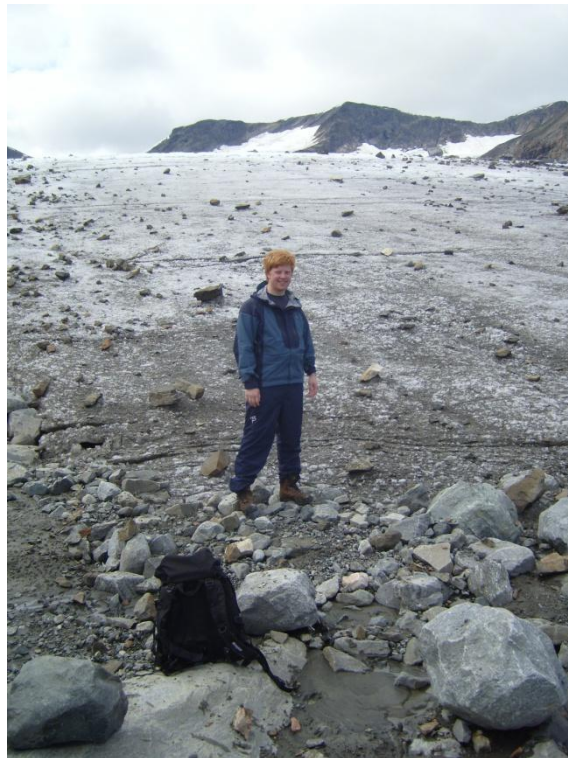


Kan forekomsten av laterale sedimenter ved utvalgte breer defineres som sidemorener?



Kjetil Holm

Masteroppgave i geografi

Geografisk institutt

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Trondheim 2011

Abstract

Holm, K. (2011). *Can the lateral deposits on some glaciers be defined as lateral moraines?*
Master thesis in Geography, Department for Geography, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim

Lateral deposits alongside several glaciers located in the eastern Jotunheimen and Lyngen are observed higher up than what would be expected according to the theory on the formation of lateral moraines. By using the accumulation area ratio (AAR) of 0.6 on these glaciers the equilibrium line altitude (ELA) from the Little Ice age (LIA), and at present, were calculated. The lateral deposits occur above the estimated ELA on all glaciers with varying amount. The maximum position of lateral moraines (MELM) is also a method used to estimate ELA, but the data in this study suggests that by using all of the lateral deposits as the basis for these estimations the accumulation area ratio under LIA must have been varying from 10 to 44 % on these glaciers. This will most likely underestimate the ELA on glaciers under this period. It is suggested that they are deposited because of increased rockfall and debrisfall during the LIA, which have made ice-cored moraines at the glacier margin. They could also have been melted out over the existing lateral moraine which would create the illusion that the moraine is higher. Since the deposits are above the ELA they are not made as a result of sediments following the flow lines of the glacier and consequently can't be characterized as lateral moraines.

Forord

Nå når masteroppgaven og en lang studietilværelse nærmer seg slutten, er det flere som fortjener en takk. Først i rekken er førsteamanuensis Geir Vatne, som har bidratt med mye inspirasjon og kunnskap både som veileder av masteroppgaven og foreleser gjennom studiet. Førsteamanuensis Ivar Berthling må også nevnes, etter flere år som engasjert kunnskapsformidler. Videre må Linda Kristiansen takkes, som bidro til en morsom og opplevelsesrik felttur, i tillegg til mange faglige og ikke-faglige diskusjoner i ettertid. Fredrik Høgaas må også takkes, både på bakgrunn av korrektur og tips av masteroppgaven og andre faglige diskusjoner, men også som en god venn gjennom studietilværelsen. I tillegg fortjener Ole Fredrik Sørensen en takk, som ”gadd” å lese korrektur av masteroppgaven.

Videre vil det rettes en stor takk til ”lukket avdeling ved geografisk institutt”, som har gjort masterstudiet til en fantastisk opplevelse. Min søster Elin må også takkes, for korrekturlesning av masteroppgaven, og for mange trivelige og morsomme diskusjoner på MSN, som har vært en avkobling fra oppgaveskrivingen. Til slutt går en stor takk til foreldrene mine, som har støttet meg på alle mulige måter.

Kjetil Holm

24. mai 2011

Innholdsfortegnelse

1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avhandlingens oppbygning.....	2
2 Områdebeskrivelse	3
2.1 Jotunheimen	3
2.1.1 Geografi og forekomsten av isbreer	3
2.1.2 Klima.....	3
2.1.3 Geologi.....	4
2.2 Lyngenthalvøya	4
2.2.1 Geografi og forekomsten av isbreer	4
2.2.2 Klima.....	5
2.2.3 Geologi.....	5
2.3 De aktuelle breene og hvorfor de ble valgt	6
3 Teori	8
3.1 Glasiologi	8
3.1.1 Massebalanse og likevektslinje	8
3.1.2 Equilibrium line altitude (ELA)	8
3.1.3 Isbreens temperaturregime og dynamikk	10
3.1.4 Tilstanden til isbreer i Norge i Holocene	11
3.2 Geomorfologi	12
3.2.1 Isbreers transport og avsetning av materiale	12
3.2.2 Sidemorener: Definerings og teoretisk lokalisering	13
3.2.3 Steinskred og steinsprang.....	14
3.2.4 Fjellpermafrost: påvirkning av breer og geomorfologiske prosesser.....	16
4 Metode.....	18
4.1 Fjernanalyse og observasjon	18
4.2 Metoder for å finne likevektslinjen	19
4.2.1 Akkumulasjonsområdeforhold (AAR).....	20
4.3 Valg av metode og praktisk gjennomføring	20
4.4 Metodekritikk	21
4.4.1 Plasseringen av ELA	21

4.4.2 Fjernanalyse og observasjon	22
5 Resultater.....	24
5.1 Teoretisk utregnede likevektslinjer og observasjon	24
5.1.1 Heimre Illåbreen.....	24
5.1.2 Styggebreen	25
5.1.3 Blåbreen	26
5.1.4 Steinflybreen	27
5.1.5 Kvassryggbreen	28
5.1.6 Bukkehåmmårbreen	29
5.1.7 Gråsubreen	30
5.1.8 Sydbreen og Midtbreen	31
6 Diskusjon.....	33
6.1 Definisjon av sidemorene i lys av det laterale materialet ved de aktuelle breene.....	33
6.2 Bruk av lateralt materiale ved de aktuelle breene for å estimere plasseringen av ELA med MELM-metoden.....	34
6.3 Hvordan kan disse laterale avsetningene ha blitt dannet?.....	36
6.4 Within-valley asymmetry	41
7 Konklusjon	43
8 Forslag til videre arbeid.....	44
9 Referanser.....	45

Figurliste

Figur 1: Oversiktsbilde over østlige Jotunheimen.....	3
Figur 2: Oversiktsbilde over Lyngnehalvøya	5
Figur 3: Forskjellen mellom ELA bestemt av temperatur og nedbør (TP-ELA) og ELA hvor akkumulasjon av snø fra skred og vind er avgjørende (TPW-ELA).....	10
Figur 4: Isbreutbredelsen gjennom Holocene i ulike deler av Norge	11
Figur 5: Isens flytlinjer og den teoretiske lokaliseringen av sidemorener.	14
Figur 6: Materialfordelingen etter et steinskred og steinsprang.....	16
Figur 7: Flybilde i liten romlig skala fra Steinflybreen.....	19
Figur 8: Flybilde over Heimre Illåbreen med dagens utregnede likevektlinje.....	24
Figur 9: Flybilde over Styggebreen med dagens utregnede likevektlinje.....	25
Figur 10: Flybilde over Blåbreen med dagens utregnede likevektlinje.	26
Figur 11: Flybilde over Steinflybreen med dagens utregnede likevektlinje	27
Figur 12: Flybilde over Kvassryggbreen med dagens utregnede	28

Figur 13: Flybilde over Bukkehåmmårbreen med dagens utregnede likevektlinje.....	29
Figur 14: Flybilde over Gråsubreen med dagens utregnede likevektlinje.	30
Figur 15: Flybilde over Sydbreen og Midtbreen, med dagens likevektslinje	31
Figur 16: Flybilde fra Blåbreen hvor den røde streken viser hvor mye høyere breen en gang må ha stått.....	35
Figur 17: Bilde fra den laterale avsetningen nedenfor den nordvendte skråningen ved Sydbreen, hvor man kan observere tydelige kantete steiner i forgrunnen.	37
Figur 18: Fotografi fra feltturen til Sydbreen, hvor det nærmeste lavet til breen ble observert på den store steinen i forgrunnen.	38
Figur 19: Størrelsen på lavet i figur 22, med undertegnedes finger som skala.	38
Figur 20: Illustrasjon over hvordan en gitt bre kan ha sett ut under LIA,.....	39
Figur 21: Illustrasjon over en gitt bre ved dagens posisjon.....	39
Figur 22: Flybilde over deler av den aktuelle laterale avsetningen ved Heimre Illåbreen, hvor sirkelen representerer taluser som tyder på en høyere skredaktivitet enn området videre til venstre på bildet (Norgei3d, 2011).....	40

Tabelliste

Tabell 1: Tabell over de aktuelle breene	7
Tabell 2: Tabell over de aktuelle breene med dagens estimerte ELA, lengden og ELA under LIA, skråningsgradienten til fjellveggen langs siden eller bakenfor, samt ELA og AAR under LIA for at den laterale avsetningen skal forekomme nedenfor likevektslinjen.	32

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Forekomsten av isbreer er en god indikator på både lokalt, regionalt og globalt klima. Dette som en følge av at breer vil øke i masse og rykke frem i klimatiske perioder som har lave temperaturer eller en økt vinternedbør, men opplever økt smelting og har en tilbaketrekning under varmere perioder. I Norge i dag er ca 1 % av landarealet dekket av isbreer (ca 2609 km²), men det har vært variasjoner i denne forekomsten siden forrige istid sluttet for om lag 10 000 år siden. Hvor Den lille istiden, som sluttet for ca 150 år siden, var den største markante kalde perioden (Nesje, Bakke, Dahl, Lie, & Matthews, 2008a; Østrem, Selvig, & Tandberg, 1988).

Isens krefter er sterkt delaktig i utformingen av landformene og overflaten til områdene som er, eller har vært, dekket med is. Mye materiale vil med andre ord potensielt bli erodert vekk fra underlaget og transportert videre. Materialet som faller oppå isen, som en følge av for eksempel skredmateriale fra fjellvegger rundt, vil i tillegg bli fraktet oppå, eller begravd inni breen (Benn & Evans, 2010). I akkumulasjonsområdet, hvor det er en pålagring av snø i løpet av et år, vil isen bevege seg innover, mens i ablasjonsområdet, hvor smelting er den dominerende faktoren, vil strømbevegelsen være ut til kantene (Sutherland, 1984). Siden ablasjon forekommer nedenfor likevektslinjen, området hvor det er like mye pålagring og smelting av is og snø i løpet av et år, vil man i teorien bare finne sidemorener her (Nesje, 1992). Ved å se på maksimumshøyden på sidemorener vil dette derfor være gode indikatorer på den høyeste plasseringen av gamle likevektslinjer, en metode kjent som MELM (maximum elevation of lateral moraines). Dette kan gi svar på breens tidligere tilstand, og derfor også palaeoklima (Benn & Lehmkuhl, 2000; Dahl, Bakke, Lie, & Nesje, 2003; Nesje, 1992). Sutherland (1984) hevder imidlertid at lokale flytforhold i isen, eller topografi, kan bidra til en sporadisk forekomst av sidemorener også ovenfor likevektslinjen (Sutherland, 1984).

Ved bruk av flybilder hos nettjenestene norgei3d.no og norgeibilder.no ble det observert en lateral avsetning ved en isbre i Jotunheimen som strekker seg høyere enn hva teorien rundt dannelsen av sidemorener skulle tilsi. Etter å ha undersøkt videre ble det til slutt funnet flere forekomster av laterale avsetninger i østlige Jotunheim, samt ved to isbreer i Lyngsalpene. Flere av isbreene ble besøkt sommeren og høsten 2010, og det var planlagt å datere de utvalgte sidemorenene med metodene lichenometri og Schmidt hammer, i håp om å finne ut

når de ble avsatt. Vanskelig fremkommelighet og mangel på lav gjorde imidlertid at data ikke ble samlet inn. Feltturen til østlige Jotunheimen ble gjennomført med en medstudent som i sin masteroppgave ønsker å se på de regionale forskjellene på utbredelsen under den Lille istiden til isbreene i Jotunheimen. Det mest interessante å undersøke på disse breene er imidlertid å finne endemorener fra den Lille istid (Holocen maksimum) og beregne datidens likevektslinjer. Ønske om dette er på bakgrunn av antagelsen av at disse laterale avsetningene ble avsatt under denne kalde perioden, noe som gjør det relevant å undersøke hvordan breens tilstand var da. Dette, i tillegg til dagens likevektslinjer, kan bli funnet ved ulike metoder ved bruk av flybilder og topografiske kart ved nettjenestene *norgei3d* og *norgebilder*.

1.2 Problemstilling

Hovedproblemstillingen til denne avhandlingen er: *Kan sedimentene som forekommer lateralt ved enkelte breer i østlige Jotunheimen og Lyngen defineres som sidemorener?*

Andre spørsmål som det ønskes å undersøke er: Kan man bruke det laterale materialet til å beregne posisjonen på likevektslinjer med MELM-metoden? Hvilke prosesser kan danne laterale landformer ovenfor likevektslinjen? Hvorfor er det en asymmetri på forekomsten av avsetninger i dalsidene rundt breene?

1.3 Avhandlingens oppbygning

I det følgende vil områdebeskrivelse av Jotunheimen og Lyngenhavøya bli presentert hver for seg, før de aktuelle breene blir introdusert sammen med bakgrunnen for valgene av de aktuelle breene. Deretter vil relevant teori og begreper innen glasiologi og geomorfologi bli forklart i kapittel 3. I kapittel 4 vil metodene observasjon og fjernanalyse bli beskrevet. Videre i dette kapittelet vil metoder for å finne likevektslinjen komme, før valg av metode og argumenter for gjennomføringen av denne. I kapittel 5 vil resultat av målinger og observasjoner utført i *norgei3d* og *norgebilder* komme, representert med tabell og animasjoner på flybilder fra de aktuelle breene. Deretter vil det i kapittel 6 komme en diskusjonsdel hvor resultatene vil bli prøvd å bli forklart i lys av teoriene i kapittel 3, i tillegg vil nye teorier bli foreslått, før avhandlingen oppsummeres med avslutning og konklusjoner i kapittel 7.

2 Områdebeskrivelse

2.1 Jotunheimen

2.1.1 Geografi og forekomsten av isbreer

Jotunheimen (figur 1) er den høyeste fjellkjeden i Nord-Europa. Området består av om lag 300 isbreer av ulik karakter, hovedsakelig botnbreer (Østrem, et al., 1988). Her finner man flere topper på over 2000 meter, deriblant de to høyeste fjellene i Norge, Galdhøpiggen og Glittertinden, som har en høyde på henholdsvis 2469 og 2463 m.o.h. Tregrensen ligger på ca 1000 m.o.h. (Matthews, 2005), mens permafrostgrensen er lokalisert ved ca 1460 m.o.h. (Isaksen, Hauck, Gudevang, Ødegård, & Sollid, 2002).



Figur 1: Oversiktsbilde over østlige Jotunheimen og breene Heimre Illåbreen (nr 1), Styggebreen (nr 2), Blåbreen (nr 3), Steinflybreen (nr 4), Gråsubreen (nr 5), Kvassryggbreen (nr 6) og Bukkehåmmårbreen (nr 7) (Norgebilder, 2010).

2.1.2 Klima

Østlige Jotunheimen ligger i en overgangssone mellom det maritime klimaet på vestkysten av Norge, og det kontinentale klimaet på innlandet videre østover. Området ligger i nedbørsskyggen til de vestlige delene av Jotunheimen, og blir derfor karakterisert som et semi-kontinentalt temperaturregime (Støren, Dahl, & Lie, 2008; Østrem, et al., 1988). Den eneste klimastasjonen i området er Sognefjellet (1413 m.o.h.), hvor Norges meteorologiske institutt i perioden 1961-1990 målte en gjennomsnittlig årstemperatur på $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, og en årlig

nedbør på gjennomsnittlig 860 mm (eKlima, 2010). Temperatur synker og nedbør øker med høyden, så med en økning i vinternedbør (488 mm for oktober-april (eKlima, 2010)) på 8 % per 100 meter over havet (Dahl & Nesje, 1992) og en senkning i sommertemperatur (gjennomsnittlig 3.2 °C for mai-september (eKlima, 2010)) på 0,6 °C per 100 meter (Sutherland, 1984), vil det med en økning på 800 meter tilsvare en gjennomsnittlig sommertemperatur på -1.6 °C og en gjennomsnittlig vinternedbør på 1172 mm årlig nedbør. Disse tallene vil gi et bedre estimat på de klimatiske forholdene ved de aktuelle breene i området.

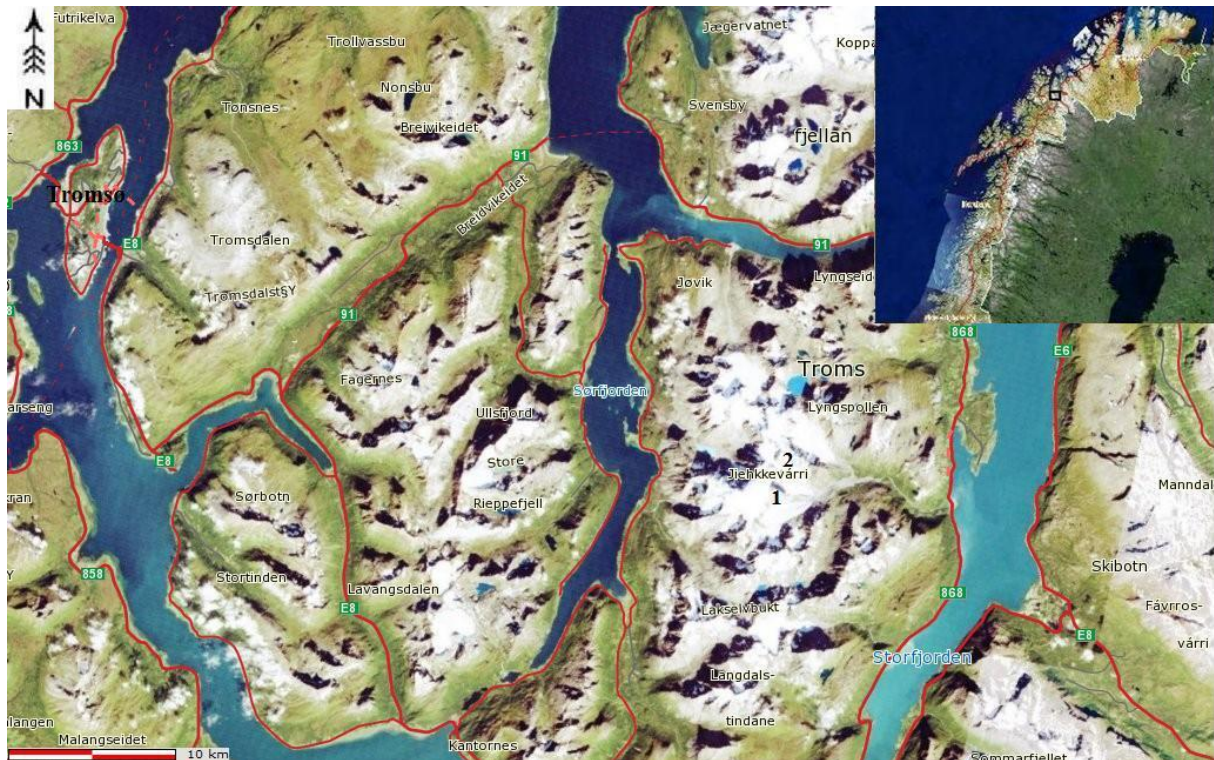
2.1.3 Geologi

Geologien i Jotunheimen kan, i likhet store deler av resten av Norge, forklares som et resultat av den kaledonske fjellkjedeformingen i devontiden, som hendte for ca 400 millioner år siden. Kontinentet som Norge da var en del av, Baltika, kolliderte med kontinentet Laurentia, som resulterte i at en fjellkjede ble dannet, hvor skiver med dypbergarter ble skjøvet østover over yngre bergarter over Jotunheimen. Disse dypbergartene er veldig motstandsdyktig mot forvitring og erosjon, og står derfor igjen som topper i terrenget, med mindre motstandsdyktige bergarter i lavlandet rundt (Fossen, Pedersen, Bergh, & Andresen, 2007). Berggrunnen under de aktuelle breene i området består av mangeritt til gabbro, gneis og amfibolitt (NGU, 2010).

2.2 Lyngenthalvøya

2.2.1 Geografi og forekomsten av isbreer

Lyngenthalvøya (figur 2) er lokalisert øst for Tromsø, Troms fylke, med ca 141 km² av området dekt av isbreer av ulik type (Østrem, Haakensen, & Melander, 1973). Jiehkkevarri er det høyeste fjellet i Lyngsalpene, og fylket, med 1833 meter over havet. En iskappe dekker toppen av fjellet, med botn- og dalbreer lokalisert i de lavtliggende områdene rundt. En av disse breene er Sydbreen (figur 2), som blir karakterisert som en dalbre. De høytliggende isbreene ligger over permafrostgrensen, og vil følgelig være påvirket av et polytermalt temperaturregime, mens botn- og dalbreene under permafrostgrensen er av en temperert karakter (Bakke, Dahl, Paasche, Lovlie, & Nesje, 2005). Studier av flutings foran breen lokalisert ved siden av Sydbreen, også kjent som Flutes glacier (Gordon, Whalley, Gellatly, & Vere, 1992), tyder på at også Sydbreen har et temperert temperaturregime.



Figur 2: Oversikt bilde over Lyngenhalvøya, Sydbreen (nr1) og Midtbreen (nr2) (Norgebilder, 2010).

2.2.2 Klima

Som en konsekvens av varme hav- og luftstrømmer langs kysten av Troms, opplever området blant de største temperaturvariasjonene i verden i løpet av et år. Nærheten til havet fører også med seg et maritimt fuktig klima (Bakke, et al., 2005). Norges meteorologiske institutts nedbørsstasjon på Lyngseidet (6 m.o.h.), lokalisert ca midt på halvøyen, målte i perioden 1961-1990 en gjennomsnittlig årlig nedbør på 635 mm, hvor vinternedbøren (oktober-april) var 430 mm (eKlima, 2010). Med en økning på 8 % per 100 meter over havet (Dahl & Nesje, 1992), vil ca 705 mm vinternedbør være et godt estimat over forholdene 800 m.o.h. ved Sydbreen. Lyngseidet har ikke hatt en målestasjon over temperatur som har vært i drift lenge nok til å få akseptable klimadata. Derfor vil en målestasjon i Tromsø (8 m.o.h.) bli brukt for å beregne temperaturen. Den årlige gjennomsnittstemperaturen ved denne målestasjonen for perioden 1961-1990 var på 2,9 °C, hvor den gjennomsnittlige sommertemperaturen (mai-september) var 8,8 °C (eKlima, 2010). Med en senkning i temperatur på 0,6 °C per 100 meter (Sutherland, 1984), vil dette tilsvare en gjennomsnittlig sommertemperatur på ca 4 °C ved Sydbreen.

2.2.3 Geologi

Sydbreen ligger over store forekomster av gabbro (NGU, 2010). I likhet med Jotunheimen, og nesten hele resten av Norge, er geologien på Lyngenhalvøya påvirket av den kaledonske

fjellkjedeformingen. Området består av den største forekomsten av gabbro i Skandinavia, i tillegg til blant annet grønnskifer, som er blitt tolket som gammel havbunnsskive fra havet mellom Baltica og Laurentia før fjellkjedeformingen (Fossen, et al., 2007; Kvassnes, Strand, Moen-Eikeland, & Pedersen, 2004).

2.3 De aktuelle breene og hvorfor de ble valgt

Innledningsfasen til denne studien besto hovedsakelig av observasjon over østlige Jotunheimen ved bruk av netjtjenestene `norgei3d` og `norgebilder`. Store områder og mange breer ble observert og vurdert, og bestemmelsen av de valgte lokalitetene ble gjort på bakgrunn av flere kriterier. Tydelige og interessante sidemorener var det første og viktigste kriteriet. Siden det var planlagt at flere av disse breene skulle besøkes, var det også viktig at fremkommeligheten var realistisk, og muligheten til overnatting til stede. Muligheten til å gjøre feltarbeid, både i å komme seg til og fra Trondheim, men også fordi det er mange turiststier og turisthytter i området, var med andre ord en avgjørende faktor. Siden det ikke er ansvarsfullt med tanke på sikkerhet å gjøre feltarbeid alene, var det viktig at en medstudent også hadde planer om å gjøre feltarbeid i samme område. Hun ønsket å finne regionale forskjeller på endemorener, og følgelig utstrekningen på breene, fra den Lille istiden, noe som gjorde det nødvendig at aktuelle breer for henne også var til stede i samme område. Dette bidro også til innskrenkingen til bare å se på breer i østlige Jotunheimen i denne fasen av prosjektet.

Det ble som sagt ikke samlet inn noe data fra de aktuelle laterale avsetningene i Jotunheimen, noe som gjorde at flere breer i området ble undersøkt med `norgei3d`. Dette siden fokuset til undersøkelsen nå hovedsakelig besto av å finne likevektslinjene til breene, og en realistisk fremkommelighet og relevante breer til medstudenten ikke lengre var nødvendig. Siden det var i østlige Jotunheimen at den første laterale avsetningen ble observert, var det ønskelig å undersøke om det fantes flere forekomster i området. De som er valgt i denne avhandlingen er de mest markante forekomstene i østlige Jotunheimen, og antallet gjør at et visst sammenligningsgrunnlag er til stede.

Det var svært skuffende at det ikke ble samlet inn noe data i Jotunheimen. Det ble derfor planlagt å gjøre feltarbeid ved en annen bre i østlige Jotunheimen med veileder, men denne turen ble til slutt avlyst etter flere dager med snønedbør i dagene før avreise. Ønsket om å få inn kvantitative data, men også for å undersøke om forekomsten av slike laterale avsetninger kun er et fenomen som forekommer i østlige Jotunheimen, gjorde at Lyngsalpene også ble

undersøkt ved bruk av flybilder. Så godt som alle breene i området ble undersøkt, men bare to isbreer med tydelige og interessante laterale avsetninger ble lokalisert. Siden undertegnede er fra Tromsø er nærheten til Lyngsalpene av personlig interesse, og det er også et område hvor gjennomførelse av feltarbeid var mulig. Dette på grunn av tilgangen på feltassistent fra nærmeste slekt, og det faktum at gjennomførelsen både var oppnåelig og av en liten kostbar karakter. At snøen i tillegg ikke hadde ankommet dette området enda var også viktig for at feltturen ble gjennomført. Heller ikke her ble det samlet inn noe data. Årsaken var at også her var forekomsten av kartlav fraværende, noe som er interessant data i seg selv. Dette vil bli nærmere drøftet senere i avhandlingen.

De aktuelle breene i østlige Jotunheimen er Heimre Illåbreen (nr 1), Styggebreen (nr 2), Blåbreen (nr 3), Steinflybreen (nr 4) og Gråsubreen (nr 5), Kvassryggbreen (nr 6) og Bukkehåmmårbreen (nr 7) som alle blir vist i figur 1 med sine respektive nummer. I Lyngsalpene finner man Sydbreen og Midtbreen, med henholdsvis nr 1 og nr 2 i figur 2, som også har interessante laterale avsetninger. Tabell 1 viser en oppsummering av de aktuelle breene, deres himmelretning, dagens lengde, areal og høyeste og laveste punkt over havet målt i norgei3d og norgebilder. Disse målingene tyder på en tilbaketrekning av alle breene siden *Atlas over breer i Nord-Skandinavia* av Østrem, et al. (1973) og *Atlas over breer i Sør-Norge* av Østrem, et al. (1988) ble laget. Gråsubreen er den eneste av breene som har hatt langvarige måleserier, ved at den siden 1962 har hatt årlige massebalansemålinger av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Arealet og høyeste og laveste punkt over havet av denne breen i tabell 1 er hentet fra målingene fra 2009 (Kjøllmoen, Andreassen, Elvehøy, Jackson, & Giesen, 2010).

Tabell 1: Tabell over de aktuelle breene med deres himmelretning, dagens lengde, areal og høyeste og laveste punkt over havet.

	Navn	Himmelretning	Dagens lengde (m)	Areal (km ²)	Høyde over havet (m) Høyeste/laveste
Jotunheimen	Heimre Illåbreen	Nordvest	3000	1,60	2120/1570
	Styggebreen	Øst	3700	4,90	2290/1680
	Blåbreen	Nordøst	2600	3,40	2120/1640
	Steinflybreen	Sørøst	1700	1,30	2190/1910
	Kvassryggbreen	Nord	1470	0,62	2060/1760
	Bukkehåmmårbreen	Nordøst	890	0,37	2090/1820
	Gråsubreen	Nord-nordøst	2100	2,12	2280/1830
Lyngsalpene	Sydbreen	Øst	3400	3,90	1160/460
	Midtbreen	Øst	2000	2,10	1100/520

3 Teori

3.1 Glasiologi

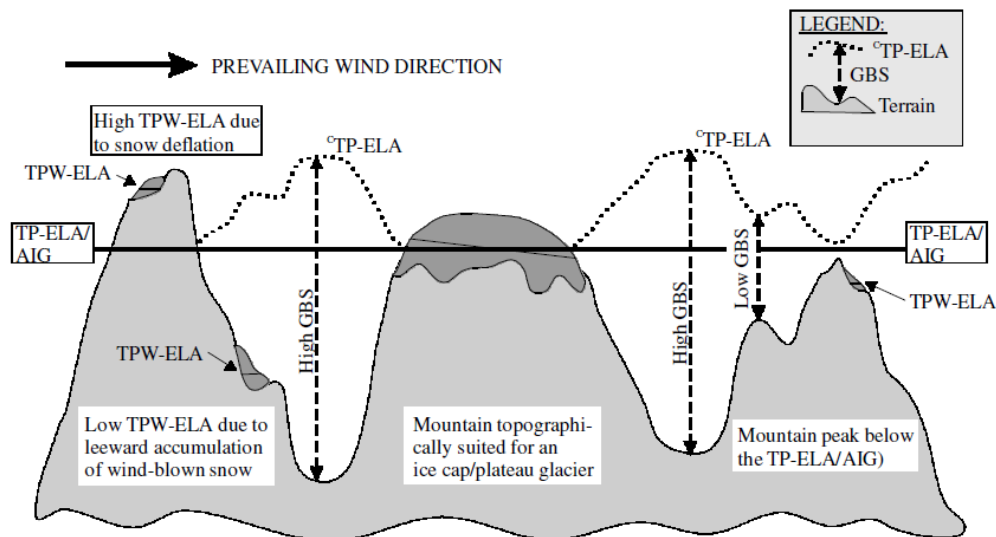
3.1.1 Massebalanse og likevektslinje

En isbre kan grovt deles inn i to ulike områder: Akkumulasjons- og ablasjonsområde. I akkumulasjonsområdet er det et overskudd av snø i løpet av et år og det vil være pålagring av is, mens i ablasjonsområdet vil det være mer smelting enn pålagring. Disse områdene blir delt av en likevektslinje (equilibrium line) hvor nettbalansen er lik 0, hvor det med andre ord vil være like mye akkumulasjon og ablasjon i løpet av et år (Benn & Evans, 2010; Sutherland, 1984; Østrem, et al., 1988). Hvis det er mer akkumulasjon enn ablasjon i løpet av et år, et år med positiv massebalanse, vil isbreens volum øke, og likevektslinjen flytte seg nedover. Hvis isbreen på den andre siden har en negativ massebalanse i løpet av et år, vil volumet av isbreen synke, og likevektslinjen vil følgelig flytte seg oppover (Benn & Evans, 2010). Den lokale topografien og breens høyde over havet kan i tillegg ha en innflytelse på plasseringen av likevektslinjen. Isbreens geografiske plassering og klima, med sommertemperatur og vinternedbør, vil derfor være de viktigste faktorene som bestemmer forandringer av massebalansen på isbreene i Norge. Forflytning av likevektslinjen (equilibrium line altitude (ELA)) er derfor en god indikator på breens tilstand og forandring i klima (Benn & Evans, 2010; Lie, Dahl, & Nesje, 2003; Sutherland, 1984; Østrem, et al., 1988).

3.1.2 Equilibrium line altitude (ELA)

Benn & Lehmkuhl (2000) presiserer at defineringen av ELA er mer komplisert enn det som blir presentert i avsnittet over. Få, eller ingen, isbreer har en nettbalanse lik 0 på tvers av isbreen langs samme høydekurve, men er heller definert som en gjennomsnittlig høyde. Det vil forekomme lokale variasjoner av akkumulasjon og ablasjon, blant annet på grunn av topografi. ELA sier heller ikke noe om likevekten til isbreen som helhet. En nettbalanse lik 0 for hele breen kalles steady-state ELA. Når ELA sammenfaller på samme høyde som steady-state ELA, er massen og geometrien til isbreen i likevekt med klima. Isbreen vil med andre ord verken øke eller minske i masse. Dette er en veldig teoretisk tilnærming, siden en slik stabil tilstand til isbreen nesten aldri vil forekomme i naturen. Steady-state ELA er derimot en god måte til å måle forskjellen i geometrien til isbreen i ulikt klima (Benn & Evans, 2010; Benn & Lehmkuhl, 2000).

Dahl & Nesje (1992) introduserte begrepene TP-ELA (temperatur og nedbør ELA) og TPW-ELA (temperatur, nedbør og vind ELA) (figur 3), på bakgrunn av at vindbasert snøtilførsel til akkumulasjonsområdet har en viktig rolle i massebalansen til isbreer på enkelte lokaliteter. På en iskappe på toppen av et fjell vil ikke vindretningen være avgjørende for akkumuleringen, og vil derfor bare være styrt av sommertemperatur og vinternedbør (TP-ELA). I en botnbre, eller dalbre, vil derimot snøtilførsel fraktet med vind fra fjellplatået over, eller med snøskred fra fjellveggene rundt, være viktige snøkilder til akkumulasjonsområdet. Likevektslinjen på slike isbreer blir av Dahl & Nesje (1992) derfor karakterisert som TPW-ELA. På grunn av vindtransportert snø, vil TPW-ELA være lokalisert mye lavere enn TP-ELA (figur 3). Himmelfretningen til isbreene i forhold til den dominerende vindretningen har med andre ord noe å si med tanke på plasseringen av ELA. I områder som ligger i le for vinden kan det potensielt samles opp store mengder med snø. I Jotunheimen er det blitt estimert at forskjellen i ELA mellom nord- og sørvendte botnbreer er på ca 50 meter, hvor de nordvendte har den laveste høyden, mens det i Troms er estimert til å være høydeforskjeller på 250-300 meter (Dahl & Nesje, 1992). TP-ELA blir også definert som en klimatisk kalkulert høyde hvor glasiasjon vil være mulig (altitude of instantaneous glacierization (AIG)). CTP-ELA (climatic temperature-precipitation equilibrium-line altitude) (figur 3) er høyden på en klimatisk likevektslinje, basert på sommertemperatur og vinternedbør, hvor dannelsen av isbreer er mest gunstig, mens GBS (glacial buildup sensitivity) er avstanden mellom overflaten og CTP-ELA (Lie, et al., 2003).



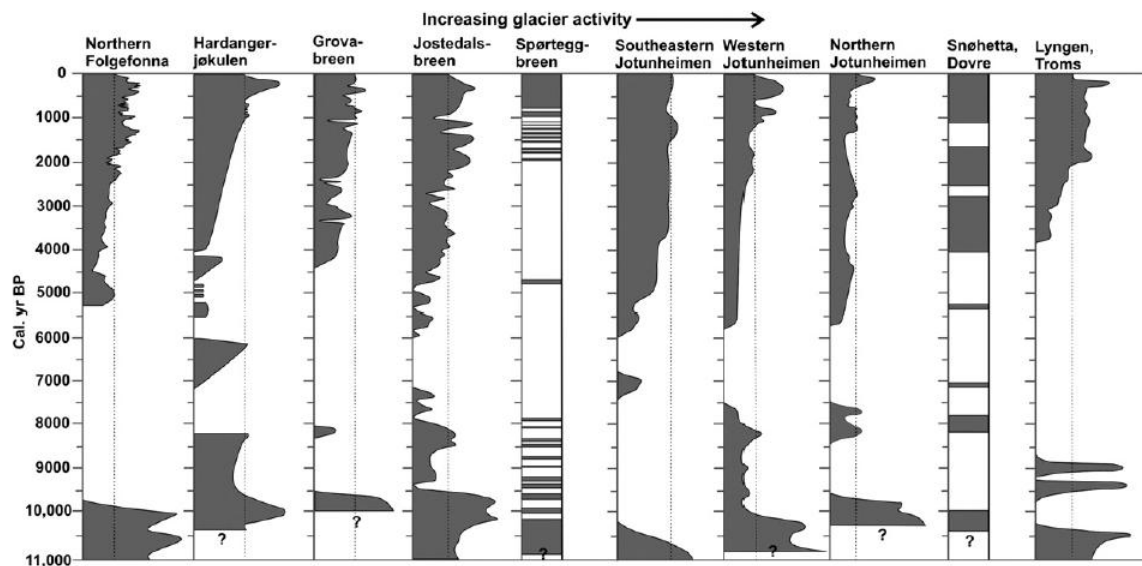
Figur 3: Forskjellen mellom ELA bestemt av temperatur og nedbør (TP-ELA) og ELA hvor akkumulasjon av snø fra skred og vind er avgjørende (TPW-ELA). AIG samsvarer med TP-ELA, som er en klimatisk høyde over havet hvor glasiering er mulig. CTP-ELA viser høyden hvor forholdene til glasiering er optimal, mens GBS er høydeforskjellen mellom overflaten og CTP-ELA (Ø. Lie, et al., 2003).

3.1.3 Isbreens temperaturregime og dynamikk

Isbreens geografiske lokalisering og klima er avgjørende for dens temperaturregime og dynamikk (Benn & Evans, 2010). Forekomsten av flytende vann, i områder hvor temperaturen er over trykksmeltepunktet, påvirker spenningsforholdene i isen, som videre fører til bevegelse og erosjon under isen (Fountain & Walder, 1998). På den andre siden finnes det breer med temperaturforhold inni og under isen som er under trykksmeltepunktet, ofte påvirket av permafrostforekomst, noe som følgelig gjør at vann ikke vil kunne renne fritt. Dette er de viktigste forskjellene mellom en isbre under et henholdsvis temperert og polar temperaturregime (Benn & Evans, 2010; Fountain & Walder, 1998). I tillegg finnes det isbreer med et polytermalt temperaturregime, som har enkelte steder ved eller rundt trykksmeltepunktet, mens det andre steder vil være temperaturer under 0 °C (polytermale breer og permafrost vil bli nærmere forklart i avsnitt 4.2.3) (Benn & Evans, 2010; Etzelmüller & Hagen, 2005). Bevegelsen til breer er med andre ord påvirket av tilstedeværelsen av flytende vann, men massebalansen til breen er også en viktig faktor. Dette siden det vil være nødvendig at det forflyttes like mye masse fra akkumulasjonsområdet som det smeltes i ablasjonsområdet for å opprettholde steady-state i en idealisert bre (Benn & Evans, 2010). Strømbevegelsene på en isbre vil derfor i akkumulasjonsområdet gå innover på breen, mens i ablasjonsområdet vil bevegelsene gå ut mot sidene (Sutherland, 1984).

3.1.4 Tilstanden til isbreer i Norge i Holocene

I den geologiske tidsperioden Holocen, som strekker seg fra ca 11 000 år siden og frem til i dag, har det vært flere svingninger i klima, og følgelig også i forekomst og utstrekning av isbreer, i ulike deler av Norge (figur 4). Innlandsisen over Norge hadde for ca 10 500 år siden, i perioden som er bedre kjent som Yngre Dryas, sitt siste markerte fremrykk. Mellom ca 8000-8500 år siden forekom det en periode som blir kalt for Finse event, hvor alle breene i Norge smeltet vekk. Dette på grunn av en økning i gjennomsnittlig sommertemperatur på 1.5-2 °C. Isbreene kom dog tilbake igjen mellom ca 6000 og 2000 år før nåtid (Nesje, et al., 2008a). Den maksimale neoglasiale utstrekningen av isbreene i Norge blir antatt å være under perioden fra ca 1550-1850, også kjent som den Lille istiden (LIA). Endemorener fra denne utstrekningen er synlig på mange botn- og dalbreer i Norge i dag, men utstrekningen kan være ulik på grunn av blant annet klima, gradienten til topografien og isen (Nesje, et al., 2008a; Nesje & Dahl, 1993; Østrem, et al., 1988). Ved bruk av metoden lichenometri, som tar for seg størrelsen på lav, har Matthews (2005) datert at breene i Jotunheimen hadde sin største utbredelse under LIA på midten av 1800-tallet (Matthews, 2005). Nesje, et al. (2008b) konkluderte med at bakgrunnen for denne økte utstrekningen var en konsekvens av økt vinternedbør på starten av 1800-tallet (Nesje, et al., 2008b).



Figur 4: Isbreutbredelsen gjennom Holocene i ulike deler av Norge. Den horisontale skalaen er skjematisk, og ikke i skala (Nesje, et al., 2008a).

Studien av isbrevariasjonene gjennom Holocene i sørøstlige Jotunheimen, som figur 4 er basert på, ble gjort av Lie, et al. (2004). De undersøkte glasiale variasjoner til Bukkehåmmårbreen, Jotunheimen, indirekte ved å analysere sedimentkjerner de hentet fra Bukkehåmmårtjørna, en liten innsjø framfor breen. Dette prøvde de å gjøre på bakgrunn av tankegangen om at andelen glasifluviale sedimenter som blir fraktet til innsjøen fra breen i bakhånd vil variere som en følge av ulikt klima. Resultatene de kom fram til var blant annet at en liten bre ble dannet mellom 7500 og 6800 år før nåtid. Etter 6000 år før nåtid ble den enda større, og Bukkehåmmårbreen har følgelig eksistert fra den tiden og fram til i dag. Det var muligens en liten tilbaketrekning rundt 5200 år før nåtid, men fra 3800 år før nåtid vokste den, og den har vært i en omtrentlig samme størrelse fram til i dag (Lie, et al., 2004). Hvis man ser på figur 4 i lys av de aktuelle breene i denne avhandlingen, kan det tyde på at det i midten av Holocene, for rundt 4000-5000 år siden, var flere variasjoner i isbreutbredelse i sørøstlige Jotunheimen enn hva tilfellet var i vestlige Jotunheimen, men at denne trenden har vært omvendt de siste 2000 årene. Dette kan videre bety at vestlige Jotunheimen opplevde større bresvingninger gjennom LIA.

Ved bruk av samme metode som i avsnittet ovenfor undersøkte Bakke, et al. (2005) isbrevariasjoner gjennom Holocene i Lyngen. De konkluderte blant annet med at de store framrykkene tidlig og seint i Holocene i Lyngen er lik forekomsten som var i sørlige Norge, men at bevis for Finse event er fraværende. Det tyder derfor på at Lyngen var isfritt rundt ca 8000 år før nåtid, noe som er annerledes i forhold til hva situasjonen var i andre områder i Norge. Det ble også konkludert at maksimum utstrekning under LIA var ved ca år 1900 (Bakke, et al., 2005).

3.2 Geomorfologi

3.2.1 Isbreers transport og avsetning av materiale

Isbreer kan ha en stor erosjon og transport av materiale. Transport av materiale av isbreer blir delt inn i aktiv og passiv (Benn & Ballantyne, 1994; Benn & Evans, 2010). Aktiv transport tar for seg subglasiale sedimenter som blir modifisert som et resultat av interaksjon mellom partiklene eller mellom partiklene og underlaget. Denne modifiseringen blir videre delt inn i knusing og abrasjon, hvor knusing sprekker opp to sammenføyde partikler, mens abrasjon er dannelsen av finkornet materiale som en konsekvens av at to partikler glir forbi hverandre. Disse prosessene resulterer i at materialet får en rundhet i kantene. Passiv transport tar imidlertid for seg materiale som blir fraktet en- eller supraglasialt, hvor interaksjon mellom

partikler er sjelden. Materialet som blir transportert på denne måten har vanligvis falt ned fra fjellsidene rundt, og vil derfor hovedsakelig være grovkornet og kantete. Det bør imidlertid presiseres at passivt transportert materiale ikke alltid vil være uten modifikasjoner. Forvitning og periglasielle prosesser kan endre på partiklene, i tillegg kan store blokker falle oppå hverandre under utsmeltning. På grunn av ulike modifikasjoner er det derfor mulig å bestemme hvilken transportmåte de avsatte sedimentene har gjennomgått, men man bør også ta type bergart med i betraktning (Benn & Ballantyne, 1994; Benn & Evans, 2010).

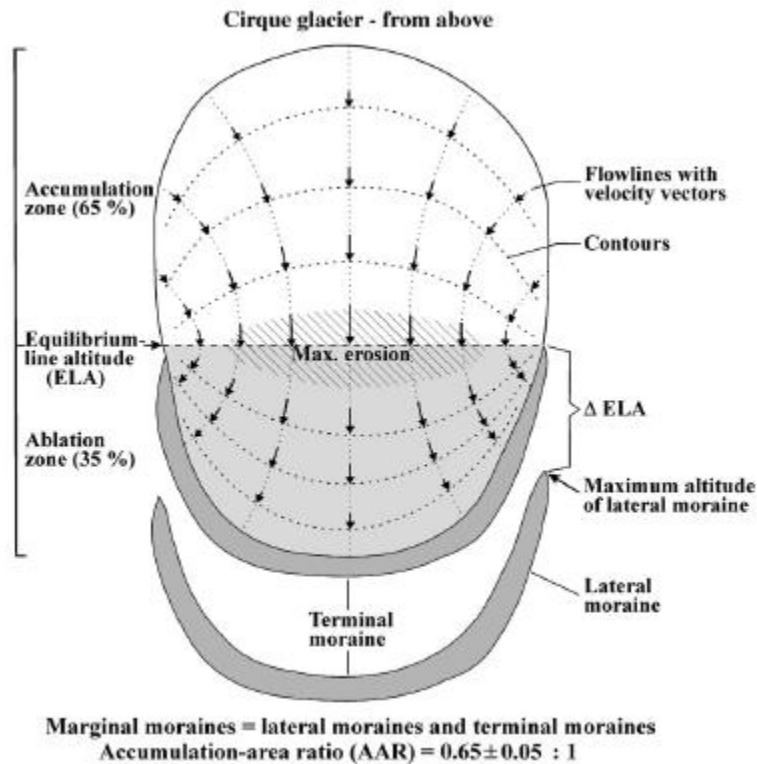
Benn & Ballantyne (1994) undersøkte side- og endemorenene til Storbreen i Jotunheimen for å se om det var noen forskjell på formen til materialet, og dermed også hvilke transportmåter som var dominerende. De fant runde aktiv transportert materiale på alle lokalitetene, noe de tolket var på grunn av strømbevegelsen isen har ut mot sidene i ablasjonsområdet. De fant derimot en konsekvent økning av kantet materiale desto høyere opp langs sidene de kom. Dette ble tolket som passivt supraglasielt transportert materiale, og at dette er dominerende del av sidemorener (Benn & Ballantyne, 1994).

3.2.2 Sidemorener: Definerings og teoretisk lokalisering

Sidemorener blir karakterisert som avsetninger langs siden av isbreen nedenfor likevektslinjen, bestående av sedimenter som har blitt fraktet sub-, en- eller supraglasielt, eller fra skred fra fjellsiden over (Humlum, 1978; Small, 1983). Klima, som tidligere poengtert, er med på å bestemme isbrens massebalanse og dynamikk, som videre virker inn på mengden og hastigheten som sedimenter blir fraktet og avsatt. Man vil derfor finne store forskjeller på forekomsten av sidemorener fra region til region. Humlum (1978) diskuterte begrepet han kalte for lagdelte sidemorener. Han hevdet at sidemorener hovedsakelig besto av skredmateriale fra fjellveggen over, eller skredmateriale som var blitt fraktet supraglasielt fra områder over likevektslinjen. Sidemorenene han undersøkte i Alpene hadde tydelige lagdelinger, noe han tolket til at det hadde vært sporadiske skredaktivitet, som videre kunne representere klimatiske variasjoner gjennom Holocene (Humlum, 1978).

Benn & Evans (1998) kaller slike lagdelte sidemorener for supraglasielle sidemorener, ved at skredmateriale som har havnet oppå isen i akkumulasjonsområdet over tid har blitt fraktet framover til ablasjonsområdet nedenfor ELA, og blitt smeltet ut av isen langs siden. Eller så kan skred fra fjellveggen over gi en direkte tilførsel av materiale. Materialet man finner i slike morener vil følgelig være lite modifisert av breen (Benn & Evans, 1998). Figur 5 gir et godt innblikk i inndelingen av akkumulasjons- og ablasjonsområde, samt hvordan isens

karakteristikkene bestemmer strømsbevegelsene og videre dannelsen og plasseringen av sidemorener. Den høyeste posisjonen av sidemorener er derfor en av flere metoder som blir brukt for å anslå tidligere ELA (Benn & Lehmkuhl, 2000; Dahl, et al., 2003; Nesje, 1992).



Figur 5: Isens flytlinjer og den teoretiske lokaliseringen av sidemorener (Dahl, et al., 2003).

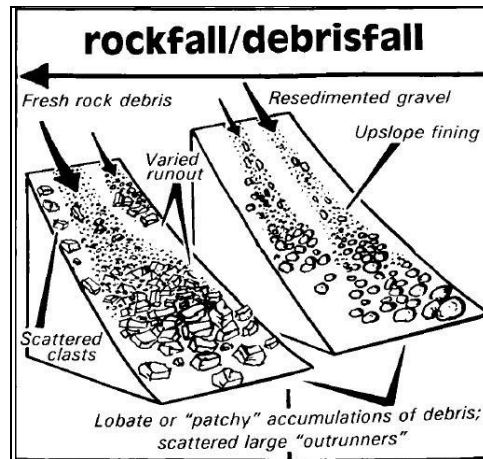
Det forekommer tilfeller hvor sidemorenen på den ene siden av dalen er mye større enn på den andre. Dette har blitt definert som et fenomen kalt *within-valley asymmetry*, som ble tidlig forsket på av blant annet Benn (1989) og Bennett & Boulton (1993). Dette kan forklares på bakgrunn av fire ulike faktorer: (1) ulik tilførselsgrad av sedimenter fra fjellveggen over, (2) volumet til sidemorener kan vise til forskjeller i type og tykkelse til sedimentene i området over, (3) ulik sedimenttilgang på grunn av forskjellig bergart eller struktur, (4) eller på grunn av ulikheter i skyggeforekomst, med topografi og himmelretning, og dynamikken til isbreen (Benn & Evans, 2010).

3.2.3 Steinskred og steinsprang

Stein fra fjellsidene rundt er blant de viktigste kildene til materiale i botn- og dalbreer, og kan bli forflyttet til breen som en følge av blant annet steinskred og steinsprang (Benn & Evans,

2010). Steinskred (rockfall) er en rask gravitasjonsforflytting av oppsplittet berggrunn i en fjellvegg med en skråningsgradient mellom 35° og 50°. Det finnes også lokale skråningsvariasjoner som kan variere fra 25-30° til 70-90° (Blikra & Nemeč, 1998). Steinskred skjer på grunn av en reduksjon i skjærstyrken i berggrunnen, hovedsakelig et resultat av økt porevannstrykk eller mekanisk og kjemisk forvitring. Desto større materialet som gjennomgår et slikt skred er, desto høyere hastighet vil den oppnå. Det største materialet har dessuten potensial til å forflytte seg lengre enn materiale med en mindre størrelse, noe som gjør at man vil finne en materialfordeling i fronten hvor størrelsen på materialet blir større og større jo lengre ned man kommer. De alle største steinene kan ha så stor hastighet at de ender opp langt framfor resten av skredet, og bli karakterisert for såkalte "out-runners" (figur 6) (Blikra & Nemeč, 1998). Under kalde perioder tyder det på at det var en økt forekomst av slike steinskred. Dette på grunn av en økende forekomst av tine-frysesykluser, regnstormer og snømengde (Blikra & Nemeč, 1998; Sandersen, Bakkhøy, Hestnes, & Lied, 1996). McCarroll, et al. (2001), for eksempel, daterte en talus i vestlige Jotunheimen ved bruk av lichenometri. De konkluderte at det var en økt forekomst av steinskred, opptil syv ganger så mye, gjennom LIA, i forhold til resten av Holocene, og hevdet at dette var sterkt knyttet til klimavariasjonene i denne perioden.

Steinsprang (debrisfall) er en annen rask gravitasjonsforflyttelse av sedimenter utløst på bakgrunn av mange av de samme prosessene som ved steinskred. I motsetning til steinskred består ikke materialet i et steinsprang av en nylig oppsplittet berggrunn, men av eldre materiale som har blitt forflyttet ved en tidligere anledning, av for eksempel steinskred. Dette gjør at materialet er delvis eller mye avrundet i kantene (Blikra & Nemeč, 1998). Størrelsen på materialet vil også påvirke hvor langt det har potensial til å forflytte seg, noe som gjør at man finner mindre og mindre materiale desto lengre opp i skråningen man kommer (figur 6) (Benn & Evans, 2010).



Figur 6: Materialfordelingen etter et steinskred og steinsprang (Blikra & Nemeč, 1998).

3.2.4 Fjellpermafrost: påvirkning av breer og geomorfologiske prosesser

Tilstedeværelsen av permafrost i fjell og jord, hvor temperaturen i bakken er under 0 °C i minst to år, er en viktig faktor som blant annet er med på å regulere isens dynamikk (avsnitt 3.1.3) og geomorfologiske prosesser, deriblant skredforekomster og dannelsen og opprettholdelsen av iskjernemorener. Permafrost er hovedsakelig styrt av klima, hvor en årlig gjennomsnittstemperatur rundt -4 °C gir en god indikator på forekomsten i Sør-Norge (Etzelmüller, Berthling, & Sollid, 2003; Etzelmüller & Hagen, 2005). Forholdet mellom gjennomsnittlig temperatur i bakken og i luften er derimot påvirket av mange faktorer, som for eksempel høyde over havet, snødybde om vinteren og fuktigheten i bakken. Dette gjør at den gjennomsnittlige årlige temperaturen i underlaget kan være forskjellig innenfor samme region (Etzelmüller, et al., 2003; Harris, et al., 2009). Isaksen, et al. (2001) gjorde borehullsmålinger blant annet i Juvvasshøe (1894 m.o.h.) i Jotunheimen, og fant at tykkelsen på permafrosten i området kunne være på over 300 meter (Isaksen, et al., 2001). I sørlige Norge er området hvor det potensielt kan forekomme permafrost, ca dobbelt så stort som området som er dekket av isbreer. Under LIA kan dette området med potensiell forekomst ha vært dobbelt så stor. I disse områdene i Norge vil den nedre grensen (m.o.h.) for permafrost bli lavere desto lengre øst man kommer, mens det er en motsatt trend for ELA i samme retning. Dette gjør at man har en overgang fra vest til øst mellom prosesser som er styrt av isbreer, til prosesser som er styrt av permafrost (Etzelmüller, et al., 2003).

Forekomsten av permafrost bidrar til et kaldt eller polytermalt temperaturregime i breene, som fører til at hastigheten til isen synker. Overgangen mellom varm og kald temperaturregime i

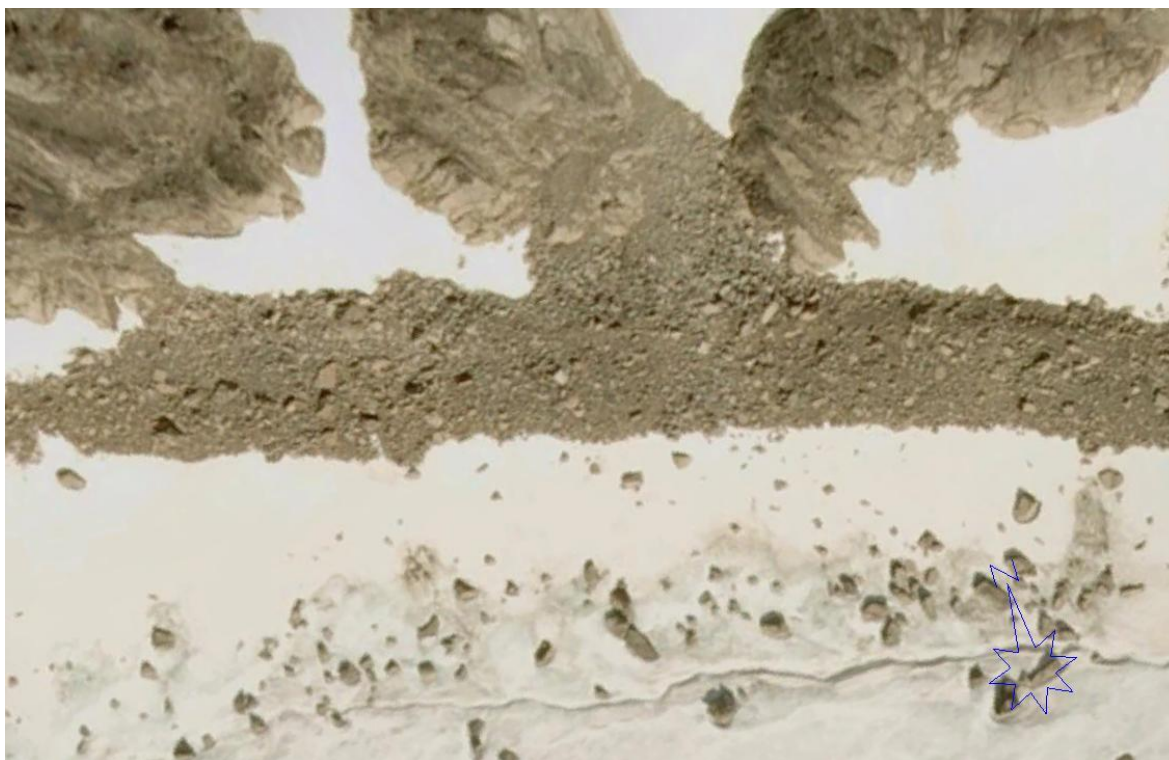
en bre fremmer for en økt påfrysing av subglasialt materiale, som følgelig blir fraktet oppover englasialt i breen før materiale til slutt ender opp på isoverflaten (Etzelmüller, et al., 2003). Dette fører til en akkumulasjon av materiale oppå bretungen som kan beskytte isen som ligger under, og kan følgelig føre til at tungen blir igjen hvis breen trekker seg tilbake. Dette beskriver forekomsten av iskjernemorener framfor surge-breer på Svalbard beskrevet av Etzelmüller, et al. (1996), men kan forklare forekomsten også andre steder hvor breer har hatt et framtykk, som for eksempel under LIA. I østlige Jotunheimen forekommer ELA på de fleste breene ovenfor den nedre grensen for permafrost (Etzelmüller, et al., 2003), noe som fikk Østrem (1964) til å hevde at alle endemorenene i dette området var iskjernemorener. Hvis temperaturen under sedimentdekket er lavere enn 0 °C gjennom året, kan iskjernemorener bevarer og bli stabil over en lengre periode, noe som gjør at forekomsten av stabile iskjernemorener er en god permafrostindikator. Utsmeltingen av iskjernemorener vil først forekomme ved en varm klimaperiode, eller hvis materialedykket blir for tynt. Når isen trekker seg tilbake kan det termiske regimet i breen forandre seg, ved at permafrost kan bli dannet i et område som tidligere har hatt et temperert temperaturregime. Denne overgangen fra temperert til kald kan bli geomorfologisk observert ved tydelige flutings framfor dagens brefront, som nå er påvirket av permafrost (Etzelmüller & Hagen, 2005)

4 Metode

4.1 Fjernanalyse og observasjon

Observasjon er grunnleggende innenfor vitenskapen, men det er derimot blitt argumentert for at nesten all vitenskapelig observasjon også er basert på teoretiske forutsetninger, noe som er med på å øke diskusjonen om hvorvidt objektiviteten til observasjoner er reell. Forskerens bakgrunnskunnskap og relevante teorier er med andre ord viktige faktorer under observasjoner (Rhoads & Thorn, 1996a). Som en følge av at ingen kvantitative data ved bruk av lichenometri eller Schmidt hammer ble samlet inn under feltarbeidet, er denne avhandlingen hovedsakelig basert på observasjoner eller fra flybilder, og noe observasjon i felt. Når man observerer isbreer og glasiale former på flybilder er man avhengig av kunnskap og erfaring rundt det man observerer. Det er viktig at man har innsikt i de prosessene og kreftene som dominerer, for å kunne anslå hva man faktisk observerer.

Ved bruk av flybilder fra norgei3d og norgebilder har man muligheten til å hente ut blant annet areal, høyde over havet, himmelretning, samt å estimere skråningsgradienter. I tillegg kan man observere de største sedimentstørrelsene og til dels tyde hvorvidt de er runde eller kantete (figur 7), og tydelige glasiale former, som for eksempel flutings og morener. En annen svært viktig del man kan bruke flybilder til, er å observere og bestemme områder før man skal ut i felt. I tillegg har man muligheten til å observere ufremkommelige områder som ikke har vært mulig å besøke under feltarbeidet. Flybilder gjør det følgelig mulig å observere store områder på kort tid, og man har muligheten til å zoome seg opp og ned i romlig skala. Med muligheten til å forandre den romlige skalaen, i lag med relevant kunnskap, kan dette skape et godt helhetlig bilde over hva som forekommer i det aktuelle området. Som for eksempel kan man med en god nok bakgrunnskunnskap når man observerer en isbre ha større mulighet til å tolke forekomster som kan si noe om blant annet temperaturregimet og den neoglasiale utstrekningen, ved å se etter flutings og endemorener.



Figur 7: Flybilde i liten romlig skala fra Steinflybreen hvor man kan observere blant annet en materialfordeling og størrelsesforskjell på materialet og (Norgei3d, 2011).

4.2 Metoder for å finne likevektslinjen

I litteraturen nevnes det flere ulike metoder for å estimere tidligere steady-state ELA på en isbre. Metodene har en tendens til å få ulike resultater, og enkelte er mer gunstig å bruke i enkelte områder enn andre. Den første metoden ser på høydeforhold mellom fronten og midten av isbreen (MEG). Denne metoden prøver å lokalisere ELA ved å estimere medianen, midt i mellom fronten og toppen, til isbreen (Benn & Evans, 2010; Nesje, 1992). En annen metode blir kaldt for balanseforhold (BR), som sier noe om både høydeforskjeller (også kjent som hypsometri) til isbreen og formen på massebalansekurven. Denne metoden baserer seg på at isbreer i likevekt vil ha et akkumulasjonsområde som er i balanse med ablasjonsområdet, og at denne balansen er kjent og lineær (Benn & Evans, 2010; Benn & Lehmkuhl, 2000). Videre er det en metode som prøver å estimere ELA ved å se på høydeforholdet mellom den høyeste toppen (fjellet) bak, og endemorenen framfor breen (TSAM) (Benn & Lehmkuhl, 2000). En fjerde metode ser på høydeforholdet mellom det laveste og høyeste punktet på en isbre (THAR). Denne metoden er lik MEG-metoden til en viss grad, ved at man antar at ELA ligger ved en gitt avstand mellom det laveste og det høyeste punktet på en isbre. Dette forholdet vil ikke nødvendigvis være på 0,5 slik som MEG-metoden, men har blitt estimert til å være mellom 0,35-0,5 og 0,6-0,8, for henholdsvis sedimentfrie og sedimentdekte isbreer

(Benn & Evans, 2010; Benn & Lehmkuhl, 2000; Nesje, 1992). Den femte metoden heter akkumulasjonsområdeforhold (AAR), og vil i det neste avsnittet bli forklart nærmere.

4.2.1 Akkumulasjonsområdeforhold (AAR)

AAR-metoden baserer seg på at under steady-state forhold vil akkumulasjonsområdet dekke en bestemt størrelse av den totale utstrekningen av isbreen. Kunnskap om gradienten til massebalansen er ikke nødvendig, bare hvilket klimatisk regime og hvilken type isbre det er snakk om. Det er imidlertid nødvendig med gode høydekurvekart over området der isbreen en gang lå, eller fortsatt ligger (Benn & Lehmkuhl, 2000). For mellom- og høytliggende isbreer vil akkumulasjonsforholdet ligge en plass mellom 0,5-0,8, vanligvis mellom 0,55-0,65 (Benn & Lehmkuhl, 2000; Nesje, 1992). Hvis man for eksempel antar at forholdet til akkumulasjonsområdet er på 0,6 (60 %), kan man sette ELA der 60 % av det totale området ligger ovenfor. Isbreer med skittent ablasjonsområde, med stein og andre sedimenter, vil derimot ha en lavere AAR (0,2-0,4), fordi dette er med på å øke den totale størrelsen til ablasjonsområdet (Benn & Evans, 2010). I høye fjellområder kan det være store forskjeller i AAR mellom isbreer som ligger i samme region, på grunn av ulikheter med tanke på et sedimentdekt ablasjonsområde og snøtilgangen, snøfall og snøskred, i akkumulasjonsområdet. Breer med en negativ massebalanse vil vanligvis ha et forhold på under 0,5. Verdier mellom 0,5 og 0,8 representerer en isbre rundt steady-state, mens et akkumulasjonsforhold på over 0,8 viser til en isbre med positiv massebalanse (Benn & Evans, 2010)

4.3 Valg av metode og praktisk gjennomføring

Torsnes, et al. (1993) fant ut at akkumulasjonsområdeforhold (AAR) med en verdi på 0,6 var den beste metoden for å beregne LIA ELA etter en studie på 20 breer i vestlige Jotunheimen. De hevdet også at feilmarginen ved bruk av denne metoden vil trolig ligge rundt $\pm 0,05$, ettersom de undersøkte forskjellen mellom deres utregnede likevektslinjer, og likevektslinjer som var blitt bestemt etter massebalansemålinger på fire av breene (Torsnes, et al., 1993). På bakgrunn av konklusjonene i denne studien, blir AAR-metoden med en verdi på 0,6 valgt i denne avhandlingen for å finne likevektslinjene.

Målingene av arealet til de aktuelle breene blir gjennomført ved bruk av flybildene og måleredskapene til nettjenesten norgebilder. For å finne dagens posisjon av likevektslinjen blir en estimering av det totale arealet først målt, før det blir regnet seg fram til 60 % av denne verdien. Deretter blir det prøvd å måle seg fram til 60 % av arealet, som gjerne kan ta flere

forsøk før en mest mulig nøyaktig måling blir oppnådd. For å gjøre det enkelt under denne målingen blir det tatt utgangspunkt i at likevektslinjen går på tvers over breen.

Siden det også er ønskelig å finne hvor likevektslinjene var under LIA, vil det følgelig også være nødvendig å finne endemorener som representerer dette. Alle breene har imidlertid ikke tydelige endemorener, noe som vil kunne føre til en subjektiv tolkning av plasseringen til disse. Ved flere av breene ble det med det første ikke observert noen morener som kunne representere posisjonen til breen under denne kalde perioden. Men ved nærmere observasjon, både ved å lese terrenget og videre hvilken retning breen må ha gått, i tillegg til å zoome seg inn og ut i romlig skala, ble det funnet konturer av noen av morenene som blir tolket til å være fra LIA. Det ble også prøvd å tolke andre glacialgeomorfologiske landformer, for eksempel sidemorener, som kan si noe om tidligere utbredelse og posisjon til breene. Dette for å kunne få et helhetlig bilde som bidrar til å kunne måle seg fram til et mest mulig nøyaktig areal under LIA. Her vil det følgelig også være en andel subjektivitet i tolkningene som er gjort, og en del bestemmelser som er blitt tatt. Når det estimerte arealet fra LIA er målt blir AAR med en verdi på 0,6 anslått, og videre blir høyden over havet til likevektslinjen estimert ved å se på høydemodellen i norgei3d på tvers over breen ved denne plasseringen. Deretter blir morenene som blir tolket til å være fra LIA, samt de anslåtte likevektslinjene og den aktuelle laterale avsetningen, tegnet inn på flybildene ved bruk av et tegneprogram. For å anslå skråningsgradienten til fjellveggene rundt breene, vil lengden og høyden til disse veggene bli målt flere plasser, før en enkel hypotenusregning vil føre til en gjennomsnittlig gradient.

4.4 Metodekritikk

4.4.1 Plasseringen av ELA

Likevektslinjene som ble utregnet og inntegnet i punkt 5 er veldig generaliserende, siden en likevektslinje vanligvis ikke vil forekomme på tvers på isbreen over samme høydekurve, men vil kunne ha lokale forskjeller på bakgrunn av ulik akkumulasjon og ablasjon. Bruk av en AAR-verdi på 0,6 er også kritikkverdig. Denne metoden baserer seg på ratio mellom akkumulasjon og ablasjon i en steady-state tilstand, men på grunn av tegn på tilbaketrening av breene de siste årene, tyder det på at ingen av disse breene er i nærheten av denne teoretiske tilstanden.

Gråsubreen hadde i 2009 en estimert AAR på kun 0,07 (7 %), noe som plasserer ELA ved 2235 meter over havet (Kjøllmoen, et al., 2010). Dette er et godt eksempel på hvor kritikkverdig det er å bruke AAR-metoden, men det bør presiseres at man ville ha utregnet en

gal plassering av likevektslinjen på Gråsubreen uansett hvilken av metodene man hadde brukt. Det er derimot ikke sikkert at AAR-metoden er like dårlig til å beregne plasseringen av Gråsubreens ELA under LIA, men det er allikevel nødvendig å ha i tankene feilmarginene ved å bruke denne metoden.

Flere av de valgte breene i Jotunheimen er nordvendt, eller delvis nordvendt, noe som gjør at mengder av snøakkumulasjonen kan være vindbasert eller fraktet fra fjellveggene rundt, som videre vil gi en TPW-ELA. I tillegg ligger Sydbreen rett nedenfor en stor iskappe som bidrar med materialet. Det påstås ikke at dette materialet er avgjørende for opprettholdelsen av breene, men at det kan påvirke plasseringen til ELA, eller bidra til at små kolonier ovenfor likevektslinjen har en positiv massebalanse, noe metoden i denne avhandlingen ikke har tatt hensyn til. Plasseringen av ELA på de nordvendte, eller delvis nordvendte, breene i Jotunheimen, samt Sydbreen, i denne avhandlingen kan derfor være flere titalls meter lengre ned enn hva som ble utregnet i punkt 5.

4.4.2 Fjernanalyse og observasjon

Det å observere ved bruk av flybilder er ikke det samme som å være i felt og observere. Dette kom tydelig frem under feltarbeidet som ble gjort sommeren og høsten 2010. Med flybilder får man et veldig generaliserende blikk på hvordan områder ser ut, og man har ikke muligheten til å få et tydelig bilde på de minste romlige skalaene. Dette på grunn av dårlig bildeoppløsning og nøyaktigheten til høydemodellene som disse programmene bruker. Muligheten til å forandre den romlige skalaen er nyttig og bidrar til at en mer fullstendig forståelse av de aktuelle områdene er oppnåelig, men det har også sine begrensinger. Det hadde for eksempel vært særdeles interessant å kunne klare å observere hvorvidt materialet på de laterale avsetningene er runde eller kantete i formen, for å kunne fastslå hvilke prosesser som har forårsaket deres plassering. Dette kan også være vanskelig å bestemme i felt, men man hadde spart mye tid og penger hvis dette hadde vært oppnåelig ved bruk av et dataprogram. I tillegg trenger ikke flybildene som blir brukt nødvendigvis å være en reell representasjon av virkeligheten. Dårlig oppløsning kan for eksempel ekskludere viktig informasjon, noe som kan gjøre at det man observerer egentlig ikke er hva som faktisk forekommer i naturen. Det er derfor viktig at man har et kritisk blikk på det man observerer.

Målingene som blir framstilt under i kapittel 5 vil muligens heller ikke være korrekte, siden kartprogrammets høydemodeller vil basere seg på en lineær interpolasjon mellom målte høydekurver, noe som skaper unøyaktighet hvis man ønsker å finne høydeforskjeller på noen

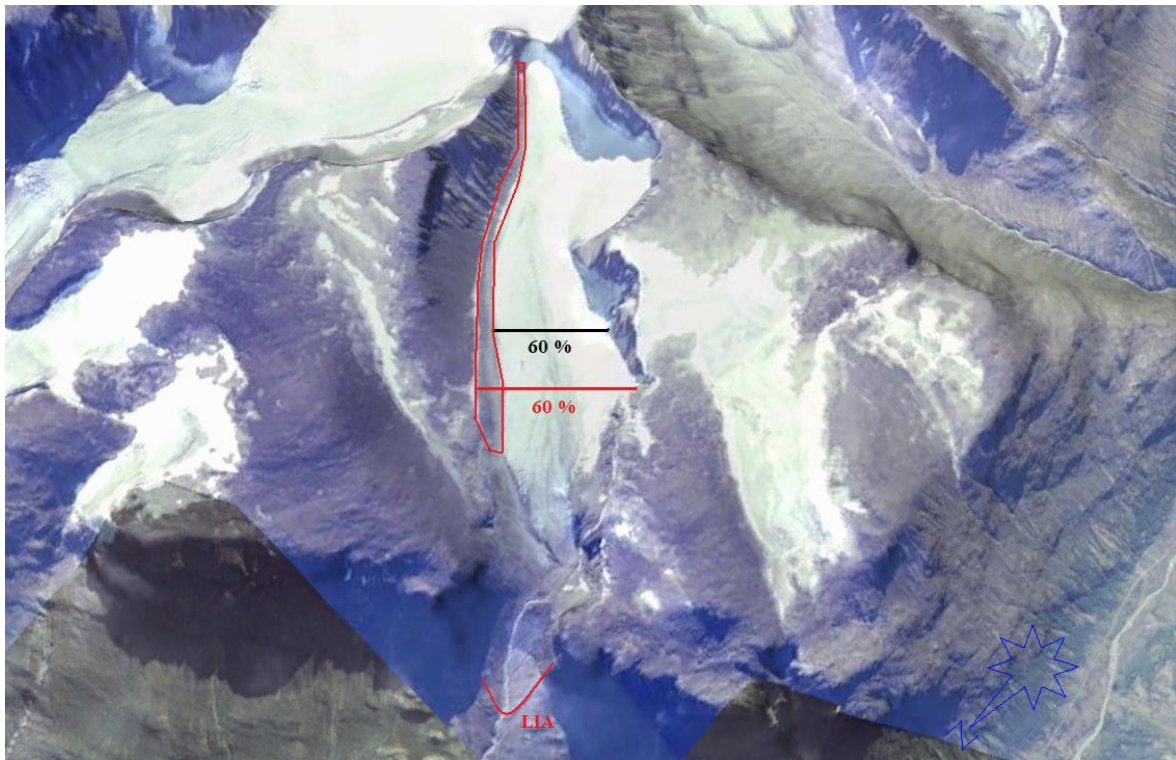
titalls meter (Aasård, personlig kommentar). En slik filosofisk tilnærming vil det alltid være under fjernanalyse og annen forskning, noe som er viktig å ha et perspektiv på under arbeidet. En konsekvent metodebruk er derfor nødvendig for å få de mest pålitelige og sammenlignbare dataene, noe som var tilfellet i denne avhandlingen.

5 Resultater

5.1 Teoretisk utregnede likevektslinjer og observasjon

Plasseringene av likevektslinjene er på bakgrunn av AAR-metoden som er blitt estimert etter å ha målt arealet av de ulike breene ved bruk av måleredskapene i norgebilder og norgei3d. Disse ble videre tegnet inn på flybildene. I det følgende vil resultatene til hver bre bli presentert hver for seg med flybilder, hvor verdiene fra dagens estimering vil bli representert med sorte streker. Endemorenene fra LIA og likevektslinjen under disse forholdene, samt den aktuelle laterale avsetningen, vil bli representert med en rød farge. I tillegg vil andre observasjoner ved bruk av flybildene, og derfor mulighetene til ulik romlig skala, bli presentert.

5.1.1 Heimre Illåbreen

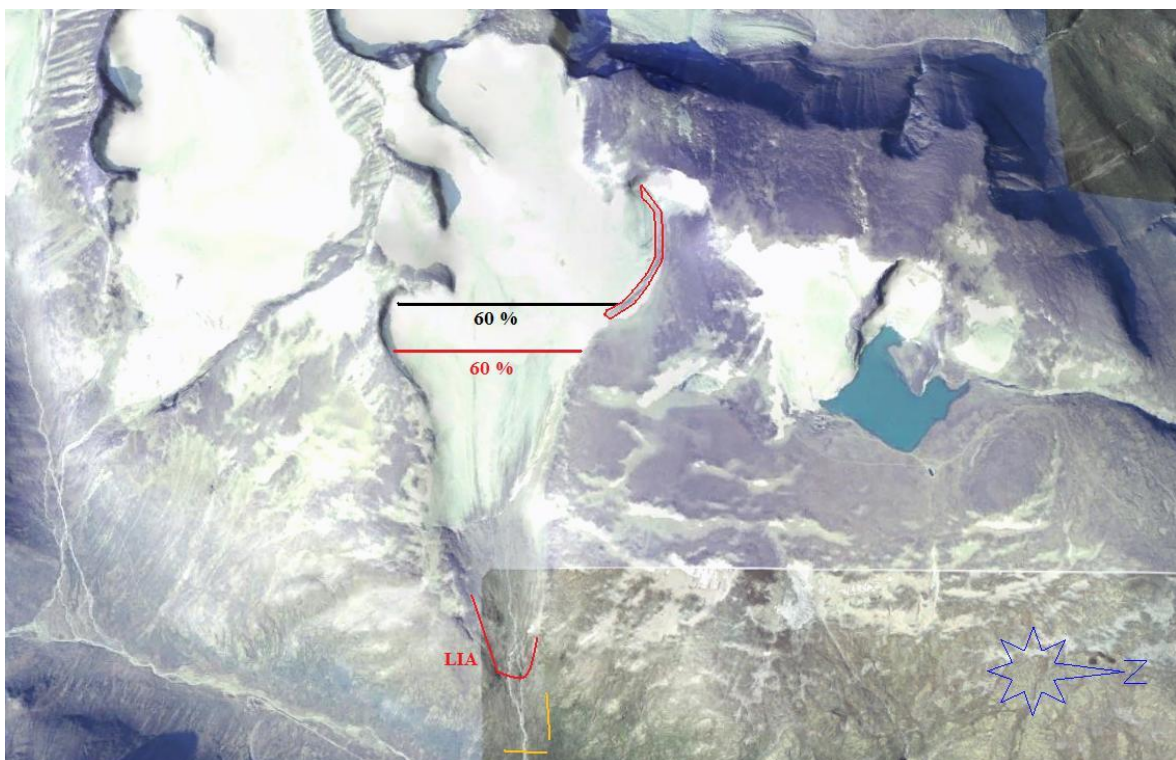


Figur 8: Flybilde over Heimre Illåbreen med dagens utregnede likevektlinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen (rød polygon) og endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker) (Norgei3d, 2011).

Den aktuelle laterale avsetningen til Heimre Illåbreen er lokalisert på nedsiden av fjellveggen i sørvestlig retning, på venstresiden av breen på bildet i figur 8 (markert med en rød farge rundt). Det observerte materialet skaper en asymmetrisk forekomst rundt breen, og strekker seg kontinuerlig nesten helt øverst opp langs siden av isbreen. Langs den øverste delen av

breen blir det observert hva som blir tolket til å være tydelig skredmateriale nedover fjellsiden. Store steiner blir observert nesten overalt nedenfor fjellveggen, som blir utregnet til å ha en skråningsgradient på ca 37° . Endemorenen fra LIA (den nederste av de røde strekene i figur 8) blir tolket til å være lokalisert ca 1 km lenger ned enn dagens posisjon. Arealet under denne perioden blir målt til å være ca 2 km^2 , noe som plasserer ELA med en AAR-verdi på 0,6 ved ca 1770 meter over havet (rød linje figur 8). Dagens teoretiske utregnede posisjon på likevektslinjen blir representert ved en sort strek i figur 8, og som man kan lese ut fra tabell 2 har derfor likevektslinjen hevet seg med ca 30 høydemeter over havet siden LIA.

5.1.2 Styggebreen

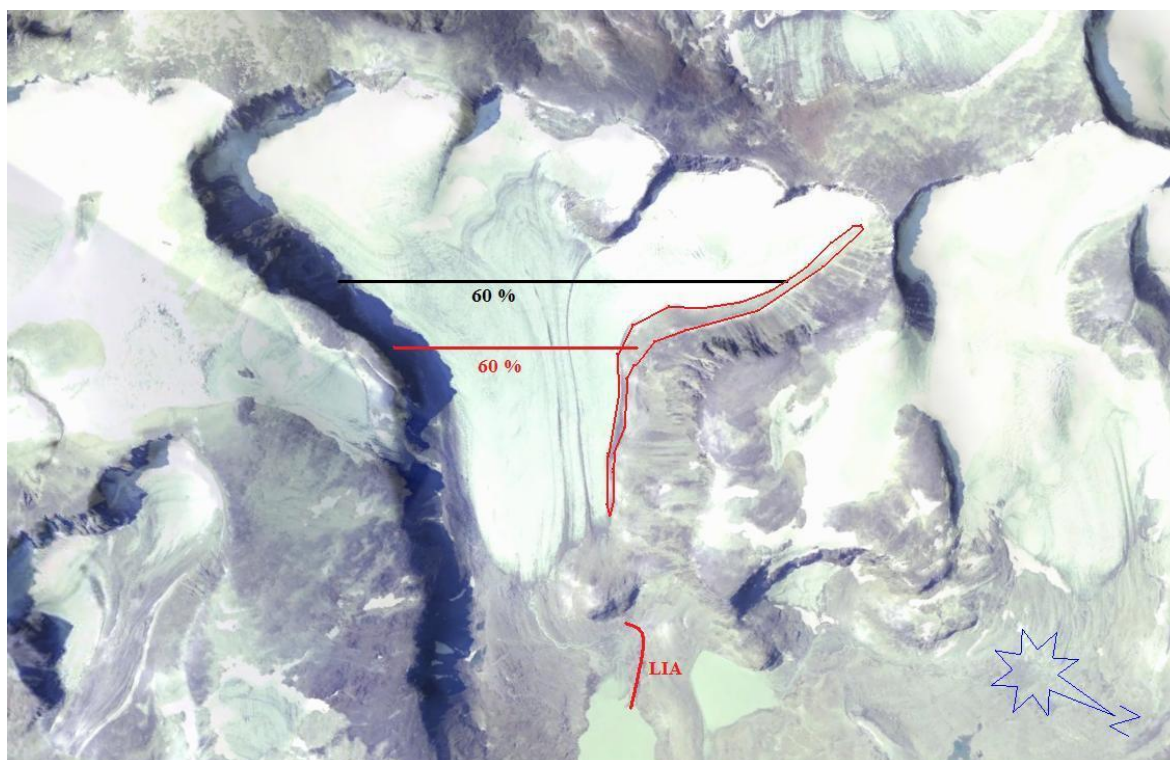


Figur 9: Flybilde over Styggebreen med dagens utregnede likevektlinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, den aktuelle laterale avsetningen (rød polygon), endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker), samt konturer av side- og endemorener (oransje streker) (Norgei3d, 2011).

Figur 9 viser den laterale avsetningen på Styggebreen markert med en rød polygon. Denne avsetningen forekommer nedenfor en sørvendt bakke som har en gradient på ca 17° (tabell 2), men det blir ikke observert tydelig skredmateriale ned denne skråningen. Avsetningen er til dels kontinuerlig og skaper en asymmetrisk forekomst langs sidene av breen. Endemorener fra LIA (rød strek i figur 9) blir tolket ca 1,2 km lengre ned enn dagens posisjon, i tillegg blir det observert konturer til det som blir tolket til å kunne være en sidemorene og endemorene enda lengre ned (oransje streker i figur 9), men den mest konservative plasseringen blir valgt i

denne fremstillingen. Arealet under LIA blir målt til å være ca 5,6 km², noe som plasserer ELA fra denne perioden, ved å anslå at breen består av 60 % akkumulasjonsområde, til å være lokalisert ca 1905 meter over havet (rød strek i figur 9). Videre blir dagens likevektslinje estimert til å være plassert ved ca 1970 meter over havet, som blir representert ved en sort strek i figur 9.

5.1.3 Blåbreen

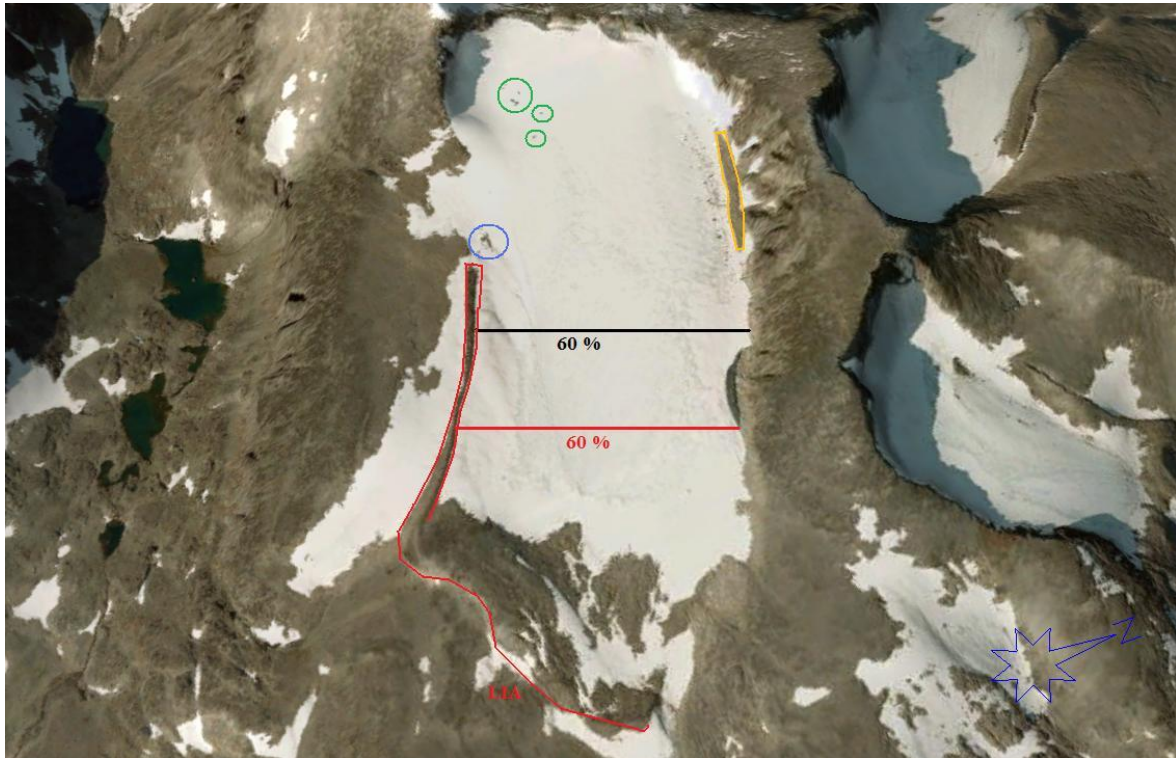


Figur 10: Flybilde over Blåbreen i østlige Jotunheimen med dagens utregnede likevektslinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen (rød polygon) og endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker) (Norgei3d, 2011).

Den utregnede posisjonen til dagens likevektslinje med en AAR-verdi på 0,6 blir fremstilt i figur 10 med en sort strek. Den laterale avsetningen ved denne breen forekommer nesten kontinuerlig opp langs hele breen, nedenfor en sørvendt fjellside med en skråningsgradient på ca 37°. Her blir det observert noe som blir tolket til å være skredmateriale. Det blir til dels også observert en lateral avsetning langs kanten på den andre siden av breen, men på grunn av dårlig lysforhold på flybildene kan det ikke bli dratt noen konklusjoner. Endemorener som blir tolket til å være fra LIA blir observert ca 1000 meter framfor dagens brefront, noe som gir et estimert areal fra denne tiden til å være på ca 4,4 km². Dette gir videre en plassering av ELA ved ca 1770 meter over havet, noe som er ca 20 høydemeter lavere enn hva som er utregnet fra dagens posisjon. Dette blir representert ved en rød strek i figur 10. Det blir også

observert en landform framfor dagens brefront som blir tolket til å være flutings, i området som nå er kommet fram i dagen etter at breen har trukket seg tilbake.

5.1.4 Steinflybreen



Figur 11: Flybilde over Steinflybreen med dagens utregnede likevektlinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen, endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker). I tillegg til skredmateriale fra fjellveggen på nordsiden av breen (oransje polygon) og supraglasialt materiale nært fjellveggen i bakkant (grønne sirkler) og nært den laterale avsetningen (blå sirkel) (Norgei3d, 2011).

Figur 11 viser flybilde av Steinflybreen, med en inntegnet sort strek som representerer estimert plassering av dagens likevektslinje med en AAR-verdi på 0,6. Endemorener som blir tolket til å være fra LIA blir observert noen hundre meter framfor dagens brefront, noe som plasserer datidens likevektslinje med en AAR-verdi på 0,6 noen hundre meter bak dagens brefront, ved ca 1970 meter over havet. Den laterale avsetningen er kontinuerlig og skaper en within-valley asymmetri, og har i motsetning til hva man finner ved mange av de andre aktuelle breene ikke en bratt fjellside opp langs siden av seg, men heller et stykke bak, og kan være en del av morenesystem fra LIA (markert med rød farge i figur 11). Avsetningen forekommer også ved denne breen ovenfor de estimerte likevektslinjene både med tanke på dagens posisjon, og fra LIA. På nordsiden av breen, nedenfor en sørvendt fjellside med en skråningsgradient på ca 44°, blir det observert noe som kan ligne på en sidemorene (markert

med en oransje farge i figur 11). Figur 8 viser denne forekomsten på en mye mindre romlig skala, og blir tolket dit hen som å være bestående hovedsakelig av skredmateriale. Det største materialet blir observert lengst utpå isen, noe som er et godt eksempel på den romlige materialfordelingen man kan forvente seg etter et skred. I tillegg blir det observert annet supraglasialt materiale nesten helt bak på breen (grønne sirkler figur 11), samt noe materiale nærmere den laterale avsetningen (blå sirkel i figur 11), noe som kan tyde på en grad av skredaktivitet også fra fjellveggen bak breen. Denne nordvendte fjellveggen blir, som man kan lese ut av tabell 2, målt til å ha en skråningsgradient på ca 50°.

5.1.5 Kvassryggbreen

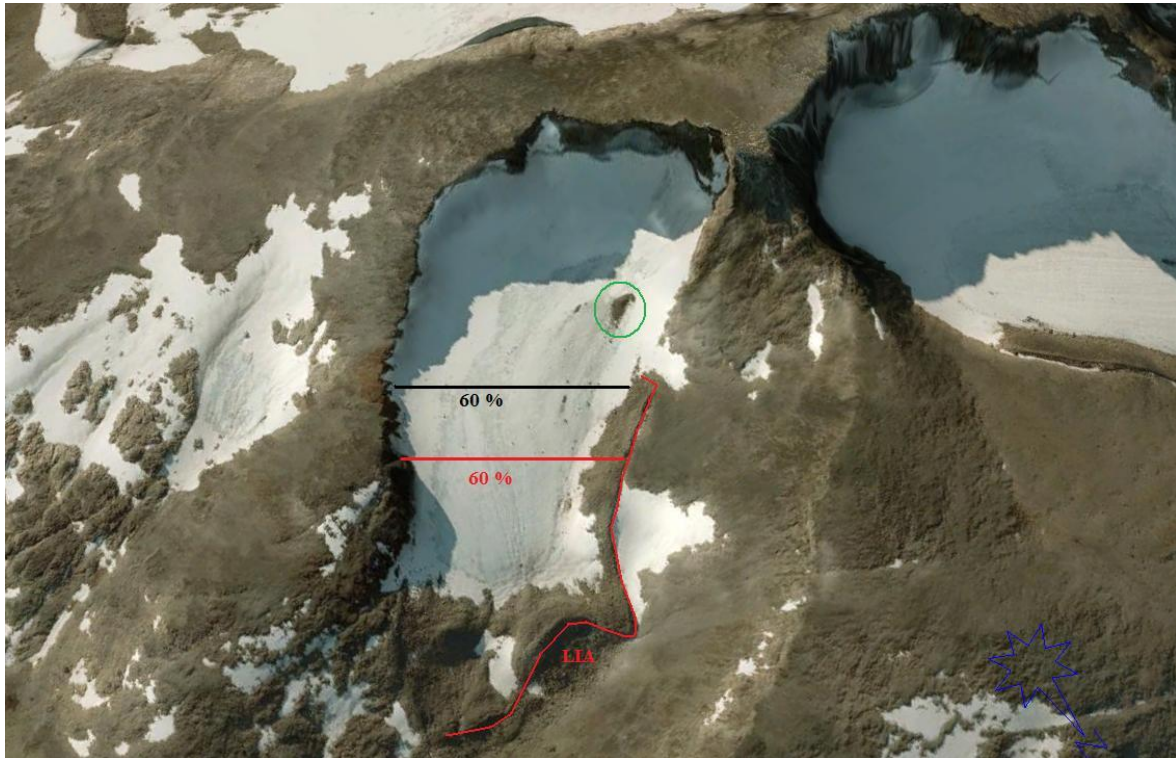


Figur 12: Flybilde over Kvassryggbreen med dagens utregnete likevektlinje med AAR-verdiene 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen, endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker) (Norgei3d, 2011).

Et flybilde over Kvassryggbreen blir i figur 12 framstilt med utregninger og observasjoner. Endemorener fra LIA blir observert ca 500 meter framfor dagens brefront, noe som plasserer ELA (AAR=0,6) under denne perioden et stykke over dagens brefront, ved ca 1880 meter over havet. Som man kan lese ut fra tabell 2 blir det utregnet at likevektslinjen med en AAR-verdi på 0,6 teoretisk har steget med ca 40 høydemeter siden LIA og fram til i dag. En lateral avsetning går kontinuerlig opp langs venstresiden av breen, og det ser ut som om den er en del av morenesystemet fra LIA. Alt dette blir i figur 12 representert med røde streker. Også her

skaper avsetningen en within-valley asymmetri, og den har i likhet med Steinflybreen ikke en bratt fjellvegg opp langs siden. Dagens ELA-posisjon har blitt estimert med en AAR-verdi 0,6 og tegnet inn på bildet i figur 12 med en sort strek. Bak breen er det en bratt nordvendt fjellvegg, som i norgei3d har blitt målt til å ha en skråningsgradient på gjennomsnittlig 55°.

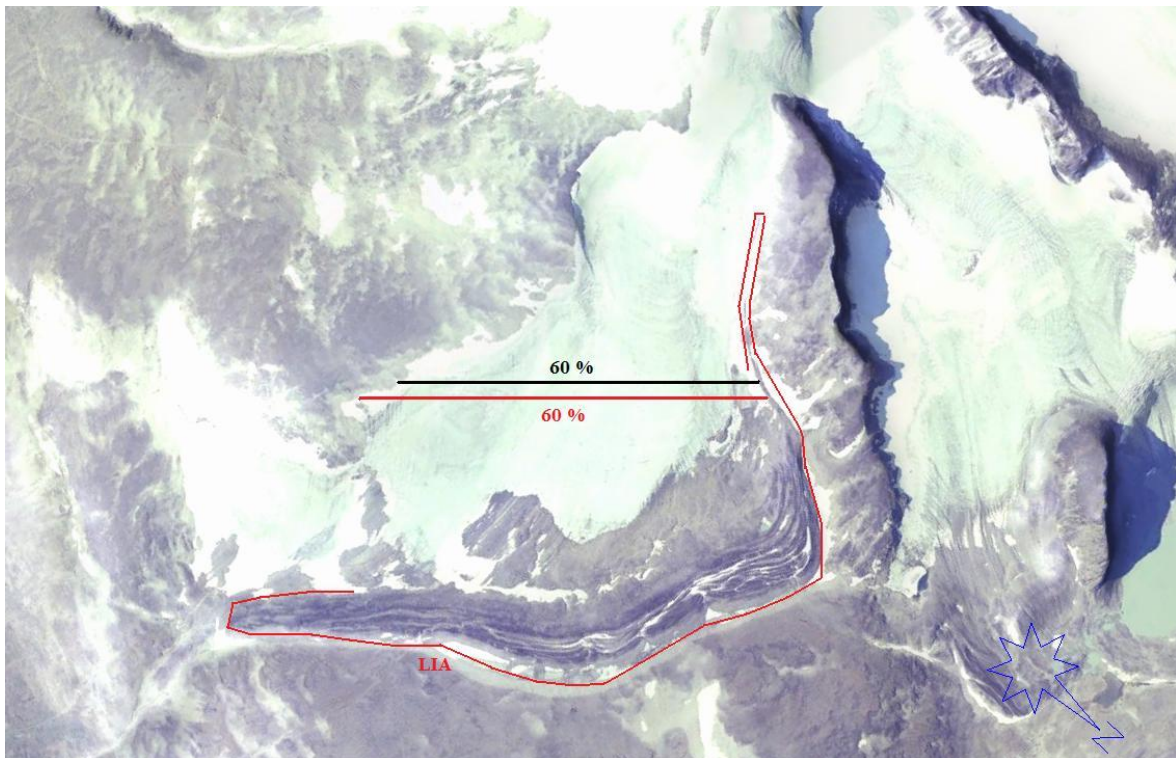
5.1.6 Bukkehåmmårbreen



Figur 13: Flybilde over Bukkehåmmårbreen med dagens utregnede likevektlinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen, endemorener fra LIA, ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker) og observert supraglasialt materiale (grønn sirkel) (Norgei3d, 2011).

Bukkehåmmårbreen blir i figur 13 framstilt med røde streker som representerer endemorener fra LIA, den aktuelle laterale avsetningen og likevektslinjen under LIA med en AAR-verdi på 0,6. I tillegg til sorte streker som viser den mulige plasseringen av dagens ELA med AAR-verdien 0,6. Som man kan lese ut av tabell 1 og 2 har denne breen i dag et areal på ca 0,37km², i motsetning til ca 0,49km² under LIA. Dette gir en høydeforskjell i ELA fra LIA og fram til i dag på ca 20 meter over havet. Også ved denne breen går den laterale avsetningen kontinuerlig opp langs siden og skaper asymmetri i forhold til den andre siden av breen, og ser ut til å kunne være en del av morenesystemet fra LIA. Bak breen er det en nordøstvendt fjellvegg, med en gjennomsnittlig skråningsgradient på ca 49°, og man kan se supraglasialt materiale (grønn sirkel figur 13) som kan være skred fra denne veggen.

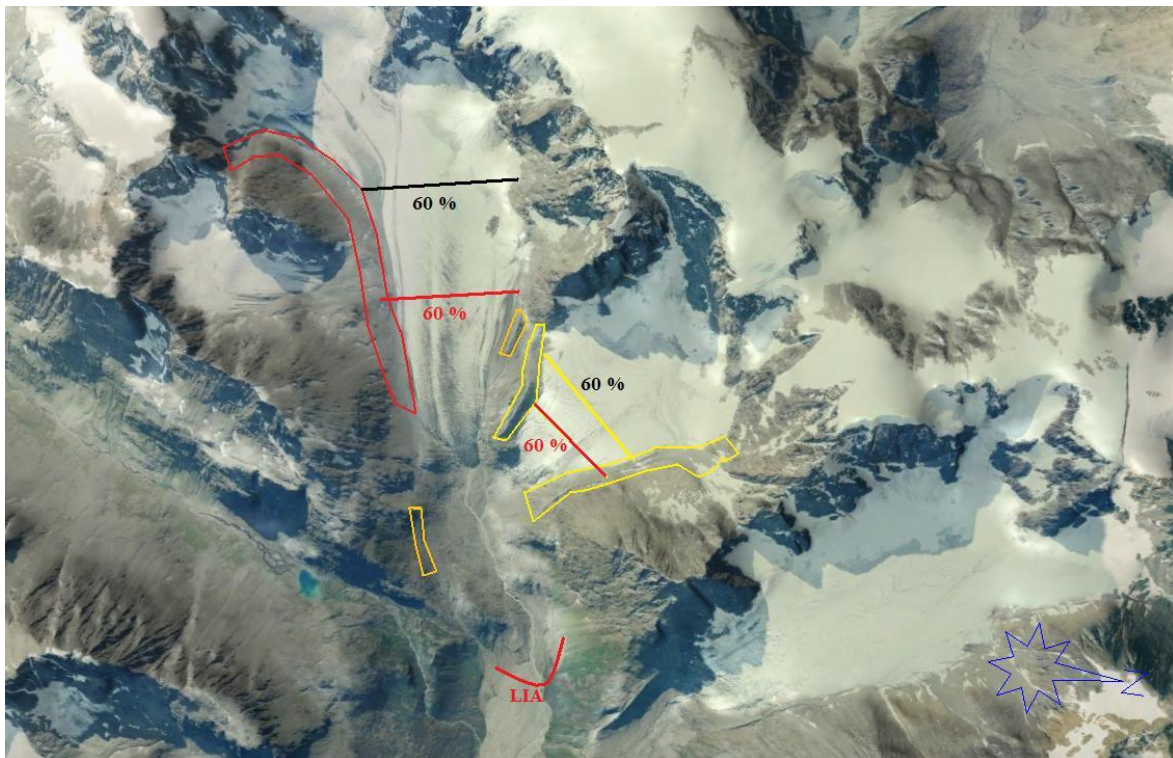
5.1.7 Gråsubreen



Figur 14: Flybilde over Gråsubreen med dagens utregnede likevektlinje med AAR-verdien 0,6 representert med en sort strek, samt den aktuelle laterale avsetningen, endemorener fra LIA og ELA fra denne perioden med en AAR-verdi på 0,6 (røde streker) (Norgei3d, 2011).

Dagens posisjon av likevektslinjen til Gråsubreen har blitt estimert med AAR-verdien 0,6 og alle presentert med en sort strek i figur 14. Den aktuelle laterale avsetningen forekommer til dels sporadisk opp langs den nordvestlige siden av breen og den ser også her ut til å være en del av morenene som blir tolket til å være fra LIA. Disse morenene er hovedsakelig iskjernemorener (tolket på grunn av observasjon i felt), som strekker seg langt nedover (markert inn i rødt i figur 14). Som man kan se ut fra animasjonene i figur 15 forekommer den laterale avsetningen ovenfor alle de teoretisk plasserte likevektslinjene. Areal ble av Norges vassdrags- og energidirektorat i 2009 målt til å være $2,1 \text{ km}^2$ (Kjøllmoen, et al., 2010) (tabell 1), mens under LIA blir arealet ved bruk av norgebilder målt til å ha vært ca $3,2 \text{ km}^2$ (tabell 2). Dette gir en tilbaketrekning av ELA på ca 20 meter, som blir presentert i figur 14 med en sort og en rød strek som representerer posisjonen henholdsvis i dag og under LIA. I motsetning til alle de andre aktuelle breene forekommer det ikke en stor fjellvegg over eller rundt den laterale avsetningen. Opp langs siden av avsetningen forekommer det kun en skråningsgradient på gjennomsnittlig ca 8° .

5.1.8 Sydbreen og Midtbreen



Figur 15: Flybilde over Sydbreen og Midtbreen, hvor dagens likevektslinje er blitt beregnet (med AAR-verdiene 0,6) og blir representert med henholdsvis en sort og en gul strek. Endemorener blir observert (den nederste av de røde strekene) og tolket dit hen at disse er avsatt under den Lille istiden (LIA), hvor likevektslinjene fra denne posisjonen blir representert med de to resterende røde strekene (AAR = 60 %). Den laterale avsetningen ved Sydbreen er marker inn som en rød polygon, mens på den andre siden av breen blir det observert en annen lateral avsetning (oransje polygon). I tillegg blir en annen sidemorene observert framfor dagens breffront, og blir representert ved en oransje polygon. De gule polygonene representerer en midtmorene (øverste) og lateral avsetning (nederste) ved Midtbreen (Norgei3d, 2011).

Den ene aktuelle laterale avsetningen ved Sydbreen blir observert på sørsiden av breen (venstresiden på bildet i figur 15). Avsetningen er lokalisert nedfor bratte fjellsider med en estimert skråningsgradient på 38° , i tillegg til at endemorenen fra Flutes glacier kan bidra med materiale. Det er også mulig å observere det som blir tolket til å være supraglasialt materiale, som ved å se på flytlinjene blir tolket som å være skredmateriale fra fjellsiden bak breen. Disse flytlinjene viser ikke tegn på å gå ut til siden under streken med 60 %, hvis dette representerer dagens likevektslinje. Man kan i tillegg observere en sidemorene nedenfor dagens breffront, representert med en oransje polygon i figur 15.

Endemorener som blir tolket til å være avsatt under LIA blir observert ca 2,2 km nedenfor dagens breffront. Under LIA tyder det på at Sydbreen og Midtbreen, som er lokalisert på høyresiden på bildet i figur 15, ble slått i lag, og deler samme endemorene. En stor

midtmorene (den øverste av de gule polygonene i figur 15) mellom dem gir inntrykk av dette. Likevektslinjen fra denne utbredelsen blir beregnet, med en AAR-verdi på 0,6, til å være et stykke ovenfor dagens brefront ved begge breene (representert med røde strek), ved ca 670 meter over havet. Den oransje sirkelen i figur 15 representerer en annen lateral avsetning, som forekommer på nedsiden av midtmorenen, men også nedenfor en ca 1000 meter høy sørvendt fjellvegg som har en målt skråningsgradient på ca 48°. Denne avsetningen er lokalisert mellom de to estimerte likevektslinjene med en AAR-verdi på 0,6.

Den nederste av de to gule polygonene i figur 15 viser en interessant lateral avsetning til Midtbreen, som er lokalisert nedenfor en sørvestvendt fjellvegg med en skråningsgradient på ca 35°. Under LIA er det utregnet at ELA var plassert ved ca 450 meter over havet med en AAR-verdi på 0,6 (gul strek figur 15). Som tabell 2 viser, er dette 100 høydemeter lengre ned enn hva tilfellet er ved dagens posisjon med samme AAR-verdi.

Tabell 2 viser resultatene til de aktuelle breene med: (1) dagens lengde, (2) dagens ELA med AAR-verdien 0,6, (3) lengden på breen under LIA, (4), arealet til breen under LIA, (5) plasseringen av ELA under denne maksimale utstrekningen med en AAR-verdi på 0,6, (6) estimert skråningsgradient av fjellveggene rundt de aktuelle avsetningene, samt (7) hvilken AAR breene måtte ha hatt for at disse avsetningene skulle ha blitt avsatt under likevektslinjen.

Tabell 2: Tabell over de aktuelle breene med dagens estimerte ELA, lengden og ELA under LIA, skråningsgradienten til fjellveggen langs siden eller bakenfor, samt ELA og AAR under LIA for at den laterale avsetningen skal forekomme nedenfor likevektslinjen.

	Navn	Dagens ELA (m.o.h.) AAR-verdi 0,6	Lengde LIA (m)	Areal LIA (km ²)	LIA ELA (m.o.h.) AAR-verdi 0,6	Skråningsgradient (°) tan ⁻¹ (høyde/lengde)	ELA og AAR under LIA for at den laterale avsetningen skal forekomme nedenfor likevektslinjen
Jotunheimen	Heimre Illåbreen	1780	4070	2,3	1750	37	2060 m.o.h. AAR = 0.1
	Styggebreen	1970	4930	5,6	1905	17	2130 m.o.h. AAR = 0.23
	Blåbreen	1790	3640	4,4	1770	37	1800 m.o.h. AAR = 0.29
	Steinflvbreen	2000	2120	1,8	1970	Nvendt= 50/Svendt= 44	2020 m.o.h. . AAR = 0.38
	Kvassryggbreen	1920	2000	0,88	1880	55	1960 m.o.h. AAR = 0.22
	Bukkehåmmårbreen	1920	1110	0,49	1900	49	1930 m.o.h. AAR = 0.44
	Gråsubreen	2080	2470	3,2	2060	8	2170 m.o.h. AAR = 0.13
	Lyngsalpene	Sydbreen	720	5620	5,8	670	Nvendt= 38/Svendt= 48
Midtbreen		760	3920	3,3	670	35	780 m.o.h. AAR = 0.31

6 Diskusjon

6.1 Definisjon av sidemorene i lys av det laterale materialet ved de aktuelle breene

Flytlinjene til breen går innover i akkumulasjonsområdet (Nesje, 1992; Sutherland, 1984), og siden store deler av de aktuelle laterale avsetningene i denne avhandlingen ville ha vært ovenfor likevektslinjen da de ble avsatt under LIA, ville sub-, en- eller supraglasialt materiale til breen ikke ha blitt fraktet ut til sidene hvor disse avsetningene er. De laterale avsetningene vil følgelig ikke representere flytlinjene til breen. Det vil kunne antas at det meste av materialet man finner vil bestå av steinskred eller steinsprang fra fjellveggen rundt eller ovenfor. Ved enkelte av lokalitetene kan med andre ord ikke materialet som forekommer ha blitt fraktet verken aktivt eller passivt av breen. Breen vil selvfølgelig ha påvirket materialet i den forstand at den lå under skredmaterialet der det stoppet opp, men den vil ikke nødvendigvis ha hatt en direkte innflytelse på materialet og hvor det er blitt avsatt.

Etter definisjonen til blant annet Humlum (1978) vil en sidemorene forekomme nedenfor ELA og bestå til dels av materiale fraktet sub-, en- eller supraglasialt, og er følgelig materiale som har blitt direkte påvirket av isbreen, men også av skredmateriale fra fjellveggen ovenfor. Skredmateriale fra fjellveggen rett ovenfor morenen i ablasjonsområdet, og skredmateriale fraktet nedenfor likevektslinjen fra akkumulasjonsområdet, var også bakgrunnen til Benn & Evans (1998) sine supraglasiale sidemorener. Disse definisjonene hevder med andre ord at sidemorener bare vil forekomme nedenfor likevektslinjen som en konsekvens av breens flytlinjer. På bakgrunn av at det laterale materialet ved breene presentert i kapittel 5 tyder på å forekomme ovenfor ELA, noe som ikke er i samsvar med disse definisjonene, kan de ikke defineres som sidemorener.

Selv om landformene som blir studert i denne studien har en plassering og form som er lik sidemorener, er ikke prosessene som har skapt dem de samme, siden det tyder på at de forekommer ovenfor ELA. Innenfor vitenskapen er en vanlig metode å arbeide med flere hypoteser som prøver å forklare samme fenomen, men etter kritisk testing stå igjen med den hypotesen som forklarer mest. I geomorfologi kan det derimot forekomme landformer som har samme morfologi, men med forskjellig genese (Haines-Young & Petch, 1983), som for eksempel steinbreer som har forårsaket en lang debatt (Berthling, In press) At ulike prosesser har endt opp med lignende landformer blir kalt for *equifinality* (Haines-Young & Petch, 1983; Rhoads & Thorn, 1996b). Muligheten til equifinality innen geomorfologi kan være på grunn

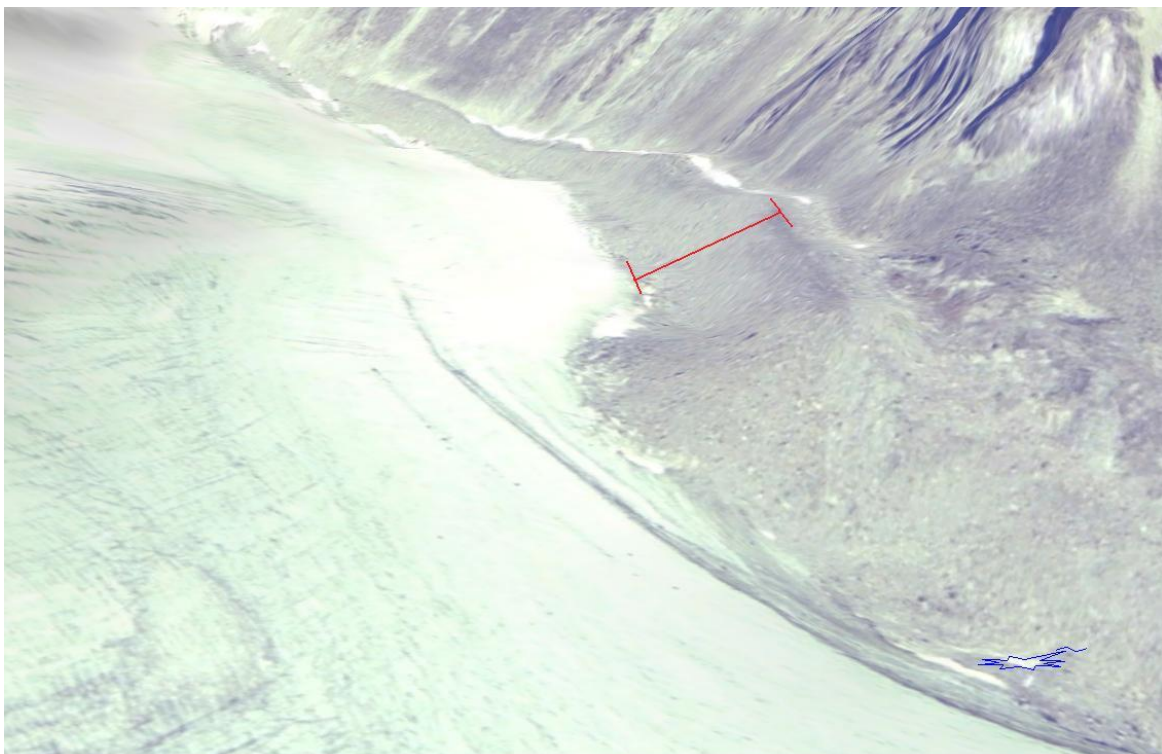
av vanskeligheten ved å studere landformer, både i en romlig og tidsmessig skala. Man kan følgelig ikke definere en landform bare på bakgrunn av morfologien, siden det kan finnes flere ulike prosesser hvor produktet er av samme form (Haines-Young & Petch, 1983; Rhoads & Thorn, 1996b).

Ved de aktuelle breene som ble presentert i kapittel 5 kan det deles inn i tre ulike typer av disse landformene: Breer med en bratt fjellvegg opp langs siden - Heimre Illåbreen, Blåbreen, Sydbreen og Midtbreen – breer som har en bratt fjellvegg i bakkant – Steinflybreen, Bukkehåmmårbreen og Kvassryggbreen – og Styggebreen, og til dels Gråsubreen, som ikke har noen av delene. I kapittel 6.2 foreslås det flere ulike prosesser som har skapt disse, noe som gjør at man kan få en equifinality i defineringen også her. Det laterale materialet ved Styggebreen forekommer langt over de estimerte likevektslinjene, men det er ingen fjellvegg rundt som kan bidra med materiale direkte, bare en bakke med en målt gjennomsnittlig skråningsgradient på 17°. Det tyder derfor på at det er isen som har fraktet og avsatt materialet ved denne lokaliteten, noe som eventuelt må bety at estimeringene av ELA ved denne breen er feil, eller at det er andre egenskaper eller faktorer til isen som har stått bak denne avsetningen. Dette betyr at man derfor kanskje kan definere den laterale avsetningen ved denne breen som en sidemorene, men det avhenger følgelig at dannelsen er på bakgrunn av flytlinjene til breen slik som definisjonene ovenfor hevder. Siden denne definisjonen ikke samsvarer med de andre laterale avsetningene, er det nødvendig at nye definisjoner som forklarer disse, som for eksempel lateralt forflyttet skredmateriale eller modifisert talus, blir laget.

6.2 Bruk av lateralt materiale ved de aktuelle breene for å estimere plasseringen av ELA med MELM-metoden

MELM-metoden er den eneste metoden for å estimere plasseringen av likevektslinjen som bare ser på glasiogeomorfologiske forekomster, mens andre metoder hovedsakelig ser på en forholdsverdi av glasiologiske og topografiske faktorer (Benn & Evans, 2010; Benn & Lehmkuhl, 2000; Nesje, 1992). Denne metoden tar derimot ikke hensyn til forekomsten av annet lateralt materiale som kan forstyrre datagrunnlaget, hvor en klar avgrensning av en sidemorene ikke er til stede. I kapittel 5 ble det presentert lateralt materiale ved breer i østlige Jotunheimen og Lyngen. De laterale avsetningene kan derfor tilsynelatende bli tolket som sidemorener, men utstrekningen og forekomsten av dem er av en uvanlig karakter. Ved flere av de aktuelle breene blir avsetningene observert høyere i terrenget enn plasseringen breen har

i terrenget den dag i dag, noe som tyder på at disse må ha blitt avsatt en gang da breen sto så høyt i terrenget. Figur 16 visualiserer denne tankegangen. Ved å bruke måleredskapene i Norgei3d blir avstanden som streken i figur 16 representerer målt til å være en økning i ca 30 høydemeter. Hvis isen skal ha stått så høyt i terrenget må breen følgelig hatt et mye større volum enn hva man tilfellet er i dag, og mest sannsynlig vil også arealet vært større. Brefronten vil mest sannsynlig ha vært lokalisert ved endemorenene som er observert og tolket til å være fra LIA. Under denne perioden må likevektslinjen derfor også ha forflyttet seg nedover ettersom breen avanserte.



Figur 16: Flybilde fra Blåbreen hvor den røde streken viser hvor mye høyere breen en gang må ha stått (Norgei3d, 2011).

Siden det antas at de laterale avsetningene ved de aktuelle breene ble avsatt under LIA, ble det derfor i kapittel 5 estimert hvor plasseringen av likevektslinjen var da. Dette ved å ta utgangspunkt i at akkumulasjonsområdet til en bre i steady-state vil dekke ca 60 % av breens totale areal. Selv med en feilmargin i metoden på ca 20 %, vil alle de aktuelle laterale avsetningene fortsatt forekomme ovenfor ELA. Som presentert i tabell 2 må andelen bestående av akkumulasjonsområde for at det laterale materialet skal forekomme under likevektslinjen under LIA ha vært helt nede i 10 % ved Heimre Illåbreen, mens

Bukkehåmmårbreen hadde det største estimerte verdien på 44 %. Dette virker absolutt ikke som en reell plassering av likevektslinjen, siden det antas at breene ville ha hatt flere år med positiv massebalanse, som ville ha gitt et stort akkumulasjonsområde og følgelig forflyttet likevektslinjen nedover. Hvis man tar utgangspunkt i alt av laterale avsetninger som er tilgjengelig ved disse breene til bruk av MELM-metoden vil man med andre ord underestimere akkumulasjonsområdet i forhold til hva tilfellet muligens var, noe som skaper en meget gal representasjon av likevektslinjen.

6.3 Hvordan kan disse laterale avsetningene ha blitt dannet?

De laterale avsetningene kan ha blitt dannet på flere mulige måter. En mulighet er at under LIA ville breene ha hatt et større volum og stått følgelig høyere i terrenget, og studier har dokumentert en økt forekomst av steinskred under denne perioden (Blikra & Nemeč, 1998; McCarroll, et al., 2001). Hvis nok materiale blir akkumulert oppå isen, vil dette bidra til å beskytte og bevare isen som ligger under mens resten av isen trekker seg tilbake. Dette gjør at man kan få dannet iskjernemorener, som vil bevare isen under så lenge de klimatiske forholdene tillater det. Som en følge av en høy skråningsgradient i fjellveggen over, eller kanskje som følge av paraglacial justering (Ballantyne, 2002), vil skredforekomsten fortsatt være til stede etter at breen og iskjernemorenen har blitt koblet fra hverandre, noe som kan bidra til økt materiale og følgelig økt beskyttelse av isen under.



Figur 17: Bilde fra den laterale avsetningen nedenfor den nordvendte skråningen ved Sydbreen, hvor man kan observere tydelige kantete steiner i forgrunnen.

Det faktum at det ikke blir observert lav til bruk av metoden lichenometri framfor Blåbreen, og framfor og opp langs siden av Sydbreen, er data i seg selv. På vei hjemover etter å ha besøkt Sydbreen ble det først observert lav på en stein (på bildet i forgrunnen av figur 18), noen hundre meter framfor brefronten. Denne lavforekomsten ser man avbildet i figur 19, og er med andre ord ikke større en noen millimeter. Framfor flere av de andre breene som ble besøkt under feltturen sommeren 2010 ble det derimot funnet lavforekomster på det meste av morenemateriale. Etter turer til Storbreen og Veobreen i Jotunheimen, for eksempel, så man tydelig de største lavene lavest i terrenget, mens de ble mindre og mindre desto nærmere dagens brefront man kom. En mulig årsak til at det ikke ble observert lav på de laterale avsetningene ved Sydbreen er at dette kan være skredmateriale som ganske nylig har blitt avsatt, noe som gjør at kartlav enda ikke har klart å etablere seg. Dette tyder på et aktivt system hvor skråningsprosesser er et jevnlig fenomen. Tydelige kantete og lite modifiserte steiner i forgrunnen av bildet i figur 17 fra feltturen til Sydbreen gir inntrykk av dette. Mesteparten av dette materialet ligger dessuten oppå is, noe som kan danne lignende iskjernemorener som diskutert i avsnittet over. En annen mulighet som kan forklare årsaken

til at lav ikke blir observert er at de forholdene ikke er optimale for vekst, for eksempel ved at snø blir liggende lenge om sommeren, og forhindrer at det nødvendige sollyset kommer til.



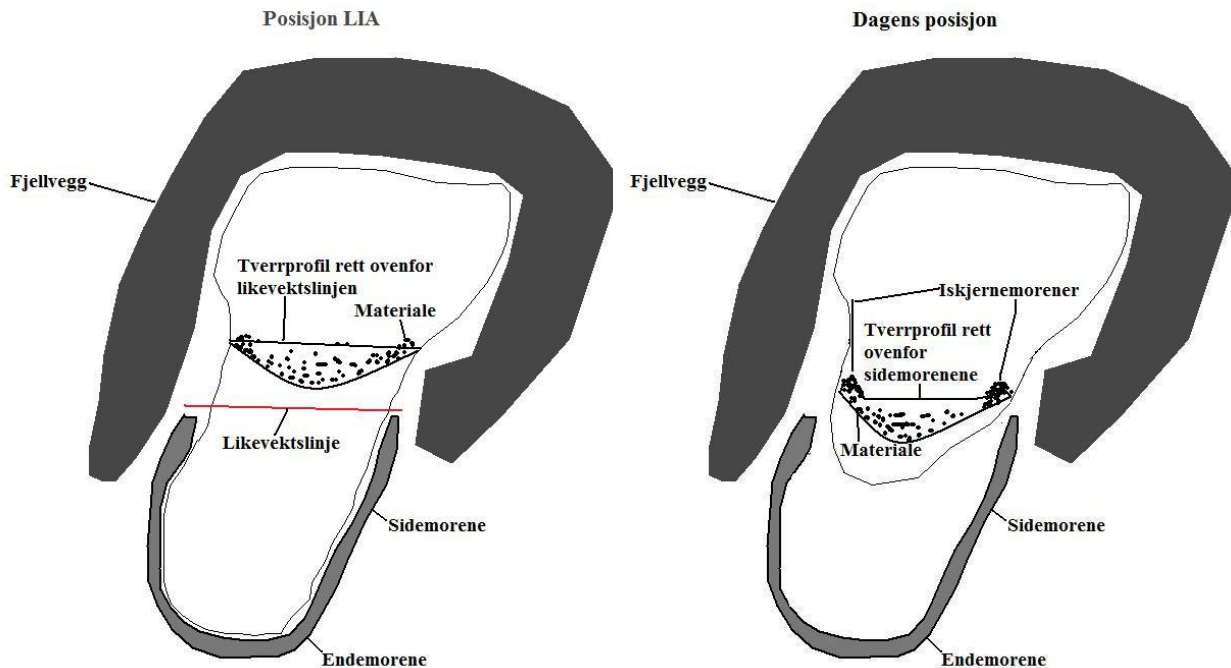
Figur 18: Fotografi fra feltturen til Sydbreen, hvor det nærmeste lavet til breen ble observert på den store steinen i forgrunnen.



Figur 19: Størrelsen på lavet i figur 22, med undertegnede finger som skala.

En annen mulighet for dannelse av slike iskjernemorener blir fremstilt i figur 20 og 21. Figur 20 viser en gitt bre under LIA, hvor breen har økt i masse og lengde og danner tydelige ende- og sidemorener. En fjellvegg i bakgrunnen og langs sidene vil bidra til materiale som blir fraktet supraglasialt, og vil kunne bli begravd og fraktet englasialt. Det kan med andre ord være mye materiale som ikke er fremme i dagen, men som blir fraktet nedover breen, slik det er vist i bildet av tverrprofilen i figur 20. Når isen trekker seg tilbake, som vist i figur 21, og minker i masse, blir materialet som tidligere har vært inni breen smeltet fram. Dette materialet kan ligge over og beskytte isen under, og vil bli avsatt videre ovenfor sidemorenen som har blitt dannet nedenfor likevektslinjen. På grunn av at dette er iskjernemorene, vil ikke materialet rase sammen, men heller forbli som en morenerygg som vist i figur 21. Disse iskjernemorenene kan derfor gi en illusjon av at sidemorenen faktisk har blitt avsatt lengre opp enn hva teorien rundt dette sier. Så lenge de klimatiske forholdene ligger til rette, og med potensialet til økt materiale, vil disse iskjernemorenene være til stede. Et av problemene med denne teorien er derimot hvorfor materialet i figur 21 plutselig stopper opp. Hvis det er skred fra fjellsiden over, vil det kunne antas at materiale vil kunne ende opp lengre og lengre utpå breen. Denne teorien passer derfor muligens best til å forklare de laterale avsetningene ved

Steinfløybreen, Bukkehåmmårbreen og Kvassryggbreen siden det ved disse breene ikke er en fjellvegg opp langs siden til å bidra med skred. De har heller en fjellvegg bak, som kan bidra med materialet isen frakter fram mot fronten av breen.



Figur 20: Illustrasjon over hvordan en gitt bre kan ha sett ut under LIA, med tydelige side- og endemorener, men også mye materialet inni breen ovenfor ELA, som vist i tverrprofilen, som følge av økt skredforekomst fra fjellveggene rundt under denne perioden.

Figur 21: Illustrasjon over en gitt bre ved dagens posisjon, hvor materialet som før var inni breen har blitt smeltet fram i dagen som iskjernemorener ovenfor ELA, som gir en illusjon på at sidemorenene strekker seg lengre opp enn det de gjør.

Figur 22 viser en del av den laterale avsetningen ved Heimre Illåbreen, som var en av breene Benn & Evans (1998) studerte til deres definisjon av supraglasiale sidemorener (Benn & Evans, 1998). Sirkelen i figuren viser hva som blir tolket som taluser. Talusene representerer skredmateriale fra fjellveggen ovenfor, noe som tyder på at dette området er mer aktiv enn hva tilfellet er videre til venstre på bildet. Hvis den laterale avsetningen er skapt av sporadisk steinskred og steinsprang, både i tidsmessige og romlig forstand, hvorfor er det da en jevn fordeling av materialet nedover? Skulle man ikke anta at det ville være områder med mye materiale, mens andre med lite? En mulig forklaring på dette kan være at det er nok tid mellom skredforekomstene til at skredmaterialet har blitt flyttet nedover med isen, noe som vil kunne gi en jevn fordeling. Dette vil derfor også tyde på at skredene forekommer

sporadisk, kanskje som en følge av klimatiske variasjoner. Et problem med denne forklaringen er derimot at området i figur 22 er ovenfor den estimerte likevektslinjen fra både dagens og LIAs posisjon. Hvis materialet har blitt fraktet supraglasielt, vil man derfor også kunne anta at, i hvert fall noe av det, burde ha fulgt flytlinjene innover på breen, og ikke bare blitt fraktet videre nedover. Det er derimot ikke mulig å gjøre gode nok observasjoner til å fastslå om hvorvidt materialet ligger over is som fortsatt er en del av breen, eller om det er iskjernemorener som er koblet fra breen. Dette vil muligens ikke ha vært tilfellet under LIA da dette materialet kan ha vært lokalisert oppå eller inni breen, for så å bli smeltet fram. Spørsmålet som nok en gang må bli stilt er hvorfor dette materialet ikke har fulgt flytlinjene til breen.



Figur 22: Flybilde over deler av den aktuelle laterale avsetningen ved Heimre Illåbreen, hvor sirkelen representerer taluser som tyder på en høyere skredaktivitet enn området videre til venstre på bildet (Norgei3d, 2011).

Kan enkelte av de observerte avsetningene egentlig være endemorener bestående av iskjernemorener? Dette kan i så fall kunne forklare hvorfor man finner en slik kontinuerlig avsetning, men det åpner også opp for nye spørsmål, blant annet hvorfor det skulle forekomme endemorener akkurat ved disse lokalitetene. Alle breene i østlige Jotunheimen forekommer ovenfor dagens regionale permafrostgrense som har en nedre grense ved ca 1400

meter over havet (Isaksen, et al., 2002). Man observerer allikevel landformer som blir tolket til å være flutings i forgrunnen av blant annet Blåbreen. Dette tyder på at breen som lå over dette området en gang må ha vært temperert. Dette støtter opp rundt tankegangen til dannelsen av endemorener bestående av iskjernemorener, ved at tilstedeværelsen til permafrost påvirker breen og bidrar til et polytermalt temperaturregime (Etzelmüller, et al., 2003; Etzelmüller, et al., 1996). Østrem (1964) karakteriserer alle endemorener i østlige Jotunheimen som iskjernemorener. I de vedlagte kartene i samme studie blir også flere av de aktuelle laterale avsetningene karakterisert som endemorener. Dette blir forsvart med at det var vanskelig å skille mellom laterale morener og endemorener. Flere av endemorenene som er blitt observert og tolket i denne studien er derimot ikke tegnet inn, noe som kan forklare hvorfor de laterale avsetningene ble tolket som endemorener. Etter observasjon ved bruk av Norgei3d tyder det på at topografien ikke er av en nedgående gradient mellom de laterale avsetningene og breen. Isens flytretning vil følgelig ikke følge gradienten, noe gjør at dannelse av endemorener i slike forhold virker urealistisk. Utregningen og inndelingen av akkumulasjons- og ablasjonsområdet som ble gjort i kapittel 5 må i så fall revideres kraftig for at forholdene skal være til rette.

6.4 Within-valley asymmetry

Ved flere av de mulige forklaringene som er diskutert i avsnittene over, er det mulighet for at de laterale forekomstene kan forekomme på begge sidene av breen. Dette er ikke tilfellet ved de aktuelle breene i denne avhandlingen. En viktig faktor som er med på å forklare denne forekomsten av within-valley asymmetry ved disse lokalitetene, er tilgangen på materiale. Det faktum at arealet på fjellveggen på den ene siden er større, for eksempel ved Heimre Illåbreen, gjør at det potensielle akkumulasjonsområdet av materiale er større. Bratte fjellvegger, med en skråningsgradient målt til å være mellom 35-55°, over og langs siden av breene kan bidra med mye materiale i form av skred.

Det er også en tendens til at denne asymmetrien forekommer nedenfor sørvendte fjellvegger, som følgelig vil være mer utsatt for sollys. Mer sollys, og følgelig større temperaturforskjeller, kan forklare hvorfor skredaktiviteten tydeligvis er ulik mellom dalsidene. Under LIA er det dokumentert en høyere skredforekomst (McCarroll, et al., 2001), hvor en stor andel muligens er på bakgrunn av en økning i tine-frysesykluser (Blikra & Nemec, 1998; Sandersen, et al., 1996). Sørvendte fjellvegger vil ha størst potensial til å oppleve flere slike sykluser. Dette kan være med på å forklare asymmetrien ved disse breene. Enkelte av breene, som Steinflybreen, Kvassryggbreen og Bukkehåmmårbreen, har derimot

ikke en sørvendt fjellvegg som kan bidra med materiale, eller en fjellvegg opp langs siden. De har like fullt en fjellvegg i bakkant som vil kunne bidra. Ulik bergart mellom fjellsidene har tidligere også blitt antatt til å være årsaken til utbredelsen av within-valley asymmetri ved enkelte breer. Det finnes derimot ikke gode nok data til å dra noen slutninger om dette er tilfellet ved de aktuelle breene i denne avhandlingen.

7 Konklusjon

Som fremstilt i avsnittene over forekommer det laterale avsetninger som overgår den teoretiske plasseringen av sidemorener, noe som derfor vil kunne gi en gal representasjon av posisjonen til tidligere ELA ved bruk av MELM-metoden. Man kan lese ut fra tabell 2 at de aktuelle breene i denne avhandlingen hadde AAR-verdier helt ned til 0,1 under Holocene maksimum, hvis man skal dra tolkninger ved bruk av MELM-metoden. Plasseringen av ELA vil derfor kunne avvike med flere hundre meter over havet fra de mulige forholdene under denne perioden. Det er blitt foreslått at disse avsetningene er iskjernemorener bestående av en stor andel skredmateriale fra fjellveggene opp langs siden og i bakenfor, som forklarer deres plassering. De kan ha blitt dannet som en følge av at iskjernemorener har blitt stående igjen etter at breen har trukket seg tilbake. Eller fordi sedimenter som har blitt fraktet med breen, og etter hvert smeltet fram ovenfor de allerede eksisterende sidemorenene. Dette har gitt en illusjon av at sidemorenen er lengre enn hva den egentlig er. Det er også blitt diskutert muligheten til at de aktuelle avsetningene er endemorener, slik Østrem (1964) hevdet, men det tyder på at topografien og isens flytretning ikke korrelerer med dette.

Viktige faktorer som er med på å forklare hvorfor man finner en within-valley asymmetri ved disse breene er at store fjellsider gjør at akkumulasjonstilgangen er stor. I tillegg er de fleste av disse fjellveggene sørvendte, noe som gjør at muligheten til flere tine-fryse sykluser, og følgelig flere skred, er mulig. Siden det antas at de laterale avsetningene har blitt avsatt over de estimerte likevektslinjene, vil ikke materialet ha blitt avsatt der som en følge av isens flytlinjer. Dette gjør at avsetningene mest sannsynlig ikke vil bestå av forekomster med verken aktivt eller passivt transportert materiale, men hovedsakelig som en følge av skredmateriale. Det konkluderes dermed med at disse derfor ikke kan bli karakterisert som sidemorener.

8 Forslag til videre arbeid

- En ny definisjon som tar hensyn til forskjellen mellom sidemorener og andre laterale forekomster.
- Undersøke i felt hvorvidt det laterale materialet består av kantet eller mer runde sedimenter for å prøve å anslå blant annet om det har blitt fraktet aktivt eller passivt.
- Datere de laterale avsetningene og undersøke om det er en tendens til en økt alder desto høyere opp man kommer. Dette kan eventuelt kunne svare på om det forekommer sidemorener med utsmeltet materiale ovenfor.
- Undersøke og anslå hvor mye materiale (volum) som har blitt forflyttet fra fjellveggene over som en følge av skred, for videre å sammenligne andelen i den laterale avsetningen.
- Undersøke om det forekommer slike laterale avsetninger i andre områder, både ved bruk av flybilder, men også ved feltarbeid.

9 Referanser

- Aasård, R. (2010). Norkart geoservice.
- Bakke, J., Dahl, S. O., Paasche, O., Lovlie, R., & Nesje, A. (2005). Glacier fluctuations, equilibrium-line altitudes and palaeoclimate in Lyngen, northern Norway, during the Lateglacial and Holocene. [Review]. *Holocene*, *15*(4), 518-540.
- Ballantyne, C. K. (2002). Paraglacial geomorphology. [doi: DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00005-7]. *Quaternary Science Reviews*, *21*(18-19), 1935-2017.
- Benn, D. I. (1989). Debris transport by Loch Lomond Readvance glaciers in Northern Scotland: Basin form and the within-valley asymmetry of lateral moraines. *Journal of Quaternary Science*, *4*(3), 243-254.
- Benn, D. I., & Ballantyne, C. K. (1994). RECONSTRUCTING THE TRANSPORT HISTORY OF GLACIOGENIC SEDIMENTS - A NEW APPROACH BASED ON THE CO-VARIANCE OF CLAST FORM INDEXES. [Article]. *Sedimentary Geology*, *91*(1-4), 215-227.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (1998). *Glaciers & Glaciation*. London: Arnold.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers & Glaciation*. London: Hodder Education.
- Benn, D. I., & Lehmkuhl, F. (2000). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. [doi: DOI: 10.1016/S1040-6182(99)00034-8]. *Quaternary International*, *65-66*, 15-29.
- Bennett, M. R., & Boulton, G. S. (1993). A reinterpretation of Scottish "hummocky moraine" and its significance for the deglaciation of the Scottish Highlands during the Younger Dryas or Loch Lomond Stadial. *Geological Magazine*, *130*(3), 301-318.
- Berthling, I. Beyond confusion: Rock glaciers as cryo-conditioned landforms. [doi: 10.1016/j.geomorph.2011.05.002]. *Geomorphology*, *In Press, Accepted Manuscript*.
- Blikra, & Nemeč. (1998). Postglacial colluvium in western Norway: depositional processes, facies and palaeoclimatic record. *Sedimentology*, *45*(5), 909-959.
- Dahl, S. O., Bakke, J., Lie, Ø., & Nesje, A. (2003). Reconstruction of former glacier equilibrium-line altitudes based on proglacial sites: an evaluation of approaches and selection of sites. [doi: DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00135-X]. *Quaternary Science Reviews*, *22*(2-4), 275-287.
- Dahl, S. O., & Nesje, A. (1992). Paleoclimatic implications based on equilibrium-line altitude depressions of reconstructed Younger Dryas and Holocene cirque glaciers in inner

- Nordfjord, western Norway. [doi: DOI: 10.1016/0031-0182(92)90114-K]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 94(1-4), 87-97.
- eKlima. (2010). Månedsnormaler (1961-1990). Retrieved 12.11.10, from Meteorologisk institutt, vær- og klimadatabase: www.eklima.met.no
- Etzelmüller, B., Berthling, I., & Sollid, J. L. (2003). Aspects and concepts on the geomorphological significance of Holocene permafrost in southern Norway. [doi: DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00250-7]. *Geomorphology*, 52(1-2), 87-104.
- Etzelmüller, B., & Hagen, J. O. (2005). Glacier-permafrost interaction in Arctic and alpine mountain environments with examples from southern Norway and Svalbard. *Geological Society, London, Special Publications*, 242(1), 11-27.
- Etzelmüller, B., Hagen, J. O., Vatne, G., Ødegård, R. S., & Sollid, J. L. (1996). Glacier debris accumulation and sediment deformation influenced by permafrost: Examples from Svalbard. *Annals of glaciology*, 22, 53-62.
- Fossen, H., Pedersen, R. B., Bergh, S., & Andresen, A. (2007). En fjellkjede blir til. In I. B. Ramberg, I. Bryhni & A. Nøttvedt (Eds.), *Landet blir til: Norges geologi* (pp. 178-229). Trondheim: Norges geologiske forening.
- Fountain, A. G., & Walder, J. S. (1998). Water flow through temperate glaciers. [Review]. *Reviews of Geophysics*, 36(3), 299-328.
- Gordon, J. E., Whalley, W. B., Gellatly, A. F., & Vere, D. M. (1992). THE FORMATION OF GLACIAL FLUTES - ASSESSMENT OF MODELS WITH EVIDENCE FROM LYNGSDALEN, NORTH NORWAY. [Article]. *Quaternary Science Reviews*, 11(7-8), 709-731.
- Haines-Young, R. H., & Petch, J. R. (1983). Multiple Working Hypotheses: Equifinality and the Study of Landforms. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 8(4), 458-466.
- Harris, C., Arenson, L. U., Christiansen, H. H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., et al. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. [doi: DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.12.002]. *Earth-Science Reviews*, 92(3-4), 117-171.
- Humlum, O. (1978). Genesis of layered lateral moraines: implications for palaeoclimatology and lichenometry. *Geografisk Tidsskrift*(77), 65-72.
- Isaksen, K., Hauck, C., Gudevang, E., Ødegård, R. S., & Sollid, J. L. (2002). Mountain permafrost distribution in Dovrefjell and Jotunheimen, southern Norway, based on

- BTS and DC resistivity tomography data. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 56(2), 122-136.
- Isaksen, K., Holmlund, P., Sollid, J. L., & Harris, C. (2001). Three deep Alpine-permafrost boreholes in Svalbard and Scandinavia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 13-25.
- Kjøllmoen, B., Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Jackson, M., & Giesen, R. H. (2010). *Glaciological investigations in Norway in 2009: NVE Report 2*.
- Kvassnes, A. J. S., Strand, A. H., Moen-Eikeland, H., & Pedersen, R. (2004). The Lyngen Gabbro: The lower crust of an Ordovician Incipient Arc. [Article]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(3), 358-379.
- Lie, Ø., Dahl, S. O., & Nesje, A. (2003). A theoretical approach to glacier equilibrium-line altitudes using meteorological data and glacier mass-balance records from southern Norway. [Proceedings Paper]. *Holocene*, 13(3), 365-372.
- Lie, Ø., Dahl, S. O., Nesje, A., Matthews, J. A., & Sandvold, S. (2004). Holocene fluctuations of a polythermal glacier in high-alpine eastern Jotunheimen, central-southern Norway. [doi: DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.03.012]. *Quaternary Science Reviews*, 23(18-19), 1925-1945.
- Matthews, J. A. (2005). 'Little Ice Age' glacier variations in Jotunheimen, southern Norway: a study in regionally controlled lichenometric dating of recessional moraines with implications for climate and lichen growth rates. [Article]. *Holocene*, 15(1), 1-19.
- McCarroll, D., Shakesby, R. A., & Matthews, J. A. (2001). Enhanced rockfall activity during the Little Ice Age: further lichenometric evidence from a Norwegian talus. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(2), 157-164.
- Nesje, A. (1992). Topographical Effects on the Equilibrium-Line Altitude on Glaciers. *GeoJournal*(27.4), 383-391.
- Nesje, A., Bakke, J., Dahl, S. O., Lie, Ø., & Matthews, J. A. (2008a). Norwegian mountain glaciers in the past, present and future. [doi: DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.08.004]. *Global and Planetary Change*, 60(1-2), 10-27.
- Nesje, A., Dahl, S., Thun, T., & Nordli, Ø. (2008b). The 'Little Ice Age' glacial expansion in western Scandinavia: summer temperature or winter precipitation? *Climate Dynamics*, 30(7), 789-801.
- Nesje, A., & Dahl, S. O. (1993). Lateglacial and Holocene glacier fluctuations and climate variations in western Norway: A review. [doi: DOI: 10.1016/0277-3791(93)90081-V]. *Quaternary Science Reviews*, 12(4), 255-261.

- NGU. (2010). Berggrunnen i Norge N250. Retrieved 24.11.10, from Norges geologiske undersøkelse: ngu.no/kart/bg250/
- Norgei3d. (2011). Norge i 3D: Norkart geoservice. www.norgei3d.no.
- Norgebilder. (2010). Norge i bilder: Statens kartverk. www.norgebilder.no.
- Rhoads, B. L., & Thorn, C. E. (1996a). Observation in Geomorphology. In B. L. Rhoads & C. E. Thorn (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology* (pp. 21-56): John Wiley & Sons.
- Rhoads, B. L., & Thorn, C. E. (1996b). Toward a Philosophy of Geomorphology. In B. L. Rhoads & C. E. Thorn (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology* (pp. 115-143): John Wiley & Sons.
- Sandersen, F., Bakkhøy, S., Hestnes, E., & Lied, K. (1996). The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. *Report Norwegian Geotechnical Institute*(585910-10), 97-114.
- Small, R. J. (1983). Lateral Moraines of glacier de Tsidjiore Nouve: form development, and implications. *Journal of Glaciology*, 29(102), 250-259.
- Støren, E. N., Dahl, S. O., & Lie, O. (2008). Separation of late-Holocene episodic paraglacial events and glacier fluctuations in eastern Jotunheimen, central southern Norway. [Article]. *Holocene*, 18(8), 1179-1191.
- Sutherland, D. G. (1984). Modern glacier characteristics as a basis for inferring former climates with particular reference to the Loch Lomond Stadial. [doi: DOI: 10.1016/0277-3791(84)90010-6]. *Quaternary Science Reviews*, 3(4), 291-309.
- Torsnes, I., Rye, N., & Nesje, A. (1993). Modern and Little Ice Age equilibrium-line altitudes on outlet glaciers from Jostedalbreen, western Norway: and evaluation of different approaches to their calculation. *Arctic and Alpine Research*, 25, 106-116.
- Østrem, G. (1964). Ice-Cored Moraines in Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 46(3), 282-337.
- Østrem, G., Haakensen, N., & Melander, O. (1973). *Atlas over breer i Nord-Skandinavia* (Vol. 22). Oslo: Avdelingen.
- Østrem, G., Selvig, K. D., & Tandberg, K. (1988). *Atlas over breer i Sør-Norge* (Vol. 61). Oslo: Avdelingen.