvattentrycket höjdes till 200 kPa.

Under detta skede upptäcktes att systemet innehöll mycket luft. Detta förhindrar saturationen och gör det svårt för pumparna att behålla trycket. Dessvärre upptäcktes även en blockad vid en av ingångarna till bottenplattan. Blockaden frigjordes genom att tömma pumparna på vatten och rensa bort blockaden, därefter spolades systemet med vatten för att rensa systemet på luft. Ett läckage identifierades vid en av kopplingarna på toppen av maskinen som kontrollerar portrycket i provet. På grund av alla de felkällor som uppstått bedömdes provet vara såpass påverkat att inget tillförlitligt resultat skulle fås vid ett genomförande av ett triaxiellt test.

Undersökningen gick vidare med SGL-11B. Provet omslöts av ett pappersfilter för att underlätta vattensatueringen innan det fördes in i ett gummimembran och placerades i cellen. Vid förberedelserna av jordprovet beslutades att saturationen skulle genomföras innan konsolideringen för att inte störa provet. Pumpen som kontrollerar celltrycket ställdes in på 210 kPa medan pumpen som hanterar portrycket sattes till 200 kPa. Provet satuerades totalt i en vecka innan en serie B-test genomfördes under en tvådagarsperiod för att undersöka vattenmättnadsgraden. Resultaten från B-testen redovisas i tabell 2.2 och resultaten visade att provet inte var tillräckligt vattenmättat. Provet tilläts satureras vidare.

B-test	${f vatten m\" attnadsgrad}[\%]$
Test 1	40
Test 2	40
Test 3	54
Test 4	51

Tabell 2.2: Vattenmättnadsgrad för jordprov SGL-11B uppmätta under en
tvådagarsperiod efter att det har saturerats i en vecka.

En vecka senare pumpades fortfarande vatten in i provet och ett beslut togs att börja genomföra konsolideringsprocessen för att förhoppningsvis snabba på vattensatueringen. Celltrycket ställdes in på 610 kPa och portrycket till 500 kPa. Tre veckor senare pumpades vatten fortfarande in i provet och ett beslut togs att avbryta försöken då vattenmättnads processen tog för lång tid för ramen inom ett examensarbete.

2.3 Resultat

På grund av att satueringsproccessen tog längre tid än förväntat kunde inte förhållandena under glaciären efterliknas och därför beslutades att inget tillförlitligt resultat kunde fås från testen. Därför skiftades fokus till att utveckla en automatiserad metod för att identifiera och analysera sprickor i proven.

3 Bildanalys av sprickor

I det här kapitlet beskrivs den andra delen av examensarbetet som bestod av att analysera sprickor i sedimentprover genom bildanalys. Syftet med att identifiera sprickor genom bildanalys är att ta fram ett automatiserat arbetsverktyg för geologer och glaciologer för att lättare kunna analysera sprickor i sedimentprover. Tillvägagångssättet innebär att förbehandla röntgenbilder, identifiera orienteringsvärden och på så vis isolera enskilda sprickor. Därefter tas plan fram som passas mot sprickan för att beskriva planets orientering.

3.1 Datortomografi och digital bildanalys

3.1.1 Identifiera sprickor i sediment

Det är möjligt att uppskatta och analysera orienteringen av en spricka direkt ute i fält. En vanlig metod är att successivt avlägsna material från en sedimentyta genom att skrapa bort lager för lager. Under processen mäts och dokumenteras sprickornas lutning och orientering i jordvolymen. Med röntgenbilder finns möjligheten att systematiskt finna strukturer i jordvolymer, som inte hade varit möjligt för det mänskliga ögat. Iakttagelser kan göras manuellt men blir då mer subjektiva. Att klassificera är upp till enskild individ och beror till viss del av erfarenhet. Med bildanalys kan röntgenbilderna analyseras objektivt med bestämda kriterier för identifiering av sprickor och beräkning av sprickornas lutning och orientering. Resultatet blir därför mindre beroende av utövare, även om det alltid kommer behövas en professionell bedömning av resultaten.

3.1.2 Röntgen mikro datortomografi

Röntgen mikro datortomografi (μ CT) gör det möjligt att undersöka strukturen i ett material utan att förstöra det. Materialet som undersöks placeras mellan en källa för röntgenstrålar och en detektor. Detektorn avläser intensiteten av röntgenstrålen, skillnader i intensitet används för att skapa en bild som representerar objektets innre struktur. Områden med högre densitet kommer försvaga intensiteten av röntgenstrålningen, medan områden med lägre densitet så som hålrum, porer och sprickor inte försvagar intensiteten lika mycket (Tarplee m. fl., 2011). Genom att rotera materialprovet 360 grader relativt till röntgenkällan och detektorn och ta bilder för flera olika vinklar går det att beräkna fram en rekonstruerad bild för en skiva i provet. Varje pixelvärde i den framtagna rekonstruktionen motsvarar ett värde för en viss punkt i provet (Tarplee m. fl., 2011). Med algoritmer byggs en 3-D bild av materialets struktur och sammansättning upp (Cnudde och Boone, 2013). I figur 3.1 syns provet monterat i tomografen och bilder som skapas från närliggande nivåer av provet. Varje punkt i en sådan 3-dimensionell bild benämns som en voxel motsvarande en pixel i en 2-dimensionell bild.



Figur 3.1: En provkropp stabiliseras med plastfilm i tomografen, bilderna brevid provkroppen visar olika skivor av provet.

3.1.3 Digitala bilder

Den data som analyseras består av digitala bilder, varje bild är en matris där varje cell motsvarar en pixel. Värde i en cell beskriver intensiteten av pixelns färg. En vanlig svartvit bild består av en matris, medan en färgbild normalt består av tre matriser, för färgerna röd, grön och blå. Storleken på matrisen är densamma som antalet pixlar i bilden (Pal och Pal, 1993).

3.1.4 Binarisering

För att möjliggöra vidare studier av röntgenbilderna från μ CT och identifiera sprickor och deras orienteringar, är det viktigt att på ett tydligt sätt avskilja luften i sprickan och det fasta materialet. De gråskaliga bilderna från datortomografin är inte binära av tre anledningar. Röntgenstrålens försvagning är inte konstant genom det fasta materialet. Den andra anledningen är att vid framtagning av röntgenbilder förkommer en viss mängd störningar. Den tredje och sista anledningen beror på partial volymeffekt (Ando, 2013).

Partiala volymeffekten är ett vanligt förekommande fenomen i bildanalys och innebär att en pixel eller voxel representerar en blandning av fast material och luft. Detta sker eftersom sensorerna har en begränsad upplösning och inte kan särskilja olika material i en pixel eller voxel. Detta resulterar i att det tilldelade värdet för en pixel eller voxel motsvarar ett medelvärde av värdena för de båda materialen. Värdet är proportionellt mot andelen av de båda materialen, vilket innebär att pixeln eller voxeln representerar en blandning av materialen (Ando, 2013). Ett sätt att få sprickorna mer kontinuerliga är att använda sig av bildbehandlingsmetoderna utvidgning (dialation) och erodering (erosion) som framhäver strukturer i binariserade bilder och beskrivs mer utförligt i avsnitt 3.1.6 (Soille, 2004).

Figur 3.2 visar ett histogram från en röntgenbild från ett sedimentprov. Där tydliggörs de två materialkategorierna som två toppar i histogrammet. På grund av de olika gråskalorna behöver ett tröskelvärde bestämmas för att kunna urskilja porer och sprickor från det fasta materialet (Ando, 2013). Det är detsamma som att separera de två topparna i histogrammet så bra som möjligt. Den process där en bild omvandlas till en binärbild kallas binarisation och innebär att pixlar som representerar fasta material ges ett värde och de andra pixlarna ges ett annat. För att identifiera ett bra gränsvärde finns det flertalet algoritmer som kan användas. Tröskelvärdet som användes var de standardinställningar som föreslogs av programmet *Fiji ImageJ*, då ett automatiserat gränsvärde var att föredra.



Figur 3.2: Fördelningen av antalet pixlar och dess värde som går mellan 0 och 65 587 för en av skivorna.

3.1.5 Segmentering

Segmentering syftar till processen att dela in en bild i olika segment och eller regioner baserat på egenskaper eller krav. Detta används för att identifiera intressanta regioner, objekt med mera i en bild. Segmenteringen kan göras med pixelvärden, form eller storlek av objekt (Pal och Pal, 1993).

3.1.6 Erodering och utvidgning av binariserade bilder

Erodering (*erosion*) och utvidgning (*dilatation*) är en vanlig bildbehandlingsmetod vars mål är att extrahera relevanta strukturer i en binariserad bild. Det uppnås genom att definiera ett strukturelement av en viss form, till exempel en kvadrat med 5X5 pixlar. Strukturelementet är en form av mall och kriterium som appliceras på varje pixel i den binariserade bilden. Vid erodering används regeln att om en pixel är svart inom strukturelement så skall pixeln i fokus bli svart i den resulterande bilden. Motsatsen gäller vid dilation där pixeln i fokus blir vit om någon av pixlarna som täcks av strukturelementet är vit (Soille, 2004).

Genom att applicera utvidgning och sedan en efterföljande erodering är det möjligt att sammanfoga områden som skulle kunna bedömas vara en del av samma struktur, men som vid en ursprunglig binariserad bild inte blivit sammanhängande, vilket kan bero på partiala volymeffekten. Vita element som sammanfogas vid en utvidgning kommer inte att separeras vid efterföljande erodering. Hur det kan se ut presenteras i figur 3.4.

3.2 Framtagning av sprickanalysprogram

Här beskrivs utvecklingen av ett verktyg som autonomt analyserar röntgenbilder av sedimentprover, som gjordes med hjälp av beräkningsprogrammet MATLAB version R2019b, *Matrix Laboratory* utvecklat av MathWorks (The MathWorks Inc., 2023) och bildbehandlingsprogrammet Fiji ImageJ (Schindelin m. fl., 2012).

3.2.1 Data som analyseras

Datan som analyseras är en trave bilder där varje bild är ett tvärsnitt av den röntgade provkroppen. I figur 3.3 visas en bild från provkroppen i gråskala, de mörkaste delarna av bilden är hålrum och de ljusa områdena är sediment. Diametern för provet är ca 50 mm. För att få en analys på sprickor i en volym används flera bilder i serie, tagna från intilliggande fysiska plan.

3.2.2 Förbehandling av röntgenbilderna

Bilden kan binariseras vid önskat tröskelvärde för att strikt skilja fast material mot hålrum. Behandlingen av bilden sker i bildbehandlingsprogrammet Fiji imageJ, vilket föreslår en gräns för ett pixelvärdet. Alternativt kan bilden utvärderas varefter ett subjektiv värde på gränsen kan anges. I detta fall valdes den förvalda inställningen i Fiji imageJ, vilket gav ett önskvärt resultat pågrund av de tydligt separerade topparna i histogrammet.

För att belysa sprickorna vid visualisering inventeras bilden så att sprickorna presenteras som vita pixlar och fast material presenteras som svarta pixlar. Vid utvecklingen av verktyget behandlas en kvadratisk sektion ur bilden då det krävs en alltför stor datorkraft för att analysera hela bilden med konsekvensen att beräkningstiden blir för lång. Man undviker även gränsen mellan provet och kanten till provets behållare. Mindre porer filtreras bort då det inte är nödvändigt att utföra beräkningar på dessa. Ett lämpligt område identifierades i de binariserade bilderna och valdes ut för segmentering. Samma område på 700x700 pixlar, ca 38 mm klipptes ut från 100 intilliggande bilder för vidare analys i Matlab, se figur 3.3. För att analysera bildtraven utförs beräkningar till en början på varje enskild bild för sig, för att sedan utföra en analys på hela traven för att på så vis analysera provkroppens volym.



Figur 3.3: En bildskiva från provkroppen som har binariserats. Det som analyseras är en kvadratiskt sektion av bildtraven.

Efter att röntgenbilder binariserats appliceras verktyg för att extrahera relevanta strukturer. Detta görs med hjälp av ett medianfilter, medfilt2 och bwareaopen för att rensa bort smått oönskat brus. Mindre områden är inte av intresse för analysen, beräkningarna för analysen behöver därför inte utföras på dessa.

Därefter används kommandot imdilate som utvidgar ljusa områden med värdet 1, för att på så sätt slå ihop närliggande strukturer till en sammanhängande struktur. Imdialate anropades totalt 5 gånger. Sedan appliceras lika många eroderingar, med Matlab-kommandot imerode, för att återgå till den ursprungliga storleken på strukturen. Då analysen riktar sig mot de största sprickorna filtreras även områden som innehåller färre än 50 pixlar bort. Till exempel sorteras små smala sprickor bort. Denna filtrering görs primärt för att effektivisera beräkningarna i programmet. Figur 3.4 visar resultatet av varje delsteg på den binariserade bilden. Filtreringen som utförs är subjektiv och utförs enligt satta gränsvärden.



Figur 3.4: De röntgade provet behandlas för att effektivisera analysen. Den gråskaliga bilden binariseras och genomgår en procedur för att närliggande sprickor ska att gå ihop. Till sist filtreras volymer med färre än 50 pixlar bort.

3.2.3 Orienteringsvärde av en pixel

Målet är att kategorisera de största sprickorna och ta reda på deras orientering, läge och storlek. För att identifiera vilka pixlar som tillhör en specifik spricka utförs en analys på varje pixel med värde 1, som motsvarar hålrum i bilden. För att förenkla beskrivningen

av metoden beskrivs processen utgående från en konstgjord sprickmatris, se figur 3.5 som visar den konstgjorda matrisen uppe till vänster med motsvarande binära bild uppe till höger.



Figur 3.5: I figuren presenteras uppe till vänster ett exempel på en 12x12 matris med cellvärden 1 eller 0. Uppe till höger visas hur en sådan svart och vit binärbild ser ut. Nere till vänster har matrisen analyserats för att ta fram den generella riktningen på sprickan där varje cell har tilldelats ett värde på vinkel av den längsta linje som strålar ut från cellen.

För att ta fram sprickans orientering och skilja sprickor som korsas från varandra behandlades alla celler med värdet 1. Avståndet till en cell med värdet 0 beräknades i flera riktningar utifrån varje cell. Detta genomfördes i steg om var 5:e grad, då detta bedömdes som en lämplig stegstorlek mellan 0 och 360 grader med hänsyn till rimlig detaljnivå och beräkningstid för programmet. Cellen tilldelas sedan orienteringsvärdet för den vinkel som resulterade i det största avståndet av de totalt 72 analyserade vinklarna. Vinklar som skiljer sig 180° tillhör samma spricka då de ligger på samma räta linje vilket medför att endast värden upp till 180 användes i det slutgiltiga resultatet. När alla celler har analyserats resulterar det i en ny matris som beskriver orienteringsvärdet för varje cell som tillhör en spricka. I figur 3.5 visas nere till vänster hur den nya matrisen ser ut när orienteringsanalysen är utförd på den konstgjorda matrisen uppe till vänster i figuren. Färgkartan visualiserar hur cellernas nya värde färgar matrisen där värdet av varje cell motsvarar sprickans orientering i intervallet 0-180 grader i steg om 5 grader.

3.2.4 Gruppera orienteringsvärden till sprickor

För att dela in cellerna till distinkta sprickor grupperades celler med närliggande orienteringsvärden inom ett förvalt spann in i sprickfamiljer. Första sprickfamiljen utgår ifrån det mest frekventa orienteringsvärdet, och alla celler som innehåller värden som ligger inom valt spann utgående från det mest frekventa värdet bedömdes tillhöra den första sprickfamiljen. ± 30 grader ansågs vara en lämplig storlek på intervallet. Därefter upprepades processen på återstående celler för att ta fram sprickfamilj 2, och processen upprepades sedan så många gånger som behövdes till dess att alla orienteringsvärden tilldelats en sprickfamilj. Detta resulterar i en matris där cellvärdet är ett index för vilken sprickfamilj cellen tillhör.

Processen åskådliggörs tydligt med hjälp av ett histogram, se figur 3.6 där processen har applicerats på den konstgjorda sprickmatrisen. I figuren visas två sprickfamiljer som två distinkta grupper i histogrammet.



Figur 3.6: Varje spricka har fått ett index för vilken familj den tilldelats. Familj nr 1 presenteras med som blå, familj nr 2 som gul.

3.2.5 Identifiering av enskilda sprickor

För att urskilja enskilda sprickor ur sprickfamiljerna användes grupperingsfunktionen *bwlabel* tillgänglig i Matlab. Bwlabel kopplar celler i matrisen som angränsar varandra och har samma värde, och dessa celler tilldelas ett unikt index. Dessa index blir identifikationsnumret för varje spricka som finns i det analyserade provet. Bwlabel kan appliceras antingen på en matris som är i ett plan, eller på flera matriser som bygger upp en volym. Det är då möjligt att på hela bildtraven koppla samman celler med samma värde och identifiera sprickorna i 3 dimensioner. Ett plan kan sedan passas in över punkterna som bygger upp en spricka i 3 dimensioner, och det resulterade planet kan då användas för att beskriva sprickan i tre dimensioner. I figur 3.7 visas en matris där sprickorna fått ett unikt index. I och med att sprickorna delats in i olika familjer delar den mörkblå sprickan i familj 1 upp den andra sprickan i två mindre.



Figur 3.7: Varje spricka har fått ett index. Den större sprickan delar den mindre till två.

3.3 Resultat av bildanalysprogrammet

Den utvecklade bildanalysen utförs på en sektion av en provkropp, där varje bild är 700x700 pixlar, och bildtraven innehåller 100 bilder.

Efter att röntgenbilderna har binariserats och förbehandlats beräknades orienteringsvärdet för varje cell i varje bild i traven i enlighet med metoden beskriven i sektion 3.2.3. Resultatet från beräkningen av orienteringsvärdet för en av röntgenbilderna kan ses i figur 3.8. I figuren går det tydligt att se att sprickor som går i samma riktning tilldelats liknande orienteringsvärde. Värdet på vinklarna utgår från en lodrät linje parallell med *y*-axeln, se figur 3.5. För att särskilja sprickorna utgår uppdelningen först utifrån det mest frekventa orienteringsvärdet. Värdena presenteras i ett histogram se figur 3.9 där topparna i histogrammet tillsammans med ett valt intervall av närliggande värden delas in i en familj.



Figur 3.8: Orienteringsvärdet för varje cell har tilldelats en färg baserat på dess värde. Det framgår ur bilden hur de blåfärgade cellerna tillhör en spricka med en orientering runt 120 grader och de rödfärgade tillhör sprickor med orientering 180 grader. Vinklarna utgår från en lodrät linje och rör sig i positiv riktning.



Figur 3.9: Histogramet visar fördelningen av orienteringsvärdena från beräkningarna för alla bilder i analysen. De toppar som syns motsvarar sprickorna i figur 3.8

Sprickorna delas in i olika familjer utefter vilka orienteringsvärden pixlarna har. I figur 3.10 har sprickorna i en röntgenbild tilldelats varsin sprickfamilj. De mörkblå sprickorna tillhör familj 1, de ljusblåa sprickorna tillhör familj 2 och så vidare. Antalet familjer som tas fram bestäms manuellt. Hur stort intervall av orienteringsvärden som ingår i en familj bestäms till 30 grader.



Figur 3.10: Sprickorna delas in i sprickfamiljer utifrån dess cellvärden inom ett bestämt intervall. Familjerna tilldelas olika färger och i histogrammet framgår vilka cellvärden som ingår i vilken familj.

Varje enskild spricka i röntgenbilderna tilldelas ett index med kommandot bwlabeln för att identifiera och särskilja olika sprickor inom en sprickfamilj, se figur 3.11. Kommandot tar hänsyn till sprickfamiljerna, intilliggande celler med olika värden särskiljs. Figuren visar en matris i 2D, men kommandot appliceras på hela volymen och sprickor genom provkroppen ges ett unikt index.



Figur 3.11: Varje enskild spricka har tilldelats ett unikt id med kommandot bwlabel.

Varje spricka kan nu visualiseras som ett punktmoln av pixlar i tre dimensioner. Där storleken på sprickan kan uttryckas i antalet pixlar med de specifika index numret. Till vänster i bilden visas alla pixlar med index 122, till höger har ett plan passats till dessa punkter i volymen. 3.12



Figur 3.12: I figuren visas punkter i prov volymen som tillhör spricka nr 122. Notera z-axlen 0-100 antalet röntgenbilder, varje bild ligger i xy-planet. Planet har en färggradient från gul till blå.

Ett orienteringsplan passades in till de fem största sprickorna i provet där varje cell som tillhör en spricka plottas som en punkt i en 3 dimensionell rymd. Till dessa punkter passas ett plan in med hjälp av MATLAB-funktionen *fit* och fittype *poly11* för att få ett plan. De framtagna planet för respektive spricka kan beskrivas med två vinklar. Sprickans id och planets motsvarande lutning presenteras i tabell 3.1. Vilka punkter i rymden och hur planen passats in till dessa visas i figur 3.13.

sprick id	Orientering	Lutning	Familj
5	-79 °	0°	1
108	-135°	4°	2
122	-141°	11°	2
23	-90°	13°	1
125	-152°	25°	2

Tabell 3.1: Orientering och lutning av respektive spricka.



Figur 3.13: De fem största sprickorna har identifierats och presenteras med dess punkter och plan som är passade till punkterna. Bilden i 2D är nr 50 av 100 från bildtraven

4 Diskussion och slutsats

I det här kapitlet diskuteras resultatet av de triaxiella testen och bildanalysen. I slutet av kapitlet lämnas förslag på vidare studier.

4.1 Triaxialtest

För att skjuvhållfastheten i de subglaciala sedimentet ska kunna bestämmas, behövde rådande förhållanden under en glaciär efterliknas. Det var därför nödvändigt att proverna skulle bli vattenmättade, men den låga permeabiliteten hos sedimentet medförde att det tog för lång tid att vattenmätta proverna inom ramen av ett examensarbete. För att vattenmätta lerhaltiga sediment kan det ta flera månader för alla luftfickor och halvslutna porer att fyllas med vatten. Det gick därför inte att testa skjuvhållfastheten med tillförlitliga resultat. Därmed gick det heller inte att reda ut anisotropins effekter på sedimentets mekaniska egenskaper eller att koppla dessa till glaciärers rörelse. För att genomföra testerna hade vattenmättningen av proverna behövt påbörjas en lång tid innan starten för ett examensarbete.

Vid placering av proverna i vattenbadet hade större försiktighet behövts vidtas då ett av proverna förstördes i samband med att de skulle bli vattenmättade. Även om anledningen till att provet förstördes inte kunde fastställas, hade något under vattenmättnadsfasen fått porstenen i änden på provet att lossna och fått sedimentet att tappa sin struktur och glida ur sin form. En förbättring hade varit att säkerställa porstenens infästning mot formen som provet befann sig i, till exempel ett gummiband som träs över ändarna på cylindern och som håller porstenarna på plats.

4.2 Bildanalys

Inom ramen för detta examensarbete har ett verktyg utvecklats som bedöms framgångsrikt kunna identifiera sprickor och uppskatta deras orientering i ett jordprov genom att analysera röntgenbilder.

Verktyget bedöms uppnå sitt syfte då programmet har förmågan att särskilja hålrum från sprickor. Verktyget har också förmågan att särskilja korsande sprickor i prov från röntgenbilder. Programmet har dock en begränsning vid korsande sprickor, då varje cell enbart kan tillhöra en spricka. Detta innebär att vid sprickor som korsar varandra kommer hålrummet i korsningen bedömas tillhöra den dominerande sprickan som då delar den andra sprickan i två delar, se figur 3.6 och 3.7. En utveckling av programmet hade varit att möjliggöra för cellerna i dessa områden att tillhöra flera sprickfamiljer samtidigt. Ytterligare ett problem med att särskilja sprickor syns i spricka nr 5 i figur 3.13, här är det tänkbart att sprickan egentligen består av två sprickor. Men så som programmet är uppbyggt har den definierats som en sammanhängande spricka. Detta till följd av att de överlappar i någon del av provet samt att de har liknande riktning och tilldelats samma sprickfamilj.

När röntgenbilderna från jordprovet analyserades för att identifiera sprickor i volymen valdes det att finna voxlarnas orienteringsvärde på varje plan först, för att sedan kunna sammanställa resultaten från varje enskilt plan och identifiera sammanhängande sprickor i volymen. Valet att finna voxlarna orienteringsvärde i varje plan först gjordes för att hålla nere mängden beräkningar. Hade däremot orienteringen av varje voxel beräknats med hänsyn till alla 3 dimensioner samtidigt hade de resulterat i betydligt fler beräkningar vilket bedömdes göra programmet för långsamt med de resurser som fanns tillgängliga. Det är dock möjligt att resultat då hade blivit annorlunda och något som skulle kunna undersökas i ett framtida arbete.

Verktyget tar fram ett plan som beskriver en sprickas orientering i jordprovet. För att säkerställa att detta plan de facto är ett plan som bra beskriver sprickans orientering, behöver resultatet valideras mot prover med kända orienteringar. Med det hade statistik varit möjlig att ta fram på hur väl programmets resultat stämmer överens med verkligheten. Detta är något som förslagsvis skulle kunna göras som ett framtida arbete.

Skulle programmet efter en validering visa sig ge samma resultat som andra metoder har programmet potential att användas för att bättre förstå glaciärers rörelsers effekter på underliggande sediments egenskaper, genom att koppla glaciärernas rörelse till den inre strukturen hos sediment. Detta skulle innebära att programmet kan ersätta de manuella metoder som finns för att identifiera och mäta sprickors orienteringar, vilket skulle vara tidsparande och minska risken för fel på grund av den mänskliga faktorn. Metoden förutsätter dock att en röntgentomograf finns tillgänglig, vilket inte kan tas för givet.

Ytterligare en begränsning av resultatet är att det endast är en liten volym som har analyserats med programmet. Utöver de så begränsas passningen av de plan som beskriver sprickans orientering, beräkningar utförs på 100 bilder med 700x700 pixlar. Det hade varit önskvärt att ha 700 bilder så att det är en kub av celler som analyseras. Inklinationen är vinkeln mellan planet som passas till sprickan och normalen ut ur pappret av röntgen bilderna. Höjden på bildtraven är 100 bilder och därför 100 st pixlar. Orienteringen är vinkeln mellan planet som passas till sprickan och en linje vertikalt över röntgen bilden. Varje bild är 700x700 pixlar. Programmet utför beräkningar på en bild i taget, vilket medför att sprickor som befinner sig parallellt med bilderna inte identifieras lika effektivt.

Litteratur

- Al-Karni, Awad A och Mosleh A Al-Shamrani (2000). "Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices". I: Computers and Geotechnics 26.2, s. 83–103.
- Altuhafi, Fatin, Béatrice A. Baudet och Peter Sammonds (2010). "The mechanics of subglacial sediment: an example of new "transitional" behaviour." I: *Canadian Geotechnical Journal* 47.7, s. 775–790.
- Ando, Edward (2013). "Experimental investigation of microstructural changes in deforming granular media using x-ray tomography". Diss. Université de Grenoble, s. 72– 108.
- Budhu, Muni (2007). Soil Mechanics and Foundations. Jhon Wiley & Sons.
- Cnudde, Veerle och Matthieu Nicolaas Boone (2013). "High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications". I: *Earth-Science Reviews* 123, s. 1–17.
- Earle, Steven och Karla Panchuk (2019). "Chapter 16 Glaciation". I: *Physical Geology*. BCcampus. ISBN: 9781774200285.
- Evans, D.J.A., E.R. Phillips, J.F. Hiemstra och C.A. Auton (2006). "Subglacial till: Formation, sedimentary characteristics and classification". I: *Earth-Science Reviews* 78.1, s. 115–176. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.04.001.
- Feng, Di, Jiakun Gong, Xiaodong Ni och Jie Ren (2021). "Experimental and numerical analysis of soil cracking characteristics under evaporation". I: *Math. Probl. Eng.* 2021, s. 1–10.
- Hugonnet, Romain, Robert McNabb, Etienne Berthier, Brian Menounos, Christopher Nuth, Luc Girod, Daniel Farinotti, Matthias Huss, Ines Dussaillant, Fanny Brun m. fl. (2021). "Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century". I: Nature 592.7856, s. 726–731.
- Knappett, Jonathan och Robert F Craig (2019). Craig's soil mechanics. 9. utg. CRC press.
- Larsson, Rolf (2008). Jords egenskaper. 5. utg. Statens Geotekniska Institut (SGI).
- Liu, Kui, Richard Boardman, Mark Mavrogordato, Fleur A Loveridge och William Powrie (2020). "The importance of the heel effect in X-ray computed tomography imaging of soils". I: *Environmental Geotechnics* 40, s. 1–16.
- Menzies, John och Jaap J.M. van der Meer (2018). "Chapter 5 Subglacial Processes and Sediments". I: *Past Glacial Environments*. 2. utg. Elsevier, s. 105–158.
- Pal, Nikhil R och Sankar K Pal (1993). "A review on image segmentation techniques".
 I: Pattern Recognition 26.9, s. 1277–1294. DOI: 10.1016/0031-3203(93)90135-J.
- Rees, Sean (u. å.). PART ONE: INTRODUCTION TO TRIAXIAL TESTING. GDS Instruments. Hämtad: 2023-10-10. URL: https://www.gdsinstruments.com/__ assets__/pagepdf/000037/Part%201%20Introduction%20to%20triaxial% 20testing.pdf.
- Schindelin, Johannes, Ignacio Arganda-Carreras, Erwin Frise, Verena Kaynig, Mark Longair, Tobias Pietzsch, Stephan Preibisch, Curtis Rueden, Stephan Saalfeld, Ben-

jamin Schmid m. fl. (2012). "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis". I: *Nature methods* 9.7, s. 676–682.

Soille, Pierre (2004). "Erosion and Dilation". I: Morphological Image Analysis: Principles and Applications. Springer Berlin Heidelberg, s. 63–103. ISBN: 978-3-662-05088-0.

Svensson, Conny (2012). Kompendium i Teknisk Geologi AK. KFS i Lund AB.

- Sveriges Geotekniska Förening (2012). *Triaxialförsök En vägledning*. SGF rapport 2:2012.
- Tarplee, Mark FV, Jaap JM van der Meer och Graham R Davis (2011). "The 3D microscopic 'signature' of strain within glacial sediments revealed using X-ray computed microtomography". I: Quaternary Science Reviews 30.23-24, s. 3501–3532.
- The MathWorks Inc. (2023). *MATLAB version: 9.13.0 (R2019b)*. Natick, Massachusetts, United States. URL: https://www.mathworks.com.
- Tudisco, Erika, Stephen Alexander Hall, Elli Maria Charalampidou, Nikolaj Kardjilov, Andreas Hilger och Hiroki Sone (2015). "Full-field measurements of strain localisation in sandstone by neutron tomography and 3D-volumetric digital image correlation". I: *Physics Procedia* 69, s. 509–515.
- Wang, Pengpeng, Xiaoxia Guo, Yong Sang, Longtan Shao, Zenan Yin och Yudi Wang (2020). "Measurement of local and volumetric deformation in geotechnical triaxial testing using 3D-digital image correlation and a subpixel edge detection algorithm". I: Acta Geotechnica 15, s. 2891–2904.