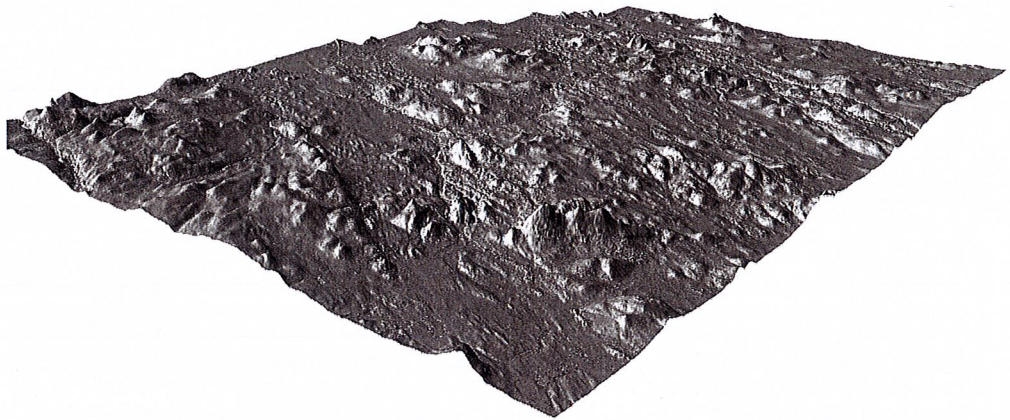


Glaciala lineationers dimensioner och dess koppling till isströmmar i norra Sverige



**Jonny Edberg
Ibrahim Ibrahim**

**Degree of Bachelor of Science
with a major in Earth Sciences
15 hec**

**Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2022 B-1171**

Faculty of Science



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

Glaciala lineationers dimensioner och dess koppling till isströmmar i norra Sverige

Jonny Edberg
Ibrahim Ibrahim

ISSN 1400-3821

B1171
Bachelor of Science thesis
Göteborg 2022

Mailing address
Geovetarcentrum
S 405 30 Göteborg

Address
Geovetarcentrum
Guldhedsgatan 5A

Telephone
031-786 19 56

Geovetarcentrum
Göteborg University
S-405 30 Göteborg
SWEDEN

Sammanfattning

Denna studie undersöker glaciala lineationers former och dimensioner i ett område inom Kirunas kommun i norra Sverige. Utöver detta undersöker arbetet huruvida landformernas form och dimensioner förhåller sig till isflödet relativt till områdets hypotetiskt uppsatta flow-set. Glaciärer kan delas in i varmbottnade och kallbottnade. Isströmmar är varmbottnade, vilket innebär att smältvatten finns vid isbädden. Det är denna typ av isrörelse som antas flödat över undersökningsområdet. Den ökade mängden vatten vid varmbottnade istäckens bädd möjliggör högre hastigheter jämfört med kallbottnade istäcken där isbädden är fast. Utifrån tidigare arbeten antas långa och utdragna subglaciala landformer, i synnerhet lineationer, indikera snabbt isflöde. Denna undersökning gjordes med hjälp av ArcGIS för att kartera och analysera lineationerna i studieområdet. De karterade lineationerna visade en tydlig ökning av genomsnittlig längd och längd till bredd ratio i den centrala axeln av det observerade isflödesmönstret, vilket indikerar snabbare isrörelse vid dessa områden. Majoriteten av de undersökta lineationerna uppvisade en klassisk form, däremot kunde även en noterbar andel av lineationer med symmetrisk och reverse form observeras, dock kunde ingen tydlig koppling mellan lineationernas form och ishastigheten uttolkas.

Nyckelord: *Glaciär, Glaciala lineationer, Isströmmar, Drumliner*

Förord

Denna studie är en kandidatsuppsats med fokus på isströmmar, subglaciala lineationer och relationen däremellan. Studien har tillsammans, utförts av Jonny Edberg och Ibrahim Ibrahim. Där Jonny fokuserade på lineationernas form i studieområdet och hur detta förhåller sig till tidigare forskning. Medan Ibrahim ansvarade för lineationernas förhållande till isflödes hastigheten och hur det jämförs med tidigare arbeten.

Vi vill tacka och ge uppskattning till några personer som varit till hjälp under studiens gång. Tack till Mark Johnson som gav åsikter och råd för våra frågor och funderingar kring olika teorier gällande glaciala lineationer och deras formation. Vår uppskattning går även till Heather Reese som gav råd kring GIS relaterade problem som underlättade metodiken och utförandet för studien. Slutligen vill vi ge ett stort tack till vår handledare Jakob Heyman som har varit till stor hjälp och väglett oss under studiens gång.

Jonny Edberg & Ibrahim Ibrahim

Göteborgs universitet, Maj 2022

1. Introduktion	5
1.1 Syfte och frågeställningar	6
2. Studieområde	6
3. Bakgrund	7
3.1 Glaciär dynamik	7
3.2 Isströmmar	9
3.3 Subglaciala landformer	11
3.4 Tidigare arbeten	13
3.4.1 Processer som kontrollerar bildningen av isströmmar	15
3.4.2 Relationen mellan längd/bredd-ratio och isströmmar	16
3.4.3 Drumliners form	18
4. Metod	19
4.1 Datainsamling och bearbetning	19
4.2 Bedömning och kartering	20
4.3 Dataextraktion och interpolering	22
5. Resultat	23
5.1 Områdets lineationer och dess form	23
5.1.2 Frekvens distribution av lineation dimension och form	24
5.2 Variation mellan områden	27
6. Diskussion	29
6.1 Lineationernas form	29
6.2 Förhållandet med isflödet	31
6.3 Felkällor	32
6.3.1 Metoddiskussion	33
6.4 Framtida undersökningar	34
7. Slutsats	34
Referenser	35

1. Introduktion

Istäcken och glaciärer har stor inverkan på geomorfologin över områdena de täcker och är den primära faktorn till bildningen av subglaciala landformer. Karteringen av subglaciala landformer har stor betydelse för rekonstruktion av tidigare istäckens flödesmönster, erosions- och depositions-mönster samt karaktären på isbädd kontakten med det underliggande materialet (Boulton & Clark, 1990a; Boulton & Clark, 1990b ; Clark m.fl., 2009; Hättestrand m.fl., 2004; Mckenzie m.fl., 2022; Möller & Dowling, 2018; Schomacker m.fl., 2018).

Förhållandet mellan ackumulationen och ablationen av is är det som framförallt påverkar förändringen av massan av ett istäcke. Isströmmar, men även utlöparglaciärer är de främsta processer som kan relativt drastiskt öka mängden ablation ett istäcke genomgår, vilket gör att isströmmar och utlöparglaciärer ofta har en stor inverkan när istäcken minskar i massa (Spagnolo m.fl., 2014). Utlöparglaciärer definieras som en dalglaciär som dränerar en inlandsis eller en platåglaciär (National Snow & Ice Data Center [NSIDC], 2022). En isström har en relativt bred och varierande definition, i denna undersökning kommer definitionen av isströmmar baseras på beskrivningen som ges av NSIDC, där en isström definieras som en del av inlandsis eller i en platåglaciär som flödar med en högre hastighet än omkringliggande delar av glaciären delar av glaciären (NSIDC, 2022).

Intresset för isströmmar har under de senaste årtionden ökat betydligt. Fokus har lagts på deras mekanismer och konsekvenserna de har för glaciärer. Mycket uppmärksamhet har givits till specifikt isströmmar och dess inverkan på glaciärens stabilitet. Isströmmar agerar som den främsta processen för rörelse och transport av is och sediment för ett stort antal glaciärer (Bennett, 2003). I dagsläget släpps 90 % av det Antarktiska istäckets sediment och is ut av snabbt flödande isströmmar (Morgan m.fl., 1982; Rignot m.fl., 2011; Bamber m.fl., 2000). Resultaten från tidigare undersökningar av bland annat King m.fl. (2009) och Stokes & Clark (2008) tyder på att längd/bredd-ratio av subglaciala landformer är en indikation för isflödes-hastighet och att hastigheten är högre vid områden där isströmmar flödat. Eftersom längd/bredd-ratio av subglaciala landformer kan representera isflödes-hastighet, är det en intressant parameter att undersöka. Parametern kan användas som ett proxy för is-hastigheten, vilket möjliggör forskning om variation i isrörelse. Detta medför ytterligare möjlighet för att bättre förstå isflöden i glaciärer.

Gällande formen av lineationer, introducerades en metod för att beräkna den longitudinella profilen av drumliner av Harry and Trenhaile (1987). Denna metod bekräftades sedan att vara användbar och pålitlig för beräkningen av lineationers form av Spagnolo m.fl. (2011). Spagnolo m.fl. (2011) använde sedan metoden för att beräkna formen av drumliner i de brittiska öarna och kom fram till att majoriteten av drumlinerna hade en symmetrisk form istället för en klassisk form som de förväntat. Denna studie har som mål att undersöka relationen mellan tecken för ishastigheten med både längd/bredd ration och formen av lineationerna i ett utvalt område i nordöstra Kiruna kommun i norra Sverige och sedan jämföra resultaten med tidigare arbeten av Spagnolo m.fl. (2011), King m.fl. (2009) & Stokes & Clark (2008).

1.1 Syfte och frågeställningar

Denna studie avser att kartera och undersöka glaciala lineationer i norra Sverige med syfte att få en bättre förståelse för dynamiken i subglaciala isströmmar från den Pleistocena nedisningen. Studien ämnar att göra detta genom en kvantitativ analys över distributionen av och formen på lineationer med hjälp av LiDAR-höjddata. För att uppnå syftet kommer undersökningen försöka besvara nedanstående frågeställningar.

1. Vilken form har lineationerna i den karterade isströmmen och hur jämför sig dessa resultat med tidigare studier?
2. Finns det samband mellan antagen isflödes hastighet och lineationernas form och hur jämför sig detta resultat med tidigare studier

2. Studieområde

Undersökningsområdet valdes med anledning av att det uppvisade tillräckligt stort antal glaciala lineationer för att möjliggöra relevanta resultat i koppling till målet av arbetet. Hättestrand m.fl. (2004) redovisar förekomsten av drumliner i norra och centrala Sverige, där denna undersöknings studieområde ingår. Studieområdet täcker en yta på 2757 km² och ligger i nordöstra Kiruna intill den svensk-finska gränsen (figur 1).

En andel av de drumliner som förekommer i de nordliga delarna av Sverige har en ålder som överstiger 100 000 år och ses som en väsentlig del av ett kvarstående äldre glacialt landskap. Rekonstruktion av tidigare istäcken och deras rörelse beräknas oftast med den glaciala geomorfologiska historien i kombination med den geokronologiska och stratigrafiska sekvensen. I och med att en del glaciala landformer från äldre glaciationer finns kvar i norra Sverige används crosscutting av yngre glaciala landformer som en indikator för landformer som skapats under tidigare glaciationer. Om landformerna inte uppvisar några tecken på crosscutting antas landformen vara formad under den senaste nedisningen (Lagerbäck, 1988; Lagerbäck and Robertsson 1988; Hättestrand m.fl., 2004).



Figur 1. Visar karta över Sverige med studieområdet markerat

3. Bakgrund

3.1 Glaciär dynamik

Glaciärers flöde är ett resultat av deformation av individuella iskristaller som utsätts för tryck, detta sker i form iskrypning och basal glidning och beskrivs mer ingående senare i avsnittet (Van der Veen, 2022). Isflödet av ett istäcke kan sedan delas in i olika flow-sets. Flow-sets kan definieras som en samling av landformer som indikerar en isrörelseriktning. De mekanismer som har en inverkan på glaciärens rörelse påverkas till stor del av om istäcket är kallbottnad,

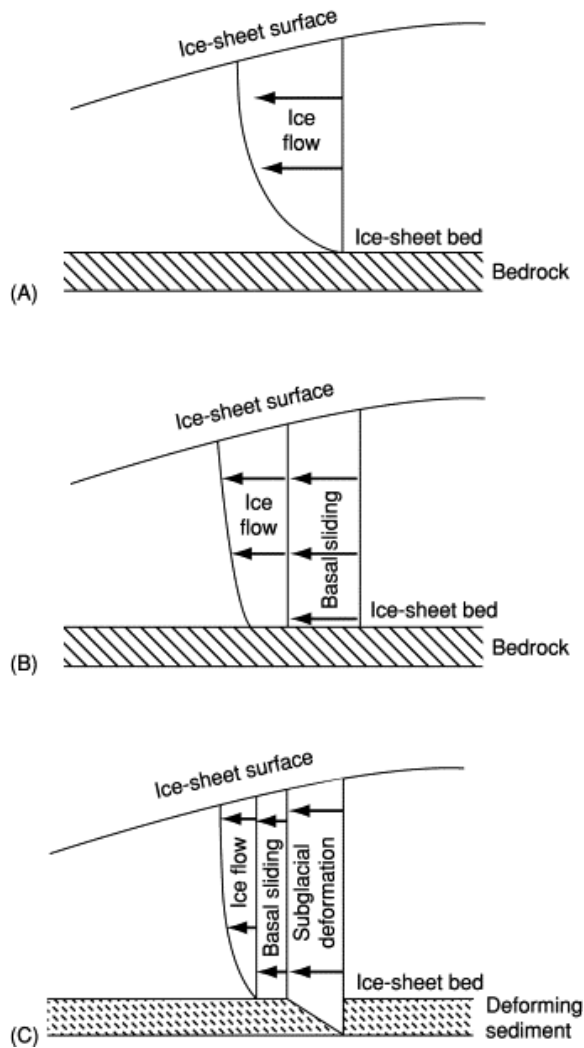
varmbottnad eller polytermal. Kallbottnade glaciärer, även kallade torr-baserade eller polära glaciärer, är glaciärer och istäcken vars botten befinner sig under tryck-smältpunkten. Detta innebär att de är bottenfrusna och inte har något smältvatten som befinner sig i kontakt med underlaget. Varmbottnade, eller tempererade glaciärer, har botten-temperaturer intill trycksmältpunkt gränsen, vilket innebär att flytande vatten existerar tillsammans med den fasta isbädden. En relativt liten förändring i temperatur kan ha en mycket stor inverkan på smältning, area och volym av varmbottnade glaciärer och istäcken (Lorrain & Fitzsimmons, 2011; United States Geological Survey, 2018).

Polytermala glaciärer är glaciärer vars botten har en blandad termisk regim. Dessa glaciärer har både varm is (0°C) i deras inre, där isen är relativt tjock och har värmts till trycksmältpunkten, och kall is (under 0°C) vid deras yttre kanter där isen är relativt tunn och yttlig. Vanligtvis består glaciärens tjockare sektioner av varmbottnad is. Detta beror på att vikten av överliggande is leder till att temperaturen vid bädden uppnår trycksmältpunkten. Vid polytermala istäcken och glaciärer består de yttre kanterna av isen oftast av kallbottnad is, vilket beror till stor del på att isen är tunnare vid dessa delar (Glasser, 2011).

Glacialt flöde styrs främst av gravitationens påverkan, där de tre mekanismer som har störst påverkan på en glaciärs rörelse är intern deformation, glidning i botten och subglacial bädd deformation (Figur 2). Intern deformation uppstår som en konsekvens av iskrypning, storskaliga veckningar och förkastningar. Iskrypning är en process där iskristaller genomgår gemensam förflyttning som en reaktion på tillförsel av skjuvspänning. Skjuvspänningen i denna situation är en funktion av isens massa och isöverytans lutning. Den ökade skjuvspänningen resulterar i att istäcket genomgår en rörelse framåt i riktningen av glaciärens ytsslutning. Veckningar och förkastningar uppstår ofta i de områden där iskrypning inte möjliggör för tillräckligt snabb anpassning till spänningsökningen inom isen (Hambrey & Glasser, 2005).

Basal glidning uppstår när ett varmbottnat istäcke glider över underliggande material med hjälp av smältvatten från glaciären. Glidningsprocessen följs av en kombination av förstärkt basal krypning och återfrysning (regelation), vilket är ett resultat av tryckvariationer orsakat av ojämnheter under isrörelsen. Den tredje processen, subglacial bädd deformation är en mekanism där icke fryst sediment under glaciären deformeras under vikten av den överliggande isen. Subglacial bädd deformation förekommer när vattenportrycket mellan sedimentkornen stiger tillräckligt mycket för att överkomma resistansen mellan de individuella kornen, vilket ger

möjlighet för gemensam rörelse. Detta är en process som har särskilt stor betydelse för varmbottnade eller polytermiska istäcken som ligger över osorterat sediment med stor kornstorleksvariation. Exempelvis har beräkningar visat att 90 % av hastigheten av utlöparglaciären Breiðamerkurjökull i Island beror på subglacial bädd deformation (Hambrey & Glasser, 2005).



Figur 2. En relativ vertikal hastighetsprofil där A) Kall-baserat istäcke över berggrund, B) Kall-baserat istäcke över berggrund, C) Varm-baserat istäcke över deformerbart sediment, visar de varierande faktorerna och komponenterna av glacialt flöde under olika termiska förhållanden (Hambrey & Glasser, 2005).

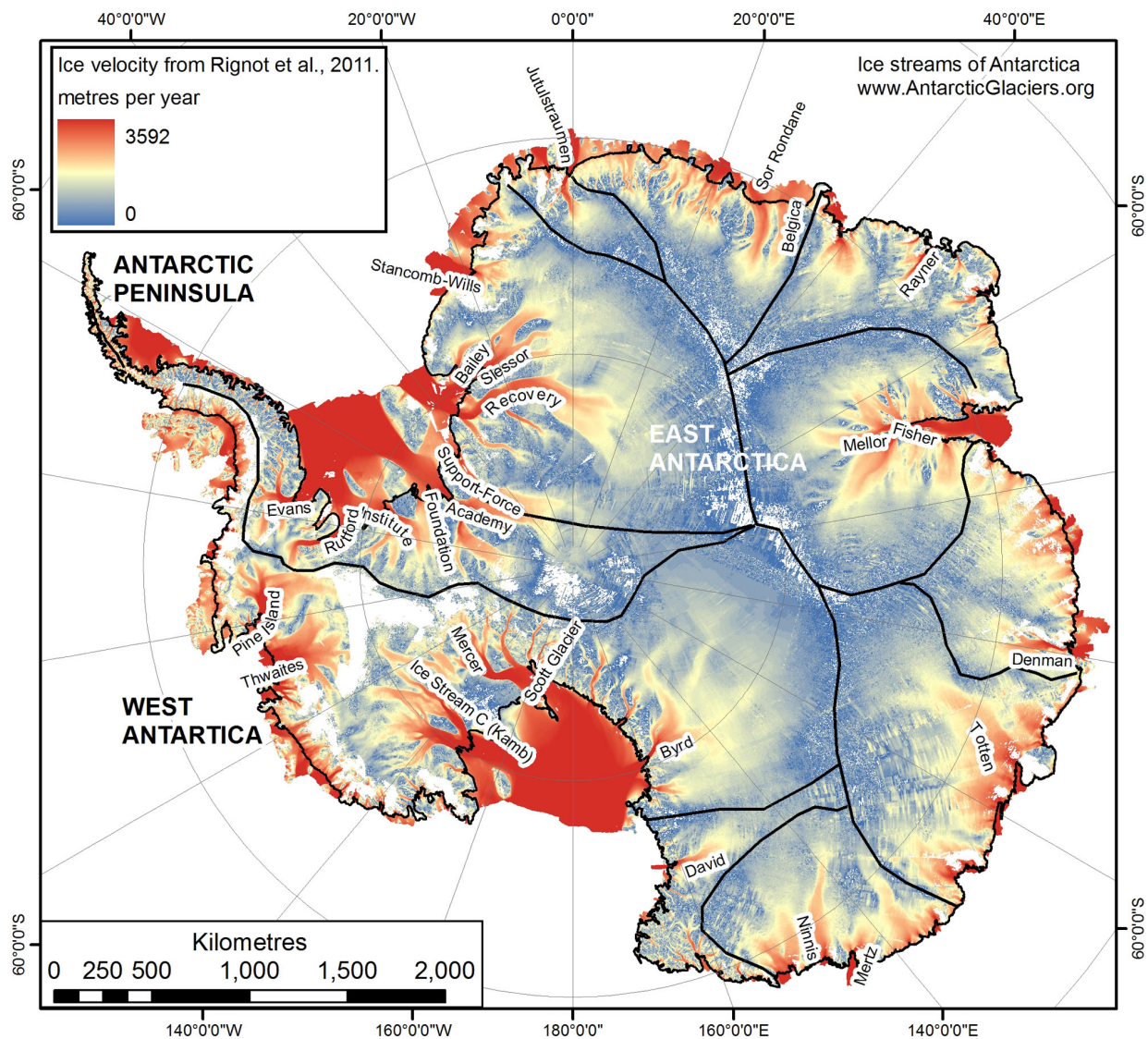
3.2 Isströmmar

Isströmmar är, som tidigare nämnts, delar av ett istäcke som rör sig med en högre hastighet jämfört med omkringliggande is och kan uppnå hastigheter uppemot 800 meter per år. Isströmmar är relativt stora med en bredd och längd som ofta överstiger 20 respektive 150 kilometer. Eftersom isströmmar transporterar en stor mängd och volym is mycket snabbt kan

detta i sin tur leda till att isströmmar påverkar både salthalt och den termiska nivån av oceancirkulationen. Isströmmar kan delas in i topografiska och “rena” isströmmar beroende på om isens rörelse begränsas av områdets topografi eller omkringliggande is med en lägre hastighet. En del isströmmar kan även bildas under omständigheter där de begränsas av både det topografiska läget och omkringliggande is (Davis, 2020).

Tidigare observationer har visat att isströmmar har en benägenhet att täcka områden med en låg genomsnittlig topografi, vilket i detta sammanhang innebär relativt lägre relief och höjd gentemot marken under omkringliggande is. Detta beror på en rad olika parametrar, därav tjockleken på isen är en. En hög tjocklek på isströmmen leder till en högre drivande tryck vid bädden vilket i sin tur leder till en högre hastighet då den interna deformationen av isen är en funktion av skjuvspänningen vid isens bädd. En högre mäktighet på isen möjliggör även att en större mängd av isen blir isolerad och kan därmed uppehålla högre temperaturer vid isbädden, vilket förstärker isdeformationen och basal glidning ytterligare (Davis, 2020; Bennett, 2003).

Mäktigheten, utbredningen och flödes hastigheten av isströmmar varierar över tidsskalor av decennier. Observationer av isströmmar i Antarktis ger stöd för hastighetsminskning, förtunning, acceleration, stagnation och migration av istäcket lateralt. I nuläget ses mekanismerna som kontrollerar egenskaperna hos isströmmar som komplexa och förståelsen om dem är begränsad. Utöver topografien och omkringliggande is med lägre hastigheter kan bildningen av isströmmar även ske vid områden med relativt svagare is eller i områden som möjliggör för en varmbottnad isrörelse. (Bennett, 2003; Winsborrow m.fl., 2010). Hastighetskartan i figur 3 visar hur isströmmar dränerar istäcket i Antarktis. Is flödar genom dräneringssystemet från istäckets centrum och delar upp sig till olika flöden mot havet eller shelf-is (Davis, 2020; Rignot m.fl., 2011)



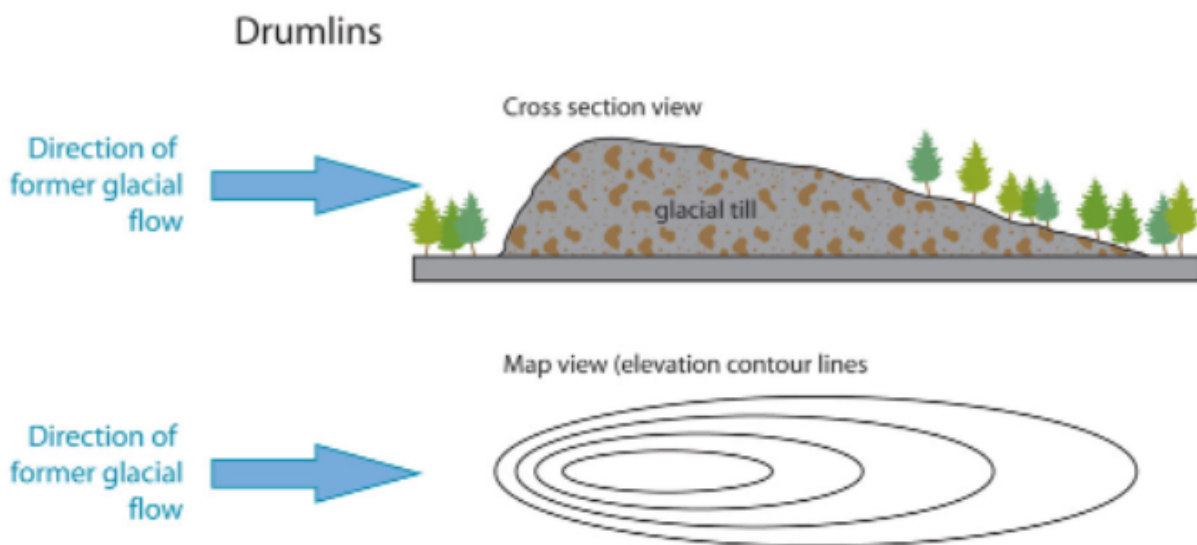
Figur 3. Hastighetkarta över Antarktis utifrån data insamlad mellan 2007-2009. Data är insamlad av Rignot m.fl.(2011) och figur är skapad av Davis (2020).

3.3 Subglaciala landformer

Subglaciala landformer bildas framförallt i glacialt deponerade sediment. Klassificeringen av subglaciala landformer baseras till största del på landformens storlek, form och hur de bildats. Bland de typer av glacialt formade eller eroderade landformer som indikerar isens rörelse är glaciala lineationer bland de främst studerade, exempel på dessa typer av subglaciala landformer är crag-and-tails (The University of Sheffield, 2022b), mega-scale glacial lineations (MSGL) (Clark, 1993) och drumliner. Drumliner är den typ av glacial landform som är mest geografiskt utspridd och talrik, vilket gör drumliner lämpliga för undersökningar gällande glaciologi (Clark m.fl., 2009).

Drumliner har ingen särskild definition när det kommer till storlek, men kan vara upp till flera kilometer i längd och uppemot 50 meter i höjd och har ett typiskt längd till bredd förhållande som ligger mellan 2:1 och 4:1 (Clark m.fl., 2009). Drumliner är utspridda i Sverige, Finland, Kanada och Irland och har sällan observerats som individuella landformer, utan förekommer istället som breda fält eller svärmar, där ett drumlinfält kan ha mellan tiotals till tusentals olika drumliner.

Observationer och undersökningar gällande drumliner har visat att majoriteten av drumliner ligger parallellt med det isrörelsemönster som format dem. Drumliner består av subglacialt deponerad morän och relativt stora mängder lera och en ideal form av en drumlin är en tårform (figur 4), där spetsen pekar i isrörelseriktningen (Clark m.fl., 2009; NSIDC, 2020; Rogerson, 2014; The University of Sheffield, 2022a).



Figur 4. Övre bilden visar den ideala ytliga formen av en drumlin. Nedre bilden visar hur en drumlin kan se ut på en höjdkarta. (NSIDC, 2020)

Mega-scale glacial lineation eller MSGL definieras som väl utdragna subglaciala lineationer som formats av sediment. MSGL är oftast längre än 10 km och har en del likheter med drumliner men är skalmässigt mycket större. MSGL bildas endast under istäcken som rör sig mycket snabbt i relation till omkringliggande is med hastigheter mellan hundratals till tusentals meter per år. MSGL används därmed idag som den främst använda landformen för att identifiera tidigare isströmmar. Undersökning av observerade MSGL tros ha stor potential för

att bättre kunna förstå och förklara flertal olika processer kopplade till isströmmar och andra snabbt flödande istäcken och glaciärer (Cofaigh m.fl., 2013; The University of Sheffield, 2022d; Spagnolo m.fl., 2014).

Crag-and-tail är en landform som utmärks av eleverad berggrund som följs av en rygg av material som eroderats och sedan deponerats av istäcket för att forma en avsmalnande bergsrygg som är riktad nedsis. Crag-and-tails kan delas upp i två olika typer beroende på materialet som ryggen består av och bildningsprocessen. Erosionsformade crag-and-tails består av mycket erosions resistent berg som skyddat materialet på läsidan från fullständig erosion från glaciären, ryggen i denna typ består av berggrund. Den andra typen av crag-and-tail bildas när glaciär sediment deponeras i ett hålrum format på läsidan av det blockerande blocket. Båda typerna kan ha glaciär deponerat sediment på ytan av ryggen. Likt drumliner varierar storleken på crag-and-tails mellan tiotals meter upp till flera kilometer.(The University of Sheffield, 2022b).

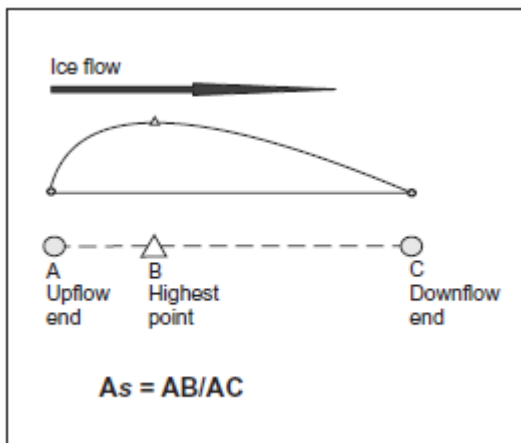
3.4 Tidigare arbeten

Debatten kring processerna som skapar subglaciala landformer såsom drumliner och MSGL pågår och frågan är relativt kontroversiell och osäkert ämne där ingen teori blivit godtagen som korrekt. Anledningen till att processerna bakom formationen av subglaciala landformer ännu inte har en fastställd teori beror till stor del på att det inte är möjligt att övervaka processen när den är aktiv utan man kan endast undersöka slutresultaten (Clark m.fl, 2009; Clark, 2010; Menzies, 1989; Möller & Dowling, 2018; Schomacker m.fl., 2018; Fowler, 2018; Stokes m.fl., 2013). Teorierna av Boulton (1987) & Shaw (1989, 2002) kan ses som grunden för de två olika teorier som dominerar vetenskapliga undersökningar gällande subglaciala landformers bildning idag.

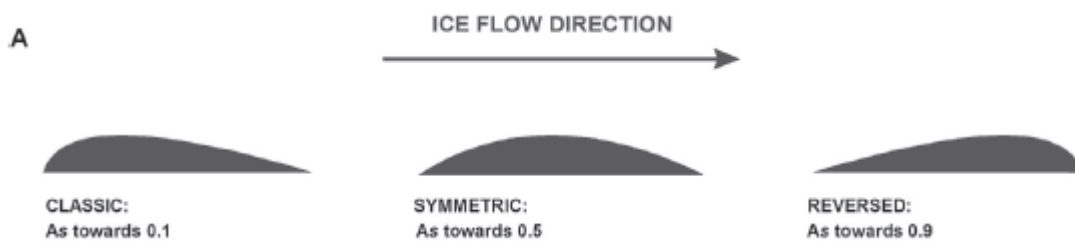
Boulton (1987) förklarar att de subglaciala landformer som kan observeras bildats som ett resultat av den påverkan som överliggande is har haft på de underliggande sedimenten under isrörelsen. Shaw (1989; 2002) hävdar att de glaciala landformerna istället skapats vid kraftig turbulens när subglaciala översvämningar inträffat. Andra teorier gällande drumlinbildning är bland annat anhopning omkring förhinder (Fairchild, 1929), utvidgandebeteende av morän (Smalley och Unwin, 1968), fyllning av hålrum på läsidor (Dardis, 1985) och instabilitet vid is-morän gränssnittet (Hindmarsh, 1988).

En studie som med hjälp av radar data kunnat undersöka en aktiv isström i västra Antarktis har kunnat observera MSGL under istäcket. Den observerade MSGL har samma proportioner som MSGL vid andra delar världen som bildats under tidigare nedisningar. Eftersom morfologin av den MSGL som observerades under studien är mer eller mindre identisk till MSGL som skapats i andra områden av tidigare isrörelser kan förhållandena vid den aktiva isströmmen antas även gälla vid tidigare isströmmar. Denna undersökning ger därmed starkt stöd för att bildningen av lineationer med hög längd till bredd ratio bildas framförallt under strömmande is och inte vid kraftiga vattenflöden (King m.fl., 2009)

Harry och Trenhaile (1987) utförde ett arbete där drumliners dimensioner analyserades. Metodiken gick ut på att använda sig av parametern AS, vars definition är avståndet mellan den högsta punkten och stötsidan dividerat med avståndet mellan stötsidan och läsidan (fig 5). AS parametern har ett intervall av 0-1, men realistiskt hamnar majoriteten av drumliner mellan 0,1 och 0,9. Ett AS värde mellan 0,1 och 0,4 indikerar en form representativ av den klassiska drumlinformen, medan AS-värden i spannet 0,4-0,6 och 0,6-0,9 representerar drumliner med en symmetrisk respektive en omvänd form (fig 6)



Figur 5. Illustrerar hur värdena för beräkningen av parametern AS tas ut (Spagnolo m.fl., 2011)



Figur 6 Illustrerar realistisk form av landformer baserat på uträknat AS värde (Spagnolo m.fl., 2011)

Stokes och Clark (1999) undersökte kriterier för att identifiera isströmmar, där de argumenterar för att geomorfologiska observationer kan spela en betydande roll för att möjliggöra identifiering av paleo-isströmmar. De menar att för att bättre kunna förstå paleo-isströmmar behöver parametrarna som påverkar uppkomsten och mekanismerna bakom isströmmar undersökas mer djupgående. Eftersom isströmmar transporterar stora mängder is från istäcket kan påverkan som isströmmar har på massan och volymen av istäcket vara mycket betydelsefullt. Undersökning av tidigare isströmmar kan därmed möjliggöra för en bättre förståelse för de aktuella processer som har inverkan på moderna istäcken vid t.ex. Antarktis och Grönland. (Stokes & Clark, 1999).

3.4.1 Processer som kontrollerar bildningen av isströmmar

Winsborrow m.fl. (2010) undersöker vad som kontrollerar positionen av isströmmar i ett istäcke och har som mål att skapa en hierarki utifrån inverkan olika processer har på bildningen av isströmmar. De sju faktorer som undersöks är “topographic focusing, topographic steps, macro-scale bed roughness, calving margins, subglacial geology, geothermal heat flux och subglacial meltwater routing”. Bland dessa sju faktorer är de mest frekventa faktorerna som observerats topographic focusing, subglacial geology, meltwater routing och calving margins. Med målet av denna undersökning och den tillgängliga datan i åtanke kommer fokus endast läggas på topografisk fokusering, topografiska trappor och Macro-scale bäddråhet.

- Topografisk-styrning

Topografisk fokusering innebär att isströmmar bildas när delar av isen åker igenom en “topographic trough” som är ett avlångt område med fördjupad mark. Detta leder till att hastigheten av isen kommer att öka för att kunna upprätthålla samma isutsläpp som omkringliggande-områden.

- Kalvningskanten

Kalvning är en mekanisk process där och isblock vid istäckets yttre kanter lossnar från glaciären på grund av tidigare sprickor som utvecklats. Vid förlusten av isblock vid kalvningskanten dras is som tidigare legat mer inåt lander ner på grund av det nyligen bildade tomrummet. Utöver detta, kan det subglaciala vattentrycket öka intill

kalvningskanten, vilket minskar skjuvspänningen vid isbädden och ökar hastigheten av isens uppströms från kalvningskanten.

- Topografiska trappor

Till skillnad från större fokusering av isriktningen kan även småskaliga branta trappor under det flödande istäcket påverkar placeringen av isströmmar, denna process kallas för topographic steps. När isen flödar över en trappa sker en ökning i temperatur som ett resultat av en påtvingad acceleration. Temperaturökningen kommer orsaka en minskning i isens viskositet vilket i sin tur leder till att isen enklare deformeras och is hastigheten kommer att öka ytterligare.

- Macro-scale bäddråhet

Bäddråhet förklarar friktionen som skapas från block, sten och gropar i isbädden, där en mer ojämn bädd ökar mängden friktion. Macro-scale bäddråhet är ett fenomen som uppstår när berggrunds hinder uppkommer i den subglaciala bädden. Utstickande berggrund skapar motstånd på två olika sätt. Den ena är en form av resistens som tillkommer när isen tvingas att flöda runt hindret. Den andra formen av resistens bildas som en konsekvens av det tunna moränlagret eller avsaknad av det. Detta beror på att morän generellt har ett lägre motstånd mot isflöde i jämförelse med berggrund. Båda dessa processer leder till en minskning av isflödes hastigheten i områden med hög bäddråhet.

Slutsatsen som Winsborrow m.fl. (2010) drar är att det är en kombination av olika processer som har störst påverkan och inverkan på bildningen av isströmmar och inte enskilda processer. Bland de sju undersökta processerna har Winsborrow m.fl. (2010) kommit fram till att kombinationen av topografisk fokusering och kalvningskanten är de primära faktorer som möjliggör isströmmar. Iströmmar kan även bildas i områden som har hög bäddråhet, topografiska trappor och omväxlande geotermiska värmenivåer.

3.4.2 Relationen mellan längd/bredd-ratio och isströmmar

Stokes & Clark (2008) undersöker relationen mellan långa drumliner och MSGL med isströmmar. Undersökningsområdet är norr om Dubawnt Lake, Keewatin distriktet i norra Kanada. De karterade över 11 000 lineationer där längd, bredd, orientering och standardavvikelsen för orienteringen mättes och beräknades. Stokes & Clark (2008) skriver att isströmmar inte nödvändigtvis producerar långa landformer. Eftersom längden på de bildade landformerna beror på isflödesmekanismerna och kopplingen mellan istäcket och det underliggande materialet. Däremot, när långa landformer är närvarande argumenterar de att isströmmar är en rimlig förklaring.

Stokes & Clark (2008) fortsätter med att diskutera utdragnings ration av landformerna och om detta är en bra indikator för tidigare snabb isrörelse. De börjar med att förklara att de utgår från Clark (1933) där längd/bredd-ratio är en kvot av is hastigheten och varaktigheten av isflödet. Med denna logik förklarar Stokes & Clark (2008) att en MSGL därmed antingen kan formas av snabbt isflöde under en kort period eller långsammare isflöde under en längre period. Dock är majoriteten av tidigare undersökningar till förmån för snabbt omväxlande ismönster, vilket antyder på att långvariga stabila ismönster i tidigare istäcken var relativt ovanligt (Andrews m.fl., 1983; Boulton & Clark, 1990a,b; MacAyeal, 1993). Därmed gör Stokes & Clark (2008) tolkningen att långa glaciala lineationer lättare förklaras med isströmmar, särskilt i områden som har andra parametrar som stödjer isströmsbildning.

Resultaten från Stokes & Clarks (2008) undersökning tyder på att lineationerna är generellt längre, bredare och mer utdragna i den centrala axeln av ett flow-set. Lineationerna som analyserades var mer tätpackade och täckte en större yta i den centrala axeln av detta flow-set. Deras resultat visar därmed att lineationerna i studieområdet inte bara blir längre i den smalaste delen av flödet, men även tätare och täcker större ytor. Slutsatsen som Stokes & Clark (2008) drar är att längd/bredd-ratio har en benägenhet att öka i den centrala axeln av det flow-set som observerats. Detta passar sedan väl ihop med observationer som gjorts av samtida isströmmar, vilket i sin tur tyder på att delarna av isen vid de laterala kanterna har en lägre hastighet som en

konsekvens av bland annat friktion vid sidorna. De fortsätter sedan med att förklara att ökningen i längd/bredd-ration som observerades sammanknyter med iskonvergensen i den centrala delen av flow-set och att de tolkar detta som ett resultat av ökad is hastighet. De avslutar med att poängtera att väl utdragna lineationer är en bra kvalitativ indikation för isströmmar i områden med kraftigt ensidig topografi och underliggande geologi.

Andra studier som tyder på att hastigheten av istäcket har en stark korrelation med utdragningen av subglaciala landformer är Briner (2007) & Hess & Briner (2009) som båda undersökte drumlinfält i delstaten New York, nordöstra USA. Resultaten från dessa två undersökningar pekar båda mot att den primära faktorn som påverkat utdragningen av de subglaciala landformerna i de undersökta drumlinfälten är isens hastighet. De områden som observerades av Briner (2007) visade även att den centrala delen av respektive område hade mest utdragna landformer.

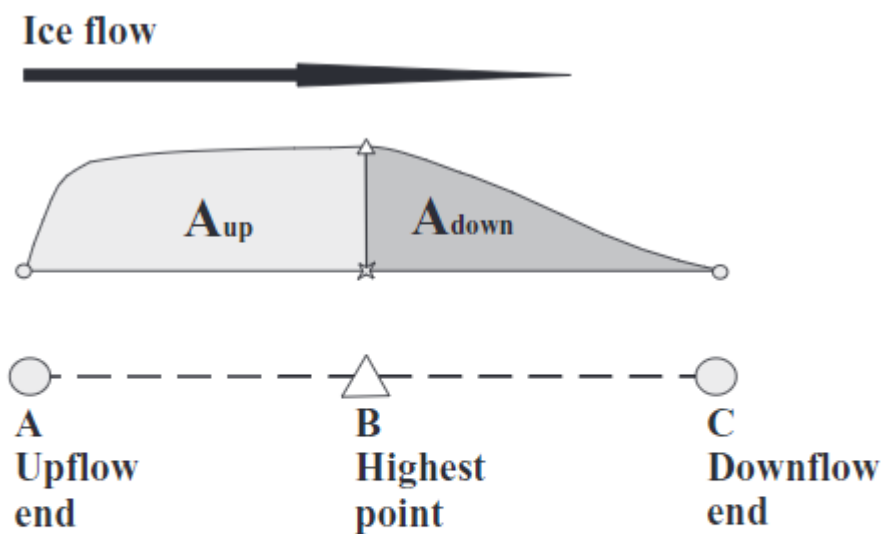
3.4.3 Drumliners form

Studien publicerad av Spagnolo m.fl. (2011) hade som mål att analysera formen av ca 29 000 drumliner utspridda över de brittiska öarna. Denna studie tar AS-metoden (figur 5) som skapats av Harry och Trenhaile (1987) och förändrar metoden, då dem anser att metoden inte korrekt representerar drumliners verkliga form. Istället för att endast beräkna As utifrån AB/AC, beräknas As_{area} genom att ta ration mellan arean under uppflödes halvan av profilen och området under hela profilen (figur 7). Spagnolo m.fl. (2011) förklarar att skapandet av denna nya metod beror på att den originella versionen av As metoden är bristande då drumliner realistiskt sätt oftast inte uppvisar triangulära profiler och att resultaten utifrån den originella As metoden därmed till viss del vara partiskt eller missvisande.

Resultaten från Spagnolo m.fl. (2011) visar att 31% av alla karterade drumliner klassificeras enligt As_{area} som asymmetriska, 52,5% som symmetriska och 16,5% som reversed. De förklarar sedan att undersökningen visade att drumliner av alla olika profiltyper kan finnas intill varandra. Vidare visar deras resultat att majoriteten av de observerade drumlinerna har den högsta punkten placerad halvvägs i drumlinens längdprofil. Spagnolo m.fl. (2011) jämför sedan det nya As_{area} med det originella As värdet och de två metoderna uppvisar mycket liknande resultat, Spagnolo m.fl. (2011) poängterar då att detta tyder på att As metoden är användbar

metod och ger trovärdiga och realistiska resultat. Därmed motbevisas hypotesen som Spagnolo m.fl. (2011) tog upp, där A_s metoden ansågs ge partiska resultat.

Spagnolo m.fl. (2011) skriver att drumlin-bildning är en process som inte har en klar och tydlig teori och att det är relativt oklart exakt hur en drumlin bildas. De menar att tidigare teorier, som nämnts i sektion 3.3, inte förklarar vad som kontrollerar profiltypen av en drumlin och behöver göra detta för att kunna vara trovärdiga. Spagnolo m.fl. (2011) anser att diskussion och vidare undersökning gällande drumliner krävs, där de tar upp huruvida drumliner bildats med deras slutgiltiga form eller inte. De fortsätter med att ta upp den möjligheten att drumliner bildas asymmetriskt och sedan påverkas av bl.a. gravitationen vilket leder till drumlinerna får sin symmetriska form i efterhand. Om detta stämmer poängterar de att nyligen bildade drumliner därmed borde vara mer asymmetriska, men på grund av den mycket svaga sluttningen på de karterade drumlinerna är gravitationens påverkan osannolik.



$$A_s = AB/AC = 0.5$$

$$AS_{area} = A_{up} / (A_{up} + A_{down}) = 0.64$$

Figur 7. Visar hur metoden för beräkning av $A_{s_{area}}$ introducerat av Spagnolo m.fl. (2011) som bygger vidare på A_s metoden skapad av Harry & Trenhaile (figur 5).

4. Metod

4.1 Datainsamling och bearbetning

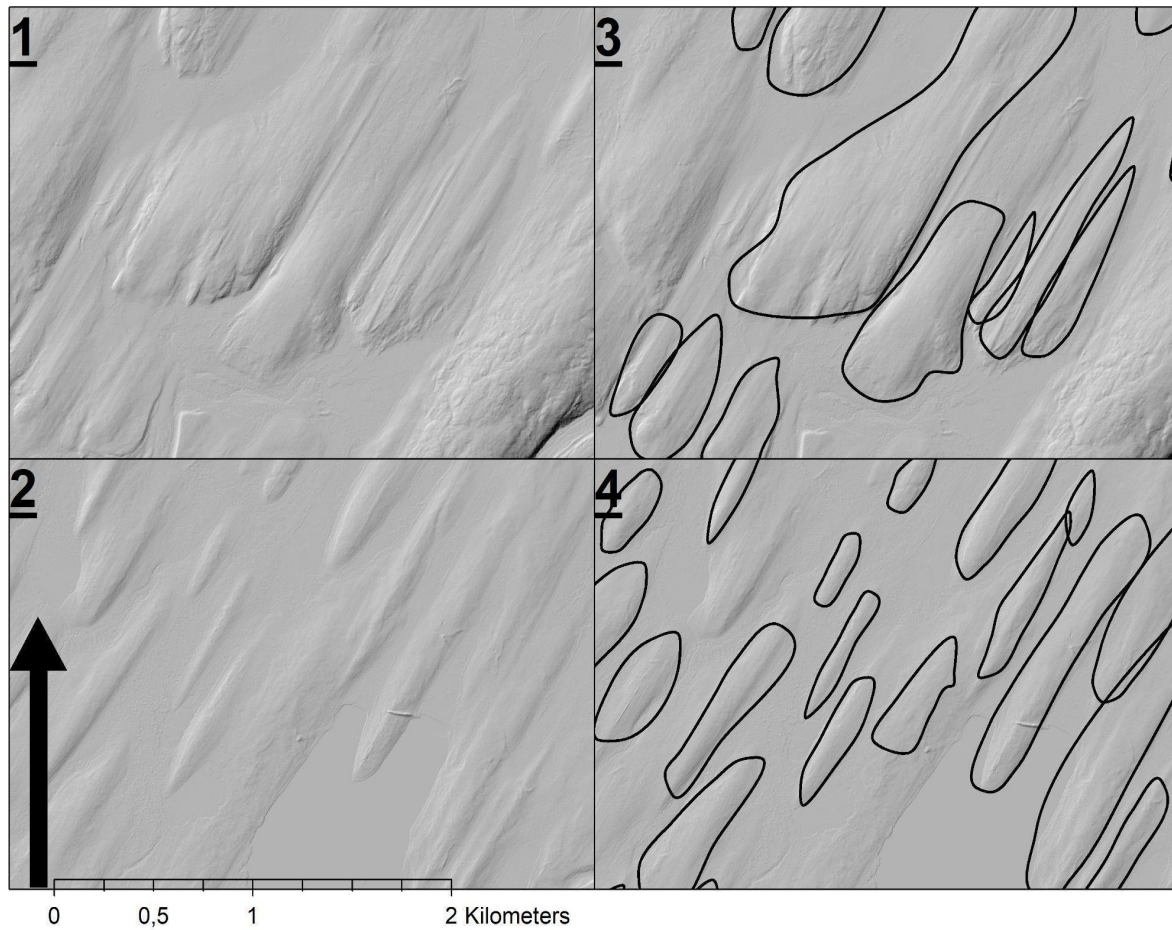
Undersökningens metodik grundas främst i analys av rumslig data som utförs med hjälp av ArcMap, Esri (2022). Den data som använts är LiDAR-höjddata med en upplösning av 2 m (Lantmäteriet, 2019). Ett hillshade lager skapades från höjdmodellen med ljusriktning från azimut 315° och altitud 45°. Med hjälp av hillshade-lagret kunde områdets topografi observeras och därmed möjliggörs kartering av lineationerna. Jordarts-data hämtades från Sveriges geologiska undersökning (Sveriges geologiska undersökning, 2021).

4.2 Bedömning och kartering

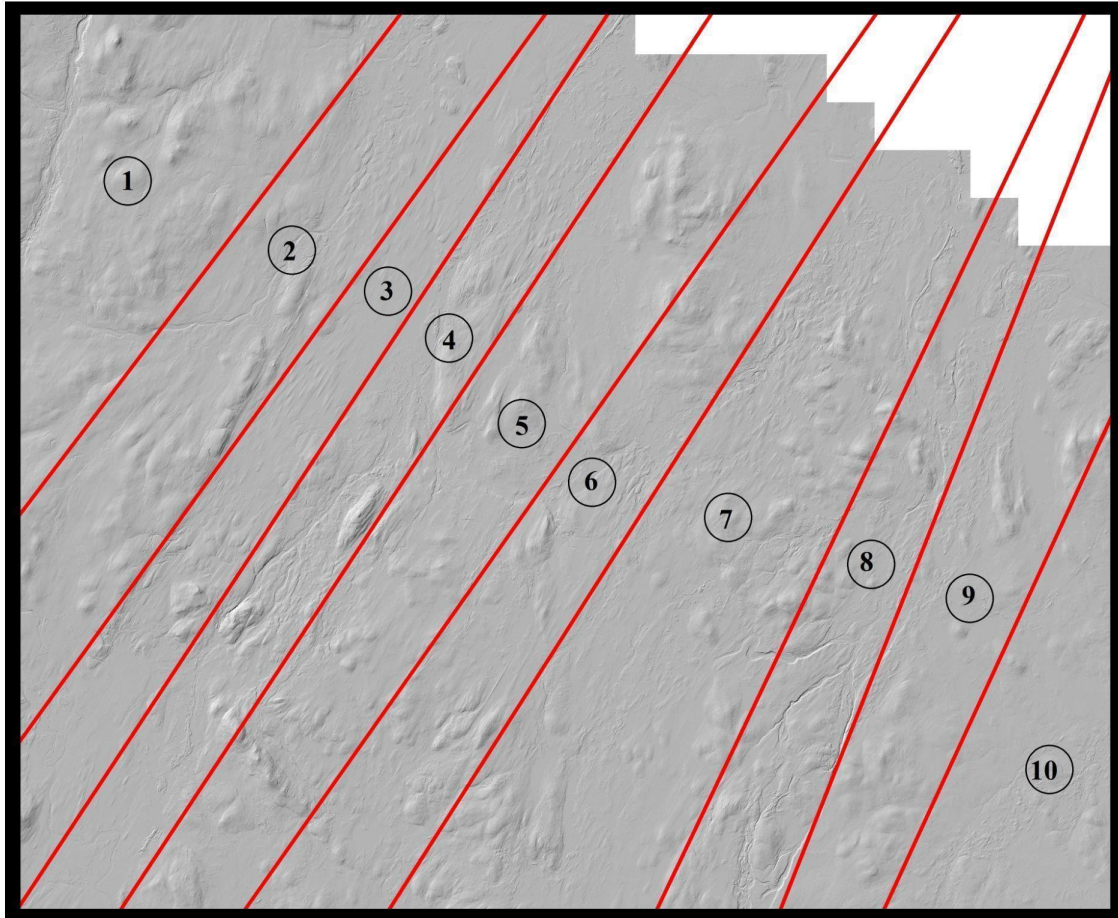
Lineationerna som karterades antogs att tillhöra ett flow-set utifrån liknande tolkningar som utförts av bland annat Stokes & Clark (2008). Undersökningen utgörs främst genom analys av dimensionerna hos glaciala lineationer. Därmed syftar studien på lineationer som helhet och inte specifika typer av landformer som drumliner, läsidesmoräner, m.m. Detta innebär att alla landformer som karterades, klassificerades som lineationer för undersökningen. Genom observationer över studieområdet gjordes tolkningar kring vilka landformer som blivit utdragna eller bildats av glacial rörelse.

Bedömningen om landformerna var lineationer och skulle karteras baserades på subjektiv tolkning av egenskaper som karaktäriserar glaciala lineationer. De egenskaper som primärt beaktades var avsmalning mot en ände, slät yta och en longitudinell profil som efterliknar drumliner/crag-and-tails. Dessa egenskaper utvärderades baserat på tidigare kunskap om lineationers form men även på hur Clark m.fl. (2009) karterat. Lineationerna karterades som polygoner. Se figur 8 för ett exempel av karterade lineationer.

För att beräkna lineationernas AS värde karterades AB avståndet med polylines. För undersökning på förhållandet mellan lineationernas dimensioner och isflödet delades området upp i tio stycken delområden. Delområdena markerades ut med polygoner orienterade parallellt med de karterade lineationerna (figur 9).



Figur 8. Exempel på hur lineationerna karterades med polygoner.



Figur 9. Visar hur studieområdet indelades i 10 mindre delområden.

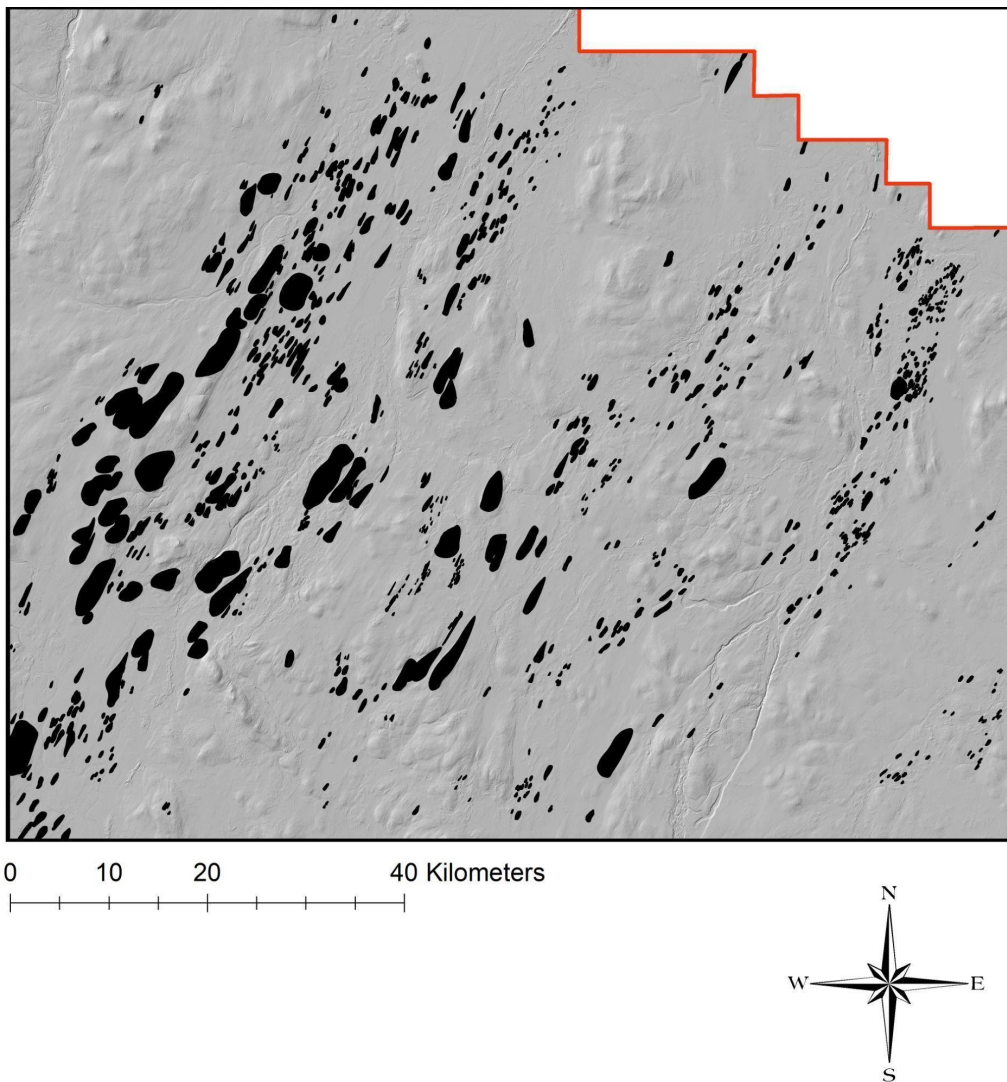
4.3 Dataextraktion och interpolering

Lineationernas bredd och längd extraherades genom funktionen “Minimum Boundary Geometry”. För att få höjden användes funktionen “Zonal Statistics”, där maximum respektive minimum elevationen beräknades inom varje enskild polygon. Höjden blev sedan beräknad som maximum subtraherat med minimum höjden. För att presentera resultaten genom geografisk visualisering användes “Inverse Distance Weighting”, kort IDW, funktionen för att interpolera värdena över studieområdet.

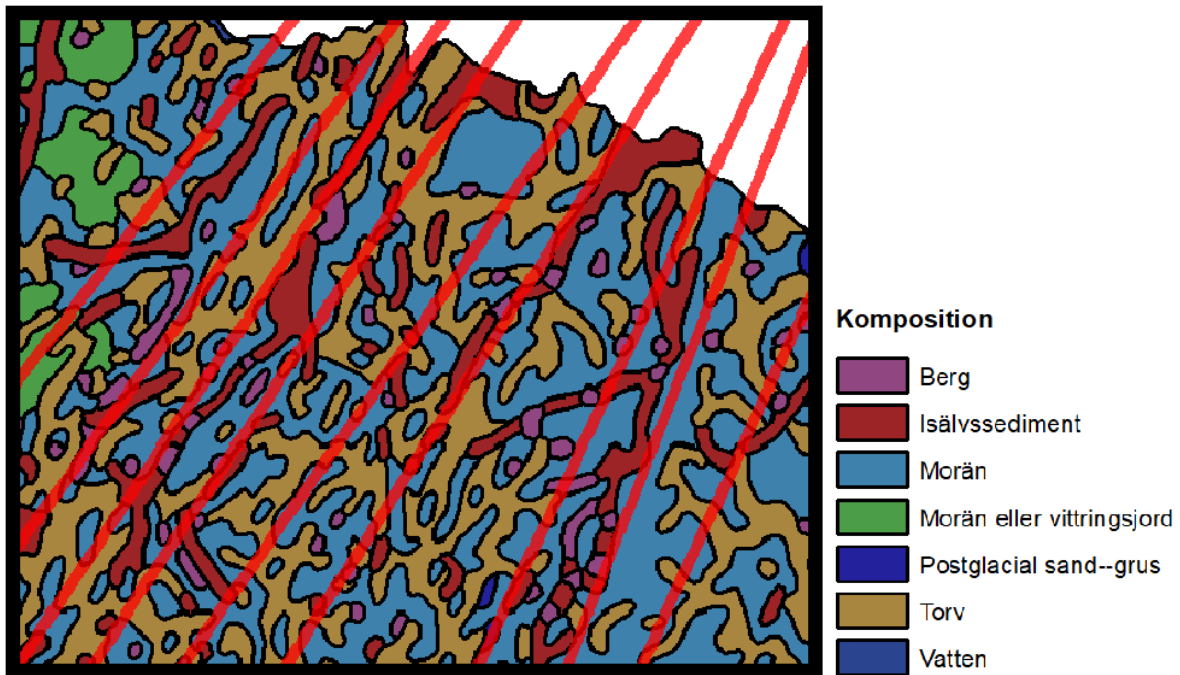
5. Resultat

5.1 Områdets lineationer och dess form

Studieområdet visar en stor variation gällande den geografiska spridningen av de glaciala lineationerna (figur 10). Lineationerna finns främst i platta områden med svag topografi och även mycket tätt i stora svärmar. Jordarter som befinner sig på markytan visar att området yta främst består av torv, morän och isälvsediment (figur 11). Delområdena två, tre, sju och åtta har till stor del berg jämfört med resterande delar av studieområdet.



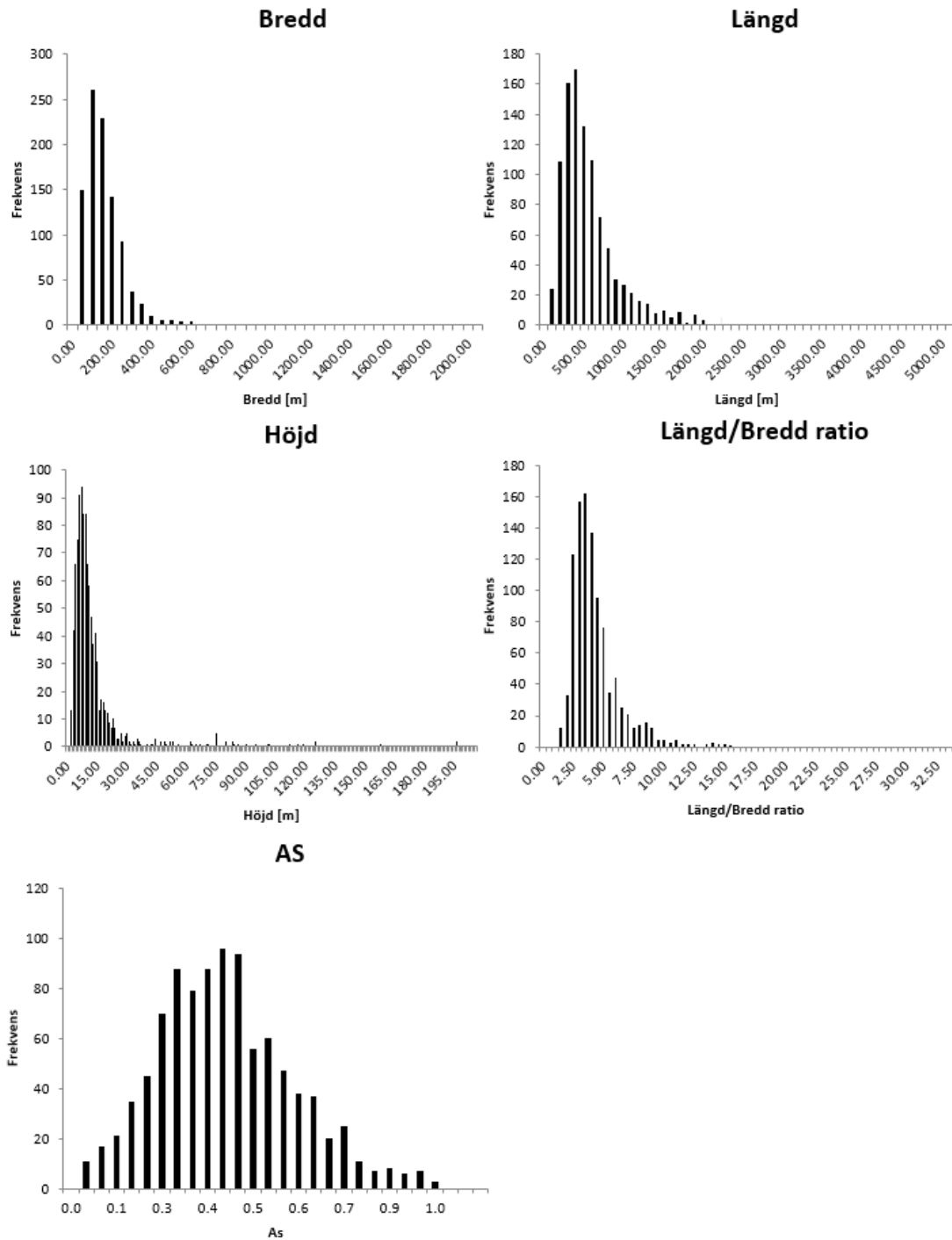
Figur 10. Lineationerna i hela studieområdet, den röda linjen representerar Finska gränsen..



Figur 11. Jordartskarta över studieområdet gjord på jordarts-data från SGU (Sveriges geologiska undersökning, 2021).

5.1.2 Frekvens distribution av lineation dimension och form

Totalt karterades 970 stycken lineationer. Bland de individuella landformerna är minimum och maximum-värdena 47 & 610 m för bredd, 47 & 2009 m för längd och 1.3 & 196 m för höjd (figur 12). En dominerande del av landformerna har en bredd av 50-300 m, en längd av 300-800 m och en höjd av 3-15 m. Majoriteten av de observerade landformerna har ett längd/bredd-ratio mellan 2 och 5.5 med 15.7 som högsta ration för en individuell landform. AS värdet varierar mellan 0,3 och 0,45 där genomsnittsvärdet för samtliga observationer var 0.44.

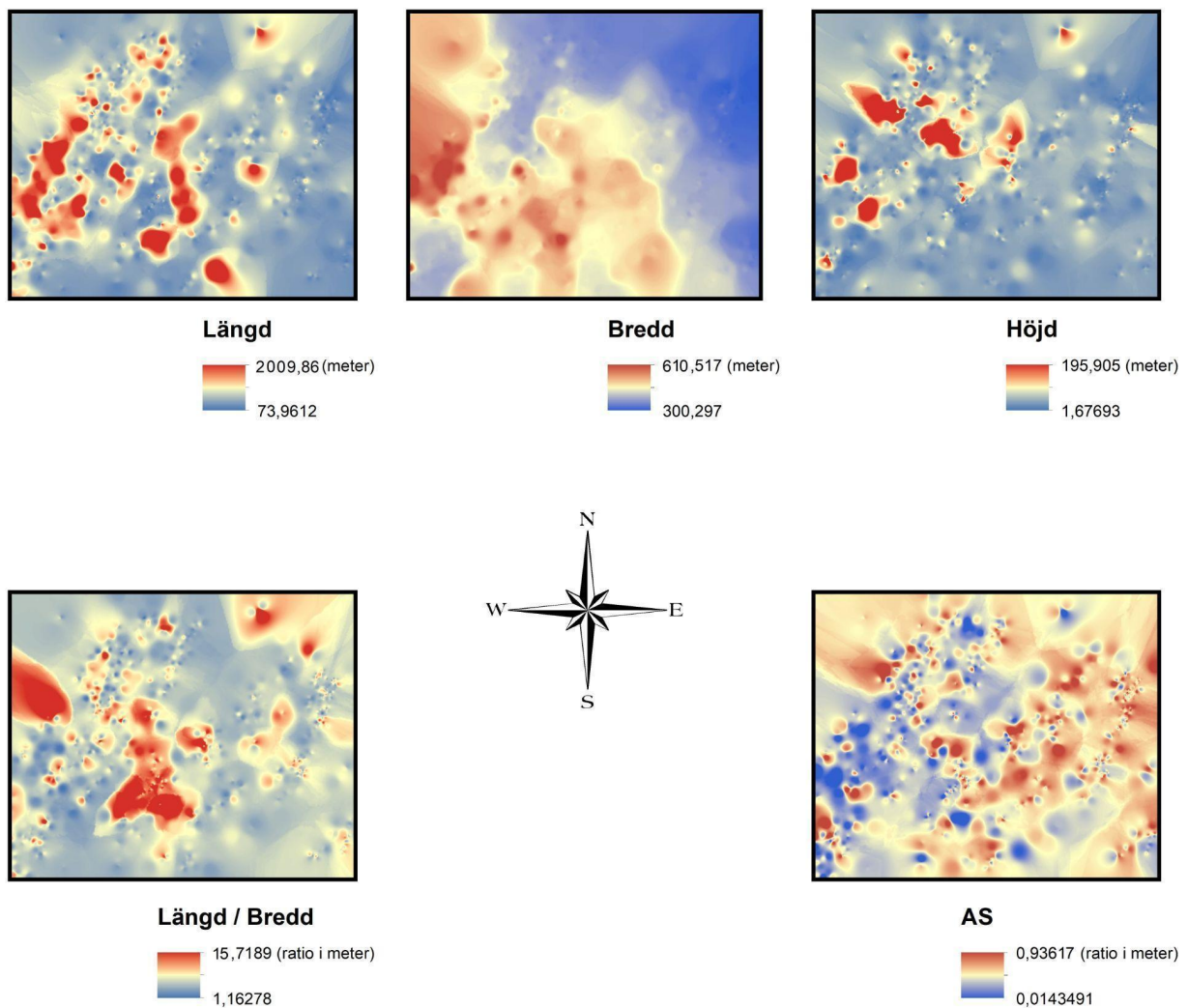


Figur 12. Frekvens distributions histogram på respektive mått för lineationernas form.

Resultaten från längd-interpoleringen visar att de längsta lineationerna främst förekommer i område fem och sex men även i område två och till viss grad nedre delen av område tre (figur 13). För område två och tre är de långa lineationerna närvarande på delar där berg finns. De bredaste lineationerna är i område ett och två. Medan de smalaste lineationerna ligger i den

nordöstra till sydöstra delen av området. Interpoleringen för bredd visar en stor yta kring område fyra till sju med en ungefärlig bredd på ca 500m. De högsta höjderna förekommer vid de största lineationerna, med viss variation.

Längd till bredd-ration visade sig vara som störst mellan områdena fem till sex. AS värdet var högt i alla områden med större delar av områdena ett, två, tre och fyra som undantag.



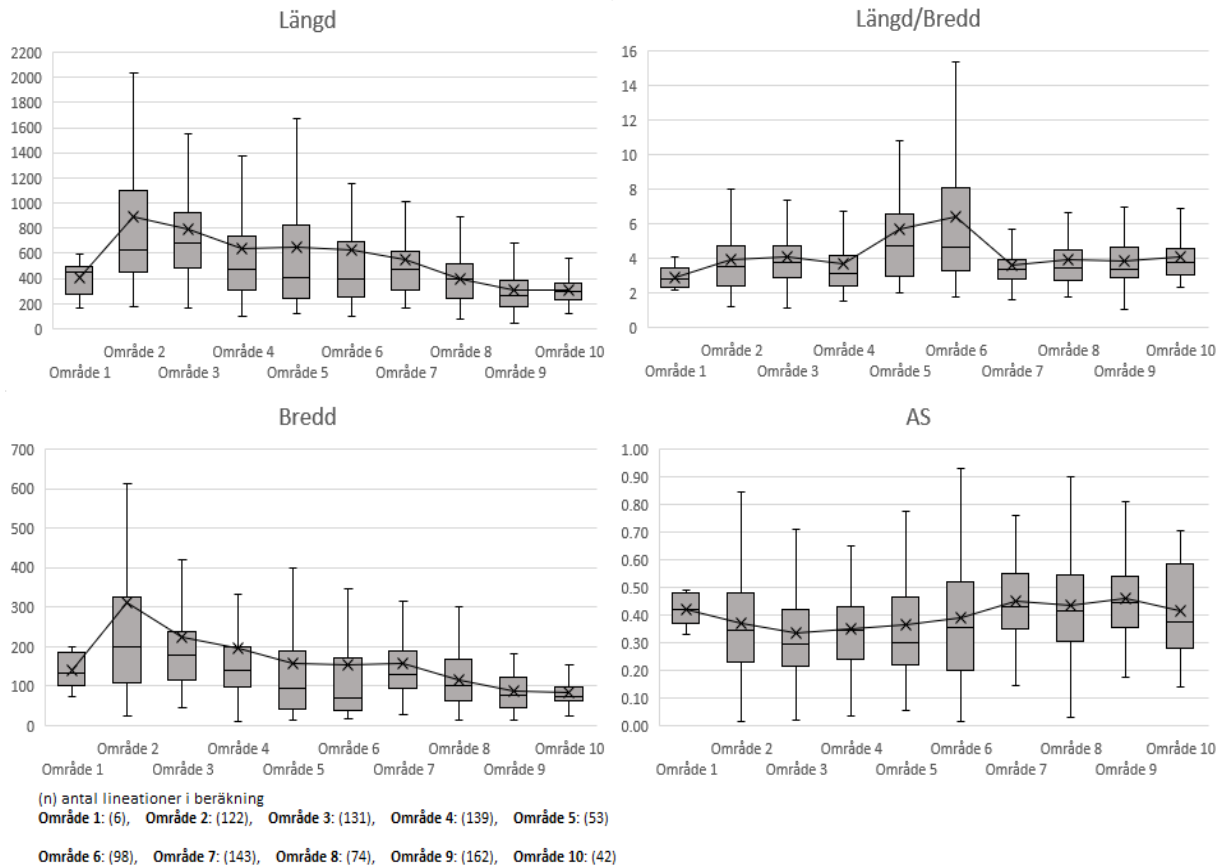
0 12,5 25 50 Kilometers

Figur 13. Visar IDW interpoleringar på måtten för lineationernas form över hela studieområdet.

5.2 Variation mellan områden

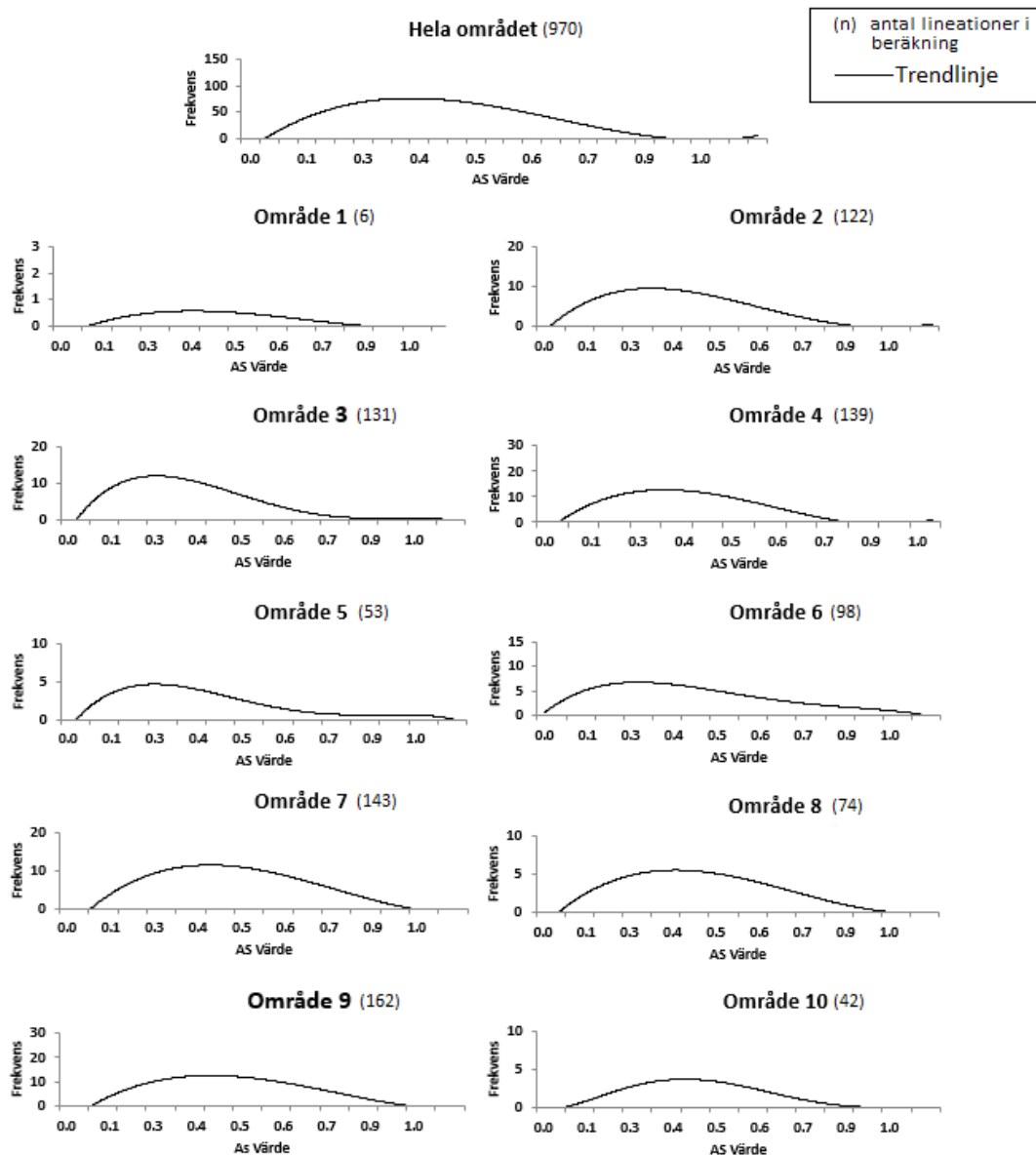
Observations-området visade överlag en noterbar variation i längd, bredd och längd till bredd-ratio i de olika delområdena. Medellängden för lineationerna minskar ju längre österut i studieområdet man kommer, där trenden börjar vid område två (figur 14). Medelbredden visar en liknande trend till medellängden, vilket indikerar att lineationerna blir successivt mindre österut. Däremot finns ingen koppling mellan lineationernas storlek och längd till bredd ratio eller AS värde. Längd till bred-ratio har högst medelvärde i område fem och sex i kontrast till de resterande delområdena. Detta indikerar att den del av studieområdet som har mest utdragna lineationer befinner sig i delområde fem och sex.

Det genomsnittliga AS-värdet visade liten variation mellan delområdena. Det beständiga AS värdet indikerar att studieområdet har en stor majoritet av klassiskt formade lineationer. Gällande extremvärden varierar dessa stort från genomsnittet och medianen för alla variabler med område ett som kontrast. För lineationernas längd minskar variationen mellan extremvärden och genomsnitt successivt österut. Denna trend är inte närvarande för de andra måtten.



Figur 14. Lådagram som visar variationer för längd, bredd, längd/bredd-ratio och AS över samtliga delområden. Samt linje som visar medelvärde variation.

En genomsnittlig trendlinje för frekvens distributionen av AS värdena för varje delområde visar att det finns en liten variation mellan delområdena (figur 15). För hela området visar genomsnittet att de flesta lineationerna är av klassisk form kring AS värdena 0,3 till 0,5. Däremot finns även delområden som visar mer symmetriska lineationer.



Figur 15. Trendlinje baserat på glidande medelvärde för frekvens distributionen av AS värde i studieområdet samt varje delområde.

6. Diskussion

6.1 Lineationernas form

Resultaten från denna studie tyder på att majoriteten av de observerade lineationerna har en klassisk form utifrån de beräknade AS värdena (figur, 12, 15). Dock är det tydligt att det finns variationer i studieområdet där både reverse och symmetriska lineationer har observerats, vilket

stämmer väl överens med resultaten från Spagnolo m.fl. (2011) som visar att totalt kan ett relativt tydligt mönster uttydas men att varje typ av form kan finnas i ett flow-set.

Kunskapen om processerna bakom drumlin bildning är fortfarande idag begränsad, vilket leder till att det inte finns någon klar förklaring till vad som lett till att lineationer har olika typer av form. Utifrån jordartskartan över studieområdet (figur 11) finns det relativt stora variationer inom varje km² med torv, morän och issälvssediment som dominerande jordarter med vissa områden av utstickande berggrund.

Det finns inget tydligt mönster mellan variationen av lineationernas profil och dess geografiska position i studieområdet. Klassiska, symmetriska och reverse former kan alla finnas i närheten av varandra och det gäller för samtliga delområden (figur 9). Detta kan kopplas till variationerna i jordartstyp över studieområdet (figur 11), där morän, torv och isälvssediment allt kan observeras i relativt små ytor. Att formen på lineationerna kan påverkas i efterhand stämmer överens med Spagnolo m.fl. (2011), där de påstår att åldern på landformerna kan ha en betydelse, där yngre landformer är mer asymmetriska medan äldre landformer är mer symmetriska. De menar att subglaciala landformerna, specifikt drumliner, kan ha formats med en asymmetrisk form och sedan med tid eroderats och jämnats ut av bland annat gravitation för att sedan få en mer symmetrisk form.

Hättestrand m.fl. (2004) skriver att den relativa åldern på en lineation kan fås ut genom att undersöka eventuella crosscuttings. Eftersom inga tydliga crosscuttings kunde identifieras i detta arbete kan lineationerna antas vara bildade under den senaste nedisningen, vilket stödjer idén om att asymmetriska drumliner är yngre än symmetriska som Spagnolo m.fl. (2011) tog upp. Däremot förklarar inte denna idé skillnaderna som kontrollerar om landformen för en reverse eller klassisk form. Eftersom variationer i ett flow-set har visats vara en standard i lineationerna observerade både i denna undersökning samt Spagnolo m.fl. (2011), kan inte den longitudinella profilen av lineationer användas som en pålitlig indikator för isrörelsen tills ett starkt motbevis tagits fram.

Majoriteten av lineationerna har en längd/bredd-ratio mellan 2:1 och 5.5:1 vilket stämmer relativt väl överens med tidigare observationer av Clark m.fl. (2009) som visar att drumliner ofta har en längd/bredd ratio mellan 2:1 och 4:1. Längd och bredd ser en successiv minskning från delområde ett till delområde tio (figur 14). En relativt tydlig korrelation mellan längd och

bredd kan urskiljas i figur 14, vilket indikerar att majoriteten av lineationerna ser en likartad variation i både längd och bredd i samtliga delområden. Utifrån figur 14 är det tydligt att längd/bredd-ration följer ett stabilt mönster, mer om detta i sektion 6.2. Längd och bredden på lineationerna kan bero på olika faktorer som spelat roll både under eller efter bildningen av lineationerna. Skillnaderna i längd och bredd beror till stor sannolikhet på variationer av hastigheten av isen. Underliggande material har även haft en viss effekt på längd och bredd, i synnerhet i delområde 2 där lineationerna är bildade på berggrund och har därmed blivit längre och bredare. Tidigare variationer i morfologin innan nedisningen kan även ha en påverkan på isens rörelse och den resulterande glaciala morfologin av landskapet. Inget tydligt mönster kan identifieras utifrån variationerna i AS värdet mellan de olika delområdena (figur 9, 14), vilket tyder på att formen av lineationerna inte har någon direkt koppling till hastigheten av isen när lineationerna bildades.

6.2 Förhållandet med isflödet

För detta flow-set identifierades gränsen mellan delområde ett och två samt delområde sju och åtta som de yttre kanterna (figur 9), medan delområdena fem och sex representerar flow-set centrala axel. Alternativt kan den östra kanten av flow-set tolkas som delområde åtta, då detta område tydligt uppvisar flera punkter med utstickande berggrund likt vid gränsen mellan delområde ett och två (figur 9). Höjd-interpoleringen (figur 13) visar ingen tydlig korrelation med vare sig längd/bredd-ration eller längd och bredd av lineationerna. Däremot är höjden som högst i de delar som har utstickande berggrund (figur 11, 13). En möjlig förklaring kan vara att områden med sediment konsoliderats av istäcket medan utstickande berggrunden inte påverkats lika mycket.

Lineationerna som karterades i delområde fem och sex var i genomsnitt relativt långa och var som mest utdragna (figur 14). Detta stämmer väl överens med resultaten från Stokes & Clark (2008) som visade att längd/bredd ration för lineationer ökar i den centrala delen av isflödet. Även extremvärdena för längd/bredd-ratio var högre i delområden fem och sex jämfört med övriga delområden, däremot visade delområden två och tre minsta lika höga extremvärden för längd och bredd som fem och sex. Detta tyder på att lineationerna som befinner sig i den centrala axeln av ett isflöde har en större benägenhet att bli relativt långa men fortfarande

mycket smala, där vissa lineationer hade en längd/bredd-ratio uppemot 15:1, vilket är mer än tredubbelt från den övre gränsen från den generella längd/bredd-ration på 4:1 för drumliner.

En relativt stor mängd av lineationerna som karterades i särskilt delområde två visade mycket höga värden för både bredd och längd. Detta kan till stor del bero på att dessa lineationer bestod av utdraget berg, vilket stöds av höjd interpoleringen gjord i figur 13. Utdraget berg ger indikation av isrörelsen och tolkas därmed som en lineation i detta arbete, men kan i vissa tolkningar ge relativt missvisande resultat på grund av att deras skala är flera gånger större än subglaciala landformer såsom drumliner och crag-and-tail. Däremot går det att observera att längd/bredd-ration (figur 14) inte påverkas av skalan, där delområde två tydligt har en lägre längd/bredd-ratio i jämförelse med delområde fem och sex.

Enligt Stokes & Clark (2008) rör sig isen med högst hastighet i den centrala axeln av isflödet, vilket leder till att lineationerna som formas där kommer att bli både längre och mer utdragna. Längden och utdragningen av lineationerna ser en graduell minskning ut mot de yttre delarna av studieområden, vilket vidare stödjer teorin om att detta studieområde kan tolkas som ett flow-set. Stokes & Clark (2008) tar upp att längden samt längd/bredd-ration är de primära parametrar som indikerar snabb isrörelse. Utifrån lineationernas bredd kan inga mönster kopplas till hastigheten på isrörelsen, utan det är endast bredden i förhållande till längden av lineationen som ger några indikativa resultat. Detta bevisas även i denna undersökning, då inga tydliga kopplingar kan göras mellan variationer i bredden och hastigheten av istäcket.

6.3 Felkällor

I undersökningen karterades lineationer med stor avvikelse från genomsnittet, särskilt i delområde två (figur 9). Detta kan leda till att de uppvisade resultaten för längd och bredd för både varje delområden men även studieområdet som en helhet blir missvisande. Eftersom målet med denna undersökning var att kartera samtliga lineationer i området som en helhet och inte sortera eller filtrera bort vissa typer av landformer karterades även dessa typer av storskaliga landformer. Utifrån figur 14 är det tydligt att längd/bredd-ration inte ser någon påverkan av skalan på lineationen och därmed inte påverkar undersökningen negativt, då en av de mer betydelsefulla parametrarna i denna undersökning är längd/bredd-ration på grund av den antagna korrelationen med isflödes hastighet.

Studien undersöker ett relativt litet område på ca 2757 km² medan tidigare arbeten som Spagnolo m.fl. (2011) undersökte mycket större delar av Brittiska öarna. Denna undersökning karterade enbart 970 stycken lineationer, medan Spagnolo m.fl. (2011) hade ca 29 000 stycken. Därmed påverkar givetvis storlek av studieområde samt mängd lineationer den kvalitativa aspekten av arbetet. Däremot bör den subjektiva bedömningen av lineationer övervägas, eftersom beroende på den subjektiva tolkningen kan landformer felaktigt bedömas som lineationer. Därmed finns det även en subjektiv aspekt till huruvida antalet lineationer i området bedöms. Sammanfattningsvis kan de största felkällorna för undersökningen vara, kvantitativa, det vill säga mängden data och dess geografiska omfattning. Samt den kvalitativa faktorn, huruvida väl lineationerna i studieområdet har bedömts. Det är även relevant att reflektera kring kompositionen av lineationerna. I detta arbete användes en del lineationer som varit på berg. Det kan finnas en variation hos lineationernas form beroende på om kompositionen består av berg eller sediment.

6.3.1 Metoddiskussion

Gällande studiens metodik finns det en del utföranden som kan reflekteras kring och förbättras. Bland dessa kan de främsta vara extraktionen av data och interpoleringen av data. Extraktionen av dimensions data gjordes genom funktionen "Minimum Boundary Geometry", vilket ramar in polygon i rektanglar och sedan extraherar bredd och längd för rektangeln. Rektangeln vinklas efter största längden av polygonen vilket innebär att den största bredden av polygonen kan avvika från vad den faktiskt är. Därmed kan studiens bredd värden för lineationerna avvika från den faktiska bredden. Ytterligare beräknades lineationernas höjd som högsta elevationen inom polygonen minus den lägsta elevationen inom polygonen. Detta ger förvisso en avvikelser från den faktiska höjden, särskilt i fall där polygonen inte inkluderar omkringliggande mark. I sådana fall innebär det att den lägsta höjden anges som den lägsta delen av lineationen och inte marken omkring.

För undersökningen användes interpoleringen IDW, vilket är en interpoleringsmetod som kan vara känslig till extremvärden. Eftersom de karterade lineationerna innehöll mycket stora samt mycket små lineationer, det vill säga många avvikelser, påverkar detta interpoleringen. Däremot avviker inte interpolering i stort kontrast till vad som kan förväntas, men detta är givetvis en rimlig felkälla för studiens metodik. Ytterligare är studiens undersökning relativt kvantitativ,

vilket är lämpligt för ämnesområdet. Däremot skulle en addition av en mer kvalitativ analys gynna undersökningen resultat. Ett tänkbar tillägg kunde varit att mer ingående analysera lineationerna i förhållande till jordarterslagerna samt underliggande berggrund i området.

6.4 Framtida undersökningar

Undersökningar och studier som analyserar den longitudinella profilen av en större mängd drumliner i Sverige, likt arbetet av Spagnolo m.fl. (2011) kring de Brittiska öarna, krävs för att en mer genomgående och betydelsefull jämförelse med resultaten från Spagnolo m.fl. (2011) ska vara möjlig. Jämförelse mellan den relativa åldern, formen, orientationen, skalan och längd/bredd-ration för landformerna i norra Sverige och de Brittiska öarna kan vara ett steg till att bättre förstå de olika mekanismer och processer som agerar i samband med isrörelse.

Ett framtida undersökningsområde gällande formen av lineationer kan vara att undersöka olika lineationer och materialet som de består av. Detta för att se om lineationer som bildats av till exempel berggrund, morän eller torv uppvisar en benägenhet för en specifik longitudinell profil. När det kommer till lineationerna bestående av jordarter såsom morän och isälvsediment, kan även den relativa åldern användas för kontrollera om äldre lineationer uppvisar en viss trend som ett resultat av att vara utsatta för erosion under längre perioder. Utöver jordartstyper av lineationerna kan även avrinningssystemet i området ha en påverkan på lineationernas form, då smältvattnet från det tillbakadragna istäcket mycket väl kan erodera och påverka formen av lineationerna. Därmed kan det vara intressant att undersöka smältvattenrännor bildade under den senaste deglaciationen för att se ifall lineationer intill har en tendens för en viss form.

7. Slutsats

Drumliner, men även andra typer av lineationer ses som asymmetriska med en brantare stötsida och en flack läsida, vilket för drumliner kallas för en klassisk form. Denna typen av longitudinell profil för lineationerna dominerar i studieområdet, dock är det tydligt att detta flow-set som har observerats även har en noterbar andel av lineationer med både reverse och symmetrisk form. När det kommer till variationen av A_s värdet mellan delområdena kunde inget tydligt mönster uttydas, vilket i detta fall innebär att en korrelationen mellan is hastigheten och den longitudinella profilen av lineationerna inte är noterbar. De karterade lineationerna visar ett relativt tydligt mönster när det kommer till variationen i dess dimensioner, där en ökning i genomsnittlig längd och längd/bredd-ratio in mot den centrala axeln av detta flow-set kunde observeras. Detta ger indikation för att isen rört sig med relativt högre hastighet i den centrala delen av studieområdet, vilket stödjer teorin om att en lineationerna i studieområdet bildats av en isström.

Referenser

Andrews, J., Shilts, W., & Miller, G. (1983). Multiple Deglaciations of the Hudson Bay Lowlands, Canada, Since Deposition of the Missinaibi (Last-Interglacial?) Formation. *Quaternary Research*, 19(1), 18-37. doi:10.1016/0033-5894(83)90025-X

Bamber, J.L., Vaughan, D.G., Joughin, I. (2000). Widespread Complex Flow in the Interior of the Antarctic Ice Sheet. *Science*, 287(5456),1248-1250.
<https://doi.org/10.1126/science.287.5456.1248>

Bendle, J. (27 juli 2020). Calving of freshwater glaciers. Antarctic Glaciers.
<https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacier-types/ice-streams/>

Bennett, M. R.. (2003). Ice streams as the arteries of an ice sheet: their mechanics, stability and significance. *Earth-science Reviews*, 61(3-4), 309–339.
[https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(02)00130-7)

Boulton, G.S., (1976). The origin of glacially fluted surfaces – observations and theory. *Journal of Glaciology* 17 (76), 287–310

Boulton, G.S., (1987). A theory of drumlin formation by subglacial sediment deformation. I R. Menzies (Red.), *Drumlin Symposium* (s.25-80). AA Balkema Publishers.

Boulton, G. S., & Clark, C. D.. (1990a). A highly mobile Laurentide ice sheet revealed by satellite images of glacial lineations. *Nature*, 346(6287), 813–817.
<https://doi.org/10.1038/346813a0>

Boulton, G., & Clark, C. (1990b). The Laurentide ice sheet through the last glacial cycle: The topology of drift lineations as a key to the dynamic behaviour of former ice sheets. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 81(4), 327-347. doi:10.1017/S0263593300020836

Briner, J. P. (2007). Supporting evidence from the New York drumlin field that elongate subglacial bedforms indicate fast ice flow. *Boreas*, 36(2), 143–147. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2007.tb01188.x>

Chandler, B. M. P., Lovell, H., Boston, C. M., Lukas, S., Barr, I. D., Benediktsson, Í. Ö., Benn, D. I., Clark, C. D., Darvill, C. M., Evans, D. J. A., Ewertowski, M. W., Loibl, D., Margold, M., Otto, J.-C., Roberts, D. H., Stokes, C. R., Storrar, R. D., & Stroeven, A. P. (2018). Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-science Reviews*, 185, 806–846. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.015>

Clark, C.D., (1993). Mega-scale glacial lineations and cross-cutting ice-flow landforms. *Earth Surface Processes & Landforms* 18 (1), 1–29.

Clark, C. D., Hughes, A. L. C., Greenwood, S. L., Spagnolo, M., & Ng, F. S. L.. (2009). Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews*, 28(7-8), 677–692. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.035>

Clark, C. D.. (2010). Emergent drumlins and their clones: from till dilatancy to flow instabilities. *Journal of Glaciology*, 56(200), 1011–1025. <https://doi.org/10.3189/002214311796406068>

Clark, C. D., Hughes, A. L. C., Greenwood, S. L., Spagnolo, M., & Ng, F. S. L.. (2009). Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews*, 28(7-8), 677–692. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.035>

Dardis, G.F. (1985) Till facies associations in drumlins and some implications for their mode of formation. *Geografiska Annaler*, 67A (1-2), 13-22

Davis, B. (22 juni 2020). Ice streams. *Antarctic Glaciers*. <https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacier-types/ice-streams/>

Davis, W.M., (1884). The distribution and origin of drumlins. *American Journal of Science* 28, 407–416

Esri, Inc (2022). ArcMap 10.5.1. Esri Inc.
<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>

Fairchild, H.L. (1929). New York drumlins. *Rochester Academy of Sciences Bulletin*, 111, s. 873 391-443

Fowler, A. C.. (2018). The philosopher in the kitchen: the role of mathematical modelling in explaining drumlin formation. *GFF*, 140(2), 93–105.
<https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1444671>

Glasser N.F. (2011) Polythermal Glaciers. I V.P. Singh, P. Singh, U.K. Haritashya (Red). *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_417

Harry DG, Trenhaile AS. (1987). The morphology of the Arran drumlinfield, southern Ontario, Canada. In *Drumlin Symposium*. J. Menzies and J. Rose (eds). Balkema: Rotterdam; 161–173

Hambrey, M.J. Glasser, N.F. (2005). SEDIMENTARY PROCESSES | Glaciers. R.C. Selley, L.R M. Cocks & I.R. Plimer (Red), *Encyclopedia of Geology* (1 uppl.,s.663-678). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00169-6>.

Hindmarsh, R. C. A. (1998). Drumlinization and drumlin-forming instabilities: viscous till mechanisms. *Journal of Glaciology*, 44(147), 293–314.
<https://doi.org/10.3189/s002214300000263x>

Hess, D. P., & Briner, J. P. (2009). Geospatial analysis of controls on subglacial bedform morphometry in the New York Drumlin Field - implications for Laurentide Ice Sheet dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(8), 1126–1135. <https://doi.org/10.1002/esp.1803>

Howat, I.M., Joughin, I., Scambos, T.A. (2007). Rapid Changes in Ice Discharge from Greenland Outlet Glaciers. *Science*, 315(5818), 1559-1561. <https://doi.org/10.1126/science.1138478>

Hättestrand, C., Götz, S., Näslund, J., Fabel, D., & Stroeven, A. P. (2004). Drumlin formation time: evidence from northern and central Sweden. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 86(2), 155–167. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2004.00221.x>

Khan, S. A., Bjørk, A. A., Bamber, J. L., Morlighem, M., Bevis, M., Kjær, K. H., Mouginot, J., Løkkegaard, A., Holland, D. M., Aschwanden, A., Zhang, B., Helm, V., Korsgaard, N. J., Colgan, W., Larsen, N. K., Liu, L., Hansen, K., Barletta, V., Dahl-Jensen, T. S., Schenk, T. (2020). Centennial response of Greenland's three largest outlet glaciers. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19580-5>

King, E., Hindmarsh, R. & Stokes, C. Formation of mega-scale glacial lineations observed beneath a West Antarctic ice stream. *Nature Geoscience* 2, 585–588 (2009). <https://doi.org/10.1038/ngeo581>

Lagerbäck, R. (2008). The Veiki moraines in northern Sweden - widespread evidence of an Early Weichselian deglaciation. *Boreas*, 17(4), 469–486. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1988.tb00562.x>

Lagerbäck, R., & Robertsson, A.-M. (2008). Kettle holes - stratigraphical archives for Weichselian geology and palaeoenvironment in northernmost Sweden. *Boreas*, 17(4), 439–468. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1988.tb00561.x>

Lantmäteriet . (2019). Höjddata, Grid 2+. <https://www.lantmateriet.se/sv/>

Lorrain R.D., Fitzsimons S.J. (2011) Cold-Based Glaciers. I V.P. Singh, P. Singh, U.K. Haritashya (Red) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_72

Lundqvist, J., (1989). Rogen (ribbed) moraine – identification and possible origin. *Sedimentary Geology* 62, 281–292

Lundqvist, J. (1997). Rogen moraine — an example of two-step formation of glacial landscapes. *Sedimentary Geology*, 111(1-4), 27–40. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(97\)00004-3](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(97)00004-3)

Macayeal, D. R.. (1993). Binge/purge oscillations of the Laurentide Ice Sheet as a cause of the North Atlantic's Heinrich events. *Paleoceanography*, 8(6), 775–784. <https://doi.org/10.1029/93pa02200>

Mckenzie, M. A., Simkins, L. M., Principato, S. M., & Munevar Garcia, S.. (2022). Streamlined subglacial bedform sensitivity to bed characteristics across the deglaciated Northern Hemisphere. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5382>

Menzies, J. (1989). Drumlins—Products of controlled or uncontrolled glaciodynamic response?. *Quaternary Science Reviews*, 8(2), 151-158.

Morgan, V. I., Jacka, T. H., Akerman, G. J., & Clarke, A. L.. (1982). Outlet Glacier and Mass-Budget Studies in Enderby, Kemp, och Mac. Robertson Lands, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 3, 204–210. <https://doi.org/10.3189/s0260305500002780>

Morris, E. M., & Morland, L. W.. (1976). Theoretical Analysis of the Formation of Glacial Flutes. *Journal of Glaciology*, 17(76), 311–323. <https://doi.org/10.3189/s002214300060000x>

Möller, P., & Dowling, T. P. F.. (2018). Equifinality in glacial geomorphology: instability theory examined via ribbed moraine and drumlins in Sweden. *GFF*, 140(2), 106–135. <https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1441903>

National Snow & Ice Data Center. (2022-04-11). Ice streams. NSIDC. <https://nsidc.org/cryosphere/glossary/term/ice-stream>

National Snow & Ice Data Center. (2020-03-16). Glacier Landforms: Drumlins. <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/gallery/drumlins.html>

Ó Cofaigh, C., Stokes, C. R., Lian, O. B., Clark, C. D., & Tulaczyk, S.. (2013). Formation of mega-scale glacial lineations on the Dubawnt Lake Ice Stream bed: 2. Sedimentology and stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 77, 210–227. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.06.028>

Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B. (2011). Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet. *Science*, 333(6048),1427-1430. <https://doi.org/10.1126/science.1208336>

Rogerson, R. (28 maj 2018). Drumlin. The Canadian Encyclopedia. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/drumlin>.

Schomacker, A., Johnson, M. D., & Möller, P.. (2018). Drumlin formation: a mystery or not?. *GFF*, 140(2), 91–92. <https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1485326>

Shaw, J., (1989). Drumlins, subglacial meltwater floods and ocean responses. *Geology* 17, 853–856.

Shaw, J. (2002). The meltwater hypothesis for subglacial bedforms. *Quaternary International*, 90(1),5-22. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00089-1).

Smalley, I. J., & Unwin, D. J.. (1968). The Formation and Shape of Drumlins and their Distribution and Orientation in Drumlin Fields. *Journal of Glaciology*, 7(51), 377–390. <https://doi.org/10.3189/s0022143000020591>

Spagnolo, M., Clark, C. D., Hughes, A. L. C., & Dunlop, P.. (2011). The topography of drumlins; assessing their long profile shape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(6), 790–804. <https://doi.org/10.1002/esp.2107>

Spagnolo, M., Clark, C. D., Ely, J. C., Stokes, C. R., Anderson, J. B., Andreassen, K., Graham, A. G. C., & King, E. C.. (2014). Size, shape and spatial arrangement of mega-scale glacial lineations from a large and diverse dataset. *Earth Surface Processes and Landforms*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.3532>

Stokes, C.R. & C.D. Clark, (1999). Geomorphological criteria for identifying Pleistocene ice streams. *Annals of Glaciology*, 28: 67-74.

Stokes, C. R., & Clark, C. D.. (2008). Are long subglacial bedforms indicative of fast ice flow?. *Boreas*, 31(3), 239–249. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2002.tb01070.x>

Stokes, C. R., Fowler, A. C., Clark, C. D., Hindmarsh, R. C. A., & Spagnolo, M.. (2013). The instability theory of drumlin formation and its explanation of their varied composition and internal structure. *Quaternary Science Reviews*, 62, 77–96.

<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.011>

Stroeven, A. P., Hättestrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B. W., Harbor, J. M., Jansen, J. D., Olsen, L., Caffee, M. W., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G. C., Strömberg, B., & Jansson, K. N.. (2016). Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews*, 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>

Sveriges geologiska undersökning. (2021). Jordarter 1:1 miljon. <https://www.sgu.se/>

The University Of Sheffield. (16 april 2022a). Drumlins. <https://www.sheffield.ac.uk/drumlins/definition>

The University Of Sheffield. (30 april 2022b). Crag-and-tail. <https://www.sheffield.ac.uk/drumlins/cragandtail#:~:text=A%20landform%20consisting%20of%20a%20deposition%20beneath%20an%20ice%20sheet.>

The University Of Sheffield. (30 april 2022c). Flutes. <https://www.sheffield.ac.uk/drumlins/flutes>

The University Of Sheffield. (30 april 2022d). MSGL. <https://www.sheffield.ac.uk/drumlins/msgl>

The University Of Sheffield. (30 april 2022e). Ribbed or Rogen moraines. <https://www.sheffield.ac.uk/drumlins/rogen>

United States Geological Survey. (12 april 2022) Where on Earth are temperate glaciers located?. USGS science for a changing world. <https://www.usgs.gov/faqs/where-earth-are-temperate-glaciers-located>

Van der Veen, C.J. (2022). Ice Properties and Glacier Dynamics. I J.F.Schroeder (Red.), Treatise on Geomorphology (2nd ed., pp. 53-60). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00046-8>

Winsborrow, M.C.M., C.D. Clark, & C.R. Stokes, (2010). What controls the location of ice streams? *Earth-Science Reviews*, 103: 45-59.