



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·

NGU RAPPORT 2023.022

Sammenheng mellom bruddsoner,
vanngjennomstrømning og skredutsatte
løsmasser: forprosjekt i Orkanger, Trøndelag



Rapport nr: 2023.022

ISSN: 0800-3416 (trykt)

ISSN: 2387-3515 (online)

Gradering: åpen

Tittel: Sammenheng mellom bruddsoner, vanngjennomstrømning og skredutsatte løsmasser: forprosjekt i Orkanger, Trøndelag

Forfatter: Joya Tetreault, Ida Gunleiksrud, Anne Katrine Svendby og Mari Lie Arntsen

Oppdragsgiver: NVE og NGU

Fylke: Trøndelag

Kommune: Orkland

Kartblad: (M=1:250.000): Trondheim

Kartbladnr. og -navn: (M=1:50.000): 1521_1 Orkanger, 1521_2 Hølonda, 1521_3 Løkken, 1521_4 Snillfjord

Førekostens navn og koordinater:

Sidetall: 60

Pris:

Feltarbeid utført: mai-juni 2022

Rapportdato: 15.11.2023

Prosjektnr: 400000

Ansvarlig: Joya Tetreault

Emneord: berggrunnsprekker, lineamenter, grunnvannstrøm, kvikkleire, skred, Orkanger

Sammendrag: Dette pilotprosjektet er et samarbeid mellom NVE og NGU der overgangen mellom fastfjellsgeologien og skredutsatte løsmasser er i fokus. Hovedtemaet er å identifisere sprekker, bruddsoner og fastfjell som utgjør mulige transportsoner av vann til skredutsatte løsmasser. Det er særlig kvikkleire som utgjør en fare i området under øvre marin grense. Orkdal kommune er valgt siden det er gjort en omfattende kartlegging av kvikkleirutbredelsen, samtidig som det finnes relativ god dekning av berggrunnsgeologien. Det finnes detaljerte kvartærgeologiske kart over større deler av kommunen og det er foretatt geofysiske målinger i større områder med kvikkleire.

Forprosjektet har identifisert viktige parametere for å identifisere sammenhenger mellom sprekkesystem i berggrunnen og mulige utvasking av kvikkleire og skredd. Vi kombinerer digitale DTM-lineamenter med feltobservasjoner for å undersøke hvilken informasjon lineamenter kan gi oss om sprekkesystemer. Resultatene skal gi et bedre kunnskapsgrunnlag for å forstå hvordan grunnvannstrømning i sprekker i berggrunnen bidrar til å destabilisere marine løsmasser og/eller utløse jord- og kvikkleirskred.

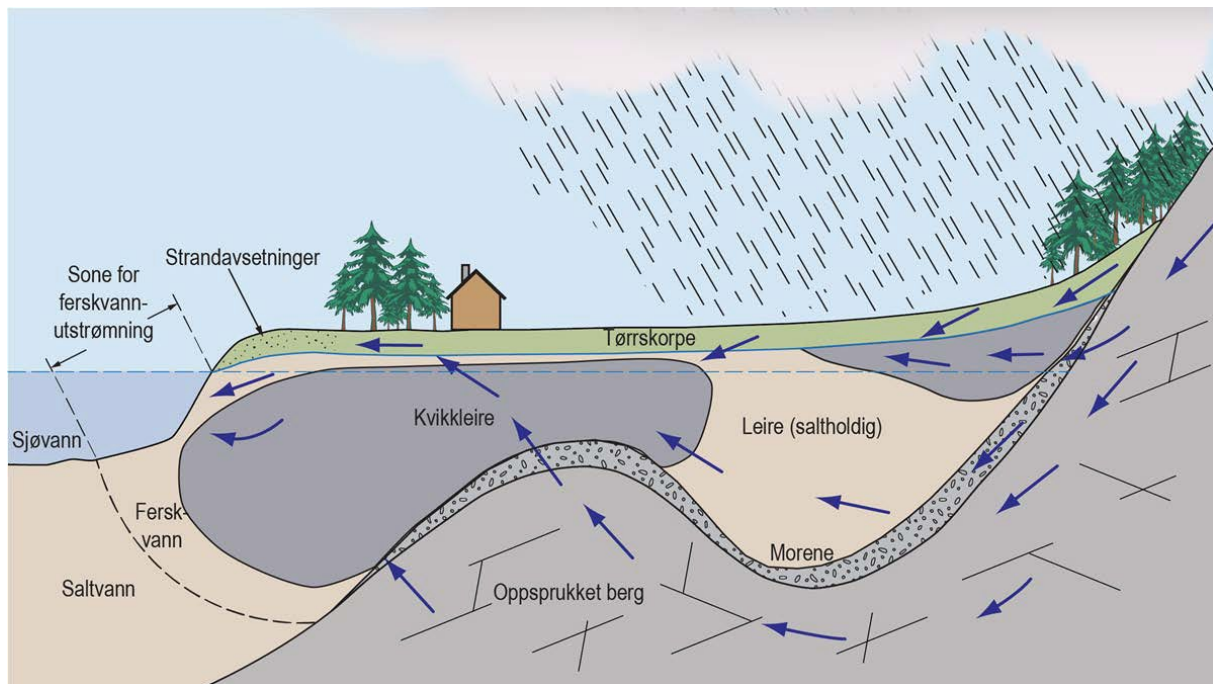
Innhold

1. Innledning	3
1.1 Formål og bakgrunn	3
1.2 Berggrunnsgeologi	4
1.3 Kvartærgeologi	5
2. Metodikk	7
2.1 Otto Lineamenter	7
2.1.1 Otto-metoden	7
2.2 Felt metoder	12
2.2.1 Datainnsamling	12
2.2.2 Sprekke egenskaper	15
2.2.3 Sprekke analyser	15
3. Resultater	17
3.1 Otto resultater	17
3.1.1 Statistiske beskrivelser	17
3.1.2 Romlig fordeling	22
3.1.3 Sprekke-egenskaper og karakterisering av lineamenter	27
3.2 Felt Analyser	32
3.2.1 Hoved sprekkesett	32
3.2.2 Sprekkefrekvens og sprekketetthet	34
3.2.3 Sprekke-egenskaper	35
4. Diskusjon	42
4.1 Otto	42
4.1.1 Lineamentfiltrering og -bearbeiding	42
4.1.2 Lineament- egenskaper – lengde, dybde og bredde	42
4.1.3 Berggrunnens betydning for lineamentretning og lineament-tetthet	43
4.1.4 Lineament-tetthet og vannføring	47
4.2 Felt	48
4.2.1 Regional betydning	48
4.2.2 Grunnvannstrømning sannsynlighet i Orkanger	49
5. Sammenheng mellom lineamenter og sprekker	50
5.1 Kvikkleire og sprekker i berggrunnen	54
6. Konklusjoner	58
7. Referanser	59

1. INNLEDNING

1.1 Formål og bakgrunn

Kvikkleireskred er et økende problem i Norge ettersom økt flom og nedbør fører til utvasking av leire og ustabilitet i de marine avsetningene. De siste fem årene har vi i Norge opplevde flere kvikkleireskred i forbindelse med forhøyet nedbør og overbelastning som har forårsaket ustabilitet. Store deler av Norges befolkning bor i områder med marin leire, som kan bli kvikk ved utvasking av ferskvann. Utvasking kan forekomme ved økt vannstrøm inn i kvikkleirelag, enten gjennom økt nedbør eller grunnvannstrøm i berggrunn (Wiig mfl., 2019). Påvirkningen av nedbør og overflatevann på kvikkleire og skred er godt undersøkt og dokumentert, men grunnvannsystemer i berggrunn er mindre studert, spesielt i Norge.



Figur 1-1 Diagram over kvikkleiredannelse og vannføringsforhold. (Wiig mfl., 2019)

Grunnvann beveger seg gjennom berggrunnen ved sprekker, forkastninger, geologiske kontakter, skjærsoner og berggrunnens porøsitet. Samspill mellom berggrunnens sprekkesystem og væskestrøm har vært studert i mange land gjennom flere tiår i forbindelse med undersøkelser av petroleum- og grunnvannsressurser (National Research Council, 1996; Berkowitz, 2002), men ikke med hensyn til skred. Kartlegging av sprekkesystemer og grunnvannstrøm er spesielt utfordrende fordi feltkartlegging kun gir informasjon om overflaten. For å få en forståelse av bruddsystemer i dybden brukes vanligvis geofysiske metoder (seismiske, elektromagnetiske og GPR-undersøkelser) eller borehulls data (National Research Council, 1996; Berkowitz, 2002). Tradisjonelle geologiske metoder for å studere sprekkestrukturer og grunnvann består av analyser av sprekke-orientering, og sprekkeegenskaper fra blotninger eller flyfoto (lineamentkartlegging), noe som gir en relativt god oversikt av regionale systemer sammenlignet med borehulldata (Manda mfl., 2012). I grunnvannstudier, har lineamentkartlegging (f.eks. via fjernmåling, flyfotografering, GIS-databaser eller geofysiske undersøkelser av vannførende lineamenter) vanligvis blitt brukt for å identifisere sprekkesett (Odling, 1997; Sanders, 2007; Chandra et al., 2019). En slik manuell lineamentkartlegging er svært tidkrevende og subjektiv. Nylig har det blitt gjort mange digitale fremskritt innen automatisert lineamentkartlegging (FracPac, Network GT, osv.) som

muliggjør 2D-deteksjon av lineamenter (Healy et al., 2017, Nyborg et al., 2019) fra bilder og ulike datasett, inkludert Lidar-data. Disse nye metodene kan gjøre det lettere å undersøke sprekkesystemer i berggrunnen.

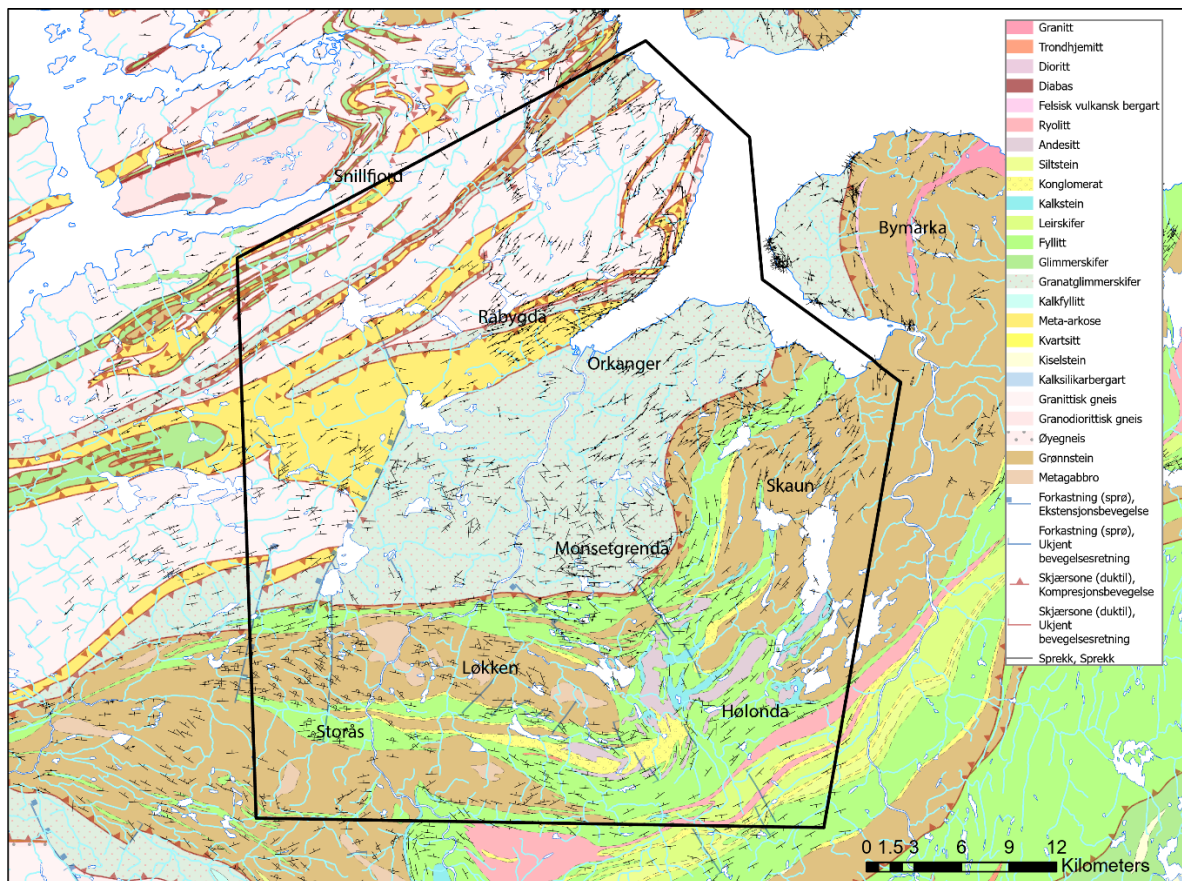
I dette prosjektet bruker vi en NGU-utviklet algoritme (Otto), kombinert med feltanalyser for å kartlegge sprekkesystemer i berggrunnen. Otto detekterer rygger og traue (begge som lineamenter) fra digitale høydemodeller (DTM) og samler topografisk informasjon langs lineamentene. Konvensjonelle metoder for automatisk lineamentkartlegging produserer en romlig representasjon av lineamenter som viser orientering og utstrekning, men inneholder utover dette begrenset informasjon om lineamentets karakter, som dybde og form. En betydelig styrke ved Otto-verktøyet er evnen til å kvantitativt beskrive lineamenter ved en rekke parametere tilhørende hvert enkelt lineament, som blant annet dybde, høyde og bredde. Numerisk modellering og feltstudier viser at sprekke-egenskapene som vil påvirke væskestrøm er sprekke-åpning, -lengde, -retning, -forbindelser og -avstand (e.g. Manda mfl., 2012, Berkowitz, 2002). Vi ønsker å sammenligne disse egenskapene fra feltdata til lineamentdata for å teste om vi kan bruke automatisert lineamentanalyse som fjernanalyse av sprekkesystemer i berggrunnen.

Orkanger fungerer som et pilotstudieområde for å teste om DTM-avlede lineamenter kan gi nyttig informasjon om rollen bruddstrukturer i berggrunnen spiller for grunnvannstrømming og utvasking av marinleire. Orkanger er et område dekket av marine avsetninger med flere historiske kvikkleireskred. Området har et godt datagrunnlag fra flere geologiske fagfelt, blant annet ga berggrunnskartlegging i 2012-2015 et nytt geologisk kart i målestokk 1:50 000 med hundrevis av observasjonspunkter og geologiske strukturmålinger. En detaljert resistivitetsundersøkelse ble utført i 2021 for å bestemme utbredelsen (i 3D) av de kvartære avsetningene, og identifisere potensielle områder for utvasket marin leire. Vi vil analysere både DTM-lineamenter og sprekkesett fra feltobservasjoner for å undersøke om DTM-lineamenter kan gi lignende informasjon som feltdata. Vi vil også teste ulike metoder for å analysere forholdet mellom DTM-lineamenter og grunnvannsstrømming.

1.2 Berggrunnsgeologi

Orkanger ligger ved deltaet til Orkla, innerst i Orkangerfjorden i metamorfe bergarter i Støren og Blåhø dekker. Bergartene innenfor prosjektområdet i Orkanger består av en heterogen lagpakke som veksler mellom opprinnelige sedimentære og vulkanske bergarter, omdannet under amfibolittfacies forhold. Berggrunnen består av vekslende, lateralt utholdende, folierte metertykke lag av kvarts-glimmerskifer, granat-glimmerskifer, amfibolitt, med underordnede lag og linser av kalksilikater og lag av intermediære til felsiske vulkanske bergarter. Kompetente lag (i hovedsak amfibolitt) tenderer til å ligge som flere meter lateralt utholdende boudines, som draperes av mindre kompetente, folierte skiferlag. Kompetente- og ikke-kompetente lag veksler på meterskala.

Bergartsenhetene er gjennomsatt av tallrike pegmatittganger, stedvis finkornede felsiske ganger (aplitt), dolerittganger og linser av amfibolitt. Større pegmatittkropper og aplitter er massive, og boudinerte. De krysser gjerne lagningen med en spiss vinkel, og synes være orientert etter foldemønster og foliasjon. Linseformede kropper av amfibolitt kutter i hovedsak også lagningen med spiss vinkel, og er gjerne subparallele med foldemønster og foliasjon. Utallige, lateralt utholdende kvartsmineraliserte årer kutter gjennom lagningen med varierende vinkel. De har ulik orientering, og veksler fra å være delvis parallelle med foliasjonen til å kutte denne med en høy vinkel.



Figur 1-2. Foliasjonsorienteringer og berggrunnsgeologien fra kartet 1:250000 i studieområdet (www.ngu.no).

Lagene er isoklinalt foldet, med en foliasjon som er parallell med lagningen. Foliasjon og lagning er forholdsvis konsistent med strøk mot NØ, og faller 20-40° mot SØ. I regional skala er berggrunnen foldet i tette til åpne folder, med akseplan orientert NØ-SV og en forholdsvis flatliggende foldeakse (se profiler fra berggrunnskart Orkanger i målestokk 1:50.000 (Gasser et al, 2018)). Langs den nordvestre siden av Orkdalsfjorden faller lagene bratt (40-50°) mot SØ, og er tolket til å representere flanken av en større synformet struktur, som bøyer ned under Orkdalsfjorden. Langs den sørøstre siden av Orkdalsfjorden viser flere stukturmålinger at lagningen stryker mot SØ, og faller mot SV. Endringen i strøk er på grunn av det regionale foldemønsteret i dekkene.

Lagene i det studerte området er gjennomgått av utallige bruddstrukturer, som varierer fra bratte, stedvis med forskyvning, til lavvinklede. Glidespeil og glidestriper er gjerne kloritt- og/eller jernmineraliserte. Det er også flere lavvinklede bruddstrukturer som følger foliasjonen, eller som har en spiss vinkel til denne.

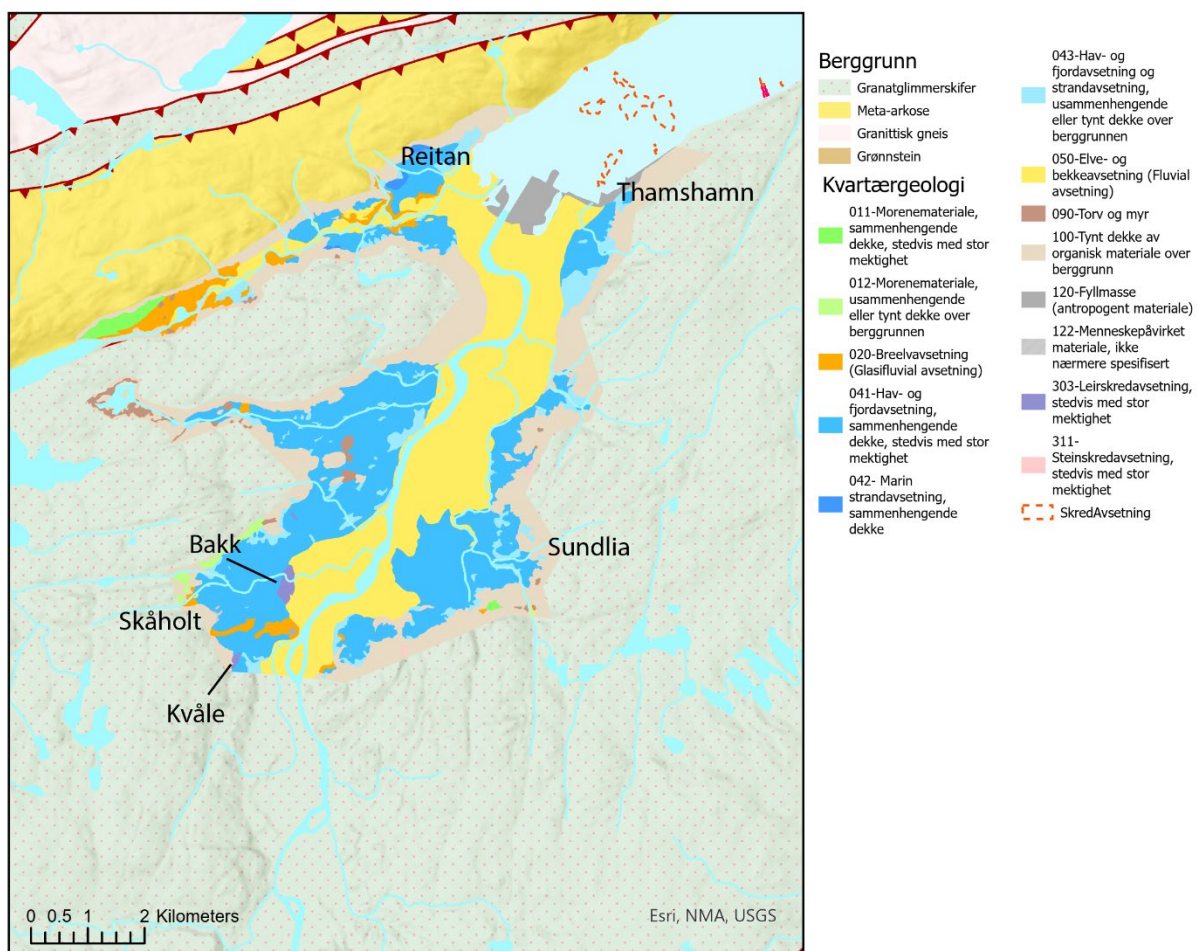
1.3 Kvartærgeologi

Kvartære avsetninger i Orkanger-området består hovedsakelig av marine avsetninger, morenemateriale, breelavsetninger og elveavsetninger avsatt under marin grense (Hansen og Gislefoss, 2021). Kvartærgeologien i området er beskrevet ytterligere i NGU rapport for Orkanger løsmassekart (Hansen og Gislefoss, 2021). Marin grense er det høyeste nivået havet nådde etter istid og ligger på 160 moh.

Marine avsetninger i studieområdet består av lagdelt marin leire, silt og finkornet sand, blandet med tynne lag av elveavsetninger. Utvasking av saltholdig marin leire (fra ferskvann

via nedbør, overflatevann eller grunnvann) kan føre til dannelse av kvikkleire og økt fare for kvikkleireskred. En ny detaljert resistivitetsundersøkelse i Orkanger gjennomført av NGU viser at de marine avsetningene i hovedsak består av utvasket leire. Det finnes enkelte områder med morene- og breelvavsetninger, blant annet ved Skåholt, der disse avsetningene danner en rygg bestående av vekslende skråstille lag av grus og sand som faller mot nord. Grus og sand er avsetninger forbundet med høy porøsitet og høyt grunnvannspotensial.

Flere hendelser og spor av kvikkleireskred er funnet i området. Ved Bakk finnes en stor leireskredavsetning, radiokarbon-datert til 1500-1600-tallet (Hansen og Gislefoss, 2021). Av de nyere skredhendelsene er et kvikkleireskred i Orkdalsfjorden ved Thamshamn. Skredet er datert til 1930, og førte til en 15 m høy tsunamibølge. I 2019 gikk et skred ved Reiten der en person omkom (Hansen og Gislefoss, 2021). Mange andre historiske skred er synlig som ulike landformer; amfier eller knekk i terrasse-terrenget, for eksempel ved Engan, sør fra Sundlia. Erosjon og nedbør har den største innflytelsen på kvikkleireskred i Orkanger. Ved Kvåle, forekommer et skredkompleks som er tolket til å være relatert til erosjon langs elveterrassen. Kvikkleireskredet ved Bakk ligger ved deltaet til Skåholtbekken og er trolig relatert til vannstrømning fra bekken. Data over historiske skredhendelser og påvist kvikkleire kan sammenlignes med sprekke-data og DTM-lineamenter for å undersøke ut om grunnvannstrøm i sprekker har vært en mulig bidragsyter for skredhendelser.



Figur 1-3. Kart over studieområde med 1:25000 berggrunn og løsmasser.

2. METODIKK

For å forstå grunnvannssystemet i berggrunnen i Orkanger, sammenlignet vi DTM-lineamenter med felldata og områder med påvist kvikkleire og tidligere skredhendelser. Vi testet flere måter å korrelere lineamentegenskaper til sprekker og sprekke-egenskaper samlet i felt, for å se om lineamentene kan relateres til berggrunnens sprekkesystemer. Disse metodene vil kunne brukes i fremtidige lineamentstudier ved bruk av Otto.

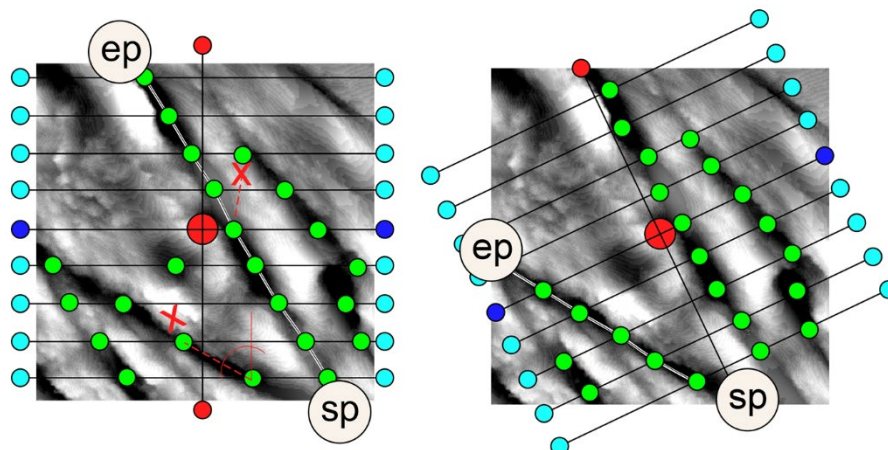
2.1 Otto Lineamenter

2.1.1 Otto-metoden

Otto er en algoritme og arbeidsmetode utviklet av forskere ved NGU for automatisk deteksjon og analyse av lineamenter. *Otto*-metoden er en stegvis prosess bestående av; 1) *Otto Detect*, som detekterer lineamenter fra rasterdata (ofte en digital terrengmodell), 2) *filtrering* av *Otto Detect*-datasettet ved utvalgte parametere og verdier, og 3) *datareduksjon* for å redusere oversampling av lineamenter. Datagrunnlaget brukt i dette prosjektet er basert på en digital terrengmodell (DTM) med oppløsning på 10m (www.karverket.no).

2.1.1.1 Otto Detect

Otto Detect er verktøyet som benyttes for å detektere lineamenter i datasettet. *Otto Detect* prøvetar datasettet gjennom en stegvis (iterativ) prosess der datasettet dekkes av en serie profiler ved en gitt retning, og *Otto* registrerer maksimum- og minimumsverdier langs disse profilene. Videre kobles punktene til disse maksimums- og minimumsverdiene sammen for å danne linjer som representerer henholdsvis 'rygger' (høyder) og 'trau' (forsenkninger) i datasettet. I dette prosjektet analyserer vi kun forsenkninger. For å sørge for at flest mulig reelle lineamenter er detektert, analyseres datasettet i flere steg, der retningen til profilene roteres fra steg til steg. Til slutt vil datasettet ha blitt analysert langs profiler som dekker datasettet ved retninger fra 0° - 180° (Figur 2-1).



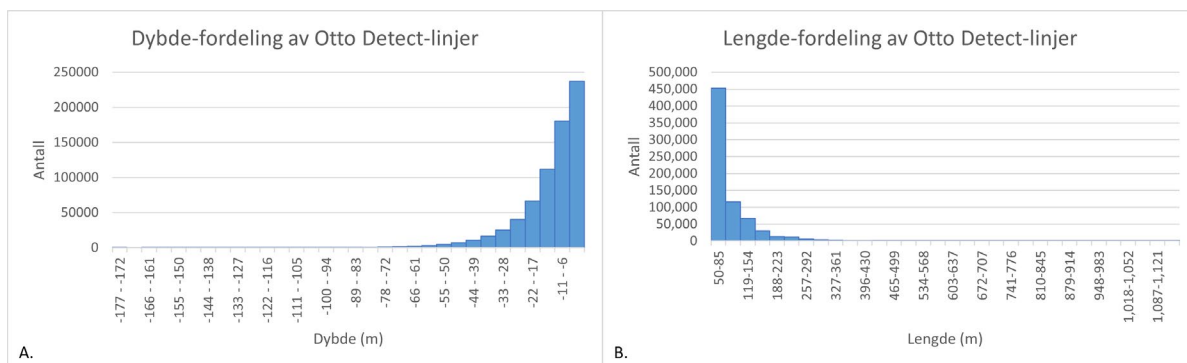
Figur 2-1. Skjematiske fremstillinger av hvordan *Otto Detect* prøvetar maksimum- og minimumspunkter for å lage rygger og trau. Datasettet er prøvetatt langs profiler ved en bestemt retning, som deretter roteres 15° for å igjen prøveta datasettet for maksimum- og minimumspunkter.

2.1.1.2 Filtrering og bearbeiding av Otto Detect-linjer

Støyfiltrering

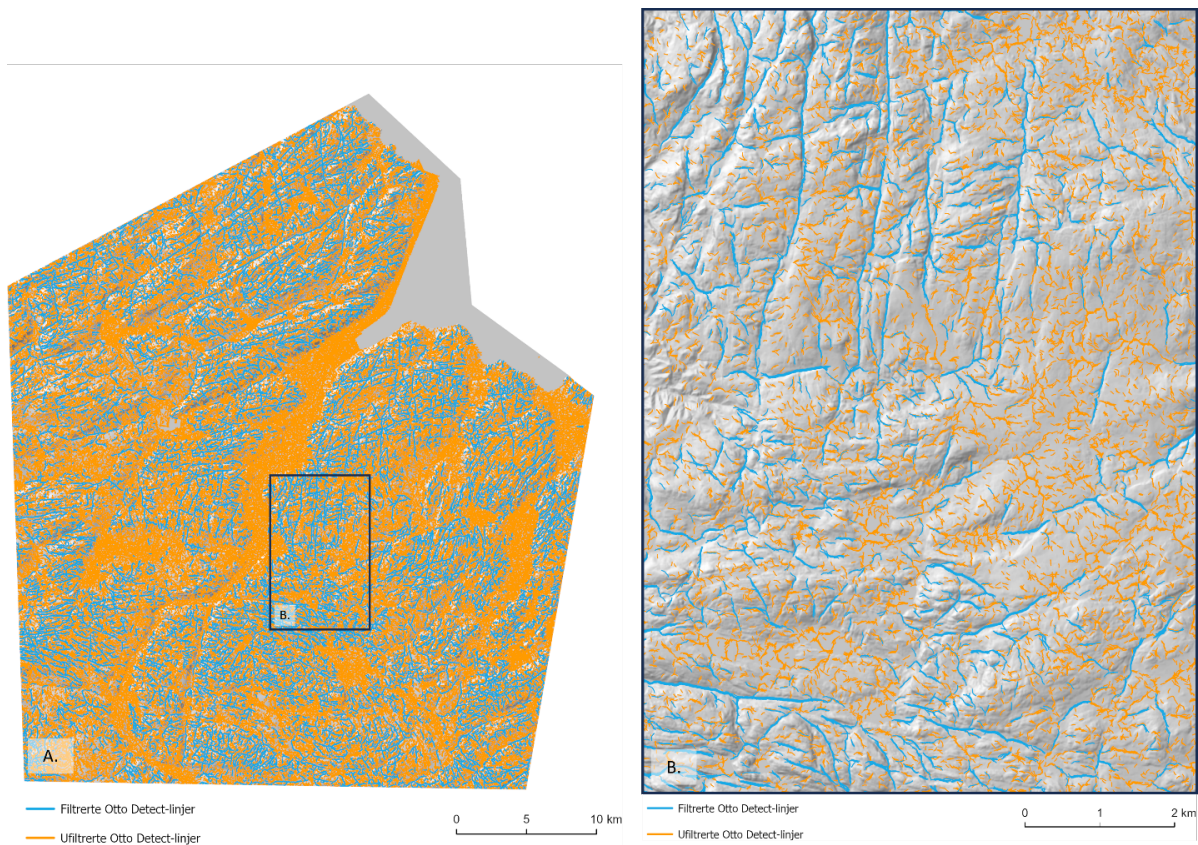
Otto Detect produserer et stort datasett av linjestykker, der mange av linjestykkene ikke representerer reelle lineamenter, men heller småskala høyder eller forsenkninger i topografien. Dette resulterer i et stort antall korte og grunne Otto Detect-linjer, som kan representere overflatestrukturer som ikke er gjenspeiler berggrunnsgeologiske strukturer (f.eks. antropogene strukturer eller infrastruktur, eller strukturer i løsmasser) eller være støy i datasettet (fra innsamling, prosessering osv.). Med et mål om å 'produsere' et lineamentdatasett som representerer bruddstrukturer i berggrunnen, forsøker vi derfor å fjerne de linjestykkene som ikke representerer reelle lineamenter og de linjestykkene som representerer lineamenter av liten betydning. Dette gjør vi ved å filtrere bort de korteste og grunneste lineamentene.

For å bestemme grenseverdiene for filtrering ble de statistiske fordelingene av dybde og lengde i Otto Detect datasettet analysert. Siden geologien og morfologien varierer fra region til region i landet, vil også filtreringsverdier som er hensiktsmessige å bruke variere fra område til område. Innenfor prosjektområdet i Orkanger viser det ufiltrerte Otto Detect-datasettet et gjennomsnittsdyp på -12.5 m og en gjennomsnittslengde på 90.4 m (Figur 2-2). Med dette som utgangspunkt testet vi først filtrering på dybde og lengde med nedre grenseverdi på henholdsvis -10m og 100m.

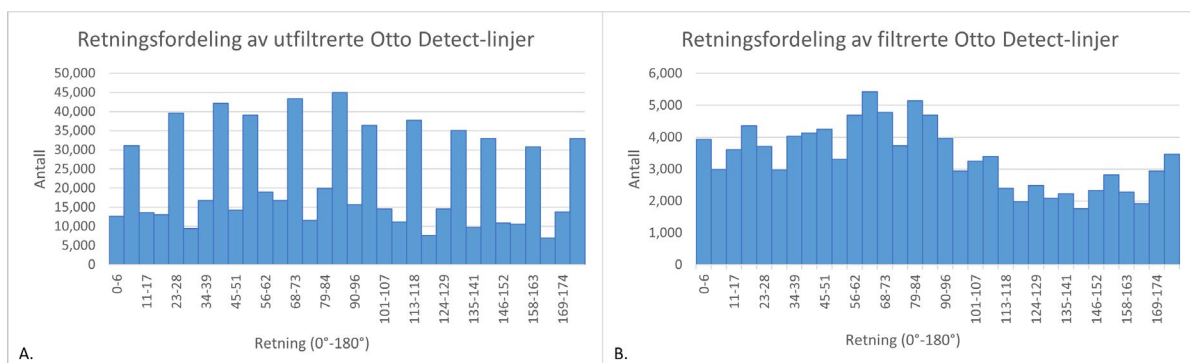


Figur 2-2. Statistisk fordeling av dybde (A) og lengde (B) til ufiltrerte Otto Detect-linjer. Gjennomsnittsdybde = -12,5 m. Gjennomsnittslengde = 90,4 m.

Det filtrerte datasettet ble analysert visuelt og statistisk, for å vurdere grenseverdiene på 10m dybde og 100 m lengde. Det ufiltrerte datasettet er nærmest mettet med linjer (Figur 2-3 A.), noe som gjør det krevende å få et visuelt inntrykk av den romlige fordelingen av linjer i datasettet. Etter filtrering (ved 10m dybde og 100 m lengde), er det visuelle inntrykket tydeligere og den romlige fordelingen gir et mer karakteristisk strukturgeologisk mønster. Statistisk analyse av retningsfordelingen til Otto Detect-linjene ble gjort før og etter filtrering, for å undersøke effekten av filteret på retningsfordelingen. Ved sammenligning av ufiltrerte og filtrerte Otto Detect-data, viser retningsfordelingen til det filtrerte datasettet tydeligere populasjoner (Figur 2-4).



Figur 2-3. (A) og (B) viser de ufiltrerte Otto Detect-linjene i oransje og de filtrerte Otto Detect-linjene i blå, der det ufiltrerte datasettet er preget av mye støy, mens det filtrerte viser et tydeligere lineamentmønster som er mer karakteristisk for bruddstrukturer i overflaten av berggrunnen. Filtrering er gjort ved lengde på 100 m og dybde på -10 m.



Figur 2-4. Retningsfordelinger for ufiltrerte Otto Detect-linjer (A) og filtrerte Otto Detect-linjer (B). Filtrering er gjort ved lengde på 100 m og dybde på -10 m.

For å vurdere om andre attributter i Otto Detect datasettet burde benyttes for filtrering, ble også *bredde* og *bredde-lengde-forhold* av Otto Detect-linjene analysert. Disse attributtene klarte til en viss grad å fjerne de samme lineamentene som lengde- og dybde-filer, men var ikke like effektive i å systematisk fjerne støy og lineamenter som ikke gjenspeiler geologiske strukturer.

Løsmasse-filtrering

Formålet med lineamentanalysen i dette arbeidet er å etablere et datasett med lineamenter som kan sammenlignes og eventuelt korreleres med bruddstrukturer observert i felt. Otto Detect-linjer som befinner seg innenfor områder med tykke løsmasseavsetninger vil representere forsinkninger relatert til kvartær landformer (f.eks. raviner) og ikke underliggende berggrunnsstrukturer. Ved å bruke 1:50 000 løsmassekart (målestokk 1:50 000) fra NGU (www.ngu.no) og Kartverkets vannflate-kart (målestokk 1:50 000 og 1:250 000) (www.karverket.no), ble linjestykker som opptrer innenfor vannflatepolygoner og løsmassepolygoner (marine, fluviale, glasifluviale, morene, tykt og sammenhengende dekke) selektert og fjernet fra datasettet.

2.1.1.3 Datareduksjon ved linjesentrering

Den stegvise prosessen i Otto Detect skaper et stort datasett av linjer (rygger/trau) som overrepresenterer hvert enkelt lineament. Denne overrepresentasjonen vises ved klynger av Otto Detect linjer rundt ett enkelt lineament, og er problematisk for videre analyser. Linjesentrering er neste steg i Otto-metoden, og har som formål å redusere overrepresentasjonen. Linjesentrering gjøres ved å samle alle linjene som representerer ett felles lineament, og kollapse disse til en enkelt linje.

2.1.1.4 Filtrering av senterlinjer

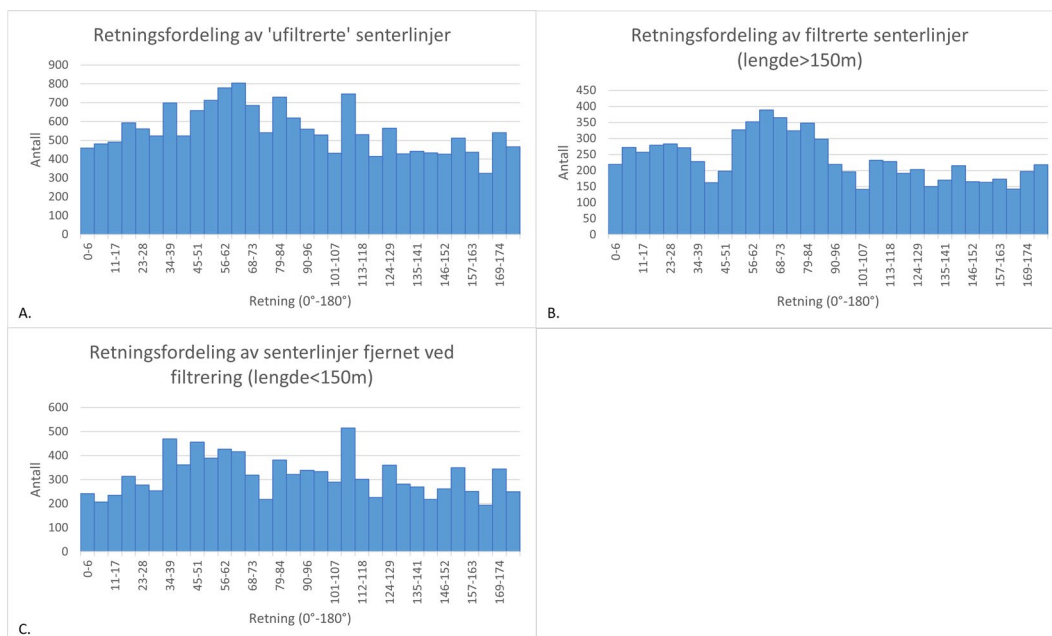
Linjesentrering bidrar til betydelig reduksjon av overrepresentasjonen som finnes i Otto Detect datasettet (se 2.1.1.3). Når flere linjer som representerer ett og samme lineament kollapses til en senterlinje, vil lengden på det nye linjestykket (senterlinjen) være et resultat av lengden på input-linjene fra Otto Detect. Det vil si at en ny filtrering på linjelengde er hensiktsmessig, som en støyreduksjon for igjen å fjerne de linjestykkene som åpenbart ikke representerer berggrunnsgeologiske strukturer. Det filtrerte senterlinjedatasettet består av 7575 linjer, noe som er en betydelig reduksjon i antall linjestykker fra det ufiltrerte Otto Detect datasettet, som består av 708 600 linjestykker.

Hvilke verdier lineament-datasettene bør filtreres med vil variere fra region til region, og med hvilke strukturer som er av interesse. I dette prosjektet, ble senterlinjene i undersøkelsesområdet filtrert slik at alle linjer kortere enn 150 m ble fjernet fra datasettet (Figur 2-5). Grenseverdien på 150 m bestemt etter utprøving og analyser (visuelt og statistisk) av ulike lengder fra 100 m til 500 m. Sammenlignet med det ufiltrerte senterlinjedatasettet, ga en filtrering med grenseverdi på 150 m en tydelig effekt på retningsfordelingen – og tre retningspopulasjoner ble identifisert (Figur 2-6).

Retningen til de bort-filtrerte lineamentene ble analysert for å sikre at filtreringen ikke fjerner bestemte (og potensielt betydningsfulle) populasjoner fra datasettet. Fordelingen til de bort-filtrerte lineamentene (Figur 2-6 c.) viser en stor spredning og ingen distinkt gruppering, som indikerer at de sannsynligvis ikke er knyttet til berggrunnsstrukturer.



Figur 2-5 (A) og (B) viser de ufiltrerte senterlinjene i svart, under de filtrerte senterlinjene i grønt. Senterlinjene er produsert fra de filtrerte Otto Detect-linjene ved datareduksjon, og deretter filtrert ved 150 m. B. viser et detaljert utsnitt av hvilke senterlinjer har blitt filtrert bort (svarte linjer), og som ligner på støy. De grønne linjene viser et tydeligere lineamentmønster som er mer karakteristisk for bruddstrukturer i overflaten av berggrunnen.



Figur 2-6. Fordeling av retning for senterlinjer før filtrering (A) og etter filtrering ved lengde på 150 m. (B) og av senterlinjer som ble fjernet ved filter på 150 m. (C) De ufiltrerte senterlinjene i A. viser stor spredning i retningsfordeling, mens de filtrerte senterlinjene i (B) viser en mye tydeligere retningsfordeling som er karakteristisk for strukturer relatert til oppsprekking av berggrunnen. Senterlinjene fjernet ved filtrering (C) viser en relativt jevn fordeling, som bekrefter at vi har fjernet støy, og ikke en bestemt populasjon med betydningsfull informasjon om berggrunnen.

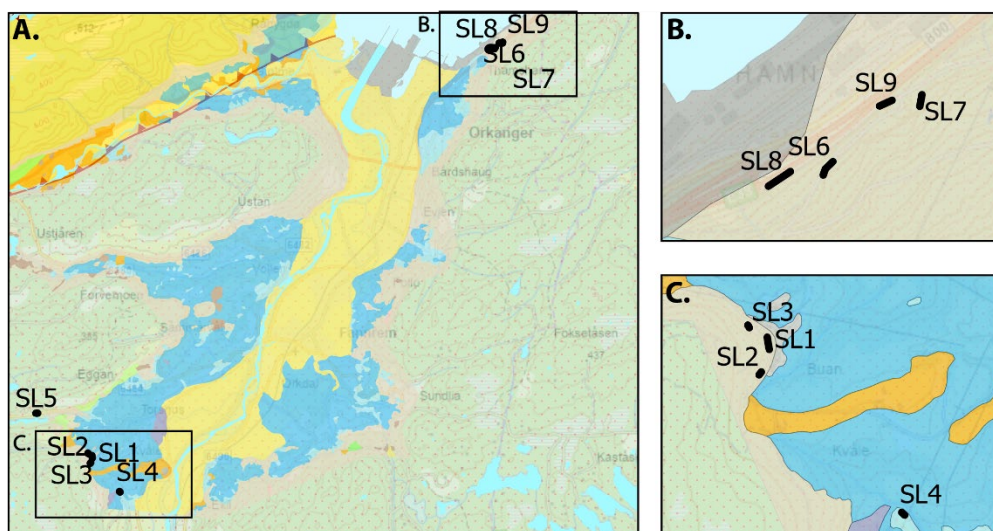
2.2 Felt metoder

2.2.1 Datainnsamling

For å få oversikt over bruddstrukturer i prosjektområdet i Orkanger målte vi sprekker (vi definere sprekke som brudd og sprekke fra strekk- og skjærspenning) med to ulike metoder: *linear scanline profiler (SL)* og *cubic meter (CM)*. Ved bruk av SL-metoden samles det inn sprekke-data langs et 2D profil. SL-metoden er den mest etablerte metoden for å måle sprekkesystemer og sprekkeegenskaper (Priest og Hudson, 1981). Metoden er nyttig fordi den gir informasjon om sprekkenes orientering, sprekkefrekvens og avstand mellom sprekke. Andre metoder for innsamling av sprekke-data i 2D er «circular scanlines», «rectangular window sampling» og «area sampling» (Watkins mfl., 2015). CM metoden samler data innenfor en avgrenset kubikk-meter, og gir informasjon om sprekke-orientering og tetthet. Både SL og CM har sine styrker og svakheter. SL vil registrere brudd som treffer en horisontal linje, men fanger ikke opp horisontale brudd. Derfor har vi supplert SL-profiler med et eller flere vertikale profiler. CM-metoden er en god metode for å registrere sprekketetthet og gir en 3D-oversikt over sprekke. Valg av metode er avhengig av blotningen: SL fungerer godt ved store blotninger (>5m), mens CM fungerer best på små blotninger der det er mulig å måle fra to ortogonale sider. I dette pilotprosjektet vurderer vi hvilken metode som gir oss mest representative data og hvordan resultatene de to ulike metodene samsvarer. For best mulig sammenligningsgrunnlag, brukte vi både CM og SL på enkelte lokaliteter.

Antall lokaliteter i studiet var begrenset av antall egnede blotninger og tilgjengelig tid. Vi forsøkte å velge lokaliteter både under og over marin grense, men det var dessverre vanskelig å finne blotninger under marin grense som var egnet for hverken SL- eller CM-metoden. Det var viktig for prosjektet å få god data dekning rundt Orkla, men det var få blotninger å finne. Øst for elva var det vanskelig å finne store nok blotninger for å bruke SL-metoden og de fleste var små gamle veiskjæringer der CM-metoden var eneste mulighet.

Feltarbeidet for innsamling av data foregikk i juni 2022. I tillegg til brudddata, dokumenterte vi berggrunnsgeologien, foliasjonsretning og eventuelle forkastninger på hver lokalitet. Totalt samlet vi sprekke-data i 9 SL- og 21 CM-lokaliteter rundt Orkla (Figur 2-7- Figur 2-8, Tabell 2-Tabell 3), hvorav det ble målt 4 SL rundt Thamshamn, der det gikk et skred i 1930 (L'Heureux et al., 2014), og 1 ved Kvåle, like ved en øst-vest orientert rygg bestående av breavsetninger og skredavsetninger (Hansen og Gislefoss, 2019). Totalt målte vi 977 sprekker ved SL-lokaliteter med 326 ved SL8 på Thamshamn, som er den andre lengste SL-lokalitet. SL-profilets lengde og retning ble registrert for vektingsanalyse (Tabell 1).



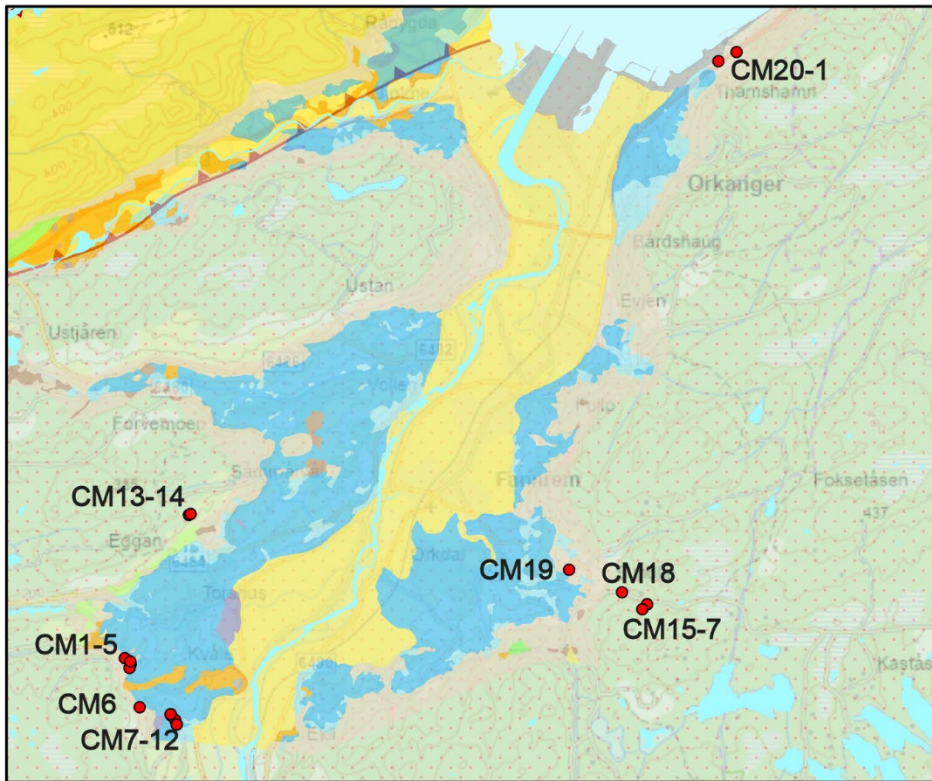
Figur 2-7. Kart for studieområdet med alle SL (A). (B) viser SL i Thamshamnområdet og (C) viser Skålholt-Kvale området

Tabell 1. SL lengde og retning. Enkelte SL er delt opp i segmenter med forskjellige retninger på grunn av blotningens geometri.

SL segmenter	Profil retning	SL segment lengde	Total lengde av SL
SL1	170	48.08	48.08
SL2	37	12.9	12.9
SL3	330	12.2	12.2
SL4	155	16.55	16.55
SL5	88	30.8	30.8
SL6a	20	9	22.7
SL6b	49	13.7	22.7
SL7	165	16	16
SL8a	60	9.6	43.62
SL8b	5	21.7	43.62
SL8c	240	12.32	43.62
SL9	233	24.68	24.68

Tabell 2. Antall sprekker samlet ved hver SL-lokalitet.

Scanline	uvektet N	vektet N
SL1	107	175
SL2	17	22
SL3	62	99
SL4	63	133
SL5	76	136
SL6	120	172
SL7	73	109
SL8	326	567
SL9	134	243
Alle SL	977	1664



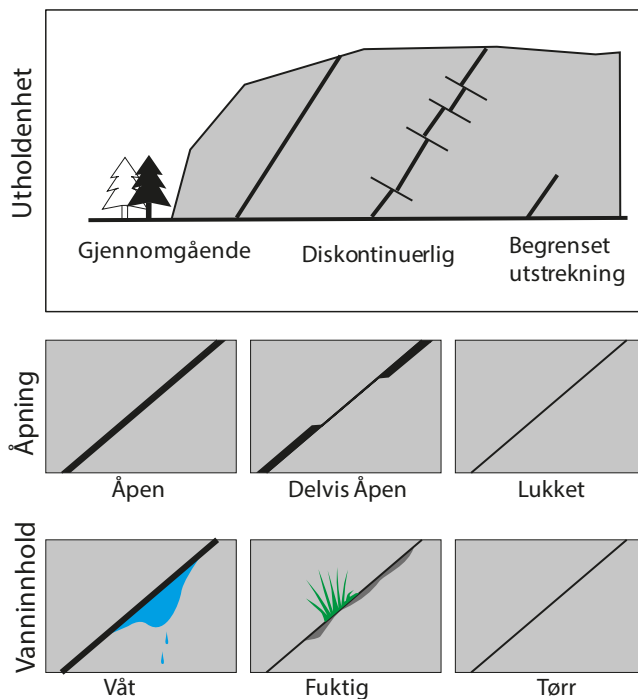
Figur 2-8. Kart over studieområdet med CM-lokaliteter.

Tabell 3. Antall sprekker malte på hvert CM-lokalitet.

CM-lokaliteter	N
CM1	8
CM2	10
CM3	12
CM4	15
CM5	13
CM6	14
CM7	20
CM8	22
CM9	5
CM10	38
CM11	10
CM12	15
CM13	30
CM14	14
CM15	10
CM16	21
CM17	20
CM18	17
CM19	12
CM20	31
CM21	44

2.2.2 Sprekke egenskaper

På hver lokalitet (både SL og CM), målte vi orienteringen på alle sprekker og klassifiserte sprekkeene i henhold til 3 egenskaper: utholdenhet, bruddåpning og vannmengde. Utholdenhet er kategorisert som *gjennomgående*, *diskontinuerlig* eller *begrenset utstrekning* (Figur 2-9). Gjennomgående sprekker strekker seg gjennom hele blotningen. Diskontinuerlige sprekker er segmenterte, men sporbare gjennom hele blotningen. Begrensede sprekker er korte sprekker, mindre enn 1 meter lange. Åpningstype er kategorisert som *lukket*, *delvis åpen*, *åpen mindre enn 1cm* eller *åpen mer enn 1cm*. I praksis, når vi analyserte brudd data, kombinerte vi åpen mindre enn 1cm med åpen mer enn 1 cm. Delvis åpne sprekker er kun stedvis åpne langs hele lengden til sprekken. Lukkede sprekker er lukket langs hele lengden til sprekken. Vanninnhold er kategorisert som *våt*, *fuktig* eller *tørr*. Våte sprekker viser tydelig at vann renner ut av sprekkeåpningen, mens fuktige sprekker har tegn til vann, som f.eks. fuktig bergart rundt sprekken eller vekst av mose og gress.



Figur 2-9. Skjematiske bilder av sprekke-egenskaper som var målt i felt.

2.2.3 Sprekke analyser

Alle sprekkemålinger var analysert i plotteverktøyene DIPS TM og Orient (Vollmer, 1990). Terazghi vektning var brukt på SL-lokaliteter for å korrigere mot underrepresentasjon av sprekker i forhold til profil-retning. CM-lokaliteter har ingen informasjon om retning målingen ble tatt ved, så vektning var ikke mulig. Manuelt avledede grupperinger ble bestemt i DIPS for SL-lokaliteter. Statistisk deriverte 'cluster-analyser' ble gjort for lokaliteter hvor det var for mye spredning i data. Vi brukte 'axis cluster partitioning' i Orient for å definere cluster-grupperinger basert på avstand fra den gjennomsnittlige orienteringen til sprekkeene ved følgende formel:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m P_k n_k$$

Hvor P_k er eigenvalue index of orientation tensor, k er cluster domain, n er antall data og n_k er antall i domain k (Vollmer, 1990).

Vi beregnet den gjennomsnittlige orienteringen for hvert sprekkesett og for de ulike sprekkeegenskapene (vanninnhold, utholdenhet og åpningstype). Brudd-frekvens ble beregnet for alle SL-data med hensyn til hoved sprekkesett, utholdenhet, vanninnhold og åpningstype. Bruddtetthet ble kalkulert for hver CM-lokalitet. For data-analyse, besluttet vi å kombinere alle målinger som var åpne (både mer og mindre enn 1 cm åpning) i et samlet datasett.

3. RESULTATER

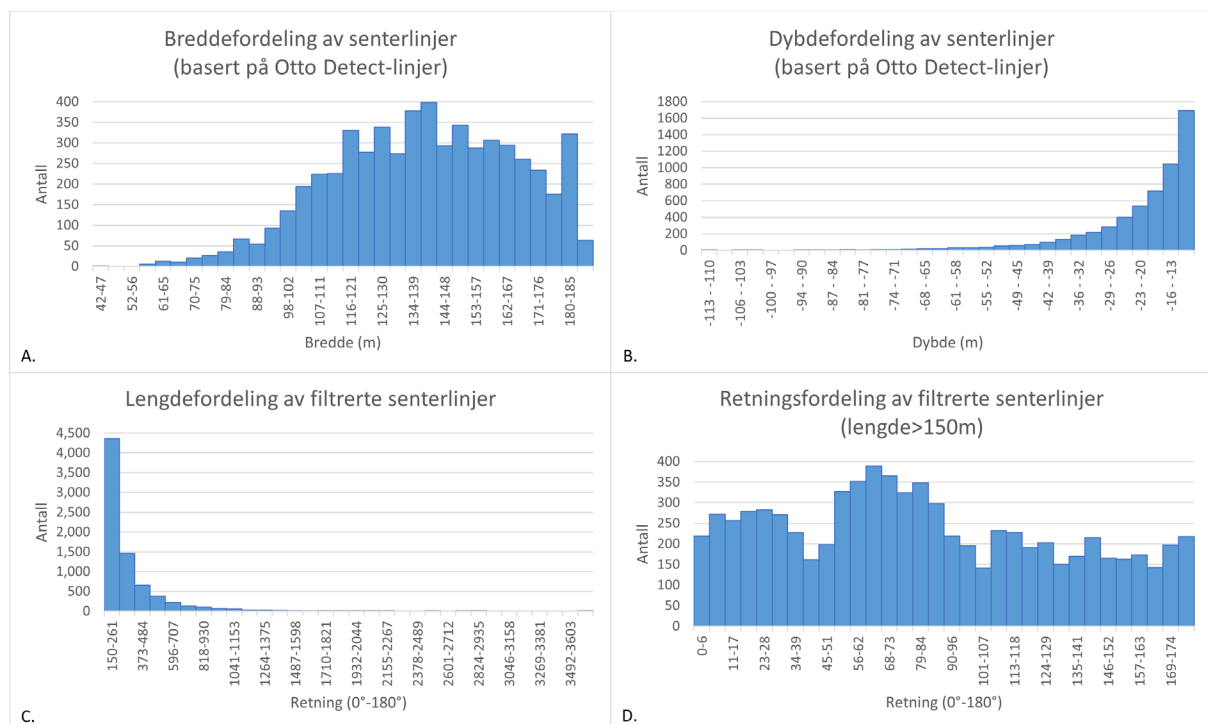
3.1 Otto resultater

Romlige analyser i dette prosjektet er gjort ved lineamentkart (av senterlinjer), symbolisert på ulike vis for å fremheve ulike egenskaper, og kart over lineament-tetthet, for å visualisere hvordan lineamentene opptrer i ulike områder av prosjektområdet. For statistiske analyser av lineamentene ble retningspopulasjoner definert og analysert for bestemte egenskaper. For å senere sammenligne lineament-egenskaper mot sprekke-egenskaper (fra feltobservasjoner), ble lineament-egenskaper som kunne relateres til sprekke-egenskaper fra feltobservasjoner analysert. Lineament-egenskapene analyser for dette formålet var lineamentlengde og lineamentets plassering i forhold til vassdrag.

3.1.1 Statistiske beskrivelser

Otto/senterlinje-attributter – dybde, bredde, lengde og retning

Basert på topografiske data, genererer Otto en rekke attributter som beskriver hvert eneste Otto-lineament. Attributtene ansett som mest relevante i dette prosjektet var dybde, bredde, lengde og retning – og ble tatt med videre i analysen. Når Otto-lineamentene bearbeides med linjesentreringsverktøyet, blir en del av attributtene (deriblant dybde og bredde) dessverre ikke bevart, så vi må bruke Otto Detect data for å analysere attributtene i senterlinjedatasettet. Overrepresentering i Otto-datasettet (som beskrevet i kapittel 2.1.1.2) gjør det krevende å gjennomføre representative statistiske analyser på Otto-datasettet. Med en rekke ArcGIS-operasjoner, kunne vi trekke ut et utvalg Otto-lineamenter for å gi en tilnærmet representativ lengde- og bredde-statistikk for senterlinjene. Lengde og retning er attributter som er bevart gjennom linjesentrering, derfor analyseres disse egenskapene direkte fra senterlinje-datasettet.



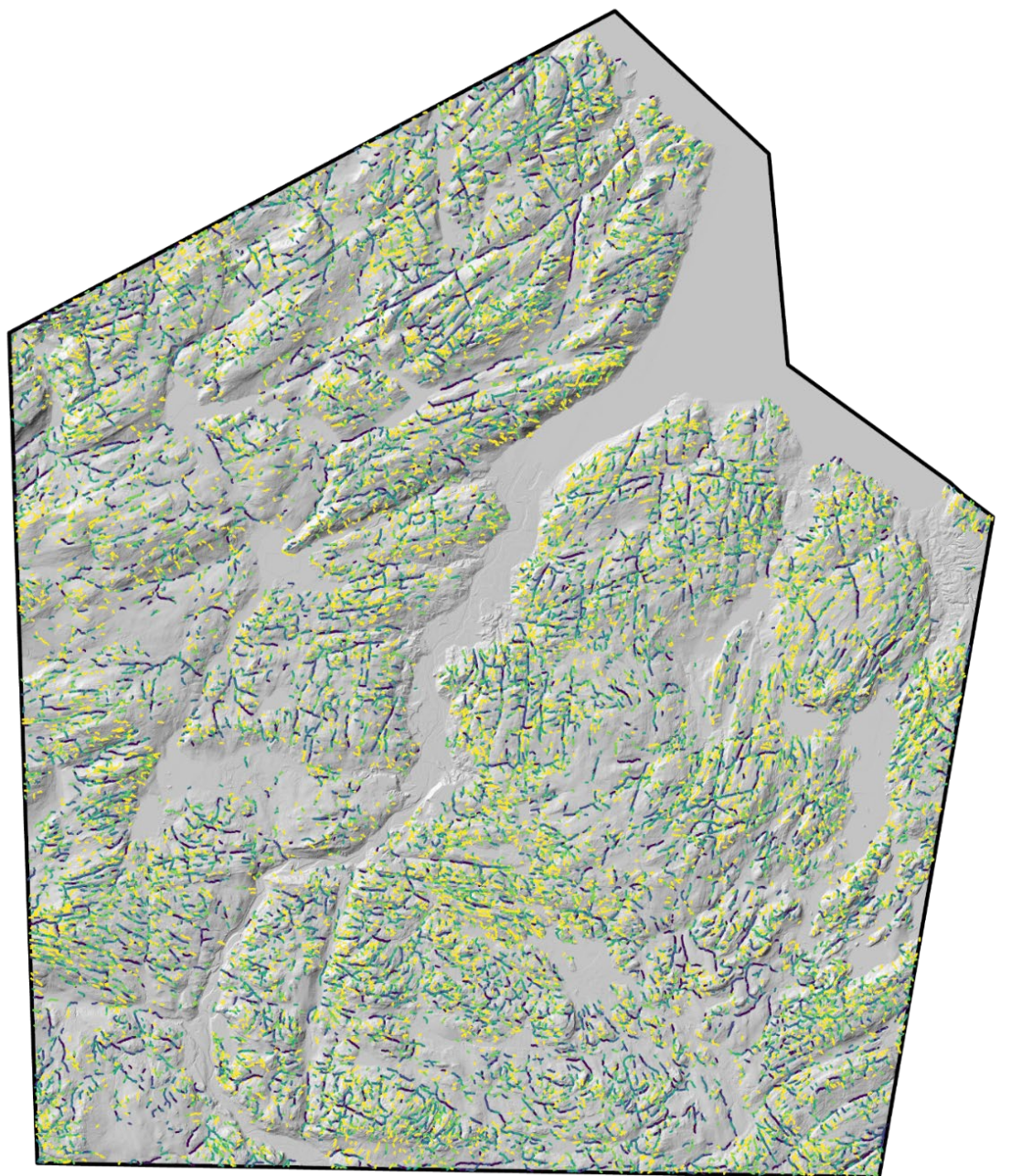
Figur 3-1 Statistiske fordelinger av attributter basert på Otto Detect-datasettet; a) lineamentbredde, b) lineamentdybde, og attributter fra senterlinjedatasettet; c) lineamentlengde og d) lineamentretning

Bredde

Lineamentbredde er analysert på et representativt utvalg fra Otto Detect-datasettet, og gir en gjennomsnittlig bredde på 140 m. Fra Figur 3-1 a. ser vi en noe skjev normalfordeling som viser en viss spredning innenfor datasettet, med et standardavvik på ca. 27 m fra gjennomsnittsbredden.

Dybde

Lineamentdybde er også analysert på et representativt utvalg fra Otto Detect-datasettet, og gir en gjennomsnittlig dybde på -21 m. Fra Figur 3-1 b. ser vi en logaritmisk dybdefordeling, bestående av mange grunne lineamenter og få dype. Datasettet er filtrert med en grense på -10 m dyp, og de grunneste lineamentene i datasettet er derfor på -10 m. Det dypeste lineamentet i datasettet er på -113 m.

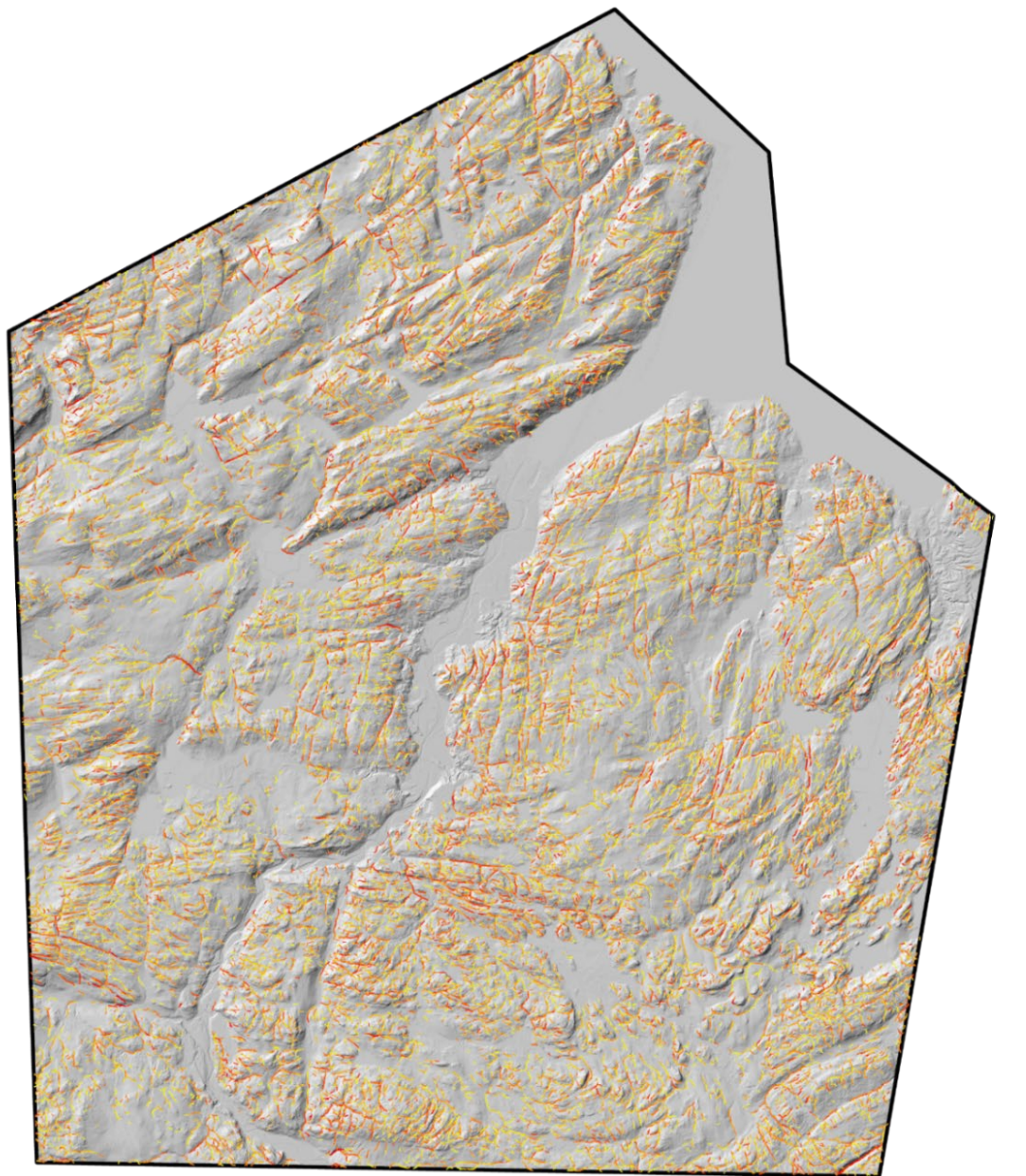


Bredde

- 190 - 190
- 180 - 180
- 160 - 170
- 150 - 150
- 130 - 140
- 49 - 120

0 5 10 km

Figur 3-2. Lineamenter (utvalg av Otto Detect-linjer) klassifisert i henhold til bredde, fra de smaleste (49 m) i gult til de bredeste (190 m) i lilla. Fargeskalaen er bestemt ut ifra den statistiske fordelingen til bredden, derfor har de smaleste 'klassene' et større intervall enn de brede 'klassene'. Dette ble gjort for å tydeliggjøre de få brede lineamentene, og dempe de mange smale lineamentene.



Dybde

- -130 m til -58 m
- -58 m til -29 m
- -29 m til -17 m
- -17 m til -12 m
- -12 m til -10 m

0 5 10 km

Figur 3-3. Lineamenter (utvalg av Otto Detect-linjer) klassifisert i henhold til dybde, fra de grunneste (-10 m fra overflaten) i gult til de dypeste (-130 m fra overflaten) i rødt. Fargeskalaen er bestemt ut ifra den logaritmiske fordelingen til dybden, derfor har de grunneste 'klassene' et mindre intervall enn de dypere 'klassene'. Dette ble gjort for å tydeliggjøre de få dype senterlinjene, og dempe de mange grunne senterlinjene.

Lengde

Lengden til senterlinjene i datasettet følger en logaritmisk fordeling (Figur 3-1 c.), som er en typisk lengdefordeling for bruddstrukturer (Priest og Hudson, 1981). Den lengste senterlinjen

er 3714,6 m og de korteste er 150 m (lik nedre grense på lengdefilter). Gjennomsnittlig senterlinjelengde er på ca. 323 m. Det er viktig å understreke at senterlinje-lengde ikke *nødvendigvis* representerer sann lineamentlengde, siden ett lineament kan være satt sammen av flere segmenter. Til tross for dette, gir målte senterlinjelengde en god generell beskrivelse av lineamentlengde i prosjektområdet, og kan brukes for videre analyser. Et ‘oppstykket’ lineament bestående av flere korte senterlinjer, representerer sannsynligvis lineamenter eller sprekker med lite kontinuitet, mens lange senterlinjer representerer sannsynligvis mer gjennomgående lineamenter med større grad av kontinuitet – noe som gir verdifull informasjon for videre analyse av lineamentegenskaper som kan sammenlignes med sprekkeegenskaper (fra felt).

Retning

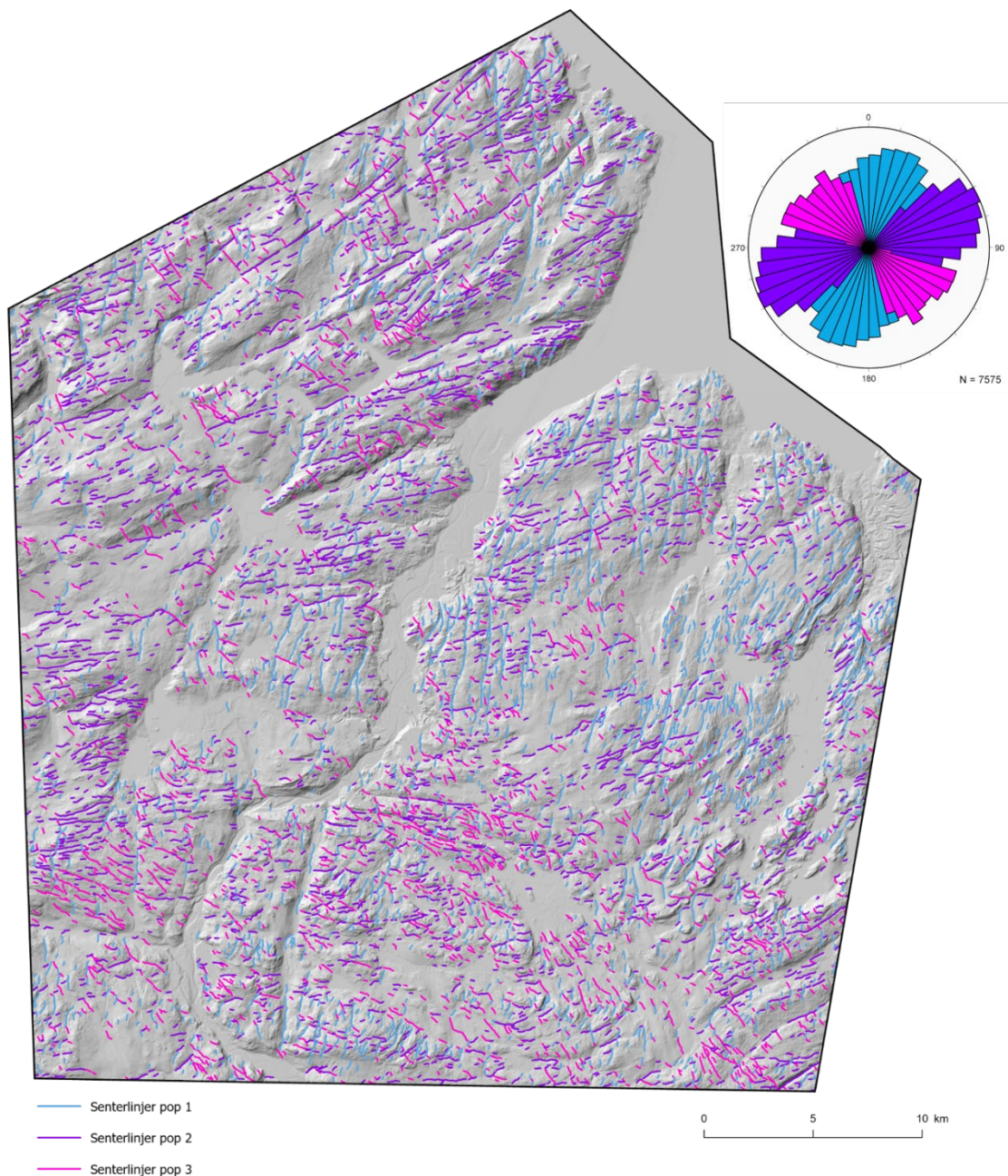
Det filtrerte senterlinjedatasettet (Figur 2-5) inneholder en relativt stor spredning av senterlinjeretning – selv om spredningen er betydelig redusert gjennom filtrering. Likevel, viser retningsfordelingen at enkelte retninger er mer dominerende enn andre – dette gjelder spesielt retninger rundt 15° og 72° (to markante høyder i venstre del av Figur 3-1 d.). Senterlinjeretninger mellom 104° og 166° viser en fordeling som er mindre konsentrert, men som likevel inneholder en betydelig andel senterlinjer.

Basert på de tydeligste bunnpunktene i fordelingen, kan vi definere tre populasjoner (Tabell 3-1). Muligheten for å dele populasjon 3 i to (en fra 104° til 132°, og en fra 132° til 166°) ble vurdert, men ved en visuell analyse av senterlinjene utvalgte steder i prosjektområdet var det ikke grunnlag for oppdeling. Senere i rapporten blir det beskrevet analyser for bestemte sub-sett av datasettet, utvalgt på relevante kriterier. Disse sub-settene vil konsekvent beskrives med de populasjon 1, 2 og 3 som utgangspunkt.

Statistiske analyser av de tre populasjonene hver for seg, er interessant for å undersøke om det finnes andre egenskaper enn kun retning knyttet til de ulike populasjonene. For hver populasjon ble attributtene lengde, dybde og bredde og antall senterlinjer analysert (oppsummert i Tabell 3-1). Denne analysen viser en viss forskjell i antall senterlinjer i populasjonene, der populasjon 2 dominerer med 3175 senterlinjer, mens populasjon 1 og 3 har et lavere antall senterlinjer, på henholdsvis 2359 og 2041. Gjennomsnittlig lengde viser også forskjell mellom de ulike populasjonene, den populasjon 3 utpeker seg med lavest gjennomsnittslengde på 293 m, mens populasjon 1 og 2 har relativt like gjennomsnittslengder på henholdsvis 334 m og 327 m. Gjennomsnitt-dybde og -bredde viser imidlertid bemerkelsesverdig lite variasjon mellom de tre populasjonene.

Tabell 3-1. Retningsbestemte senterlinjepopulasjoner, med tilhørende attributt-statistikk. Merk: siden vi måler retninger fra 0°–180° gir dette noe utslag i betegnelsen på intervallet på populasjon 1 på 166°–42°, som i praksis betyr retninger mellom 166°–180° og 0°–42°.

Retningsbestemt populasjon	Retning (0°–180°)	Gjennomsnitts-retning	Antall senterlinjer	Gjennomsnitts-lengde	Gjennomsnittsdybde	Gjennomsnittsbredde
Populasjon 1	166°–42° (NNØ–SSV)	15°	2359	334 m	-22 m	142 m
Populasjon 2	42°–104° (NØ–SV)	72°	3175	327 m	-21 m	137 m
Populasjon 3	104°–166° (NV–SØ)	134°	2041	293 m	-20 m	141 m



Figur 3-4. Senterlinjer farget i forhold til retningspopulasjoner; populasjon 1 i blått, populasjon 2 i lilla og populasjon 3 i rosa. Rosediagram av senterlinjer viser fordeling av retningsbestemte lineamentpopulasjoner, og er farget på samme vis som lineamentkartet.

3.1.2 Romlig fordeling

Linjetetthet

For å vurdere hvordan den romlige fordelingen av lineamenter varierer innenfor prosjektområdet, kan lineamentkartene (Figur 3-4, Figur 2-5) benyttes. En annen tydelig måte å visualisere den romlige fordelingen er å plote linjetetthet av senterlinjene i kartplanet. Linjetetthet av hele det filtrerte senterlinjedasettet (Figur 3-5 a) viser enkelte områder med høyere linjetetthet, men relativt sett en nokså jevn fordeling. Merk at siden vannflater og

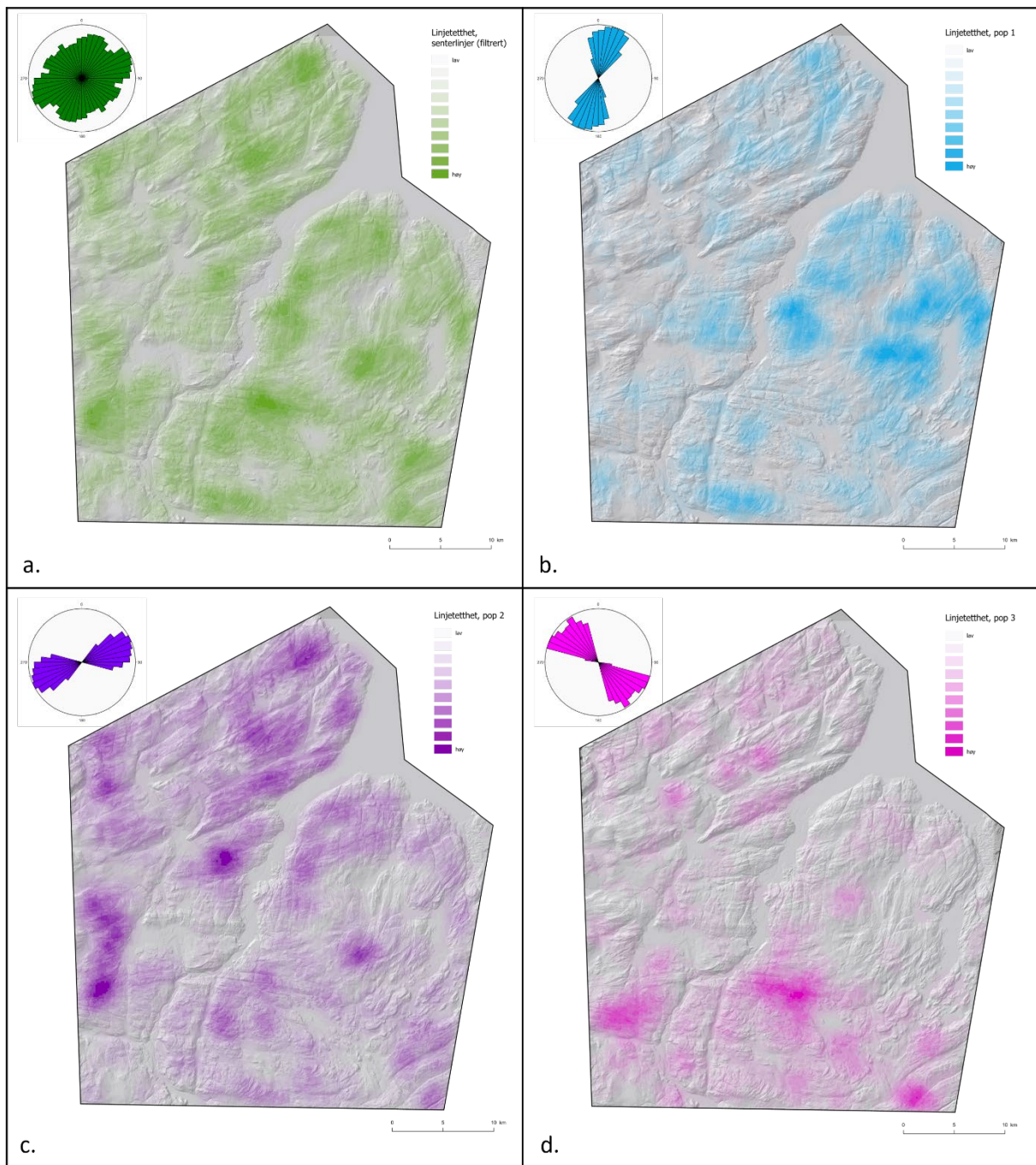
områder med løsmasseoverdekning ikke inneholder senterlinjer, vises disse områdene som 'lav tetthet', og gir dermed et uttrykk for større variasjon enn det som faktisk eksisterer i berggrunnen. Områder med høyt antall korte linjestykker også kan få et falskt positivt utslag på linjetetthet.

Tetthetsfordelingen til de retningsbaserte populasjonene viser derimot større romlig variasjon (Figur 3-5) Populasjon 1, med sine NNØ–SSV-orienterte senterlinjer, dominerer i sentrale til østlige områder – spesielt øst for Orkla (Figur 3-5 b). Populasjon 2, med sine NØ–SV-orienterte senterlinjer, dominerer i østlige og nordvestlige deler av prosjektområdet, og har for øvrig en høyere gjennomgående tetthet over hele prosjektområdet (Figur 3-5 c). Populasjon 3, med sine NV–SØ-orienterte senterlinjer, har en gjennomgående lav tetthet innenfor prosjektområdet, med en noe høyere tetthet i sørlige områder (Figur 3-5 d).

Området rundt Orkla er av stor relevans i dette prosjektet, og det er derfor interessant å vite hvordan fordelingen av lineamenter er i tilgrensende områder. Betrakter vi hele senterlinjedatasettet (Figur 3-5 a), ser vi en høyere tetthet av senterlinjer på østsiden av Orkla sammenlignet med vestsiden av Orkla. Ved å se på tetthetsfordelingen av populasjonene hver for seg (Figur 3-5 b-d) er det tydelig dominans av populasjon 1 senterlinjer på østsiden av Orkla, og en viss tilstedeværelse av populasjon 2 senterlinjer. Vestsiden er preget av motsatt trend, en dominans av populasjon 2 senterlinjer, og en viss tilstedeværelse av populasjon 1 senterlinjer. Populasjon 3 senterlinjer er bemerkelsesverdig lite representert både på østlig og vestlig side av Orkla.

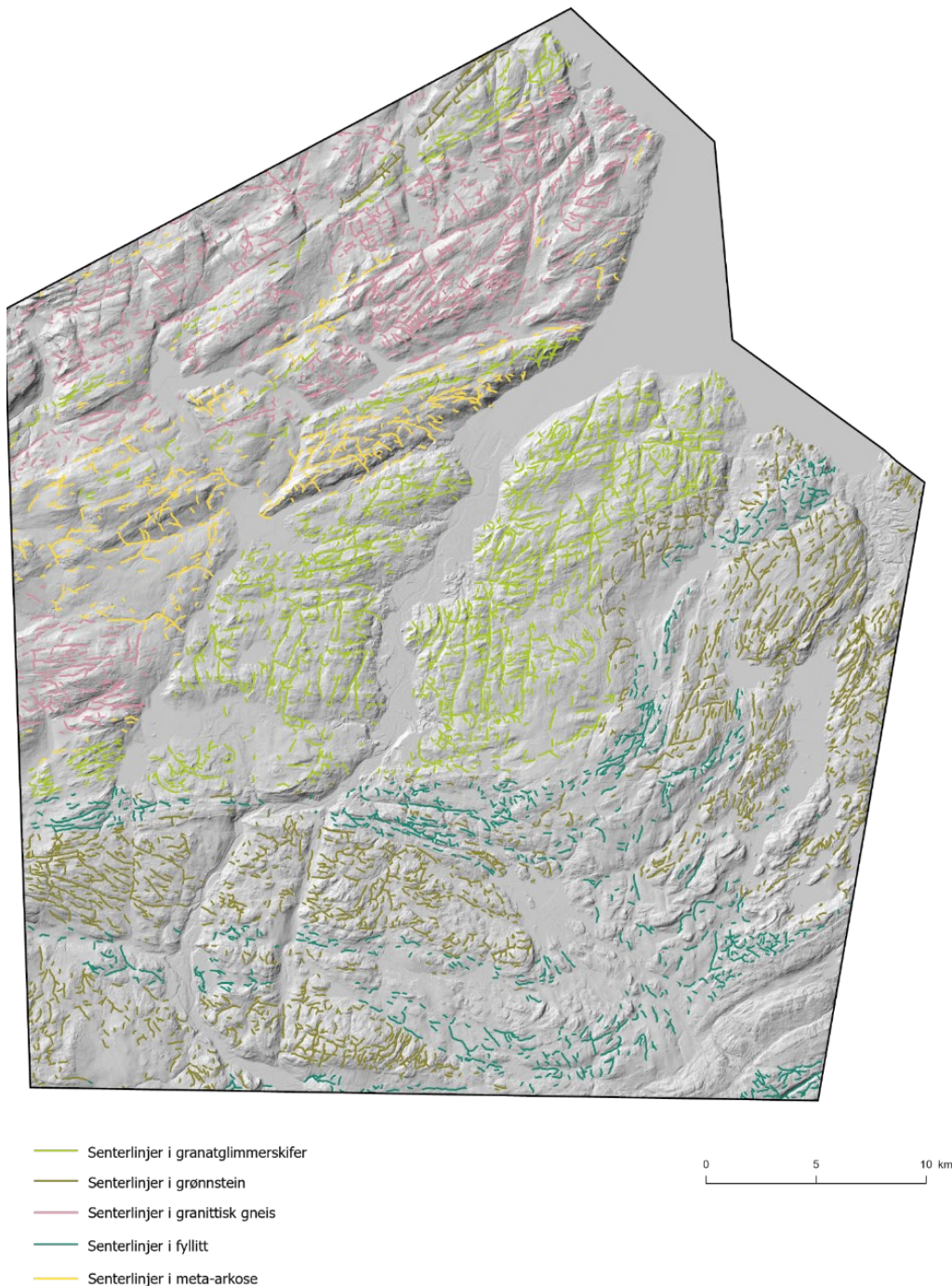
Lineamenter og bergartstype

For å undersøke om lineamentegenskaper varierte med bergartstype, analyserte vi senterlinjene i henhold til hvilken hovedbergart de befinner seg i. Senterlinjene ble delt i undergrupper basert på berggrunnstype for å undersøke om det er statisk variasjon fra forskjellige bergartstyper i studieområdet. Ifølge NGUs berggrunnkart i målestokk 1:250 000, er det fem ulike hovedbergarter som dominerer innenfor prosjektområdet; granatglimmerskifer, grønnstein, granittisk gneis, fyllitt og meta-arkose. Analyser av retningsfordeling og lengdefordeling er gjort for hver undergruppe, og er oppsummert i Figur 3-7 og Tabell 3-2.

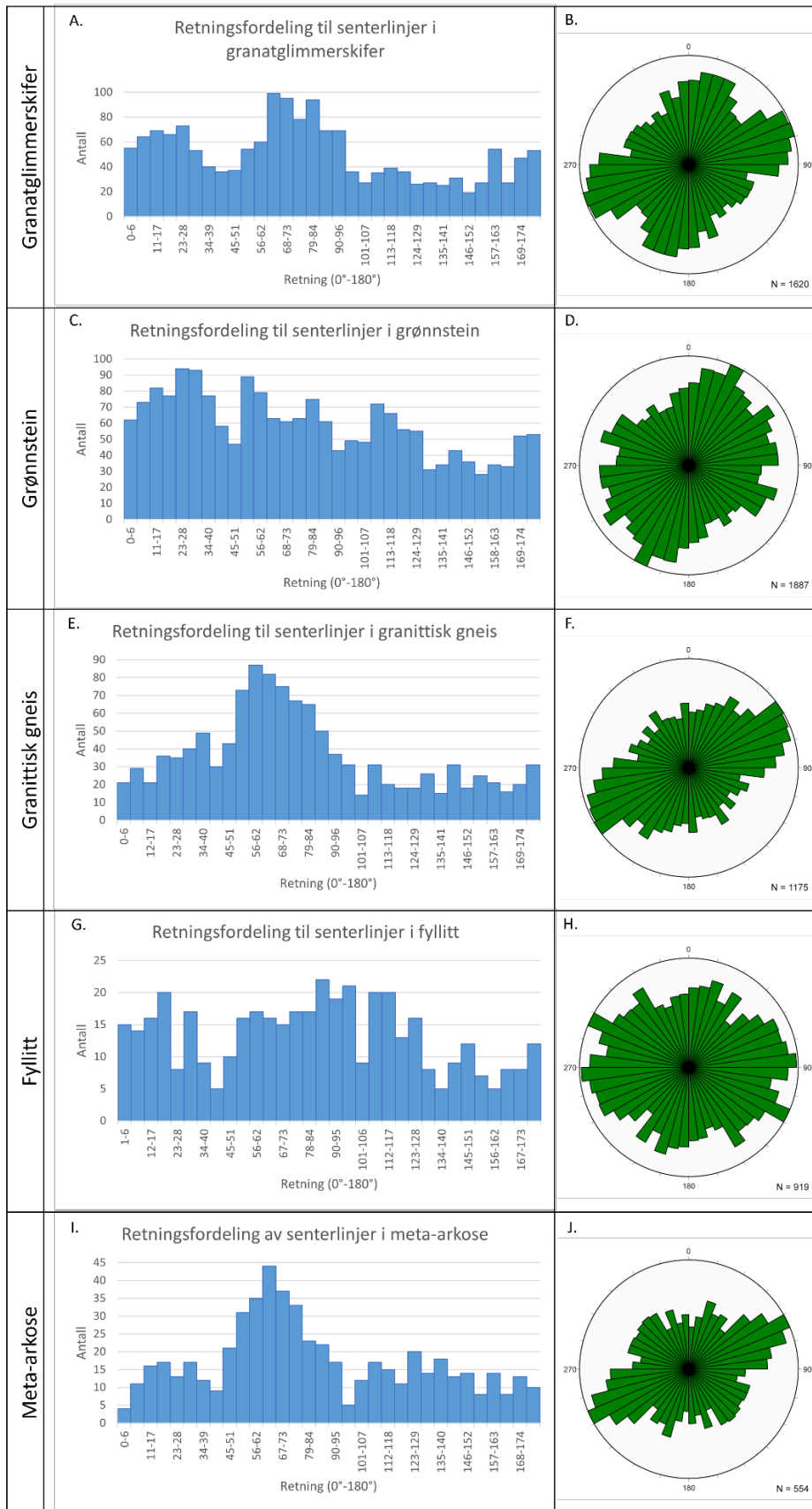


Figur 3-5. Lineament tetthet for alle lineamenter (a), lineamentpopulasjon 1 (b), lineamentpopulasjon 2 (c) og lineamentpopulasjon 3 (d). Rosediagrammer viser retningen til hver lineamentpopulasjon.

Retningsfordeling varierer tydelig med de ulike hovedbergartene. Senterlinjer i områder av fyllitt og grønnstein har stor spredning i retningsfordeling gjennom alle tre populasjoner, mens senterlinjer i områder av granittisk gneis og meta-arkose har en tydelig dominans av populasjon 2. Senterlinjer innenfor områder av granatglimmerskifer har en retningsfordeling som er svært lik retningsfordelingen for senterlinjedatasettet som helhet.



Figur 3-6. Senterlinjer farget i henhold til hvilken hovedbergart de opptrer innenfor, basert på NGUs berggrunnskart i målestokk 1:250 000 (www.ngu.no).



Figur 3-7. Retningsfordelinger av senterlinjer gruppert i henhold til hovedbergart (inndeling vist i Figur 3-6). Granittisk gneis og meta-arkose inneholder hovedsakelig av populasjon 2 lineamenter, mens grønnstein og fyllitt inneholder lineamenter med større spredning i retning. Granatglimmerskiferen inneholder lineamenter med en retningsfordeling som ligner på fordelingen vi ser i hele datasettet (Figur 3-1 d)

Tabell 3-2. Oppsummering av dominerende populasjoner, gjennomsnittslengde og antall senterlinjer for hver senterlinje-gruppering i henhold til bergartstype.

Hovedbergart	Dominerende retningspopulasjon(er)	Gjennomsnittslengde	Antall senterlinjer
Granat-glimmerskifer	Populasjon 2	332 m	1620
Grønnstein	Populasjon 1, populasjon 2, (populasjon 3)	302 m	1887
Granittisk gneis	Populasjon 2	328 m	1175
Fyllitt	Populasjon 2, populasjon 3	311 m	919
Meta-arkose	Populasjon 2	312 m	554

3.1.3 Sprekke-egenskaper og karakterisering av lineamenter

I felt ble bruddstrukturer karakterisert ut ifra tre egenskaper: 1) utholdenhet, 2) sprekkåpning og 3) vanninnhold. For at lineamentdata og felldata skal kunne sammenlignes og vurderes på tilsvarende grunnlag, har vi benyttet senterlinje-attributter som kan sammenlignes med sprekk-egenskaper (Tabell 3-3). Lineamentlengde blir sammenlignet med sprekk-utholdenhet, og romlig plassering i forhold til vassdrag (elver og bekker) blir sammenlignet med vanninnhold i sprekker.

Tabell 3-3. Oppsummering av hvordan senterlinje-attributter sammenlignes med sprekk-egenskaper.

Sprekke-egenskap		Senterlinje-attributt
utholdenhet	gjennomgående	Linjelengde > 325 m
	begrenset	Linjelengde < 325 m
vanninnhold	våt	Senterlinjer med segmenter >60m som sammenfaller med elv og bekk
	tørr	Senterlinjer som <i>ikke</i> sammenfaller med elv og bekk

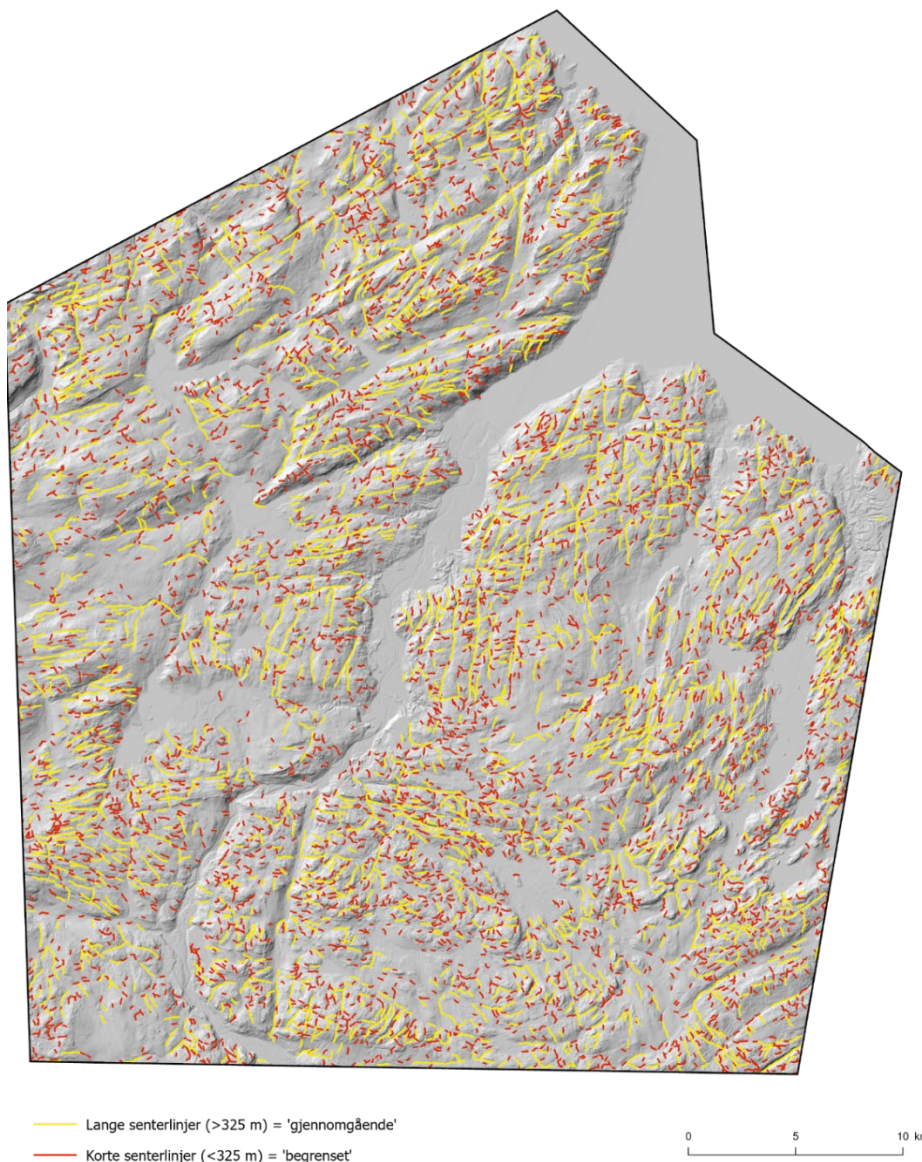
Lineamentlengde

For å kunne beskrive lineamenter i henhold til utholdenhet, samt danne et grunnlag for sammenligning mot sprekk-egenskaper (fra felt), ble senterlinjelengde brukt. Gjennomsnittlig lengde for hele senterlinjedatasettet er 323,4 m (Figur 3-1), og ved avrunding opp til 325 m ble dette brukt for å klassifisere senterlinjer som korte eller lange (Figur 3-8). Lange senterlinjer sammenlignes med sprekker klassifisert som gjennomgående, og korte senterlinjer sammenlignes med sprekker klassifisert som begrenset.

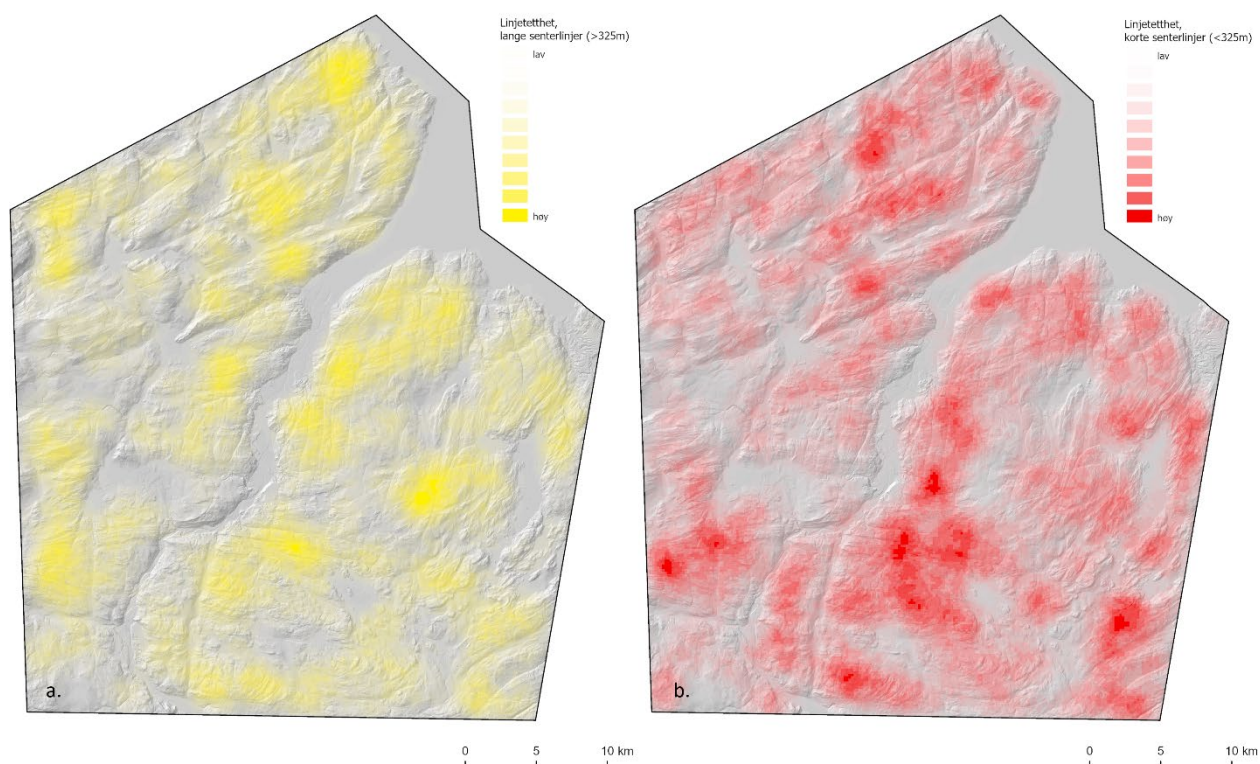
Senterlinjetetthet som vist i Figur 3-9 viser noe, men ikke utpreget, forskjell mellom de korte og de lange senterlinjene. I sørøstlig del av prosjektområdet er det høy tetthet av korte senterlinjer, og lavere tetthet (relativt sett) av lange senterlinjer. I sentrale deler, spesielt rundt Orkla, er det generelt en høyere tetthet av de lange senterlinjene enn de korte. Denne forskjellen utpreger seg spesielt på vestsiden av Orkla. De lange senterlinjene har relativt lik tetthet på vestsiden og østsiden av Orkla, mens de korte senterlinjene har merkbart høyere

tetthet på østsiden enn på vestsiden. Enkelte områder viser en høyere tetthet av de korte lineamentene sammenlignet med de lange – dette er tydeligst ved Monsetgrenda og ved Thamshamn.

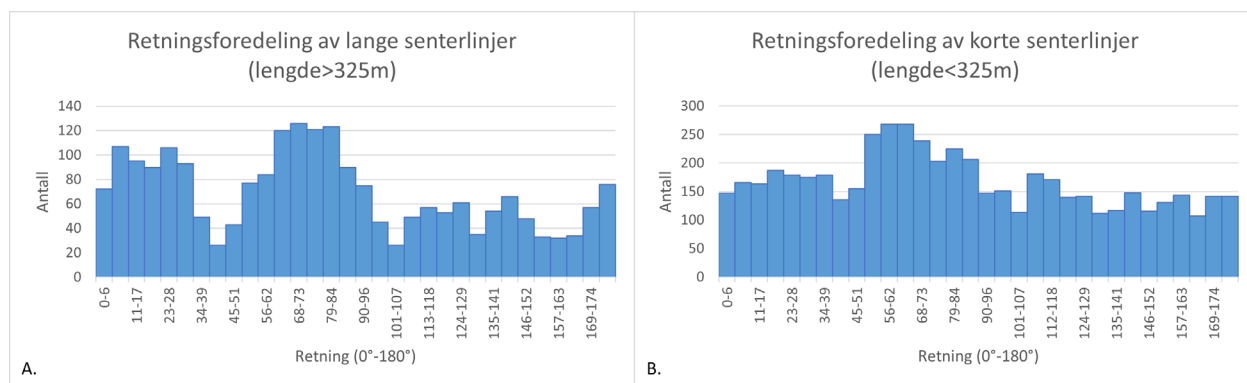
Retningsfordelingen til de lange og de korte senterlinjene viser de samme tre populasjonene hele senterlinje datasettet består av (Figur 3-1, Figur 3-1 og Figur 3-4). De korte lineamentene viser generelt mer spredning, og mindre distinkte populasjoner enn de lange. I tillegg er det flere antall korte (5352) enn lange (2223) senterlinjer, noe som statistisk sett kan medføre større spredning. Populasjon 1 og 2 dominerer tydelig i de lange senterlinjene, mens populasjon 3 viser en sterk tilstedeværelse (på nivå med populasjon 2) i de korte senterlinjene. Sett i sammenheng med gjennomsnittlig lengde på ulike retningspopulasjonene (Tabell 3-1), samsvarer dette resultatet godt med kort gjennomsnittslengde i populasjon 3.



Figur 3-8. Senterlinjer klassifisert i forhold til lengde, med de korte linjene i gult og de lange linjene i rødt. Grensen mellom korte og lange senterlinjer ble bestemt fra den gjennomsnittlige lengden til det filtrerte senterlinje-datasettet.



Figur 3-9. Senterlinje-tetthetsplott for lange senterlinjer (a) og korte senterlinjer (b). Svak farge viser lav senterlinje-tetthet, mens sterk farge viser høy tetthet.



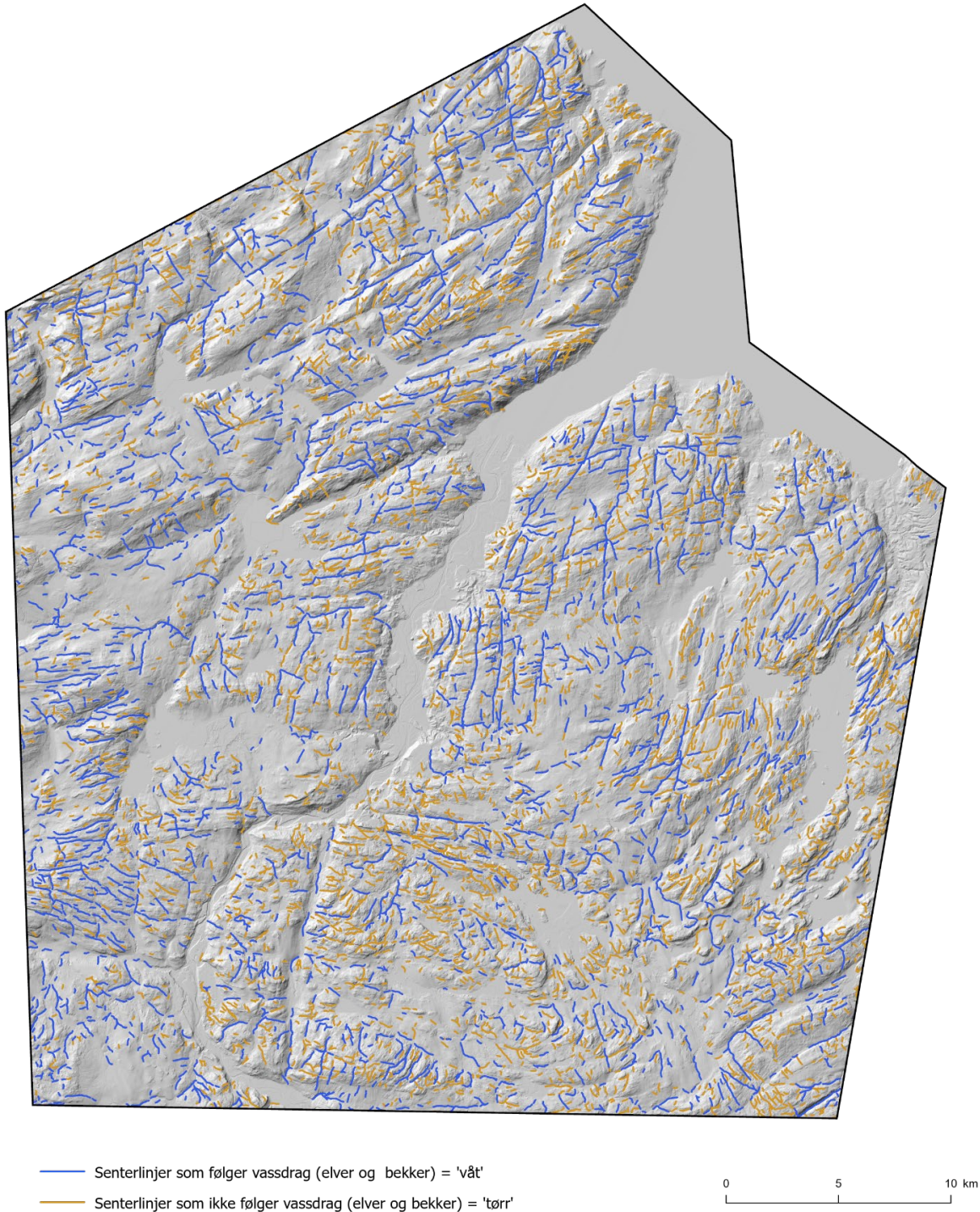
Figur 3-10. Retningsfordelingen av de lange senterlinjene (A.) og de korte senterlinjene (B.) fra 0° til 180°.

Vanninnhold

Vi ønsker å finne ut hvordan vi kan bruke lineamentdatasettet til å predikere om et lineament representerer en vannførende bruddstruktur eller ei. For å undersøke dette, antar vi at lineamenter som sammenfaller med elver og bekker, representerer bruddstrukturer som er vannførende i dyptet. Med dette som bakgrunn, delte vi senterlinjedatasettet inn i senterlinjer som sammenfaller med elver og bekker ('våte' lineamenter) og senterlinjer som ikke sammenfaller med elver og bekker ('tørre' lineamenter).

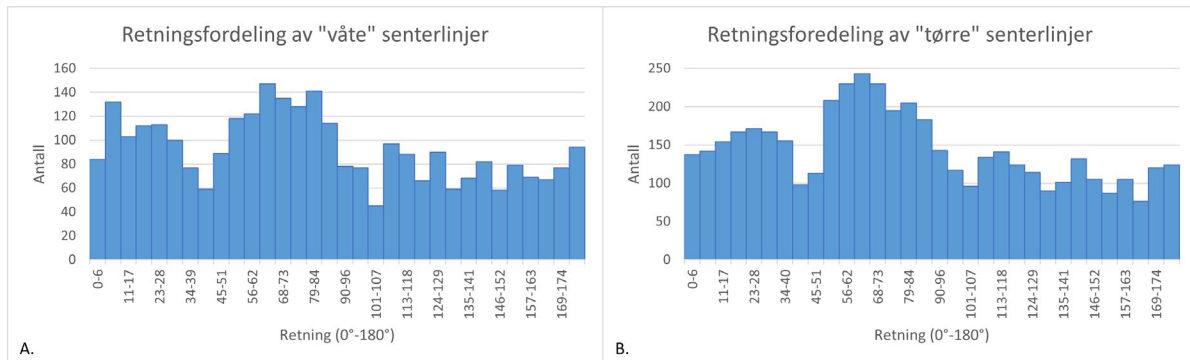
Alle senterlinjer som består av segmenter på minst 60 m-lengde som følger elver eller bekker ble selektert, og klassifisert som 'våte' lineamenter. Gjenværende senterlinjer ble klassifisert som 'tørre' lineamenter. Seleksjonen ble gjort med en buffer på 10 m rundt elver og bekker,

siden senterlinjer sjelden ligger nøyaktig plassert på elver og bekker, selv om de i praksis følger vassdraget. Vi testet forskjellige buffer-verdier og grenser for segment-lengde, der segment-lengde på 60 m og buffer på 20 m ble vurdert til å gi best mulig seleksjon av senterlinjer som følger og ikke følger elver og bekker. Seleksjonen er vist i Figur 3-11, med 'våte' lineamenter i blått og 'tørre' lineamenter i oransje.



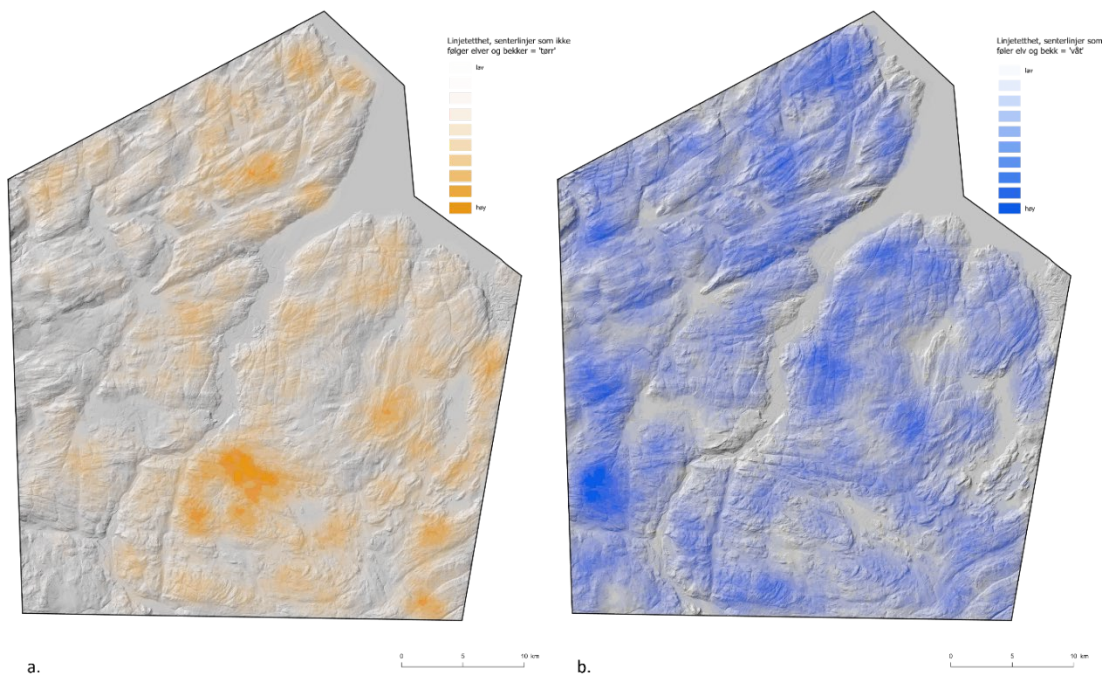
Figur 3-11. Senterlinjer klassifisert i henhold til sammenfall med vassdrag (elv og bekk datasett i målestokk 1:50 000 fra Norges Kartverk, www.kartverket.no). Blå linjer viser 'våte' senterlinjer som sammenfaller med elver og bekker (sammenfallende segmenter på minst 60 m), mens de oransje linjene viser 'tørre' senterlinjer som ikke sammenfaller med elver og bekker.

Retningsfordelingen til både de 'våte' og 'tørre' senterlinjene er relativt lik retningsfordelingen til hele senterlinjedatasettet, med populasjon 1, 2 og 3 til stede (Figur 3-12 og Figur 3-1 d). Populasjon 1 (NNØ-SSV) og 2 (Ø-V) er noe sterkere representert blant de 'våte' senterlinjene. Lineamentlengde er en parameter som statistisk sett er knyttet til lineamentenes vannføring, der de 'tørre' senterlinje har en kortere lengde, med gjennomsnitt på 258 m, mens de 'våte' har en gjennomsnittslengde på 424 m. Statistisk sett har lange senterlinjer en større sannsynlighet for å inneholde segmenter (over 60 m) som sammenfaller med elver eller bekker, så den kan påvirke forhold mellom lineamentlengde og vanninnhold.



Figur 3-12. Retningsfordelinger for senterlinjer som sammenfaller med elv og bekk (klassifisert som 'våte') (A.) og for senterlinjer som ikke sammenfaller elv og bekk (klassifisert som 'tørre').

Generelt er det en betydelig høyere tetthet av de 'våte' lineamentene enn de 'tørre' (Figur 3-13) i studieområdet, noe som antagelig delvis henger sammen med at de 'våte' lineamentene generelt er lengre enn de 'tørre'. Selv om de 'våte' dominerer over de 'tørre' på generell basis, viser området sørøst for Orkla, rundt Løkken, en tydelig høyere tetthet av 'tørre' lineamenter. Andre områder viser en utpreget dominans av 'våte' lineamenter; i nordvest, vest og på østsiden av Orkla.



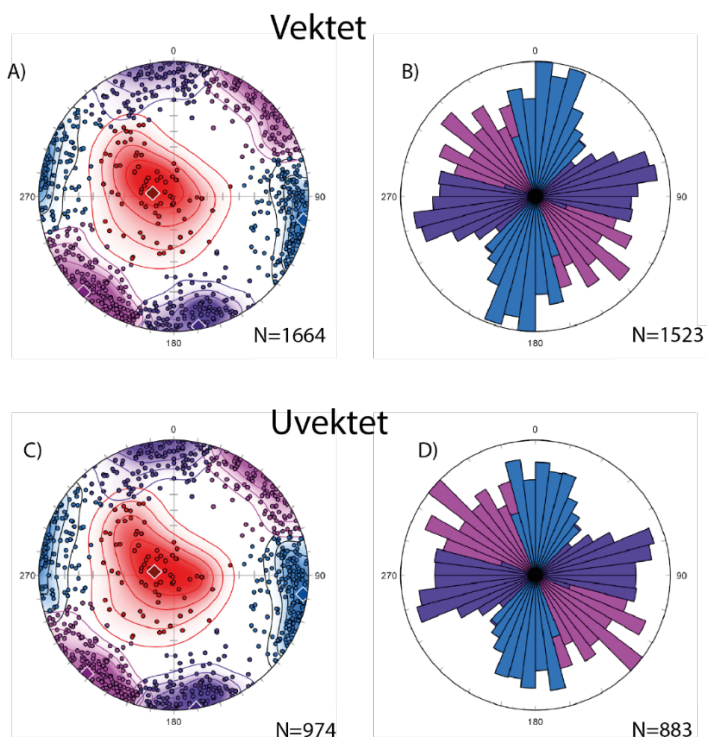
Figur 3-13. Senterlinje-tetthet for (a.) 'tørre' og (b.) 'våte' lineamenter. Svak farge viser områder med lav senterlinje-tetthet, mens områder med sterk farge viser områder med høy senterlinje-tetthet.

3.2 Felt Analyser

3.2.1 Hoved sprekkeseett

Det er stor spredning i sprekke-dataene og umiddelbart fant vi ingen åpenbar gruppering av sprekker. For å finne sprekkeseett analyserte vi derfor data fra de to metodene (CM og SL) hver for seg. I SL-datasettet registrerte vi fire sprekkeseett, mens vi i CM-datasettet registrerte fem sprekkeseett (Figur 3-14, Figur 3-15, Tabell 3-4, Tabell 3-5). Det var mulig å gruppere CM-data i fire sprekkeseett, men fra rose-diagrammer og cluster-analyser var det tydelig at fem sprekkeseett passet best. Et lavvinklet sprekkeseett ble registrert i både SL- og CM-data med sprekker med varierende strøkretning. I SL-datasettet ble det identifisert distinkte sprekkeseett med strøkretningene N-S, Ø-V og NV-SØ, i tillegg til det lavvinklede sprekkesettet (Tabell 3-4, Figur 3-14). De gjennomsnittlige orienteringene av sprekkeseett i CM-lokaliteter samsvarer generelt godt med sprekkeseett i SL-lokaliteter. CM-sprekkesett viser stor spredning, men vi kan allikevel identifisere distinkte sprekkeseett med strøkretningene N-S, NØ-SV, Ø-V, og NV-SØ, i tillegg til det lavvinklede sprekkesettet (Tabell 3-5, Figur 3-14). Selv om sprekkesettet orientert NØ-SV ikke er mulig å skille ut i SL-datasettet som helhet, er det identifisert i enkelte SL-lokaliteter (SL3 og SL9), trolig som roterte sprekker av Ø-V sprekkesettet.

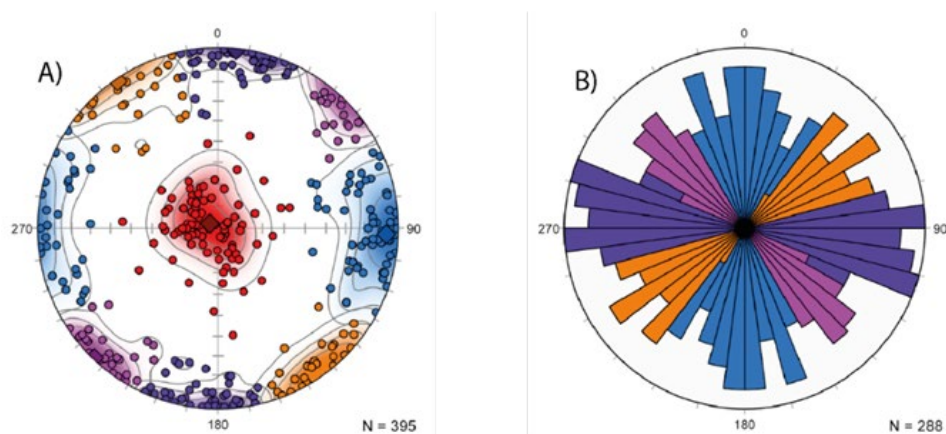
De vektete og uvektede gjennomsnittlige orienteringene for de fire sprekkeseettene i SL-datasettet er oppgitt i Tabell 3-4. Med vekting, utgjør N-S sprekkesettet det dominerende sprekkesettet, mens Ø-V sprekkesettet dominerer i uvektet data. Som diskutert i metoder, kan vi bruke vekting kun på SL-data. De fem sprekkeseettene i CM-data er oppgitt i Tabell 3-5. I CM-datasettet er det dominerende sprekkesettet nærmest horisontalt (Tabell 3-5), og eksisterer i nesten alle CM-lokaliteter. CM-metoden egner seg bedre enn SL-metoden for registrering av horisontale sprekker, og kan være en årsak til at horisontale sprekker er sterkere representert i CM-datasettet enn i SL-datasettet.



Figur 3-14. Equal area pol-tetthetsplott (A, C) og kumulativt rosedigram (B, D) av sprekker fra hele SL-datasettet. Rosediagrammet inneholder ikke horisontale sprekker.

Tabell 3-4. Gjennomsnittlig retning av sprekkeseitt fra SL-data. N er antall målinger.

	Gjennomsnittlige sprekkeseitt orienteringer							
	Sprekkeseitt N-S		Sprekkeseitt Ø-V		Sprekkeseitt NV-SØ		Sprekkeseitt lavvinkel	
	uvektet	vektet	uvektet	vektet	uvektet	vektet	uvektet	vektet
Strøk-fall	188-87	190-88	80-90	259-89	312-87	313-87	9-12	6-13
N	300	597	290	473	298	412	89	182

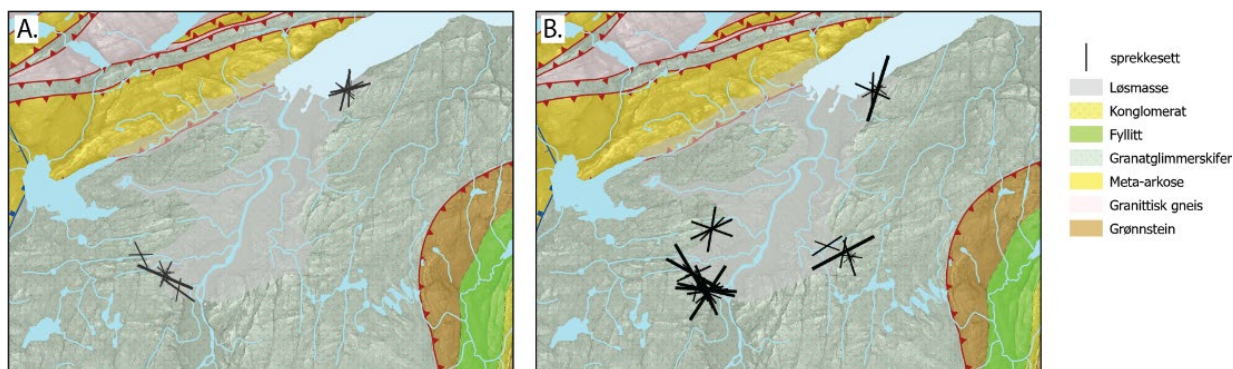


Figur 3-15. Equal area pol-tetthetsplott (a) og kumulativt rosedigram (b) av sprekker fra hele CM-datasettet. Rosediagrammet inneholder ikke horisontale sprekker.

Tabell 3-5. Gjennomsnittlige orienteringer av sprekkeseitt fra alle CM-lokaliteter. Sprekkeseitt 1 har størst antall sprekker og er horisontale.

	sprekkeseitt lavvinkel	sprekkeseitt N-S	sprekkeseitt Ø-V	sprekkeseitt NØ-SV	sprekkeseitt NV-SØ
Strøk-fall	29-4	183-52	118-22	56-88	314-89
N	107	98	91	55	44

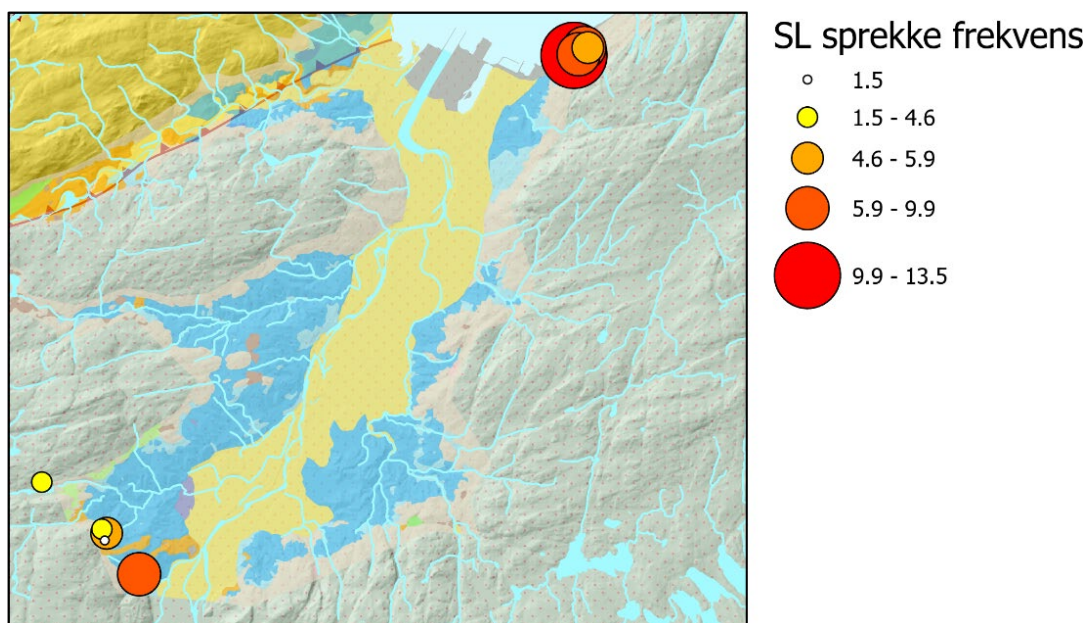
I studieområdet som helhet, med både SL- og CM-data tatt i betraktning, finnes det ikke ett dominerende sprekkeseitt. I tillegg er det en viss variasjon i orientering av sprekkeseitt fra område til område. Minst 2 av de 4 sprekkeseittene finnes i alle SL-lokalitetene, mens i CM-lokalitetene varierer det fullstendig hvilke sprekkeseitt som er representert. Sprekkeseittet med N-S til NNØ-SSV retning er registrert i de fleste lokalitetene, både i SL- og CM-data. Vi ser at SØ-NV sprekkeseittet eksisterer i Skåholt-Kvåle (Figur 3-16), spesielt i SL-data der dette sprekkeseittet dominerer, men også i CM-data. Ved Thamshamn, dominerer N-S sprekkeseittet i CM-data, mens i SL-data er både N-S og ØNØ-VSV sprekkeseitt sterkt representert. I CM-data ved Sundlia dominerer NØ-SV sprekkeseittet (Figur 3-16).



Figur 3-16. Berggrunnskart med vektete sprekkeseett-orienteringer fra hver SL-lokalitet (a) og sprekkeseett-orienteringer fra hver CM-lokalitet (b). Størrelse av symbol er normalisert i forhold til totalt antall sprekker per lokalitet. Horisontale til lavvinklede sprekkeseett (fall $<30^\circ$) er ikke vist.

3.2.2 Sprekkefrekvens og sprekketetthet

For å kvantifisere oppsprekking av berggrunnen har vi beregnet sprekkefrekvens (i SL-lokalitetene) og sprekketetthet (i CM-lokalitetene). Vi utledet sprekkefrekvensen til sprekkeseett med et bevegelig vindu ('moving window') på 10 cm lengde. For CM-lokaliteter var sprekketettheten (sprekker/m³) i utgangspunktet antall sprekker per lokalitet (Tabell 3).



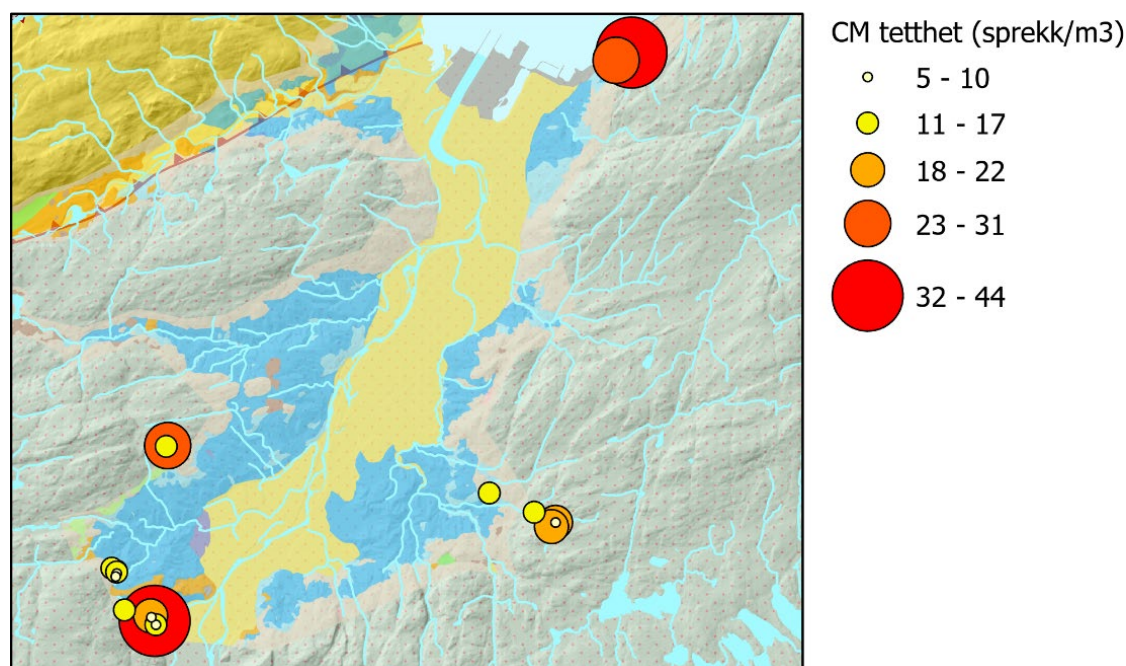
Figur 3-17. Vektet sprekkefrekvens for SL-lokaliteter.

Sprekkefrekvens for uvektet data varierer fra 1,1 til 7,5 sprekker/m. Med vekting, varierer sprekkefrekvens fra 1,4 til 13,5 sprekker/m. Den gjennomsnittlige sprekkefrekvensen i hele studieområdet er 5,3 sprekker/m (uvektet) og 9,8 sprekker/m (vektet). Den høyeste uvektede sprekkefrekvensen er 28 sprekker/m, og ble registrert i SL8 ved Thamshamn. Generelt har SL-lokalitetene i Thamshamn-området høyere sprekkefrekvens enn de fleste lokalitetene i den sørvestlige delen av studieområdet. SL4 ved Kvåle har relativt høy sprekkefrekvens, og er en lokalitet som ligger i nærheten av et gammelt skredkompleks.

Tabell 3-6. Generelle sprekke frekvens fra SL-lokaliteter. N angir antall sprekker.

	uvektet				vektet			
	Gjennomsnittlig sprekke frekvens (sprekke/m)	Standard-avvik	Maks (sprekker/m)	N	Gjennomsnittlig sprekke frekvens (sprekke/m)	Standard-avvik	Maks (sprekker/m)	N
SL1	3.092	2.411	15	107	5.266	4.202	17.082	175
SL2	1.155	1.1014	4	17	1.515	1.47	4.89	22
SL3	2.753	2.433	9	62	4.602	4.27	16.844	99
SL4	3.615	2.742	10	63	7.648	6.049	20.372	133
SL5	2.433	1.760	14	76	4.499	3.934	36.163	136
SL6	5.196	3.878	18	120	7.382	5.677	25.357	172
SL7	3.918	3.913	15	73	5.938	5.721	19.405	109
SL8	7.543	5.268	28	326	13.456	9.393	47.999	567
SL9	5.343	3.483	17	134	9.861	8.055	44.739	243
Alle SL	4.302	3.978	28	977	7.419	7.14	47.999	1664

Sprekkesetetthet fra CM-lokaliteter er også høyest ved Thamshamn og Kvåle. Interessant nok har lokalitetene på den østlige siden av Orkla lavere sprekketetthet enn de andre lokalitetene, til tross for at de ligger i umiddelbar nærhet til et stort Ø-V lineament. Sprekkesetetthet varierer mye, spesielt ved Kvåle, og er trolig relatert til vekslende lag av fyllitt og amfibolitt. Ved Thamshamn og Kvåle er det høy sprekketetthet, mens ved Sundlia er det konsekvent lavere sprekketetthet (Figur 3-18).

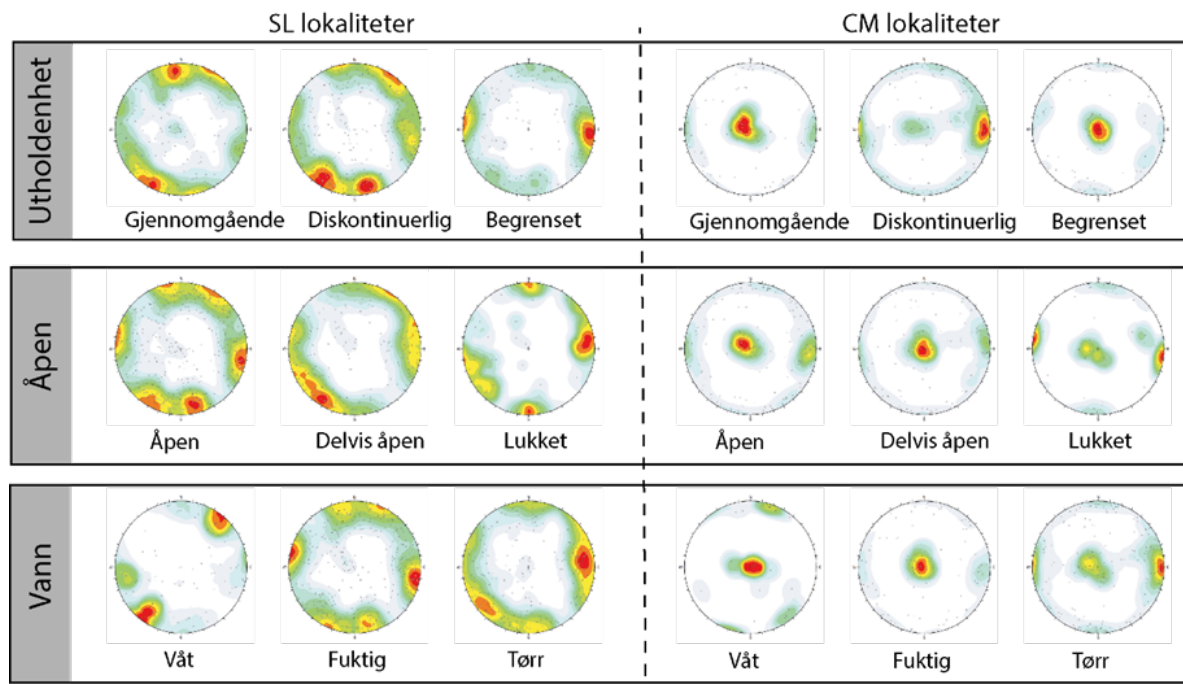


Figur 3-18. Sprekkesetetthet fra alle CM-lokaliteter.

3.2.3 Sprekke-egenskaper

Vi analyserte sprekke-data for å undersøke om sprekke-egenskapene *utholdenhet*, *vanninnhold* og *sprekkeåpning* kan relateres til ett eller flere spesifikke sprekkesett. Kun uvektet data ble brukt til analysene av bruddegenskaper fordi vekting vil gi et feilaktig inntrykk av hvilke

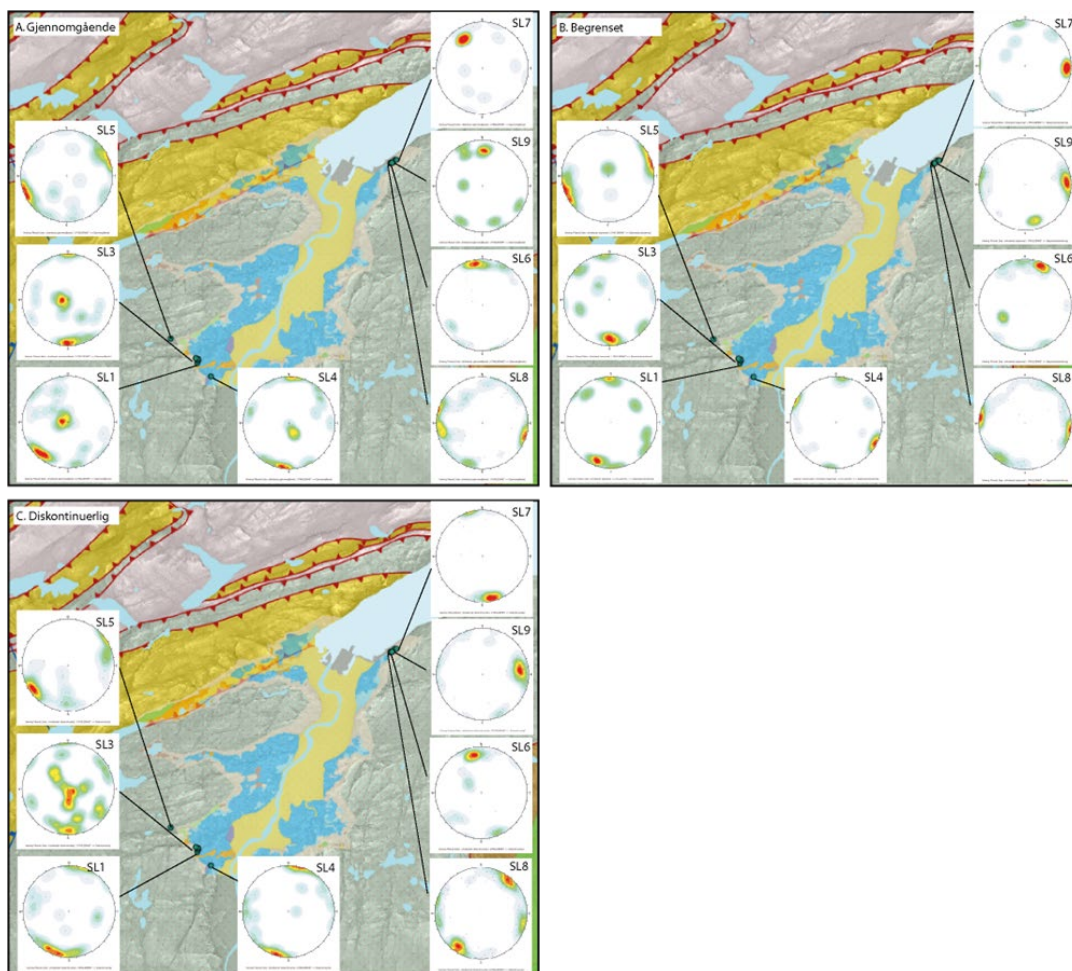
egenskaper som er de viktigste. I tillegg undersøkte vi om disse egenskapene var knyttet til sprekkefrekvens eller sted.



Figur 3-19. Equal area pol-tetthetsplott for sprekke-data klassifisert etter sprekke-egenskaper, basert på alle SL-data (venstre) og all CM-data (høyre).

Når vi deler datasettet inn i sprekke-subsett basert på forskjellige egenskaper, ser vi stor spredning i sprekkeorientering (Figur 3-19). SL-data viser en dominerende Ø-V sprekkeorientering innenfor mesteparten av sprekke-subsettene (Figur 3-19), noe som reflekterer det dominerende sprekkesettet for hele studieområdet. I CM-data er alle sprekke-subsett dominert av horisontale sprekkesett, bortsett fra diskontinuerlige, lukkede og tørre sprekker. Interessant nok har sprekke-kategorisert som «våt» en dominerende NV-SØ orientering i både SL og CM-data. For fuktige og tørre sprekker derimot, ser vi stor spredning rundt N-S og Ø-V orienterte sprekkesett. Vi ser at sprekkeutholdenhet kan være knyttet til de ulike sprekkesettene i SL-data, der gjennomgående og diskontinuerlige sprekkesett hovedsakelig er orientert Ø-V, mens begrensede sprekkesett hovedsakelig er orientert N-S. Lignende forhold gjelder også for sprekkeåpning, der åpne og delvis åpne sprekker hovedsakelig er orientert N-S til NV-SØ mens lukkede sprekker er orientert Ø-V og N-S.

Vi analyserte sprekke-data i henhold til sprekke-egenskaper for hver enkelt lokalitet for å undersøke om det var romlig variasjon i hvilke sprekkesett som dominerte for hver egenskap. På grunn av få sprekke-målinger på hver CM-lokalitet var det ikke mulig å klassifisere sprekker i henhold til sprekke-egenskaper for hver lokalitet. Klassifisering av sprekker i henhold til sprekke-egenskaper er derfor begrenset til SL-datasettet. Siden SL2 kun har ett sprekkesett var det ikke mulig å analysere av sprekke-egenskaper i henhold til sprekkeorientering. Data fra SL2 er derfor ikke inkludert i videre diskusjonen.

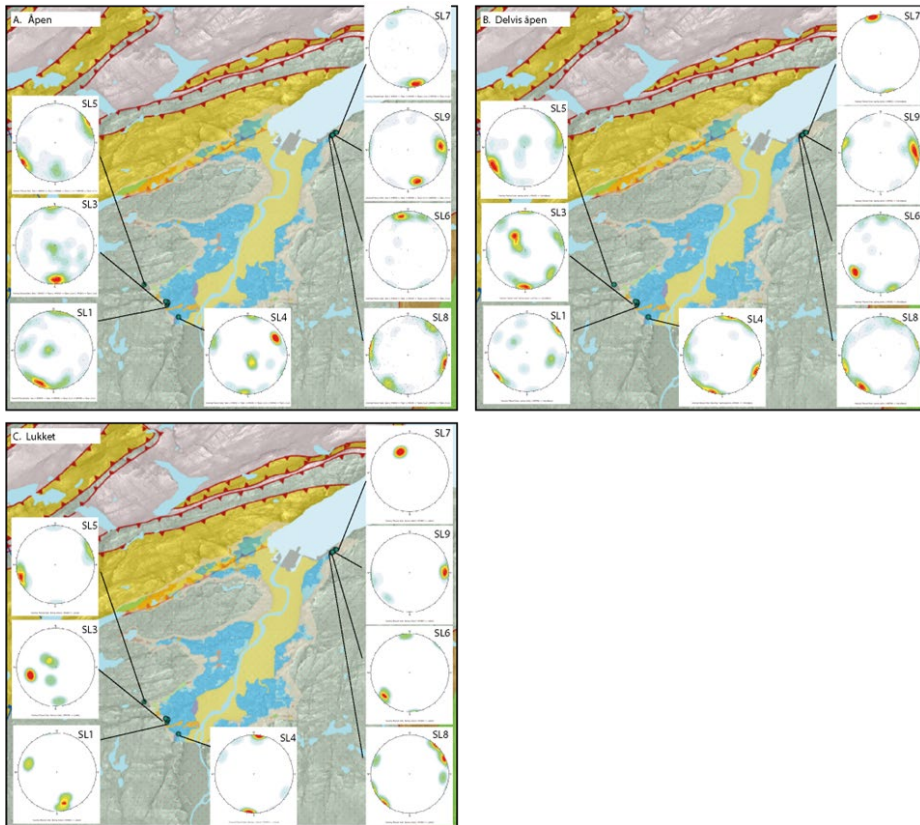


Figur 3-20. Equal area pol-tetthetsplott for utholdenhetskategorier i SL-data.

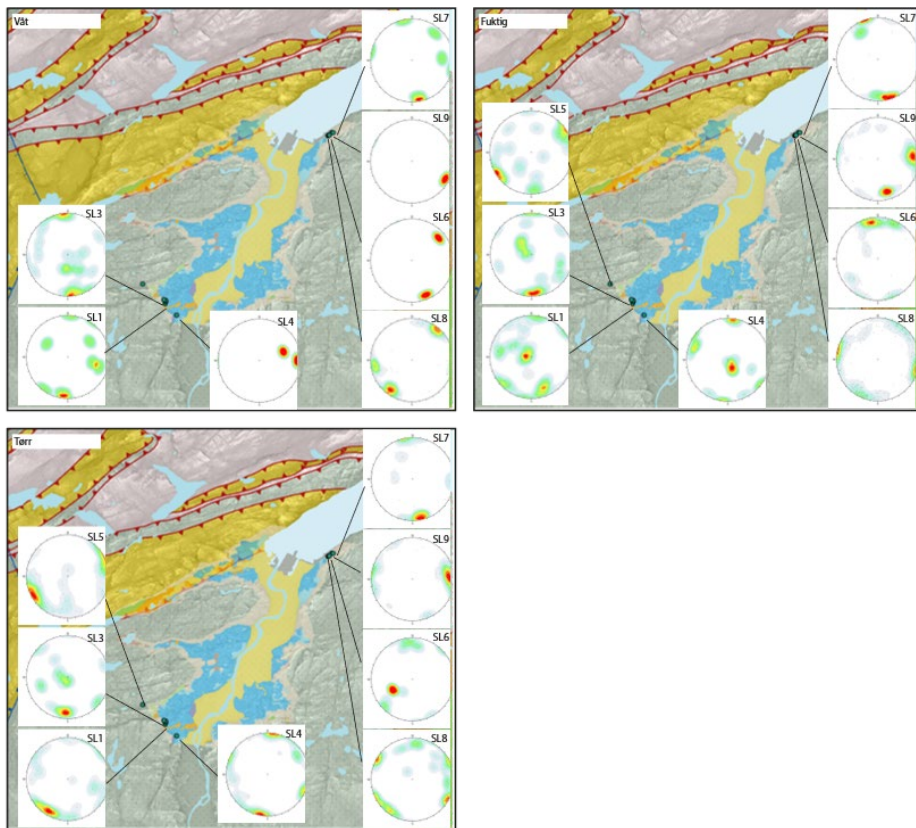
Generelt ser vi at retninger til sprekker klassifisert etter egenskaper varierer fra lokalitet til lokalitet i prosjektområdet. Gjennomgående sprekker er hovedsakelig Ø-V orientert, bortsett fra på lokaliteter SL5 (Skåholt-Kvåle) og SL8 (Thamshamn). Gjennomgående sprekker ved Skåholt-Kvåle inneholder et relativt flatliggende sprekkesett, noe som ikke er registrert i gjennomgående sprekker ved Thamshamn. Diskontinuerlige sprekker ved Skåholt-Kvåle er primært Ø-V orientert, mens sprekker ved lokaliteter rundt Thamshamn har ingen konsistent orientering. På vestsiden av Orkla er begrensede sprekker hovedsakelig orientert Ø-V, med noe rotasjon mot NØ-SV eller NV-SØ. Ved Thamshamn er de begrensede sprekkeene hovedsakelig N-S-orientert.

Sprekker kategorisert i henhold til sprekkeåpning (åpen, delvis åpen, lukket) kan være relatert til bestemte sprekkesett ved de ulike lokalitetene i Orkanger-området. Sprekker kategorisert som åpne er primært orientert Ø-V rundt Thamshamn og NV-SØ rundt Skåholt (Figur 3-21). Delvis åpne sprekker følger samme orientering som åpne sprekker, men med mindre antall sprekker. Ved Skåholt og Thamshamn har de lukkede sprekkeene en orientering som står vinkelrett på sprekkeene klassifisert som åpne.

Sprekker klassifisert etter vanninnhold (våt, fuktig og tørr) viser ingen tydelig sammenheng med sprekkesett-orientering. (Figur 3-22). Våte og fuktige sprekker ved Skåholt-Kvåle varierer fra Ø-V til N-S. I dette området har alle SL-lokaliteter tørre sprekker som er parallele med våte og fuktige sprekker, bortsett fra lokalitet SL4 hvor tørre sprekker står vinkelrett på våte sprekker. Ved Thamshamn er våte, fuktige og tørre sprekker relativt likt orientert.



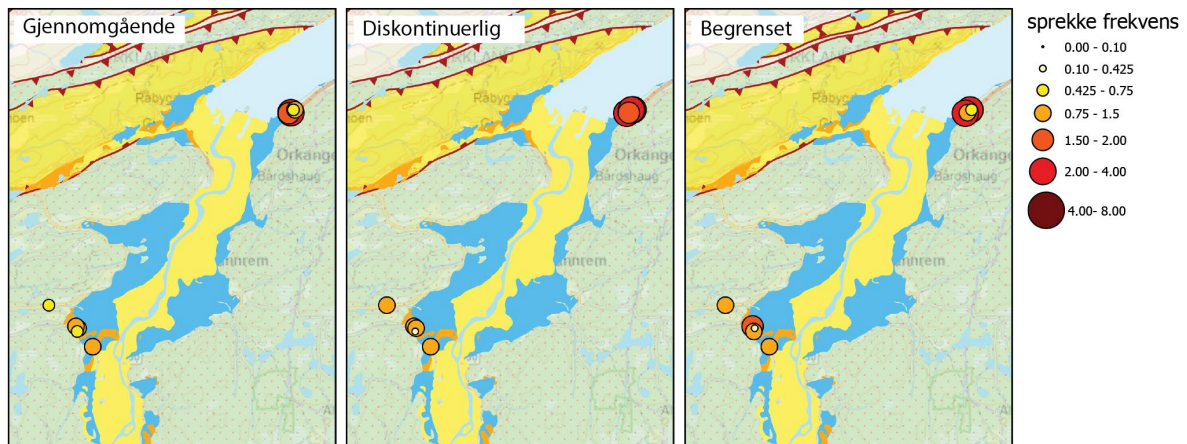
Figur 3-21. Equal area pol-tetthetsplott for sprekkeåpningskategorier i SL-data.



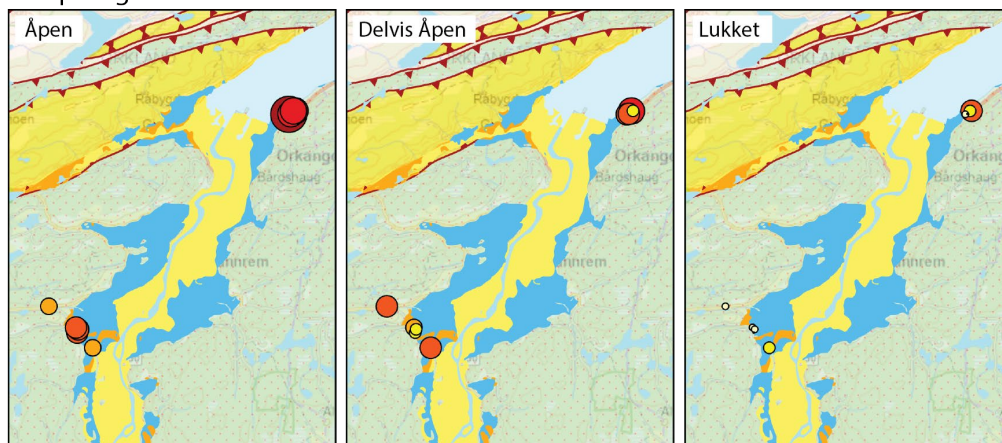
Figur 3-22 Equal area pol-tetthetsplott for vanninnhold-kategorier i SL data.

Vi observerer ingen tydelige romlige sammenhenger mellom sprekke-frekvens/tetthet og sprekke-egenskaper innenfor det studerte området. For alle klassifiseringer av utholdenhet, ser vi høyere tetthet rundt Thamshamn enn Skåholt-Kvåle (Figur 3-23). I hele det studerte området ser vi høyere sprekkefrekvens for åpne sprekker enn for lukkede sprekker (Figur 3-23). Det er flere våte enn tørre sprekker i Thamshamn-området og mesteparten tørre sprekke i Skåholt-Kvåle (Figur 3-23).

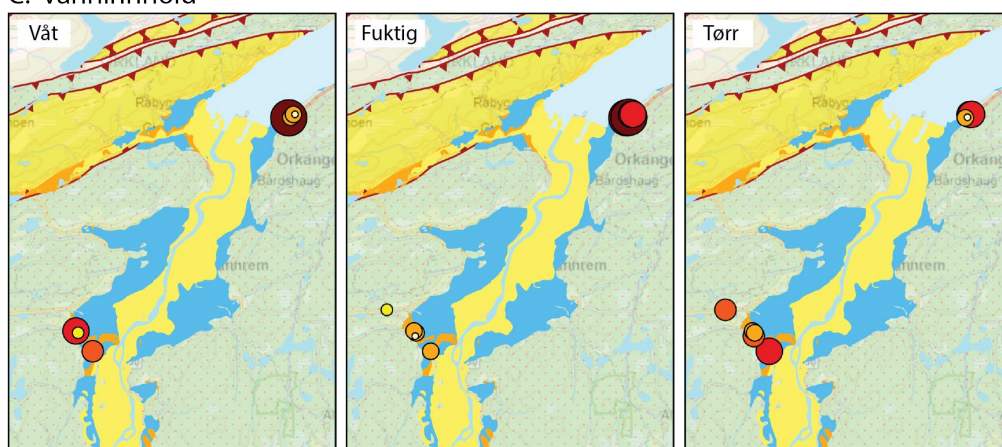
A. Utholdenhet



B. Åpning



C. Vanninnhold

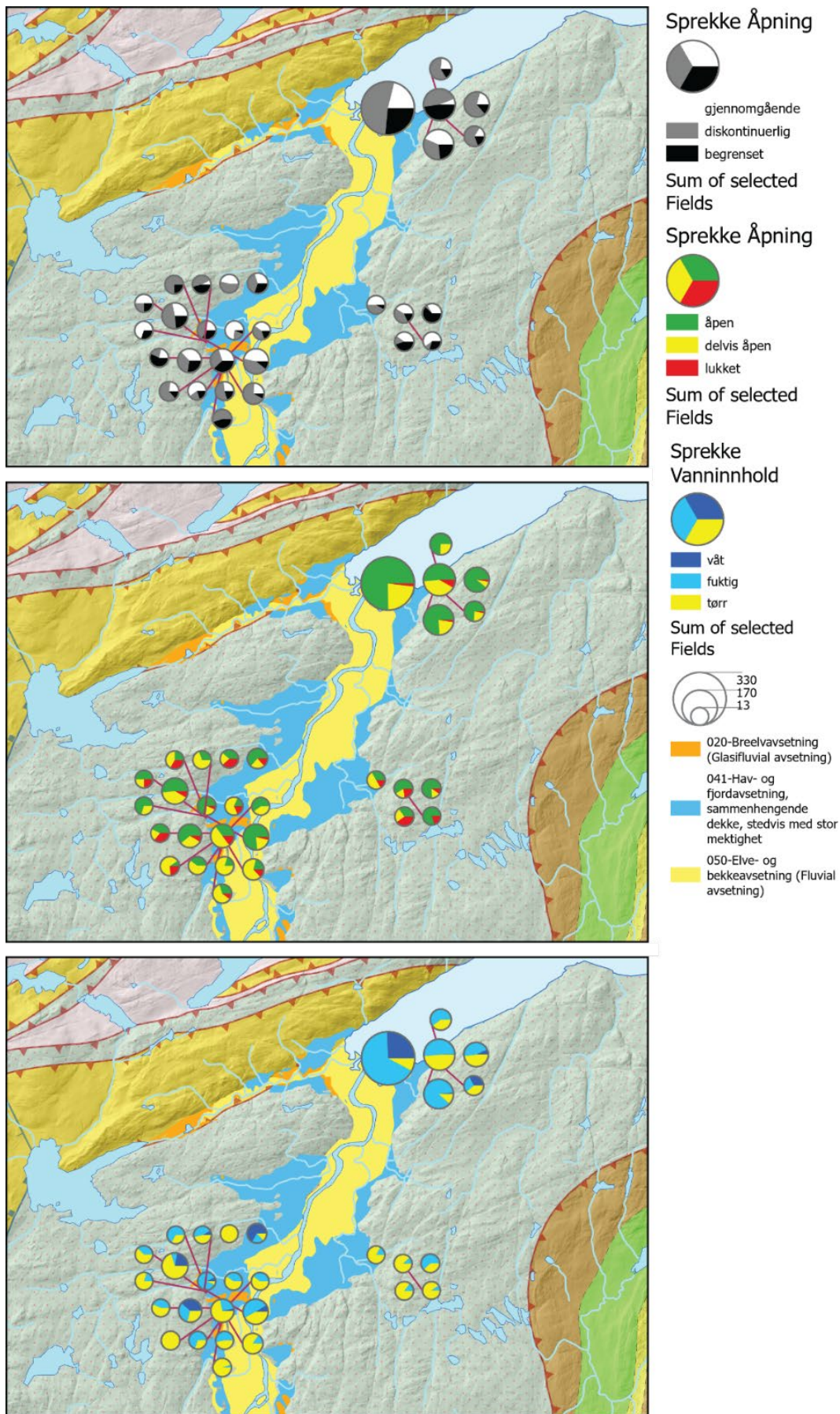


Figur 3-23. Sprekkefrekvens klassifisert etter sprekke-egenskaper. Symbolisering er skalert med uvektet sprekkefrekvens.

Vi har også analysert forholdet mellom sprekker innenfor hver egenskap-kategori for hver lokalitet. På denne måten kan vi for eksempel undersøke om antall våte sprekker er høyere enn antall tørre sprekker fra område til område. For sprekkeutholdenhet, observerer vi et tydelig romlig forhold. Ved Thamshamn ser vi flere diskontinuerlige sprekker enn gjennomgående og begrensede sprekker. Ved Sundlia, ser vi derimot flere gjennomgående sprekker enn i andre områder. Ved Skåholt-Kvåle ser vi en stor variasjon.

Sprekker som er åpne eller delvis åpne dominerer over lukkede sprekker innenfor prosjektområdet som helhet (Figur 3-23). Dette forholdet gjenspeiles også i sammenligning av sprekkefrekvens av åpne og lukkede sprekker (Figur 3-23b). Ved Thamshamn og Sundlia, dominerer åpne sprekker, mens ved Skåholt-Kvåle dominerer ofte delvis åpne sprekker. Generelt utgjør lukkede sprekker under 20% av sprekkemålingene per lokalitet, med unntak av to CM-lokaliteter.

Igjen ser vi at sprekke-egenskaper varierer fra sted til sted når vi analyser vanninnhold (Figur 3-23). Ved Thamshamn er det flere våte og fuktige sprekker enn tørre, mens ved Skåholt-Kvåle og Sundlia er det betydelig flere tørre enn våte og fuktige sprekker. Rundt Skåholt-Kvåle, viser SL og CM-lokalitetene sprekker som varierer fra tørre til fuktige og våte, men generelt er de fleste tørre. Antall våte sprekker er lavt i forhold til fuktige sprekker, men det er sannsynligvis knyttet til nedbør.



Figur 3-24. Kake-diagrammer for sprekke-egenskaper.

4. DISKUSJON

4.1 Otto

4.1.1 Lineamentfiltrering og -bearbeiding

Filtrering og bearbeiding av lineamentdatasettet (både av Otto-linjene og senterlinjene) var en viktig og omfattende del av arbeidet med lineamenter i dette prosjektet. Det finnes ulike måter å filtrere datasettet på, og metoden som brukes er avgjørende for det endelige lineamentdatasettet. Ved omfattende testing av ulike metoder kom vi frem til metoden beskrevet i detalj i kapittel 2.1.1.2 som kort oppsummert besto av:

- 1) Filtrere bort Otto Detect-linjer som opptrer innenfor tildekte områder av berggrunnen; vannflater (vannflater i målestokk 1:50 000 og 1:250 000 fra Norges Kartverk) og områder med tykke løsmasseavsetninger (NGU's løsmassekart i målestokk 1:50 000)
- 2) Lengdefiltrering og dybdefiltrering av Otto Detect-linjer. Gjennomsnittlig lengde og dybde i Otto Detect-datasettet er et godt utgangspunkt for filtreringsverdier.
- 3) Datareduksjon ved linjesentrering
- 4) Lengdefiltrering av senterlinjer. Gjennomsnittlig lengde i det senterlinjedatasettet er et godt utgangspunkt for filtreringsverdi.

For fremtidig arbeid som benytter Otto-metoden i lineamentanalyser, anbefaler vi å følge denne metoden for filtrering og bearbeiding.

4.1.2 Lineament- egenskaper – lengde, dybde og bredde

I dette prosjektet har vi analysert lineamentegenskaper som kan være relevante for å vurdere betydningen av bruddstrukturer for grunnvannstrømning i berggrunnen. Lineamentretning danner grunnlaget for de fleste analysene og sammenligninger mot sprekke-data, og blir beskrevet i detalj i kapittel 2.1.1.2 og 2.1.1.3. Lineamentlengde blir brukt som sammenligningsgrunnlag for sprekkeutholdenhet, men det er også interessant å se hvordan lengde varierer mellom de ulike retningspopulasjonene i et regionaltektonisk perspektiv. Fra (Tabell 1) ser vi at lineamenter i populasjon 1 og 2 er lengst, og populasjon 3 er kortest. Tolker vi populasjon 1 og 2 som lineamenter store regionaltektoniske hendelser, og populasjon 3 som bruddsoner av mindre regional betydning (beskrives i mer detalj i kapittel 3.1.2), antyder dette at lineamenter med større regional betydning er lengre og lineamenter med mindre regional betydning er kortere. Vi ser også at det er større spredning i retningsfordeling blant de korte lineamentene enn de lange (Figur 3-10). Dette er å forvente, siden de korte lineamentene i større grad representerer lokale variasjoner, som ikke alltid følger det regionale strukturelle mønsteret.

Selv om vi ikke brukte lineamentbredde og lineamentdybde som parameter for å sammenligne lineamentdata mot sprekke-data, var det interessant å undersøke om disse egenskapene kunne kobles til spesifikke områder eller populasjoner i lineamentdatasettet. Gjennomsnittlig lineamentdybde varierer fra -20 m til -22 m mellom de tre lineamentpopulasjonene (Tabell 3-1). Variasjon i lineamentdybde kan altså ikke kobles til de ulike populasjonene og lineamentretning. Vi ser lignende fenomen i lineamentbredde, der gjennomsnittlig bredde varierer fra 137 m til 142 m (Tabell 3-1) mellom de tre lineamentpopulasjonene. Lite variasjon blant lineamentpopulasjonene antyder at overflateprosesser (glasial og fluvial erosjon) er styrende for dagens lineament-morfologi. Selv om overflate-prosesser har satt et tydelig preg på lineamentbredde og -dybde, kan målene fortsatt være nyttige for enkelte strukturgeologiske tolkninger. For eksempel kan lineamentbredden gi en indikasjon på grad

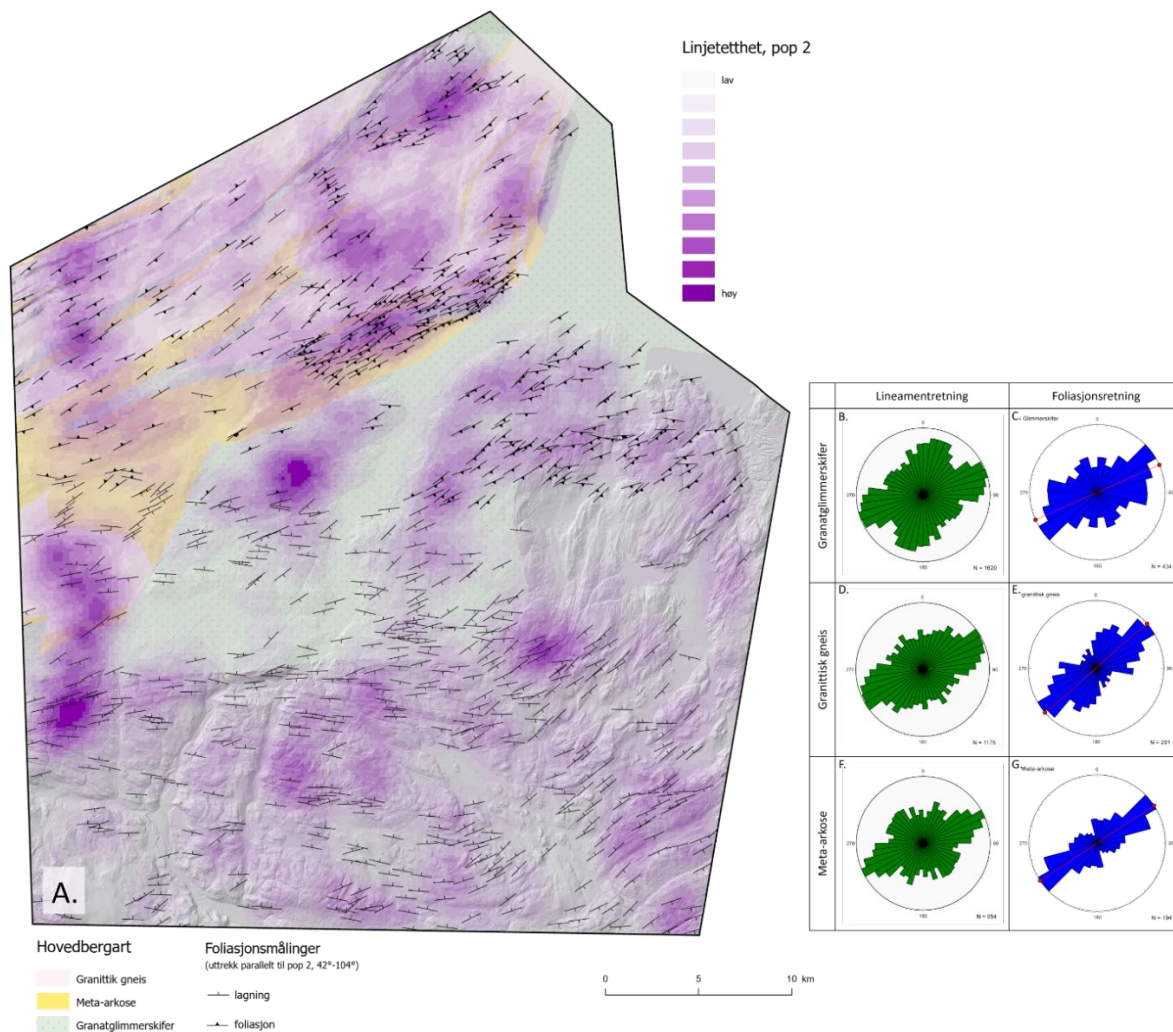
av oppsprekking. Brede sprekkekorridorer er utsatt for kraftigere erosjon, noe som vil føre til en økt bredde på det topografiske lineamentet sammenlignet med smale sprekkekorridorer. Stor grad av erosjon langs bredere sprekkekorridorer vil trolig også øke lineamentdybden. Dype lineamenter representerer mer sannsynlig bratte bruddstrukturer enn slake, siden erosjon- og forvitningsprosesser virker hovedsakelig langs en bruddplanet. I forbindelse med vanntransport langs overflaten, er morfologien til et lineament viktig – dype lineamenter er bedre egnet til å kanalisere vann, noe som vil øke erosjonen og ha en selvforsterkende effekt på lineamentdypden og lineamentbredden. I lineamentdatasettet ser vi at dypeste og bredeste lineamentene i stor grad sammenfaller med større elver.

4.1.3 Berggrunnens betydning for lineamentretning og lineament-tetthet

Senterlinjetetthet for *hele* datasettet viser en varierende tetthet av lineamenter innenfor prosjektområdet. Spesielt ser vi en tydelig høyere senterlinjetetthet på østsiden enn på vestsiden av Orkla (Figur 3-5 a.). Selv om berggrunnen er kartlagt med samme hovedbergart (granatglimmerskifer) og lignende foliasjonsretning på begge sider av elva, vet vi at denne bergartsenheten (tilhørende Blåhødekket) er svært heterogen, bestående av foldede, lagdelte bergarter med varierende kompetanse. En slik heterogenitet vil påvirke hvordan bergarten sprekker opp og bidra til store lokale variasjoner, både i lineamentretning og lineament-tetthet. Lokale forskjeller i berggrunnen bidrar trolig til forskjellen vi ser i lineamenttetthet fra østsiden til vestsiden av Orkla, da vi forventer av områder som er sterkt foldet og lagdelte (med sterk kompetansekontrast mellom lagene) er mer utsatt for tett oppsprekking og dermed har en høyere lineament-tetthet.

Sammenlignet med senterlinjetetthet for hele datasettet, viser senterlinjetetthet for de tre retningspopulasjonene sett hver for seg en større romlig variasjon (Figur 4-1, Figur 4-2 og Figur 4-3). Variasjon mellom de ulike populasjonene er interessant å diskutere i lys av berggrunnens egenskaper – både bergartstype og foliasjonsretning.

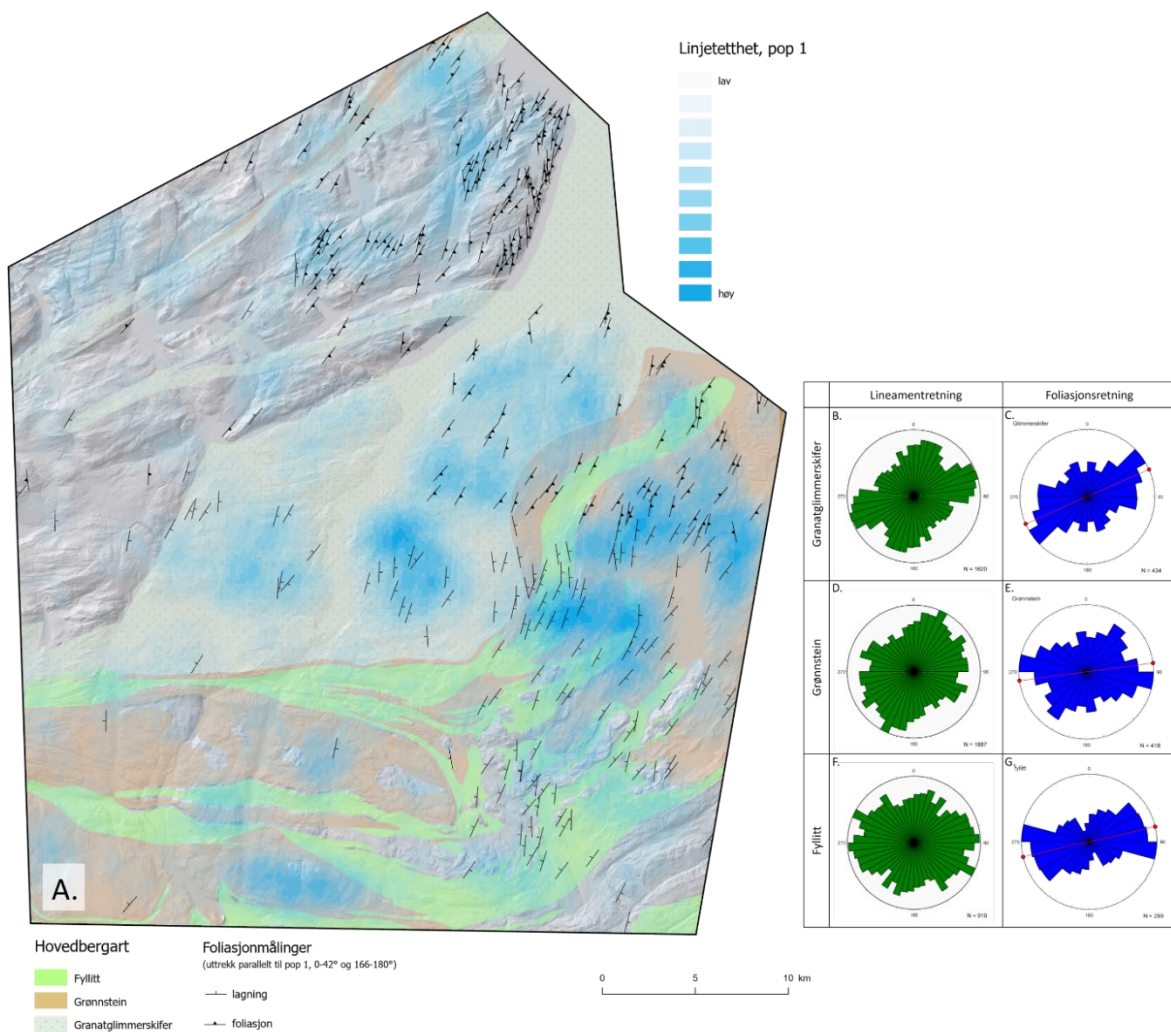
NØ–SV-orienterte lineamenter tilhørende populasjon 2 er de dominerende lineamentene over prosjektområdet som helhet, og er tydelig representert i alle bergartstyper i prosjektområdet (Figur 3-7). Lineamenter tilhørende populasjon 2 er parallelle til det regionale foliasjonsmønsteret og Møre- Trøndelag forkastningskompleks (MTFK), begge orientert NØ-SV. En gjennomgående sterk tilstedeværelse av populasjon 2 lineamenter innenfor hele prosjektområdet og alle bergartstyper bekrefter at den regionale foliasjonen og deformasjon knyttet til MTFK har vært sentrale i den strukturelle utviklingen i Orkanger-området. Populasjon 2 representerer antageligvis til dels strukturer knyttet til MTFK, men trolig også utgående av selve foliasjonen i overflaten. Lineamenter som opptrer i granittisk gneis og meta-arkose skiller seg ut fra resten av datasettet med en spesielt sterk tilstedeværelse av populasjon 2, og betydelig lavere (nærmest fraværende) populasjon 1 og 3 (Figur 3-7, Figur 4-1). Granittisk gneis og meta-arkose dominerer i den nordvestlige delen av prosjektområdet, et område der lineament-tettheten også viser en tydelig dominans av populasjon 2 lineamenter (Figur 4-1). Fra Figur 4-1 ser vi en sterk korrelasjon mellom populasjon 2 lineamentretning og lokal foliasjonsretning – som i dette området er parallelt med den regionale foliasjonsretningen. Dette antyder at bergartene i dette området har vært mer utsatt for deformasjon og oppsprekking langs foliasjons-parallelle plan og mindre utsatt for oppsprekking i andre retninger.



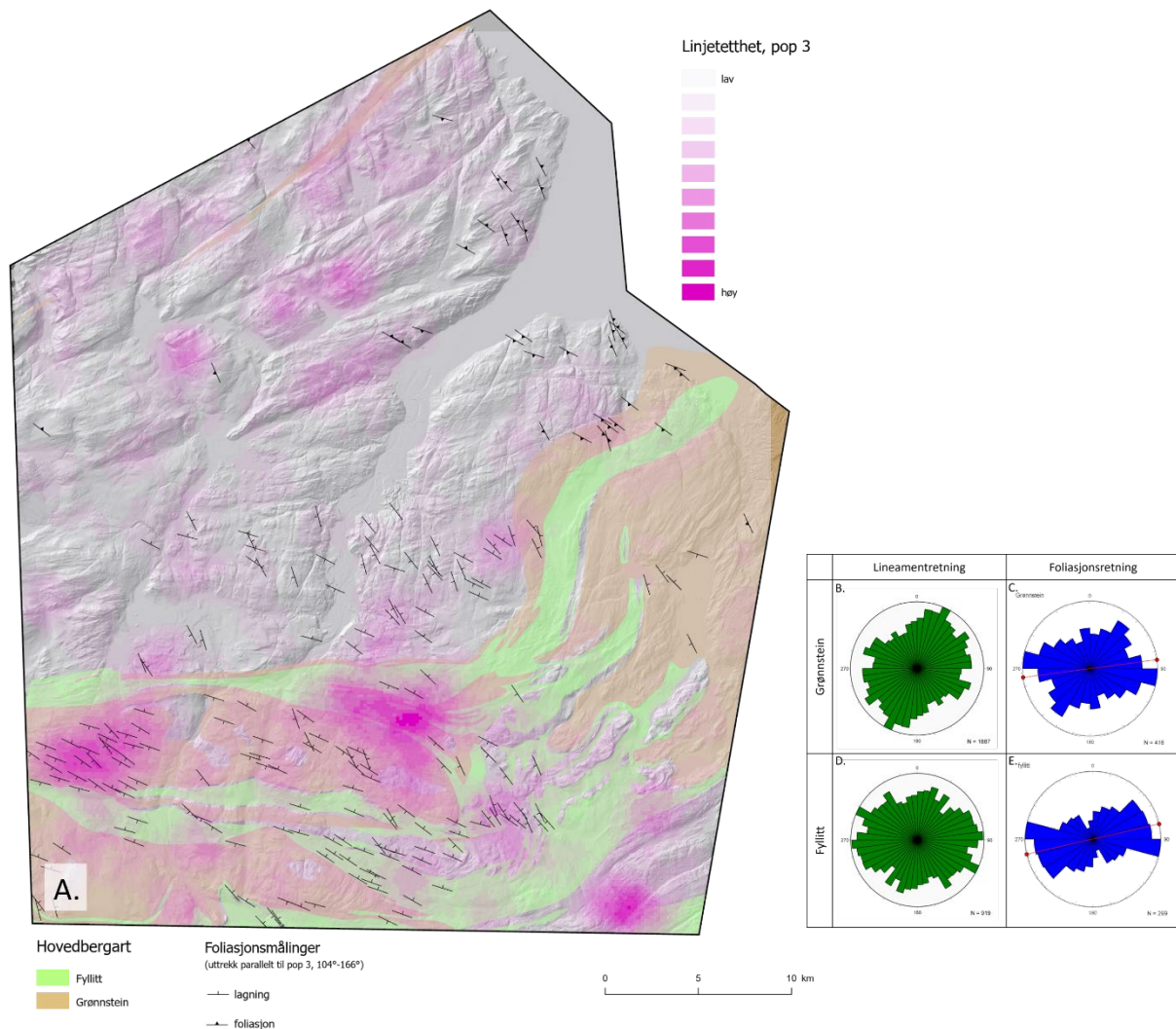
Figur 4-1 Kartet i (A) viser seleksjon av foliasjonsmålinger (fra NGUs berggrunndatabase, www.ngu.no) som er parallelle med populasjon 2 lineamentretning (NØ-SV), plottet i kartplanet sammen med lineamenttetthet av populasjon 2. Bergartsflater i bakgrunn viser granittisk gneis, meta-arkose og granatglimmerskifer, de bergartene som opptrer der populasjon 2 viser høyest tetthet. (B), (D), og (F) viser rosedigram for retningsfordeling av lineamenter som opptrer innenfor henholdsvis granatglimmerskifer, granittisk gneis og meta-arkose. (C), (E), og (G) viser rosedigram for foliasjonsmålinger innenfor henholdsvis granatglimmerskifer, granittisk gneis og meta-arkose.

Storskala folding av bergartsenhetene i prosjektområdet medfører at foliasjonsretningen varierer fra område til område. Siden vi vet at lineamentretning er påvirket av foliasjonsretning, er regionalt foldemønster derfor vesentlig å ta med i betraktningen. Fra den sørlige til østlige delen av prosjektområdet er det en markant endring i retning på bergartsenhetene og foliasjonsmålinger, fra en NV-SØ-dominerende retning rundt Løkken, til en N-S-dominerende retning rundt Skaun (Figur 1-2). Den sørlige til østlige delen av prosjektområdet består hovedsakelig av fyllitt og grønnstein. Både foliasjonsretningen og lineamentretningen innenfor disse bergartene viser en betydelig større spredning enn det vi ser innenfor granittisk gneis og meta-arkose (Figur 3-7, Figur 4-2, Figur 4-3). I tillegg til den MTFK-parallele populasjon 2, ser vi i disse bergartene også tydeligere tilstedeværelse av populasjon 1 (NNØ-SSV) og 3 (NV-SØ). Hvorvidt dette er et resultat av bergart-spesifikke egenskaper som påvirker hvordan bergarten går i brudd (f.eks. innhold av leire- og glimmerminerale) eller foliasjonsretningen og foldemønsteret i området kan diskuteres. Trolig er en

kombinasjon av disse mekanismene (bergarts-spesifikke egenskaper, foliasjon og foldemønster) med på å påvirke linementretningen i den sørøstlige delen av prosjektområdet. Den sørlige delen rundt Løkken har en dominerende NV-SØ foliasjonsretning sammen med en høy tetthet av foliasjonsparallele populasjon 3 (NV-SØ) lineamenter (Figur 4-3). Tilsvarende forhold ser vi i det østlige området rundt Skaun, der den dominerende foliasjonsretningen er NNØ-SSV og det er en høy tetthet av foliasjonsparallele populasjon 2 (NNØ-SSV) lineamenter (Figur 4-2). Foliasjonsparallele lineamenter i disse områdene antyder at lineamenter tilhørende populasjon 1 og 3 innenfor grønnstein og fyllitt til i stor grad representerer utgående av foliasjonen, med enkelte foliasjonsparallele lange og gjennomgående sprø bruddstrukturer.



Figur 4-2 Kartet i (A) viser seleksjon av foliasjonsmålinger (fra NGUs berggrunndatabase, www.ngu.no) som er parallelle med populasjon 1 lineamentretning (NNØ-SSV), plottet i kartplanet sammen med lineamenttetthet av populasjon 1. Bergartsflater i bakgrunn viser granatglimmerskifer, fyllitt og grønnstein, de bergartene som opptrer der populasjon 1 viser høyest tetthet. (B), (D), og (F) viser rosedigram for retningsfordeling av lineamenter som opptrer innenfor henholdsvis granatglimmerskifer, grønnstein og fyllitt. (C), (E), og (G) viser rosedigram for foliasjonsmålinger innenfor henholdsvis granatglimmerskifer, grønnstein og fyllitt.



Figur 4-3 Kartet i (A) viser seleksjon av foliasjonsmålinger (fra NGUs berggrunndatabase, www.ngu.no) som er parallelle med populasjon 3 lineamentretning (NV-SØ), plottet i kartplanet sammen med lineamenttetthet av populasjon 3. Bergartsflater i bakgrunn viser fyllitt og grønnstein, de bergartene som opptrer der populasjon 3 viser høyest tetthet. (B), (D), og (F) viser rosediagram for retningsfordeling av lineamenter som opptrer innenfor henholdsvis grønnstein og fyllitt. (C), (E), og (G) viser rosediagram for foliasjonsmålinger innenfor henholdsvis grønnstein og fyllitt.

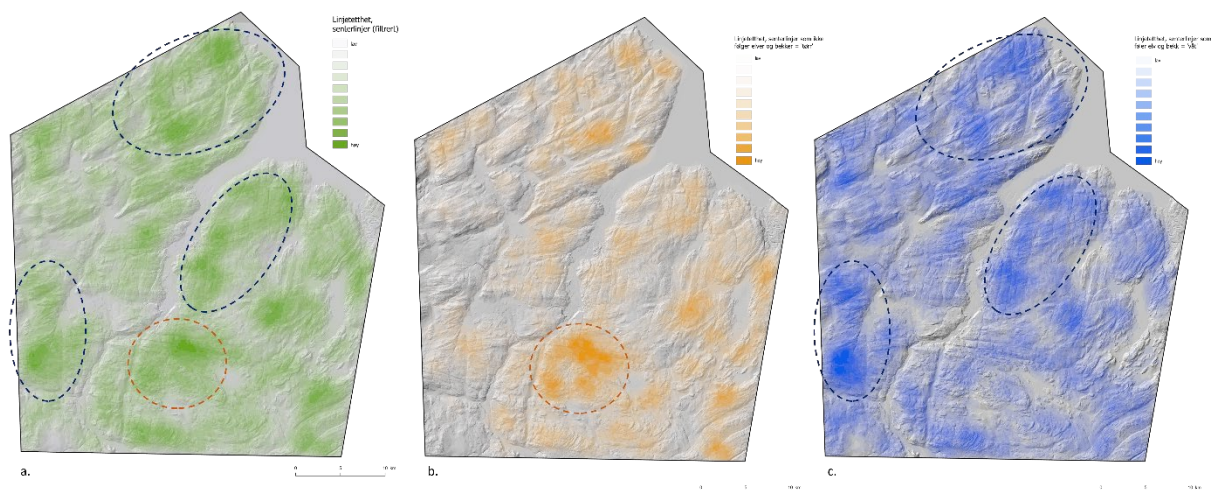
Området rett øst for Orkla, innenfor granatglimmerskiferen, viser en høy lineament-tetthet av populasjon 1. Innenfor dette området finnes enkelte populasjon 1 parallelle foliasjonsmålinger, men betydelig færre enn målingene som viser en dominerende NØ-SV-orientert foliasjonen. Basert på dette, tolker vi populasjon 1 lineamenter innenfor granatglimmerskiferen til å hovedsakelig representere sprø bruddstrukturer som kutter gjennom foliasjonen. Fra lineamentkartet (Figur 3-4) er disse lineamentene (blå) synlig som lange, rette og gjennomgående strukturer – karakteristiske trekk for lineamenter som representerer sprø bruddstrukturer. Vi tolker sprø bruddstrukturer tilhørende populasjon 1 til å være dannet under jurasisk til paleosen Ø–V-ekstensjon.

Selv om populasjon 2 lineamenter dominerer i den nordvestlige delen av prosjektområdet, finnes det også tilfeller av forhøyet av populasjon 3 lineament-tetthet i dette området. Lineamenter tilhørende populasjon 3 har en høy vinkel (ca. 60 grader) til den gjennomgående

foliasjonen i dette området som er parallell med MTFK og orientert NØ-SV. Populasjon 3 lineamenter i som forekommer i den nordvestlige delen av prosjektområdet tolkes dermed som foliasjons-kuttende strukturer, og representerer antageligvis et konjugert bruddsett til populasjon 2 lineamenter og MTFK.

4.1.4 Lineament-tetthet og vannføring

Store lineamenter som blir utnyttet av elver og bekker som vannveier er sannsynligvis involvert i grunnvannsstrømming ved større dyp i berggrunnen. Ved å sammenligne vannførende lineamenter til lineamenttetthet kan vi analysere områder med høy sannsynlighet for oppsprekking av berggrunnen og grunnvannstrøm. Dette kan undersøkes ved å sammenligne lineament-tetthetskartet for hele senterlinjedatasettet med lineament-tetthetskartet for 'våte' og 'tørre' senterlinjer. Figur 4-4 viser god korrelasjon mellom høy tetthet av 'våte' senterlinjer (Figur 4-4c) og høy senterlinjetetthet i hele datasettet (Figur 4-4a) (blå stiptet omriss) – som indikerer at vassdrag benytter geologiske strukturer høy grad. Til tross for at denne korrelasjonen stemmer godt i prosjektområdet som helhet, finnes lokale områder med motstridende sammenhenger. Oransje stiptet omriss i Figur 4-4 viser et område der høy senterlinjetetthet i hele datasettet sammenfaller med høy tetthet av 'tørre' senterlinjer. Dette antyder at dette er et område med høy lineamenttetthet (korreleres til oppsprukket berggrunn) som har få vannførende lineamenter. I dette området ser det ut til at vassdrag dannes langs drag i terrenget som ikke er berggrunns-relaterte. Av tetthets-kartet til de korte lineamentene (Figur 3-9), ser vi også en høy tetthet i det samme området, noe som tyder på at den høye tettheten til de 'tørre' senterlinjene kan kobles til at dette området domineres av korte senterlinjer (de 'tørre' senterlinjene er statistisk sett også godt representert blant de kortere senterlinjene). I det berggrunngeologiske kartet (Figur 1-2), ser vi også at dette området består av tett foldede enheter, noe som kan påvirke sprekke-mønsteret i berggrunnen ved at det dannes flere korte lineamenter innordnet etter folderetningen, fremfor de lange og gjennomgående lineamentene som typisk sammenfaller med elver og bekker.

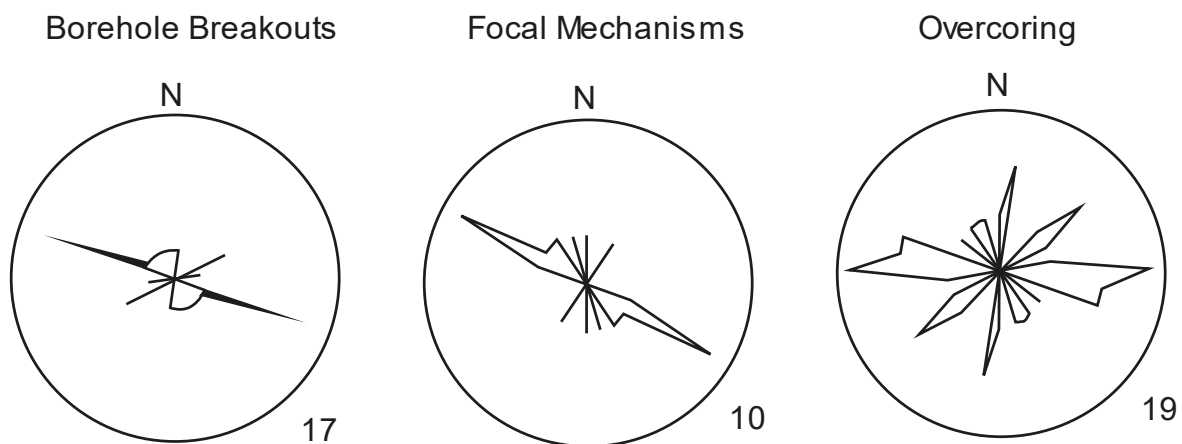


Figur 4-4 Linjetetthet for a. hele senterlinjedatasettet, (b) 'tørre' senterlinjer og (c) 'våte' senterlinjer. Områder der høy tetthet av 'tørre' senterlinjer (b) og 'våte' senterlinjer (c) sammenfaller med senterlinjetetthet for hele datasettet (a) er markert med stiptet omriss i henholdsvis oransje og blått.

4.2 Felt

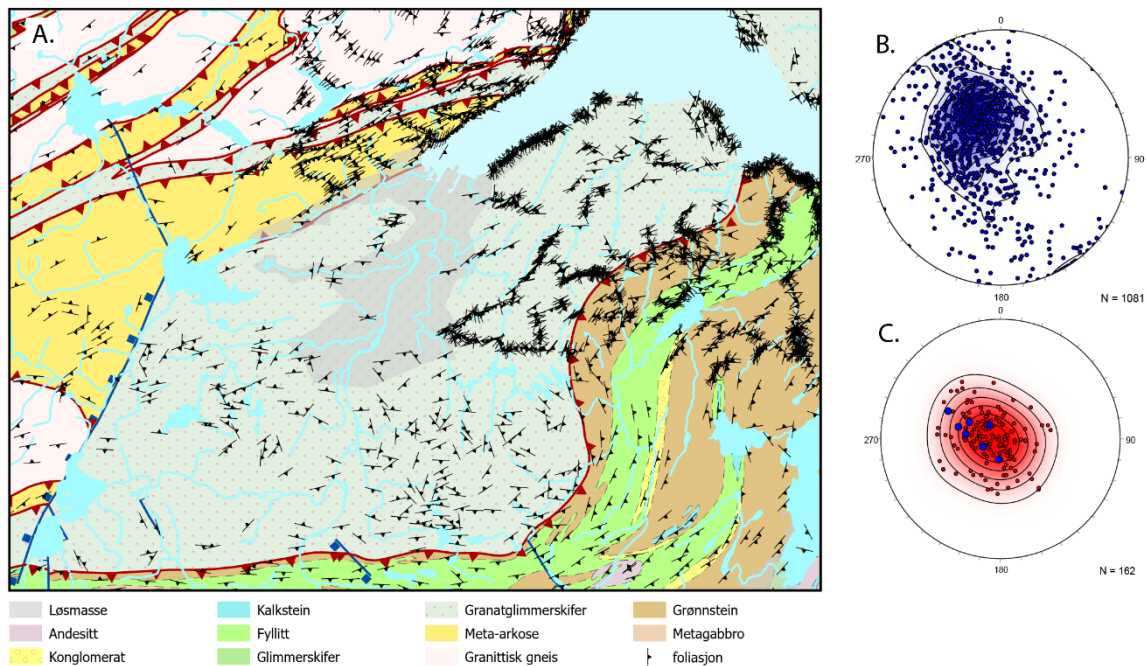
4.2.1 Regional betydning

Generelt kan berggrunns-sprekkene rundt Orkla deles inn i tre bratte sprekkeseett og ett lavvinklet sprekkeseett. Det lavvinklede sprekkeseettet tolkes til å være relatert til spenninger som har dannet foliasjonen eller trykkavlastning som har dannet sprekker parallelt med overflaten. N-S-sprekkeseettet er nesten vinkelrett til den midtnorske marginen, så det kan relateres til strekkspenninger fra rifting. Skorpespenningsretninger registrert i borehull i Midt-Norge viser en horisontal spenning som står nøyaktig vinkelrett på N-S sprekkeseettet i våre data (Figur 4-5, Fejerskov mfl., 2000), og bekrefter at dette sprekkeseettet er av regional betydning. Ø-V-settet er nøyaktig vinkelrett til N-S-settet, så disse to sprekkeseettene er trolig konjugerte sprekkeseett. NV-SØ-sprekkeseettet står nesten vinkelrett både på foliasjon (66°) i glimmergneisene i Blåhø-dekket og strøkretningen til Møre-Trøndelag-forkastningskompleks (MTFK), og kan derfor tolkes som konjugerte brudd til den regionale foliasjonen.



Figur 4-5. Skorpestressretning for midt-Norge (modifisert fra Fejerskov mfl., 2000). Rosediagrammer viser horisontal spenning fra borehull, jordskjelv og overboring målinger.

Det lavvinklede sprekkeseettet kan være relatert til trykkavlastning, også kjent som “sheeting joints”, men denne typen brudd har en tendens til å dannes i isotrope litologier som magmatiske bergarter eller gneiser (Martel, 2017). De lavvinkel sprekkene i Orkanger er svært like det regionale og lokale foliasjonsplanet (Figur 4-6). Denne typen sprekker kalles ofte «foliation parallel fractures (FPF)» i litteraturen og har vist seg å ha stor innflytelse på grunnvannstrømmen i metamorfe og mafiske bergarter i USA (Manda mfl., 2008; Boutt mfl., 2010).



Figur 4-6. Berggrunnskart med foliasjonsmålinger fra berggrunnskartleggingen i 2012-2015 og foliasjonsmålinger fra NGUs berggrunnsdatabase (A). (B) er et poltethetsplott med modifiserte Kamb-konturer av foliasjonsmålinger i glimmerskiferen fra kartlegging i 2012-2015 og fra databasen. (C) viser alle grunne sprekker fra både SL- og CM-lokaliteter i rødt. Store blå poler er foliasjonsmålinger tatt fra SL og CM-lokaliteter.

4.2.2 Grunnvannstrømning sannsynlighet i Orkanger

Vi postulerer at sprekker som er vannførende også er lange og åpne og derfor at sprekker med disse egenskapene kan finnes i de samme sprekkesettene. Som forventet ser vi at de våte og fuktige sprekkeene i våre data er assosiert med åpne og delvis åpne sprekker. Selv om våre data har stor spredning i sprekkeorientering, observerer vi at gjennomgående og diskontinuerlige sprekker, åpne og delvis åpne sprekker, og våte og fuktige sprekker hovedsakelig er orientert N-S og Ø-V. De tørre, lukkede og begrensede sprekkeene er hovedsakelig orientert N-S. N-S-sprekkesettet er dominerende i alle sprekke-egenskaper, noe som stemmer overens med vektete resultater som viser at det sprekkesettet er størst.

I andre områder der lignende studier er gjennomført, vises det at sprekke-egenskaper kan relateres til bestemte sprekkesett. Flere studier i USA og Sverige har funnet direkte forhold mellom lavvinklede sprekkesett (også foliasjons-parallele sprekker) og sprekkeåpning samt sprekkeorientering (Manda mfl., 2008; Boutt mfl., 2010; Doolaege mfl., 2023). I disse studiene var vannførende sprekker relatert til bestemte sprekkesett. Noen sprekkeegenskaper i vårt studie kan relateres til bestemte sprekkesett, men ikke alle egenskaper viser en sammenheng med sprekkeretning. I prosjektet fant vi at vannførende sprekker (våt og fuktig) er hovedsakelig orientert NV-SØ og N-S. Forbindelse mellom de forskjellige sprekkesettene har trolig en stor betydning for hvilke sprekkesett er vannførende, noe som er typisk for sprekkesystemer (Berkowitz, 2012). Dette kan forklare hvorfor vi ikke ser en klar sammenheng mellom sprekkesetter og sprekke-egenskaper i Orkanger-området.

De åpne, delvis åpne og lukkede sprekkesettene viste stor variasjon i orientering, noe som tolkes til å være et resultat av varierende litologi. Som diskutert tidligere, er mange åpne og delvis åpne sprekker foliasjons-parallele. Det relative antallet åpne sprekker er større enn lukkede sprekker over hele studieområdet, noe som er et forventet resultat siden sprekkeåpning

skal være betydelig høyere på overflaten og redusere med dypet ned til ca. 100-150m (Boutt mfl., 2010). Dette betyr at grunnvannstrømning gjennom sprekker, spesielt foliasjonsparallele sprekker, vil begrenses med økt dybde. Siden vi ikke har kontroll over hvordan sprekkesettene og sprekke-egenskaper varierer med dybde i Orkanger, kan vi bare spekulere i dybdegrensen for åpne sprekker.

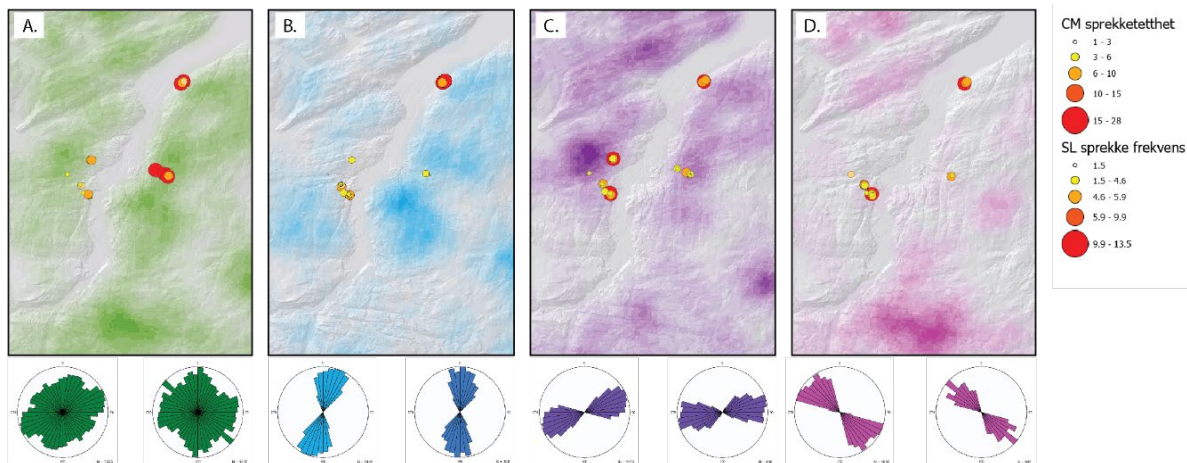
Vi mener at sprekke-utholdenhet er relatert til litologi, og observerer at de begrensede sprekkeene hovedsakelig er orientert N-S, vinkelrett på den regionale foliasjonen (Figur 3-19). Gjennomgående sprekker for hele studieområdet opptrer i konjugerte sett som er orientert NNØ-SSV (foliasjonsparallele) og NNV-SØ (vinkelrett på foliasjonen). De gjennomgående sprekkeene har trolig utnyttet svakheter i berggrunnen (f.eks. foliasjon eller litologiske endringer fra skifer til amfibolitt).

Sprekke-egenskaper varierer romlig over studieområdet og kan knyttes til tidligere skred. Sprekkesetettheten vises å være større i nærheten av områder der det allerede har gått skred (Kvåle og Thamshamn). Større sprekkesetetthet eller sprekkefrekvens øker sannsynligheten for grunnvannstrømning i berggrunnen, derfor er det mulig at disse skredene er forårsaket av grunnvannstrømning i berggrunnen. Flere vannførende sprekker er registrert ved Thamshamn (nordlige delen av Orkla) enn ved Sundlia (østsiden av Orkla) og Skåholt-Kvåle (vestsiden av Orkla). Lokaltiter ved Thamshamn er dominert av gjennomgående, vannførende og åpne sprekker som er orientert Ø-V og N-S. Ved Sundlia og Skåholt-Kvåle, ser vi at de gjennomgående, åpne og vannførende sprekkesettene relativt sett har en lavere sprekkefrekvens og høyere frekvens av tørre sprekker. Ved Skåholt-Kvåle har sprekkesettene fra SL- og CM-lokalitetene en dominerende Ø-V til NV-SØ orientering, mens ved Thamshamn er den dominerende sprekkeorienteringen N-S (Figur 3-16). Alle disse observasjonene viser at de forskjellige områdene rundt Orkla har varierende mengde av oppsprekking i berggrunnen og at de dominerende sprekkesettene ikke er de samme over hele området. Når vi sammenstiller alle felt resultater ser vi at Thamshamn har størst berggrunnsoppsprekking, og er trolig derfor mest utsatt for grunnvannstrømning gjennom sprekkesystemet i berggrunnen enn de andre områdene.

5. SAMMENHENG MELLOM LINEAMENTER OG SPREKKER

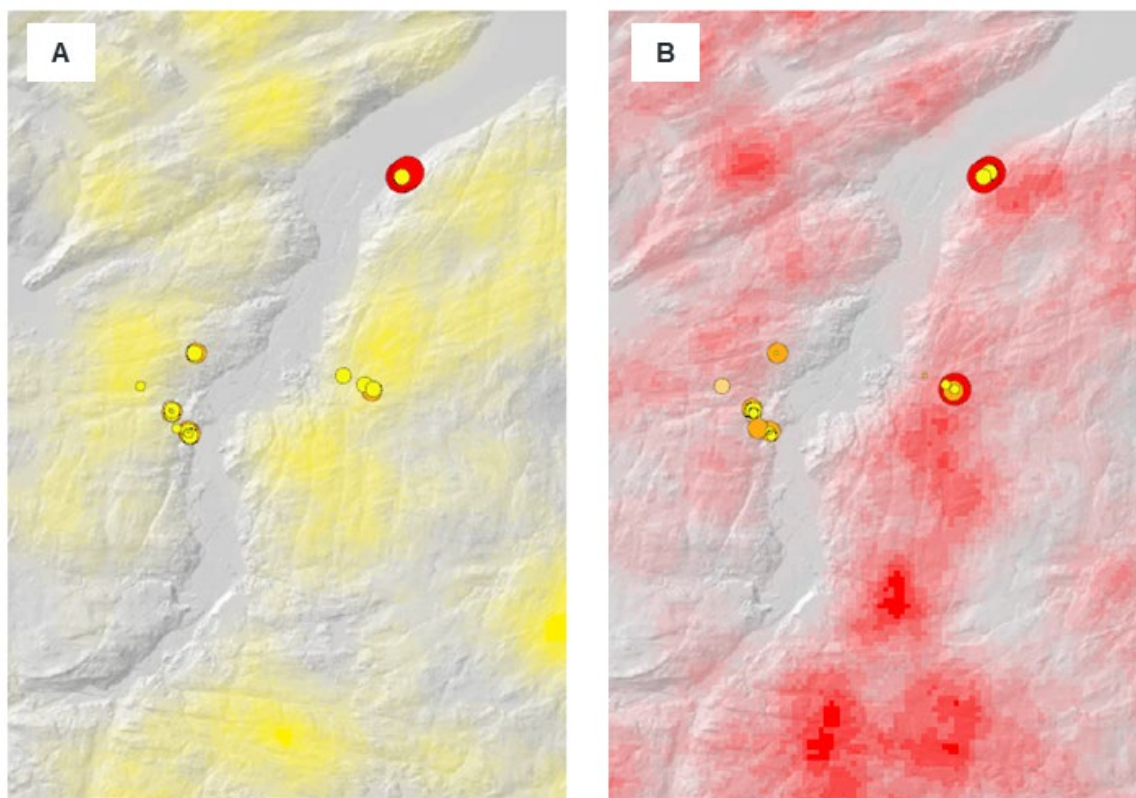
Selv om DTM-avledede lineamenter og berggrunns sprekker representerer ulike strukturer i forskjellige skaler, finner vi en klar sammenheng mellom de to datasettene. Vi observerer en svært god korrelasjon mellom gjennomsnittorienteringene til sprekkesettet fra feltobservasjoner og lineamentpopulasjoner detektert av Otto. Begge datasettene inneholder N-S til NNØ-SSV, Ø-V til NØ-SV og NV-SØ-orienterte sett. Vi observerer en stor spredning i både felt og lineament data, som er knyttet til heterogene bergartsenheter. Selv om de gjennomsnittlige retningene til bruddstrukturene i begge datasettene (sprekker og lineamenter) samsvarer, ser vi en forskjell i hvilke sprekkesett og hvilken lineamentpopulasjon som dominerer. I lineament-datasettet dominerer de NØ-SV-orienterte lineamentene (populasjon 2), men for vektet SL-data dominerer N-S- sprekkesettet. CM-dataene viser imidlertid et dominerende Ø-V-sprekkesett, og det er derfor sannsynlig at både det N-S- og Ø-V-orienterte sprekkesettet dominerer i Orkanger. Dette mønsteret gjenspeiles i Otto-lineamentene, da både populasjon 1 (NNØ-SSV) og 2 (NØ-SV) er relativt lik i mengde. Lineamenter tilhørende populasjonen 2 følger den NØ-SV-orienterte foliasjonen, men er samtidig relativt lik Ø-V sprekkesettet. Derfor er det sannsynlig at populasjon 2 inneholder både lineamenter som er relatert til duktil sen kaledonsk deformasjon (foliasjonsparallel) og senere sprø deformasjon, som sprekker og forkastninger.

En av arbeids-hypotesene i dette prosjektet var at lineamenttetthet kunne knyttes til sprekketetthet, da både lineamenter og sprekker reflekterer berggrunnens oppsprekking. Sprekke-frekvens vil redusere betydelig fra overflaten ned til dyp på 100-300 m (Boutt mfl., 2010), men vi forventer at områder med høy sprekk- og lineament-tetthet på overflaten også har høy oppsprekking i dypet, hvor grunnvannstrømning er mulig. Innenfor Orkanger-området er lineamenttetthet, sprekkfrekvens og sprekketetthet høyest på østsiden av Orkla (Figur 5-1 A). Denne korrelasjonen mellom lineamenttetthet, sprekkfrekvens og sprekketetthet er ikke like tydelig om vi analyserer retnings-settene (lineamentpopulasjon sammen med sprekkesett) hver for seg (Figur 5-1 B, C, og D). For N-S-settene, ser vi at tetthet fra lineamenter og sprekker samsvarer ganske bra, både for områder med høy og lav tetthet. For de andre lineamentpopulasjonene og sprekkesettene ser vi kun stedvis et godt samsvar. Lineamenttetthet for NV-SØ populasjonen er generelt lav samtidig som sprekketetthet er høy for tilsvarende sprekkesett, noe som indikerer at lineamentene ikke klarer å fange opp det NV-SØ-orienterte sprekkesettet i større skala. Det er enkelte feltlokaliteter som ikke passer inn i det overordnede mønstret vi beskriver, noe som sannsynligvis er knyttet til lokale litologiske variasjoner.



Figur 5-1. forhold mellom lineamenttetthet og sprekkfrekvens og sprekketetthet. (A) viser hele datasett, (B) viser kun lineamentpopulasjon 1 og N-S sprekkesett, (C) viser lineamentpopulasjon2 og Ø-V sprekkesett og (D) viser lineamentpopulasjon 3 med NV-SØ sprekkesett. Rosediagrammer for hver kart viser lineamentdata til venstre og sprekkedata til høyre.

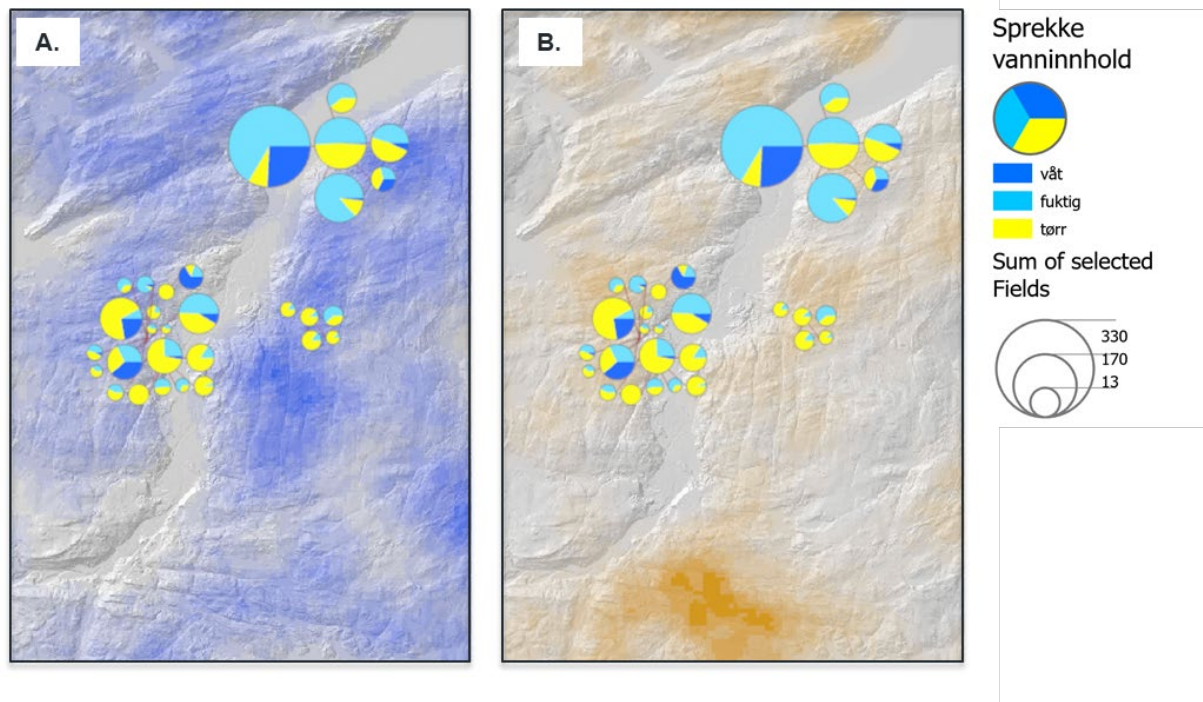
Vi sammenligner lineament-lengde mot sprekk-utholdenhet for å undersøke om det lokale mønstret reflekteres i regionale lineamenter. Interessant nok ser vi en svært god korrelasjon mellom tetthet av de korte lineamentene og sprekketetthet av begrensede sprekker (Figur 5-2). Høy tetthet av korte lineamenter og begrensede sprekker kan være relatert til bergartstype. I felt ser vi at høy oppsprekking ofte forekommer i fyllitt og skifrige lag. Ved sammenligning av tetthet til lange lineamenter og gjennomgående sprekker, ser vi derimot ingen romslig korrelasjon. Dette betyr at vi kan sammenligne korte lineamenter med korte (begrensede) sprekker i felt, men at vi kan ikke sammenligne lange regionale lineamenter med lange sprekker i felt.



Figur 5-2. Lineamenttetthet for lineamenter som er klassifisert som lange (A) og lineamenter som er korte (B). Sprekkefrekvens for gjennomgående (A) og begrenset (B) er plottet over lineamenttetthet.

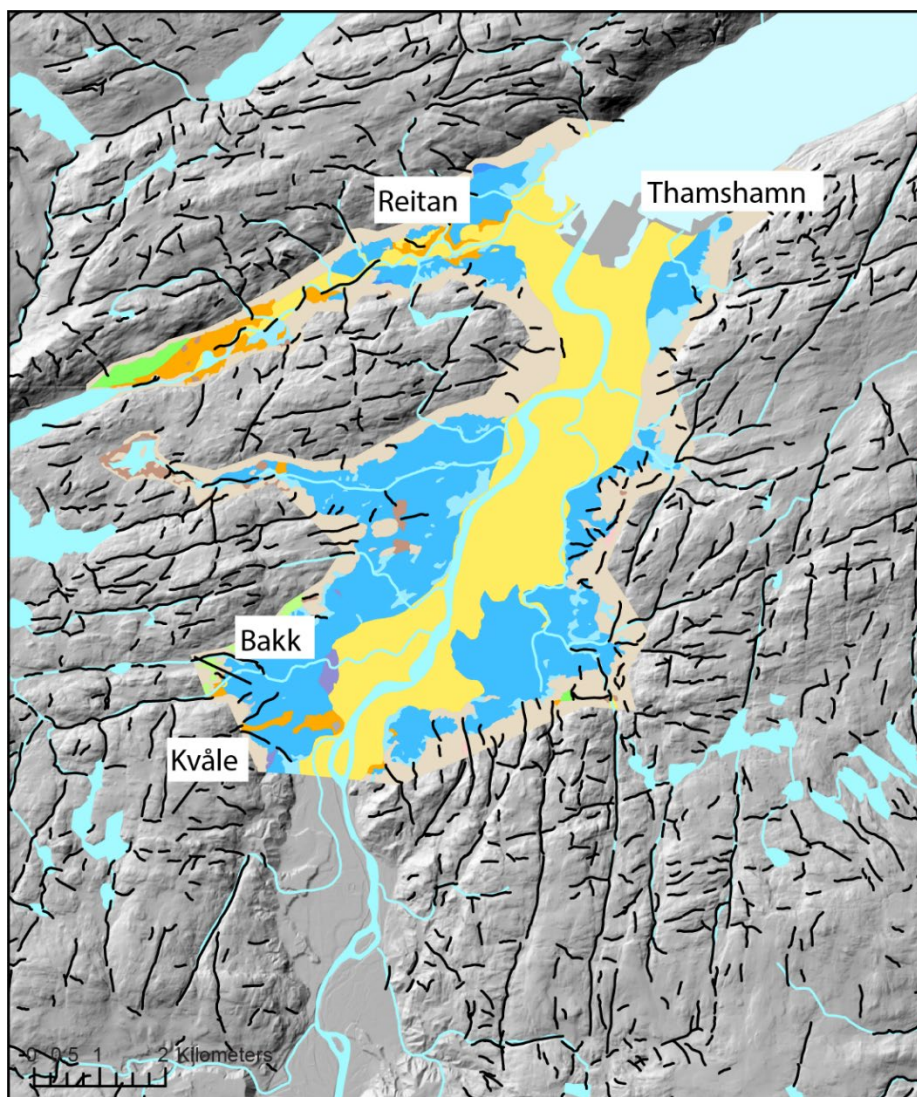
En annen hypotese vi ville teste var om lineamenter som fører rennende overflatevann (i elver og bekker) kan relateres til det samme sprekkesettet som er vannførende (klassifisert som 'våt' eller 'fuktig'). For hverken lineamenter eller sprekker ser vi et tydelig retnings-sett som rennende vann foretrekker å følge. Hadde vi sett tydelige korrelasjoner for hvilke retninger i lineamentdata og feltdata som er tørre og våte kunne vi brukt retnings-settene (lineamentpopulasjoner og sprekkesett) som grunnlag for å skalere opp (eller ned) egenskaper mellom feltdata og lineamentdata, for å lage prognosekart for vannførende bruddstrukturer. I begge datasettene, tilsvarende den dominerende retningen for våte sprekker og lineamenter det dominerende retnings-settet i hele datasettet.

Vi observerer den høyeste tettheten av vannførende sprekker og lineamenter i Thamshamn-området (Figur 5-3). Rundt Skåholt-Kvåle og Fannrem er det lavere tetthet og sprekkfrekvens av våte og fuktige sprekker. En omvendt sammenheng er observert for tørre sprekker og tørre lineamenter: større tetthet i Skåholt-Kvåle-området og lavere i Thamshamn (Figur 5-3). Feltobservasjoner av vanninnhold i sprekker er selvsagt avhengig av nedbør dagene før feltarbeid, men lineamentresultatene viser de vedvarende trendene for vannføring på overflaten. Fordi begge datasettene viser en økt vannføring i sprekker og lineamenter på østsiden av Orkla, tolker vi dette som en høyere sannsynlighet for grunnvannføring i sprekkesystemer i berggrunnen på østsiden av Orkla. Merk også at Thamshamn ligger i utkanten av Orkla-deltaet, hvor vann vil samle seg og det kan være større sannsynlighet for at vann infiltrerer berggrunns sprekker.



Figur 5-3. Lineamenttetthet for lineamenter som samsvarer med vassdrag (A) og lineamenter som ikke samsvarer med vassdrag (B). Kake diagrammer av vanninnhold i sprekker er plottet over lineamenttetthet.

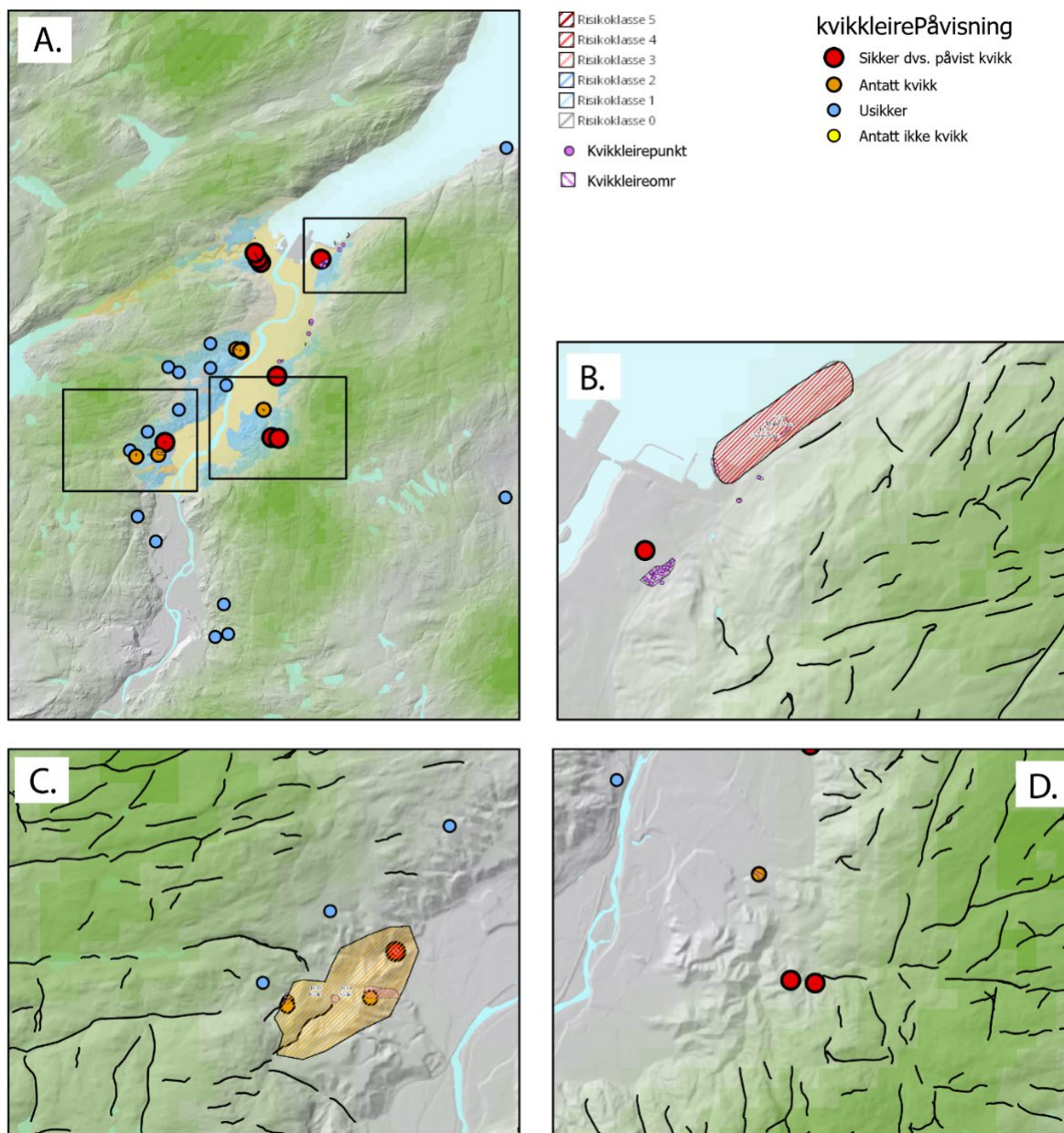
Både tørre sprekkeseett og lineamenter uten vannføring viser en høy tetthet rundt Skåholt-Kvåle og Fannrem. Ved disse områdene er også antall tørre sprekker høyere enn antall våte eller fuktige sprekker. Vi tolker disse mønstrene i sprekke- og lineamentdata til at grunnvannsstrømning gjennom bruddstrukturer i berggrunnen ved Skåholt-Kvåle og Fannrem sannsynligvis ikke er den viktigste årsaken til utvasking av marin leire eller kvikkleireskred. Skredavsetningen på Kvåle ligger langs et N-S lineament (Figur 5-4), og er ikke knyttet til noen sideelv eller bekk som strømmer inn i Orkla. Lineamentene som krysser inn mot de kartlagte kvartære avsetningene rundt Orkla er hovedsakelig orientert N-S, nesten parallelt med elva. De eldre skredavsetningene i Kvåle er derfor mer sannsynlig knyttet til flom og erosjon langs elva enn grunnvannstrømning gjennom sprekker i berggrunnen. Erosjon langs elvebredden vil lett utnytte de allerede-eksisterende N-S orienterte geologiske strukturene.



Figur 5-4. Løsmassekart med Otto-lineamenter fra senterlinje-datasettet.

5.1 Kvikkleire og sprekker i berggrunnen

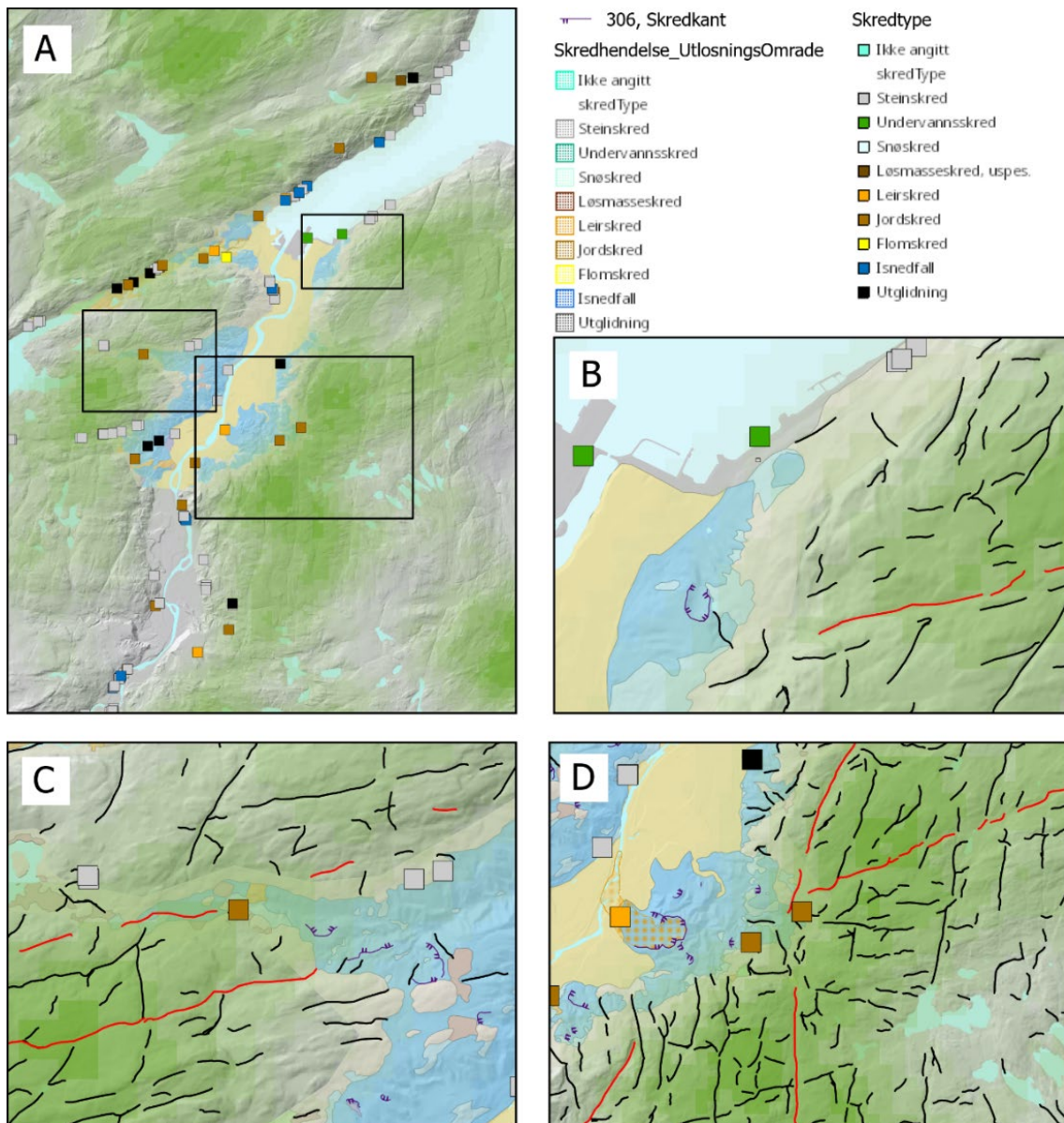
Hovedmålet med prosjekt var å undersøke sammenhengen mellom grunnvannstrøm i berggrunnens bruddsystemer og kvikkleire, en sammenheng vi finner i enkelte tilfeller. Rundt Orkla opptrer marine avsetninger av siltig leire, sandig leire og leirholdig silt, som alle kan være utvasket og dermed omdannet til kvikkleire. Geotekniske borehull fra NADAG og SVV gir oss punktdata om påvist kvikkleire i studieområdet som vi kan sammenligne med våre resultater. Påvist kvikkleire er funnet i den nordøstlige delen av Orkla (Figur 5-5) hvor senterlinjetetthet er høy, og vi har den høyeste sprekkefrekvensen. Geoteknisk kartlegging av potensiell fare for kvikkleireskred, viser at Thamshamn befinner seg i et område med høy faresone på grunn av terrengheving og påvist kvikkleire. Resultater både fra felt- og lineamentdata viser en konsistent høy oppsprekking i berggrunnen rundt Thamshamn forhold til andre deler av studieområdet. N-S-orienterte sprekker og lineament i populasjonen 1 dominerer ved Thamshamn, og kan potensielt lede grunnvann fra fastfjell til faresonen med påvist kvikkleire. På vestsiden av Orkla har mange borehull usikre funn av kvikkleire. Vestsiden av Orkla er et område med relativt lav lineamenttetthet.



Figur 5-5. (A) studieområde med lineamenttetthet, kvikkleirepunkter fra borehull og kvikkleirepåvisning fra NADAG database. (B) viser Thamshamn området med høy kvikkleireskred risiko i rød-stripet polygon. (C) og (D) viser kvikkleirepåvisning på Sundlia og Skåholt-Kvåle. Borehullene nord fra Skåholt-Kvåle viser i hovedsak usikkerhet ved kvikkleirepåvisning.

Over hele studieområdet finnes landformer som kjennetegner av kvikkleireskred, med utglidning i sirkulære former. De kjennetegnes hovedsakelig av topografi med bakskreter vinkelrett på Orkla, som det store skredet ved Sundlia. Ved Thamshamn derimot, finner vi skred med bakskreter som er parallell til et Ø-V lineament.

Vi ser en sammenheng mellom registrerte jordskred og lange lineamenter i studieområdet. De lange lineamentene som treffer områder med tidligere jordskredhendelser og skredkanter i marin leire er hovedsakelig orientert Ø-V eller N-S (lineamentpopulasjoner 1 og 2). Vi ser også at disse to retningene er de viktigste i sprekke datasettet når det gjelder utholdenhet og vann.



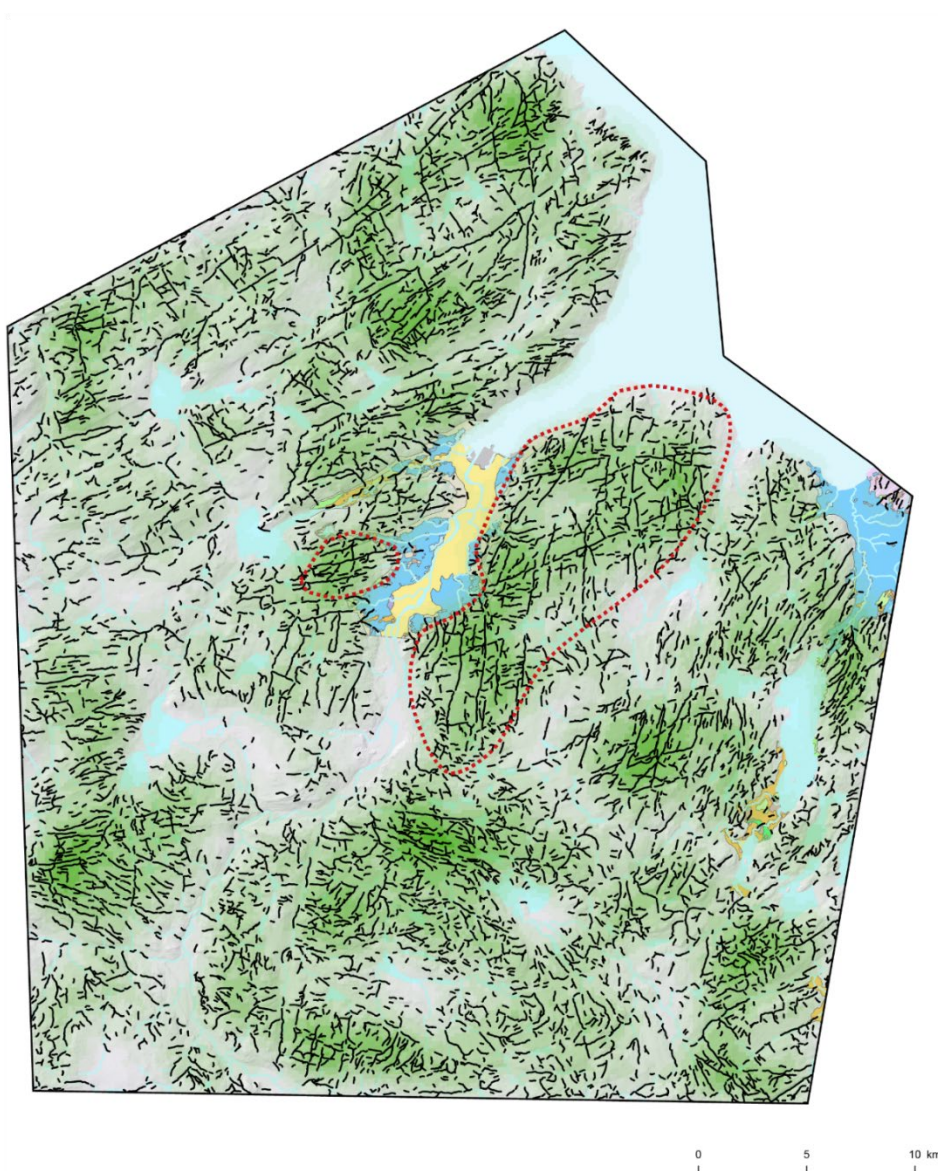
Figur 5-6. Lineamenttetthetskart med skredpunkter og løsmassekart. Store lineamenter i røde kan være knyttet til jordskred og skredkanter i marinleire.

Det er funnet andre skredhendelser i studieområdet som kan være knyttet til bruddstrukturer i berggrunnen. To historiske jordskred (Digeråsen og Sundlibrennan) ved Sundlia ligger langs et langt Ø-V lineament som krysser store deler av studieområdet. I tillegg ligger disse jordskredene i et område med høy lineament-tetthet, noe som antyder at dette er område med større oppsprekking i berggrunnen. Felt data fra Sundlia er dominert av Ø-V sprekker og de er sannsynligvis relatert til det lange lineamentet. Et jordskred i den vestlige delen av Orkla ligger også langs et langt lineament. De lange lineamentene her strekker seg over flere hundre meter, og kan være relatert til forkastninger. Alle de nevnte jordskredene kan være relatert til erosjon langs disse lange berggrunns-lineamentene.

Vestsiden av Orkla har ingen påviste leirskred, og borehull viser usikkerhet om kvikkleire. Til tross for dette, er flere skredkanter kartlagt i marine avsetninger på vestsiden av Orkla. Disse skredkantene tyder på at det har foregått en utvasking og omdanning av leire til kvikkleire, og at terrenget har sklidd (Figur 5-6c). Utvasking av marin leire kan ha vært påvirket av grunnvannstrømning gjennom sprekker i berggrunnen, men er mer sannsynlig styrt av

vassdrag og nedbør. Vi ser vi at enkelte skredkanter i kvikkleire og jordskred ligger parallelt til store lineamenter, noe som kan bety at vannstrømning i dypet langs sprekker i berggrunnen har hatt en betydning i disse skredhendelsene

Sammenstilling av felt- og lineamentdata viser at berggrunnen på østsiden av Orkla er mer oppsprukket med lange, åpne sprekker som gjør det lettere for grunnvann å strømme gjennom berggrunnen. I tillegg finner vi store lineamenter rundt Thamshamn og Sundlia som treffer områder der det er registrert skredhendelser (både jord- og kvikkleirskred) og områder med tegn til utvasket marin leire (Figur 5-7). Alle disse observasjonene indikerer at mer vann har infiltrert de marine avsetningene på østsiden av Orkla, noe vi tolker til å være relatert til grunnvannstrømning gjennom sprekkesystemer i berggrunnen. Sprekkesystemet på vestsiden av Orkla vil trolig også være grunnvannførende, men i mindre grad enn sprekkesystemet på østsiden. På bakgrunn av dette, anbefaler vi at lineamenttetthet og filtrerte senterlinjedata blir brukt sammen for å bedre forstå sprekkesystemet i berggrunnen (Figur 5-7).



Figur 5-7. Lineamenttetthet og senterlinjer kart over studieområdet. Området utsett for høyer sannsynlighet for grunnvannstrøm gjennom berggrunnsprekker er skissert i stiplede røde linjer.

6. KONKLUSJONER

Innenfor studieområdet i Orkanger utforsket vi ulike metoder for å undersøke om det var mulig å bruke digitale lineamenter fra DTM-data for å si noe om berggrunnens sprekkesystemer. Feltobservasjoner inneholder detaljerte beskrivelser, men er dessverre begrenset til enkelte lokaliteter. Lineamentkart dekker mye større områder, men mangler de detaljer som vi har i feltobservasjoner. Ved å filtrere lineamentdatasettet på lengde (>150 m) og dybde (<-10 m), kom vi frem til et lineamentdatasett som i stor grad representerer reelle bruddstrukturer i overflaten av berggrunnen. Vi fant gode korrelasjoner mellom retninger til lineamentpopulasjoner og sprekkesett, og hadde dermed et troverdig grunnlag for å sammenligne egenskaper mellom de to datasettene, for så å relatere feltobservasjonene til et større regionalt område. En slik øvelse er ikke en erstatning for detaljerte feltstudier, men et supplement for å forstå de generelle trendene innenfor et område.

Hovedresultatet er at lineamentene viser de samme retningene som sprekkesettene fra felt. Basert på dette, kan egenskapene til lineamentene sammenlignes med egenskapene til sprekke for å gi oss mer informasjon om berggrunnens sprekkesystemer innenfor prosjektområdet. I tillegg, ser vi romlige korrelasjoner mellom lineament-tetthet og sprekke-frekvens, som bekrefter at vi kan bruke lineamenttetthet til å si noe om sprekkefrekvens innenfor prosjektområdet. Både lineamenter fra DTM-data og sprekke-data samlet i fra felt indikerer at vi har tre sprekkesett som dominerer i Orkanger-området, i tillegg til foliasjons-parallele sprekker. Den regionale foliasjonen gjenspeiles i lineamentdataene, men ikke i sprekke-dataene. Vi ser også at det er nyttig å sammenligne vassdrag til lineamenter for å finne ut hvilke lineamentpopulasjoner som kan være knyttet til grunnvannstrømning.

Fra våre resultater kan vi tolke at det er større sannsynlighet for grunnvannsstrømning på østsiden av Orkla som kan føre til utvasking av marin leire. Sprekkefrekvens, bruddtetthet og lineamenttetthet er størst på østsiden av Orkla. På østsiden av Orkla er det store sideelver som strømmer inn i Orkla, men disse følger ikke hovedtrendene for regionale lineamenter i det området. På østsiden av Orkla er det derfor lite sannsynlig at grunnvannsstrømning vil være en like stor medvirkende faktor som nedbør og flom. Av de tre sprekkesettene, har de N-S og Ø-V-orienterte sprekkesettene/lineamentpopulasjonene konsekvent et forhold til vannføring (på overflaten/i sprekke) og lengde/utholdenhet. N-S og Ø-V-orienterte sprekkesett utgjør sannsynligvis de dominerende sprekkesettene også i dybden, i tillegg til foliasjons-parallele sprekker.

- Høyest bruddtetthet i felt- og lineament-data på østsiden av Orkla
- Svakt samsvar mellom lineamenter/sprekker og vassdrag (vannføring) på vestsiden av Orkla
- N-S orienterte lineamenter indikerer at erosjon av elveskråninger utnytter berggrunns sprekker

7. REFERANSER

- Berkowitz, B., (2002) Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review, *Adv. Wat. Res.*, 25, 861-884 [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00042-8)
- Björn, N., Nixon, C.W., og Sanderson, D.J. (2018) NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. *Geosphere* 14 (4): 1618–1634. <https://doi.org/10.1130/GES01595.1>
- Boutt, D.F., Diggins, P. og Mabee, S. (2010) A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeol J* 18, 1839–1854 <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0640-y>
- Cacciari, P.P. og Futai, M.M. (2019) Effects of mica content on rock foliation strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* v. 124, 104143 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104143>
- Chandra, S., Auken, E., Maurya, P.K., Ahmed, S., og Verma, S.K. (2019) Large Scale Mapping of Fractures and Groundwater Pathways in Crystalline Hardrock By AEM. *Nature Sci Rep* 9, 398 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36153-1>
- Doolaeghe, D., Darcel, C., Selroos, J.O., Ivars, D.M., og Davy, P. (2023) Controls on fracture openness and reactivation in Forsmark, Sweden. *Sci Rep* 13, 6686 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33619-9>
- Fejerskov, M., Lindholm, C., Myrvang, A., og Bungum, H. (2000) Crustal stress in and around Norway: a compilation of in situ stress observations. *Geol Soc, Lon, Spec Pub* v. 167, 441 – 449, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.167.01.18>
- Fejerskov, M., and Lindholm, C., (2000) Crustal stress in and around Norway: an evaluation of stress-generating mechanisms. *Geol Soc, Lon, Spec Pub* v. 167, 451 – 467, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.167.01.19>
- Gasser, D., Svendby, K., Solli, A. & Slagstad, T. (2018) ORKANGER 1521-1 Berggrunnskart M 1:50 000. Norges geologiske undersøkelse
- Hansen, L. og Gislefoss, L., (2021) Nordlige Orkdals kvartærgeologi. Beskrivelse til Kvartærgeologisk kart (1:20.000), NGU Rapport 2021.021
- Healy, D. Rizzo, R.E., Cornwell, D.G., Farrell, N.J.C., Watkins, H., Timms, N.E., Gomez-Rivas, E., og Smith, M., (2017) FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *J Struct Geol*, v.95, 1-16 <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.12.003>
- Krabbendam, M. og Dewey, J. E. (1998) Exhumation of UHP rocks by transtension in the Western Gneiss Region, Scandinavian Caledonides, Geological Society, London, Special Publications V. 135, 159 – 181 <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.135.01.11>
- Manda, A.K., Mabee, S.B., og Wise, D. U., (2008) Influence of rock fabric on fracture attribute distribution and implications for groundwater flow in the Nashoba Terrane, eastern Massachusetts, *J. Struct. Geol.*, 30, 464-477, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.12.006>
- Manda, A.K., Mabee, S.B., Boutt, D.F., og Cooke, M.L., (2013) A method of estimating bulk potential permeability in fractured-rock aquifers using field-derived fracture data and type curves. *Hydrogeol J* 21, 357–369 <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0919-2>
- Martel, S. (2017) Progress in understanding sheeting joints over the past two centuries, *J. Struct. Geol.*, 94 68-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.003>

- Odling, N., (1997) Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway, *J. Struct. Geol.*, 19(10) 1257-1271 [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(97\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(97)00041-2)
- Priest, S.D. og Hudson, J.A. (1981) Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 18(3), 183-197. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90973-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90973-6)
- Sanders, P. (2007) Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations, *Hydrogeol. J.*, v15, 71-74. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0138-9>
- Vollmer, F.W. (1990) An application of eigenvalue methods to structural domain analysis. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 102(6):786–791, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102<0786:AAOEMT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<0786:AAOEMT>2.3.CO;2)
- Watkins, H., Bond, C. E., Healy, D., og Butler, W.H., (2015) Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop, *J. Struct. Geol.*, 72, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.001>
- Wiig, T., Strand, S.-A., and Haugen, E.D., (2019) NVE Veileder nr. 1/2019, Sikkerhet mot kvikkleireskred: vurdering av områdestabilitet ved arealplanlegging og utbygging i områder med kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper.



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
· NGU ·

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no