



GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·



Rapport nr.: 2019.025		ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)		Gradering: Åpen	
Tittel: Forundersøkelser E6 trasé Åsen-Ulsberg - Coop3 for Nye Veier					
Forfatter: Odleiv Olesen, Vikas Baranwal, Atle Dagestad, Eyolf Erichsen, Marie Keiding, Bjørn Eskil Larsen, Janja Knežević, Eirik Pettersen, Tim Redfield, Håkon Rueslåtten, Agnes Raaness, Jasmin Schönenberger, Anna Seither, Trond Slagstad, Anne Kathrine Svendby & Guri Venvik			Oppdragsgiver: Nye Veier, NGU, Oljedirektoratet, DNO, Equinor, INEOS, Lundin Petroleum, Neptune Energy, Petrolia, Repsol, Spirit Energy, Suncor Energy, Total & Wintershall Dea		
Fylke: Trøndelag			Kommune: Levanger, Malvik, Melhus, Midtre Gauldal, Rennebu, Stjørdal, Trondheim		
Kartblad (M=1:250.000) Trondheim			Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)		
Forekomstens navn og koordinater:			Sidetall: 116		Pris: 136
			Kartbilag:		
Feltarbeid utført: Oktober 2018-mai 2019		Rapportdato: 13.06.2019		Prosjektnr.: 362210	Ansvarlig:
Sammendrag: <p>Nye Veier har gått inn som deltager i Coop3 prosjektet (Crustal Onshore-Offshore Project 3) som er et kartleggings- og forskningsprosjekt for Møre-Trøndelag-området. Prosjektet finansieres av 12 oljeselskap, Oljedirektoratet, Nye Veier og NGU. Dypforvitret grunnfjell har vært av særlig interesse for oljeindustrien ettersom det er funnet olje og gass i slike bergarter på kontinentalsokkelen. Utvidelsen av Coop3 prosjektet med Nye Veier langs E6 i Trøndelag omfatter også sammenstilling av eksisterende data om berggrunn, byggeråstoff og InSAR i tillegg til et forbedret aktsomhetskart for tunnelplanlegging, grunnvannsmodellering, studier av leirminerale i svakhetssoner og måling av elektrisk motstand i undergrunnen. Sammenstilling og harmonisering av åtte berggrunnskart langs ny planlagt ny E6 gjennom Trøndelag gir et forbedret grunnlag for valg av traséer og effektiv bruk av utsprengt masse. Det er utviklet et nytt aktsomhetskart for tunnelplanlegging basert på den vertikaleriverte av en 10x10 m høydemodell. Resistivitetsmålinger på bakken (ERT-profiler) viser en markert, ca. 20 m bred leiromvandlet sone i Langsteindalen og grafitteholdige fyllitter ved Kvithammar (sørlige påhugg for Forbordsfjelltunnelen). Nordlig påhugg i Vuddudalen består sannsynligvis av massive, friske bergarter (konglomerat). Resistivitetsmålinger over Tronggjelet 200 m sør for eksisterende Væretunnelen viser at denne kløften skyldes en ca. 20 m bred, Ø-V-gående leirholdig svakhetsone. En smalere (5-10 m bred) NØ-SV-gående svakhetsone krysser Væretunnelen. Resistivitetsmålinger over planlagt miljøtunnel på Åsen antyder kvikkleire i undergrunnen. Dyp til fjell varierer fra ca. 25 m i sør til 0 m i nord. XRD-analyser av leirholdige svakhetssoner fra Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik og Geilhaugen (ved Kvithammar) viser at de alle inneholder smektitt (svelleleire), men målinger av svelletrykk gir lavt svelletrykk. Prøver fra borehull B i Langsteindalen inneholder 4-5 % smektitt. Det er ikke funnet indikasjoner på karstdannelse ved de planlagte tunnelpåhuggene til Forbordsfjelltunnelen. Materialtekniske analyser viser at kvaliteten for flere av bergartene som kan opptre langs vegtraséen mellom Åsen og Ulsberg kan være egnet til vegfundament (bære- og forsterkningslag). Det er lite sannsynlig at bergartsmaterialet vil tilfredsstille kravene for tilslag i vegdekke med høy trafikkbelastning. En GIS-analyse av potensialet for vannlekkasje i den planlagte traséen for Forbordsfjelltunnelen viser et stor potensial for vannlekkasje under Langsteindalen der fjelloverdekningen er planlagt til 20-30 meter. Dette området bør få spesielt mye oppmerksomhet i videre planlegging av Forbordsfjelltunnelen.</p>					
Emneord:		Berggrunnsgeologi		Geofysikk	
Grunnvann		Byggeråstoff		Pukk	
Elektriske målinger		Dypforvitring		Fagrapport	

INNHOLD

0.	Innledning.....	1
1.	Tropisk dypforvitring.....	3
2.	Harmonisering av eksisterende berggrunnskart i målestokk 1:50.000 og 1:250.000 langs den planlagte utbyggingstraséen for E6 fra Ulsberg til Åsen.....	11
	2.1 Innledning	11
	2.2 Harmonisering av eksisterende berggrunnskart:	11
	2.2.1 Følgende kart berøres av vegtraséen (fra sør mot nord):.....	11
	2.2.2 Kommentarer til harmoniseringen av geologien langs den planlagte vegtraséen fra Ulsberg til Trondheim:.....	11
	2.2.3 Harmonisering fra og med kartblad Trondheim og nordover:.....	12
	2.3 Tegnforklaring	13
	2.4 Geologi	13
	2.4.1 Bemerkninger til geologien.....	13
3.	Improvement of rock construction awareness map for new E6 in Trøndelag.....	21
	3.1 Summary	21
	3.2 Introduction	21
	3.3 AMAGER method	22
	3.4 Awareness map derived only from topography	23
	3.5 SKYTEM survey in the Ranheim-Hommelvik area	33
	3.6 Conclusions	39
4.	Resistivetsundersøkelser Ranheim - Åsen.....	41
	4.1 Innledning	41
	4.2 ERT metodikk	42
	4.3 Resultater	43
	4.3.1 Langsteindalen - Profil 1 og Profil 2.....	43
	4.3.2 Åsen - Profil 3.....	43
	4.3.3 Kvithammar – Profil 4.....	44
	4.3.4 Vuddudalen – Profil 5.....	44
	4.3.5 Tronggjelet – Profil 6.....	44
5.	Mineralsk sammensetning av noen forvitringssoner i Trøndelag.....	55
	Sammendrag	55
	5.1 Prøvelokaliteter	55
	5.2 Behandling og analyse av prøvene	59
	5.2.1 Fraksjonering av prøvene.....	59
	5.2.2 Mineral-bestemmelser på XRD.....	60
	5.2.3 Svelletrykksmålinger.....	64
	5.3 Kjemiske analyser	65
	5.3.1 Graden av kjemisk forvitring vurdert fra hovedelementene.....	65
	5.3.2 Tungmetaller og sulfider.....	66
	5.4 Analyser av kjernene fra Borehull-A og -B i Langsteindalen	68
	5.4.1 Kjernebeskrivelse for Borehull-A, Drogset, Langsteindalen.....	68
	5.4.2 Kjernebeskrivelse for Borehull-B, Drogset, Langsteindalen.....	70
	5.4.3 Prøvetaking av kjernemateriale fra Borehull-B, Drogset.....	71
	5.4.4 Analyser av kjernemateriale fra Drogset.....	73
	5.5 Konklusjoner	74
6.	3D modell.....	77
7.	Kalkstein og karst-potensiale i Forbordsfjellet og Åsen.....	79
	7.1 Hva er karst?	79
	7.2 Hvorfor bør man være obs på karstdannelse?	79
	7.3 Kalkstein og marmor i ny E6-trasé	79
	7.3.1 Forbordsfjellet:.....	80
	7.3.2 Åsen.....	81
	7.4 Oppsummering	81
8.	Byggeråstoff Åsen-Ulsberg.....	83
	Sammendrag og konklusjon	83
	8.1 Bakgrunnsmateriale	83
	8.2 Materialt Tekniske Egenskaper	83
	8.2.1 Egnethet til Vegdekke.....	84

8.2.2	Egnethet til bærelag.....	86
8.2.3	Egnethet til forsterkningslag.....	88
9.	InSAR Norge.....	95
9.1	Hvordan fungerer InSAR?	95
9.2	Karttjenestens funksjonalitet	96
9.3	Bevegelser langs E6 traséen	96
9.4	Kjente problemer med datasettet	98
10.	En analyse av potensialet for innlekkasje av vann for Forbordsfjelltunnelen - Nye E6 mellom Kvithammer og Åsen i Trøndelag Fylke	99
10.1	Datagrunnlag for analysen	99
10.2	Metode for nedbørsanalyse	99
10.3	Analyse og resultat	99
11.	Konklusjoner	105
12.	Referanser	107

Innledning

Nye tunnelprosjekter i Norge, f.eks. langs E6, E18 og E39, representerer noen av de største investeringsprosjektene utenfor oljesektoren i Norge. Et titalls tunneler langs nye E6 i Trøndelag er i ulike stadier i planleggingsprosessen hos Nye Veier. Det er lønnsomt å bedre kunnskapen om fjellkvalitet, svakhetssoner og grunnvann i berggrunnen langs den planlagte traséen. Det er gunstig både for samfunnsøkonomien, naturen og klimaet å benytte de utsprengte massene så effektivt som mulig og redusere tungtransport.

Det har vært en rekke problemer knyttet til tunnelprosjekter i de siste tiårene som f.eks. rasene i Oslofjord-, Hanekleiv- og Ravnehei-tunnelene. De største vanskeligheter oppsto i Lierås- og Romeriksporttunnelene (Huseby 1968, Palmstrøm o.a. 2003). Kostnadene for Romeriksporten ble tredoblet i forhold til budsjettet og overskridelsene beløp seg til nærmere en milliard. Negative erfaringer med tunnelbygging i Osloområdet går helt tilbake til tidlig på 1900-tallet. Byggingen av Holmenkollbanen medførte for eksempel så store vanskeligheter at utbyggingsselskapet gikk konkurs (Kirkemo 2000; Olesen 2017). Ekstra kostnader i forbindelse med tunnelprosjekter på Østlandet beløper seg til flere milliarder kroner.

I Trondheimsregionen har det vært mindre problematisk å bygge tunneler. En rekke tunneler for vannforsyning (f.eks. Jonsvatnet-Jakobsli), kloakk (f.eks. Nidelva-Høvringen), jernbane (f.eks. Leangen-Lerkendal) og vei (f.eks. Strindheimtunnelen) har vært bygd uten større stabilitets- eller lekkasjeproblemer. Ett unntak er et ras i en svakhetssone under byggingen av Helltunnelen mellom Hommelvik og Hell på 90-tallet der en lastebilsjåfør omkom. En mulig forklaring er at disse tunnelene ligger ca. 200 m dypere enn de kjente dypforvitringssonene i Bymarka (Leirdalen ca. 200 moh.) og Estenstadmarka (Styggdalen, Ramdalen og Ratåsdaalen ca. 300 moh.) Problemtunnelene på Østlandet har vanligvis mindre fjelloverdekning. De ligger dessuten i den permiske Osloriften med et stort antall dype forkastningssoner og permiske størkningsbergarter med 1-3 % porøsitet. Forekomst av kvikkleire ved påhuggene av eksisterende tunneler i Trondheimsområdet har bydd på utfordringer (f.eks. ved det sørvestlige påhugget til Leangen-Lerkendal tunnelen og det vestlige påhugget til Strindheimtunnelen).

Etter at NGU laget et aktsomhetskart for tunnelplanlegging langs E18 og E39 på Sørlandet og langs E6 i Trøndelag (Baranwal o.a., 2017) som en del av Coop1 og Coop2 prosjektene (Crustal Onshore-Offshore Project, fase 1 og 2), besluttet Nye Veier å gå inn i Coop3 prosjektet som omfatter et mer detaljert studium av Møre-Trøndelag-området. Dypforvitret grunnfjell har vært av særlig interesse for oljeindustrien ettersom det er funnet olje og gass i slike bergarter på kontinentalsokkelen. Coop-prosjektene har vært finansiert av til sammen 22 oljeselskap, Oljedirektoratet, BKK og NGU i tillegg til Nye Veier. Utvidelsen av Coop3 prosjektet med Nye Veier langs E6 i Trøndelag omfatter sammenstilling av eksisterende data om berggrunn, byggeråstoff og InSAR i tillegg til et forbedret aktsomhetskart for tunnelplanlegging, grunnvannsmodellering, studier av leirminerale i svakhetssoner og måling av elektrisk motstand i undergrunnen. Strekingen Kvithamar-Åsen er gitt høyest prioritet. Sammenstilling av kvartærgeologiske data (inkludert kvikkleire) har ikke vært en del av prosjektet. Nye Veier har vurdert at de allerede har geoteknisk kompetanse i Trøndelagprosjektene. Nye Veier vil evt. komme tilbake til bestilling av en forlengelse av forprosjektet i en fase 2. Dette arbeidet vil i så fall bli konsentrert i sørlige deler av strekingen Åsen-Ulsberg.

To rapporter er allerede utarbeidet for Nye Veier innen Coop3 prosjektet:

Ericksen, E. & Finne, T.E. 2019: Nye Veier, E6 trasé Ranheim-Værnes. Bruksegenskaper til bergartsmateriale langs traséen. NGU Rapport 2019.010, 20 s.

Seither, A., Dagestad, A. & Venvik, G. 2019a: En analyse av potensialet for innlekkasje av vann for Forbordsfjelltunnelen. Nye E6 mellom Kvithamar og Åsen i Trøndelag fylke. NGU rapport 2019.005. 26 s.

Et sammendrag av Seither o.a. (2019a) er inkludert som kapittel 10 i inneværende rapport.

Anne Liinamaa-Dehls har satt sammen de 10 kapitlene i inneværende rapport i Microsoft Word.

1. TROPISK DYPFORVITRING

Odleiv Olesen

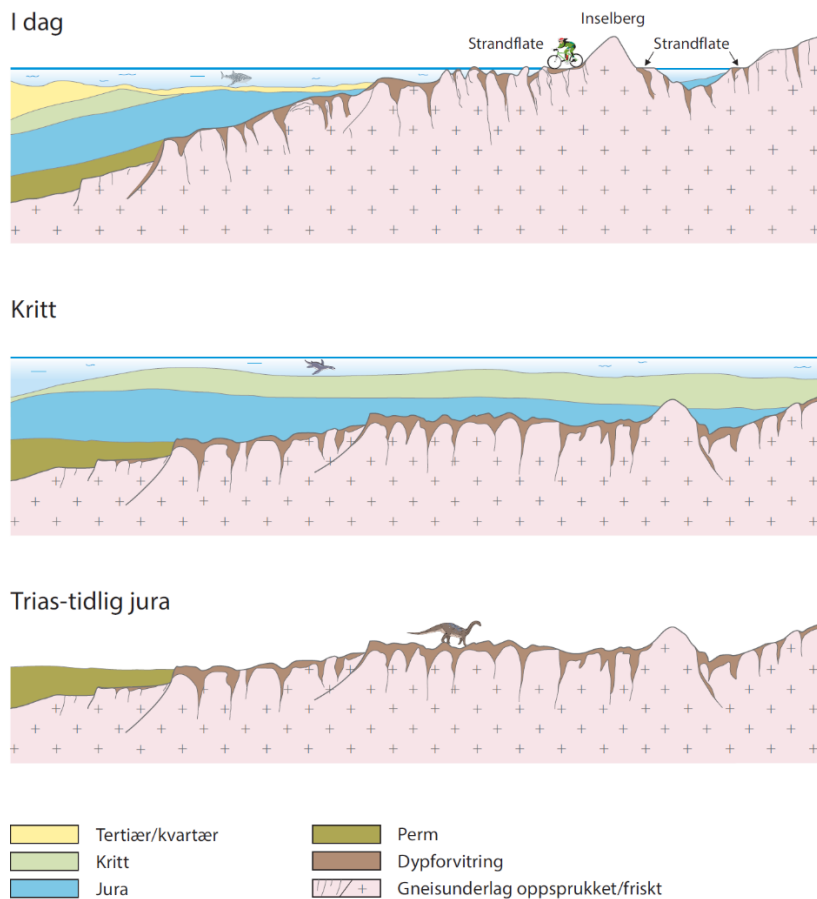
I trias-jura for mer enn 150 millioner år siden – var det et varmt klima i området som senere ble Norge. På denne tiden lå Midt-Norge på samme breddegrad som nord-India i dag. Det varme og fuktige klimaet ga gode vekstforhold for regnskoger, og restene finner vi i dag igjen som tykke kullag både i Nordsjøen og Norskehavet. Syrer som dannes fra organisk materiale gjør vannet surt. Det sure vannet rant gjennom sprekker i den underliggende berggrunnen og angrep silikatmineralene som langsomt ble brutt ned til leirmineraler. I svakhetssoner dannet under tidligere forkastningsaktivitet eller hydrotermal omvandling, kunne den altså trenge langt ned i berggrunnen (Figur 1-1 & Figur 1-2). Produktene fra forvitringen består bl.a. av leirmineralet smektitt (svelleleire). Basert på geologiske og geofysiske undersøkelser tror vi at denne leirinfiserte berggrunnen skaper hodebry for tunnelbyggere i Norge.

Denne nye geologiske viten er basert på 20 års forskning på berggrunn og landskapsformer i bl.a. Sør-Sverige utført av professor Karna Lidmar-Bergström ved Universitetet i Stockholm. Hun har vist at det i Skåne ligger et opptil 60 meter tykt lag av forvitringmateriale under sedimentære bergarter av sen jura og kritt alder (Lidmar-Bergström, 1995). Det øverste laget av dypforvitringen ble erodert i sen jura eller tidlig kritt. Produkter fra dypforvitring i form av svelleleire og kaolin finnes også i gneisunderlaget under jura-krittbergartene på Andøya (Sturt o.a., 1979) og ute på kontinentalsokkelen (Roaldset o.a., 1993; Fredin et al., 2017).

Geologiske og geofysiske observasjoner i områder med kjent dypforvitring (f.eks. i Ukraina og Australia; Kitchka, o.a. 2016; Scott & Pain, 2008) viser at forvitringen opptre på to forskjellige måter: enten som flatedekkende omvandling av berggrunnen med noen titalls meter mektighet, eller langs forkastninger og sprekkesoner der forvitringen ofte går ned til flere hundre meter. Den flatedekkende typen er observert bare på noen få lokaliteter i Norge: Kjøse i Vestfold, Vestvågøya, Hadseløya, Andøya og Hamarøya i Nordland (Låg, 1945; Sørensen 1988; Olesen et al. 2012). Figur 1-3 viser forekomst av flateforvitring ved Holsjøen i Trøndelag og Figur 1-4 viser lineær forvitring langs en sprekkesone i Leirdalen vest for Trondheim. Det er funnet smektitt ved begge lokaliteter (Kapittel 5, Rueslåtten o.a., 2019). Såkalt lineær forvitring langs forkastninger og sprekkesoner er derimot funnet en rekke steder i Norge. Det var en utbredt oppfatning på 70- og 80-tallet at leiromvandlinger i sprekkesoner skyldtes hydrotermal omvandling, og de var derfor interessante for malmleting. K-Ar-datering av slike omvandlinger på Østlandet og Sørlandet ga ofte en sen trias alder (Ihlen o.a., 1978, 1984; Ineson o.a., 1975, 1978), og det er derfor mer naturlig å assosiere dem med dypforvitring enn med permisk magmatisk aktivitet. K-Ar datering av leirmineraler fra en dypforvitringssone fra Bømlo sør for Bergen har også gitt en sentriassisk alder (Fredin o.a., 2017). Geofysiske målinger viser at dypforvitringssonene på Østlandet fortsetter til dyp på mer enn 200 m (Olesen o.a., 2007). Andre steder i verden, som for eksempel i Ukraina og Australia, er det funnet tynne dypforvitringssoner ned til tusen meters dyp.



Figur 1-1: Områder med rester av subtropisk dypforvitring i sprekkesoner og mye leirholdig berggrunn i Sør-Norge og Sør-Sverige. En stor del av vei- og jernbanetunnelene på Sørlandet, Østlandet og Trøndelag bygges innenfor dette problemområdet. Berggrunnen på ytre deler av strandflaten på Vestlandet inneholder også sprekkesoner med dypforvitring (Rønning o.a., 2006; Olesen o.a., 2012; Fredin o.a., 2017). Kartet er modifisert fra Lidmar-Bergström o.a. (1999).



Figur 1-2: Utviklingsmodell for den ytre delen av den norske strandflaten. I kritt-tiden (145-66 millioner år siden) sto havnivået 200-300 m høyere enn i dag og sedimentære bergarter ble avsatt innover et dypforvitret grunnfjell langs norskekysten. I tertiær sank havnivået og fastlandet ble dessuten hevet og utsatt for erosjon. I kvartær og spesielt de siste 600.000 år førte de mange nedisingene til økt erosjon og ytterligere landhevning. De sedimentære lagene og underliggende dypforvitring ble dermed skråstilt og avkuttet langs kysten. Bredden av strandflaten avhenger av 1) fallvinkelen på grenseflata mellom gneisunderlaget og de overliggende sedimenter, 2) intensitet og dyp av forvitringen og 3) alder på hevingen og erosjonen. Eventuelle forkastninger langs kysten kan bidra til å redusere bredden på strandflata (slik som utenfor Stad og Lofoten) eller øke bredden (f.eks. i Trøndelag) avhengig av hvor og hvordan forkastningene opptrer (Olesen et al., 2013; Olesen, 2014). Inne i fjordene (f.eks. Trondheimsfjorden) er strandflaten mindre utviklet, men dypforvitringen er også delvis erodert i dette området.



Figur 1-3: Rest av flateforvitret grønnstein langs veien mellom Soknedalen og Holsjøen sør for Hølonde. Den ser ikke ut til å være knyttet til en sprekke- eller forkastningszone.

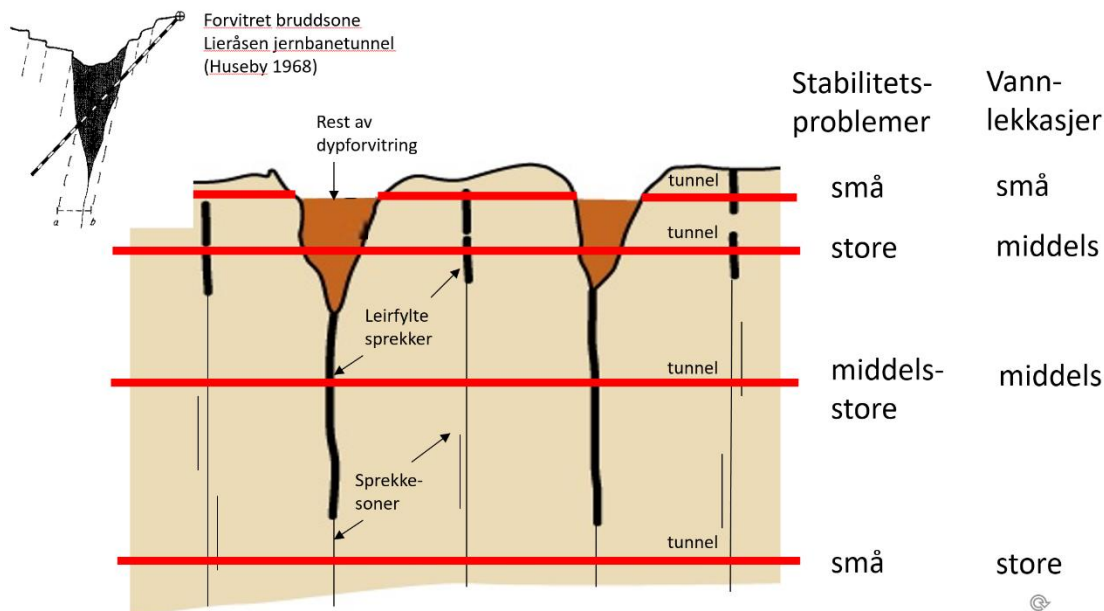


Figur 1-4: Eksempel på dypforvitret grønnstein i Ø-V-gående sprekkesone i Leirdalen vest for Trondheim (Bymarka). Dypforvittringssonen fortsetter sannsynligvis gjennom Styggdalen i Estenstadmarka øst for Trondheim.

Da havet steg med 300-400 meter og fløt inn over fastlandet i kritt tid (for ca. 140-66 millioner år siden), ble bergartene begravd av leirsteiner og krittbergarter av samme type som vi finner i Nordsjøen. Hevningen av Østlandet begynte på slutten av tertiærtiden, for ca. 50 millioner år siden og økte i kvartærtiden for ca. 2.5 millioner år siden (Riis, 1996). Produktene fra den subtropiske dypforvitringen ble sannsynligvis bevart helt frem til de store istidene satte inn for ca. én million år siden.

Under istidene sank havnivået igjen. Isens bevegelser, samt de store mengdene med smeltevann, fjernet laget med de bløte bergartene fra kritt og tertiær som hadde beskyttet forvitningsproduktene. Samtidig forsvant det øverste laget av de forvitrede bergartene, men de eroderende kreftene nådde ikke ned i de dype sprekkesonene hvor det kan ligge bevart mer enn 200 meter med forvitningsprodukter. Denne dypforvitringen kommer til syne når vi lager tunneler opptil 50-200 meter under dagens fjelloverflate.

Denne teorien for dannelse av leirsonene betyr at stabilitetsproblemer i tunneler vil avta med dypet (Figur 1-5). Vannlekkasjer kan derimot øke med dypet, noe som for eksempel kunne observeres under Puttjern og Lutvann i Romeriksporten. Denne kunnskapen om dannelse av svelleleire må tunnelplanleggere ta hensyn til ved planlegging og kostnadsberegning av nye tunneler (Olesen, 2004; Olesen o.a., 2007; Rønning o.a., 2006, 2007).



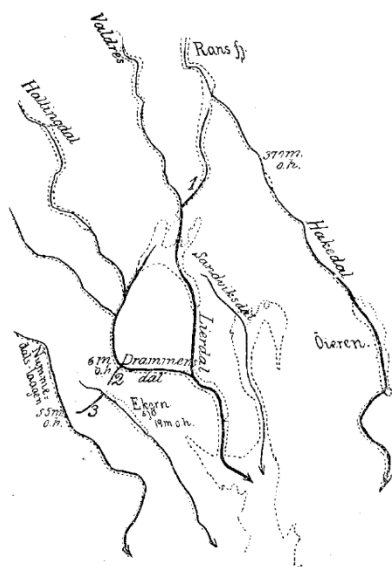
Figur 1-5: Prinsippskisse for hvordan tunnelproblemer i områder med dypforvitring varierer med dypet. En og samme tunnel kan ha flere typer problemer dersom høyden på overdekningen varierer langs tunneltraséen. Profilet øverst til venstre viser hvordan en svakhetssone langs Lieråstunnelen avtar med dypet på samme måte som i prinsippskissen.

NGUs tidligere direktør, geologen Hans Reusch, argumenterte rundt forrige århundreskifte for at hele Østlandet var dekket av sedimenter avsatt i kritt (Reusch, 1902), og at mange av landskapstrekkene ble lite forandret under istiden (Reusch, 1878; Figur 1-6). Han baserte hypotesen blant annet på et trekk i landskapet som han kalte "påtvungne daler" (Figur 1-7). Han mente at Numedalslågen ikke kunne erodere gjennom Skrimfjella uten at elveløpet var fastlagt i overliggende, bløtere sedimenter (Reusch, 1902). Han foreslo videre at Valdresvassdraget opprinnelig hadde fortsatt gjennom Hakadal/Nittedal og Øyeren og videre mot sørøst til dagens Fredrikstad. Dette elveløpet mellom Nordmarka og Romeriksåsen fulgte også en såkalt "påtvungnet dal". Valdresvassdraget hadde dermed opprinnelig samme retning som de øvrige større vassdragene i sentrale deler av Skandinavia. Funn av flint i morene på Østlandet ledet ham til å foreslå at det

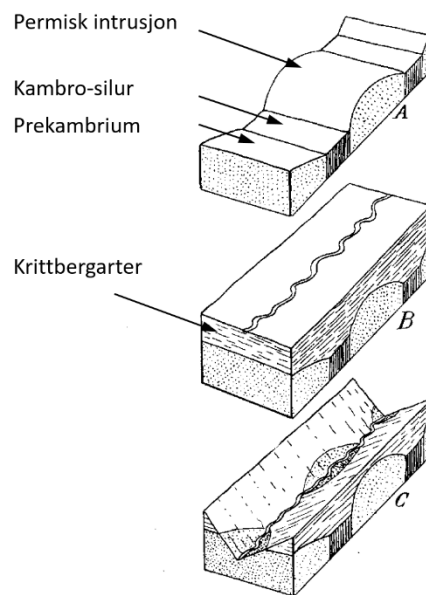
overliggende, bløtere laget kunne ha bestått av krittbergarter som var flintførende i Danmark. Dagens Grand Canyon er en god analog for utviklingen av påtvungne daler i Norge i tertiær og kvartær (Figur 1-8).



Figur 1-6: A) Stor blokk av overflateforvitret kalkstein ble transportert bort av innlandsisen i Ødegårdbukta ved Nevlunghavn i Vestfold (Reusch, 1878). Ingen ny forvitring er dannet etter at siste istid tok slutt for ca. 10.000 år siden. Den karakteristiske forvitningsflaten på kalkstein som en ofte ser rundt Oslofjorden (f.eks. ved Fornebu), må derfor være betydelig eldre enn siste istid, kanskje fra trias-jura. B) Samme lokalitet ved Nevlunghavn fotografert i 2006.

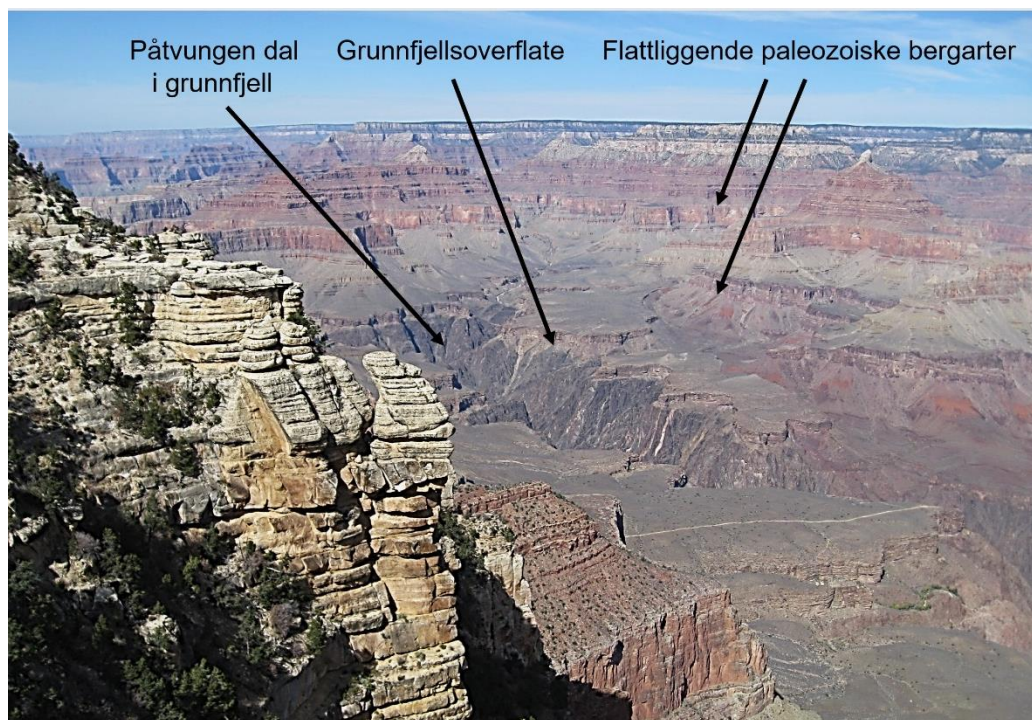


Hakadal og Numedal gjennomskjærer massive, permiske batolitter



Reusch 1902

Figur 1-7: Figuren viser hvordan påtvungne daler ble dannet i forbindelse med landhevning etter krittiden (Reusch, 1902). Reusch mente for at hele Østlandet var dekket av sedimenter avsatt i kritt og at mange av landskapstrekkene ble lite forandret under istiden (Reusch, 1878). Han mente at Numedalslågen ikke kunne erodere gjennom Skrimfjellene uten at elveløpet var fastlagt i overliggende, bløtere sedimenter. Han foreslo videre at Valdresvassdraget opprinnelig hadde fortsatt gjennom Hakadal og Øyeren og videre mot sørøst. Dagens Hakadal mellom Nordmarka og Romeriksåsen følger en såkalt påtvunget dal.



Figur 1-8: Dagens Grand Canyon i Aroszona representerer en analog til dannelsen av påtvungne daler i Norge i tertiær og kvartær. Coloradoelven har først laget en bred canyon i flattliggende og lite konsoliderte sedimenter av paleozen alder. Elven har deretter erodert ned i en smalere, indre canyon i krystallinske prekambriske gneiser. Etter hvert som landhevningen og erosjonen fortsetter, vil de flattliggende sedimentære bli borte og bare den indre cayonen bli igjen som en påtvungen dal. Den vil bare i liten grad følge forkastninger og forsenkninger i den opprinnelige grunnfjellsoverflaten (foto: Odleiv Olesen).

Vi tror at dalene i Trøndelag slik som Gauldalen og Orkdalen kan være dannet på tilsvarende måte. De høyere liggende og relativt flate områdene på Hølonda og i Brungmarka fantes sannsynligvis allerede før avsetningen av bergartene i kritt-tiden. Isstrømmer under istidene har mye senere gravd ut U-daler og fjorder i området (Figur 1-9).

I enkelte forsøkninger i terrenget rundt som f.eks. Styggdalen, Ramdalen, Ratåsdalen, Leirdalen og Trongjelet kan vi i dag observere rester av dypforvitringen (se Kapittel 3). Leire har andre fysiske egenskaper enn krystallinske bergarter. Både elektrisk motstand, seismisk hastighet og tetthet blir lavere. I tillegg vil magnetiserbarheten (magnetisk susceptibilitet) bli redusert. Bergartene i Trøndelag er i stor grad lavmagnetiske.



Figur 1-9: Flyfoto drapert over terrengmodell. Gauldalen og Orkdalen (sett fra Trondheimsfjorden mot SØ) kan representere påtvungne daler i Trøndelag. Laget med www.Norgei3D.no

Sammenfallende forsøkninger (negative anomalier) i magnetfeltet og topografien kan brukes som indikasjon på leiomvandling i den såkalte AMAGER-metoden (AeroMAGnetiske og GEomorfologiske Relasjoner; Olesen o.a., 2007). Metoden ser ut til å fungere for de fleste størkningsbergarter og omdannede bergarter på det sentrale Østlandet og på Sørlandet. Anvendelsen i lavmagnetiske avsetningsbergarter som finnes i Trøndelag, er mer begrenset.

Smektitt i dypforvitring tetter vanligvis berggrunnen for gjennomstrømning av grunnvann (Figur 1-5). Dette er også kjent fra tunnelanlegg på Østlandet og i Trøndelag der de største vannlekkasjene gjerne kommer gjennom oppsprukket fjell ved siden av eller mellom de store svakhetssonene (Banks o.a., 1992; Palmstrøm o.a., 2003; Ganerød o.a. 2006).

Geoelektriske målinger har lenge vært benyttet i malmløsing i Norge. I løpet av de siste tiårene er metoden blitt videreutviklet slik at en i dag effektivt kan kartlegge den elektriske motstanden i bakken i 2 (og 3) dimensjoner (Dahlin, 1993; Loke, 2017). NGU har tatt i bruk denne teknikken for karakterisering av svakhetssoner i fjell (Rønning, 2003; Rønning o.a., 2003; Ganerød o.a., 2006). Under gunstige forhold kan en bestemme svakhetssoners strøk, fall, tykkelse og dybderekkevidde, og en kan også få indikasjon om eventuell leiomvandling i sonene.

2. HARMONISERING AV EKSISTERENDE BERGGRUNNSKART I MÅLESTOKK 1:50.000 OG 1:250.000 LANGS DEN PLANLAGTE UTBYGGINGSTRASÉEN FOR E6 FRA ULSBERG TIL ÅSEN.

Anne Kathrine Svendby, Eirik Pettersen & Tim Redfield

2.1 Innledning

NGU skal sammenstille (harmonisere) de eksisterende berggrunnskartene innenfor den nye vegtraséen langs E6 mellom Åsen og Ulsberg i Trøndelag og levere dette som et ArcGIS-prosjekt.

Det harmoniserte berggrunnskartet langs vegtraséen til E6 er basert på eksisterende berggrunnskart med tilhørende database i målestokk 1:50.000. Langs de delene av traséen hvor det ikke eksisterer berggrunnskart i nevnte målestokk, er harmoniseringen basert på målestokk 1:250.000. Flymagnetiske data (Olesen o.a., 2015) benyttet for å korrigere berggrunnskartet, spesielt i overdekte områder. Det er også laget en filtrert og derivert terrengmodell (dDTM) innenfor det avmerkede området. Lineamenter, tolket som sprø forkastninger og bruddsoner, er basert på og tolket ut fra de bearbejdede DTM-dataene og lagt inn i ArcGIS-prosjektet.

Harmoniseringen ble fullført innen 1. desember 2018 fordi det harmoniserte kartet også skulle være et grunnlag for andre lag ved NGU som er involvert i prosjektet. Det bemerkes videre at sammenstillingen mellom kartbladene, og tolkede bruddsoner ikke er bekreftet av nye observasjoner i felt, da dette ikke inngikk i prosjektet.

2.2 Harmonisering av eksisterende berggrunnskart:

Det harmoniserte berggrunnskartet langs den planlagte vegtraséen er basert på eksisterende berggrunnskart med tilhørende database i målestokk 1:50.000. I tillegg er flymagnetiske data og DTM benyttet. Målestokk 1:250.000 er benyttet der det ikke er dekning i målestokk 1:50.000.

Traséen til nye E6 langs strekningen fra Åsen til Ulsberg berører åtte berggrunnskart i målestokk 1:50.000, (Figur 2-1). Kartleggingen av de publiserte kartene har blitt gjennomført til forskjellig tid, og noen av kartene er gamle. En konsekvens av dette er at geologien på de eldste kartbladene ikke er oppdatert, og at grensene mellom ulike kartblad ikke er i overensstemmelse.

2.2.1 Følgende kart berøres av vegtraséen (fra sør mot nord):

Publiserte kart: Rennebu (1520-1)¹, Hølonda (1521-2), Trondheim (1621-4), Stjørdal (1621-1) og Frosta (1622-2)

Manuskart: Kartblad Støren (1621-1) er under arbeid.

Harmoniseringen av kartblad Innset (1520-2) (ikke kartlagt) og Budal (1620-4) (gammelt, ikke fullstendig manuskart) er basert på målestokk 1:250.000.

Lenke til kartinnsyn, eksisterende kart: http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil

2.2.2 Kommentarer til harmoniseringen av geologien langs den planlagte vegtraséen fra Ulsberg til Trondheim:

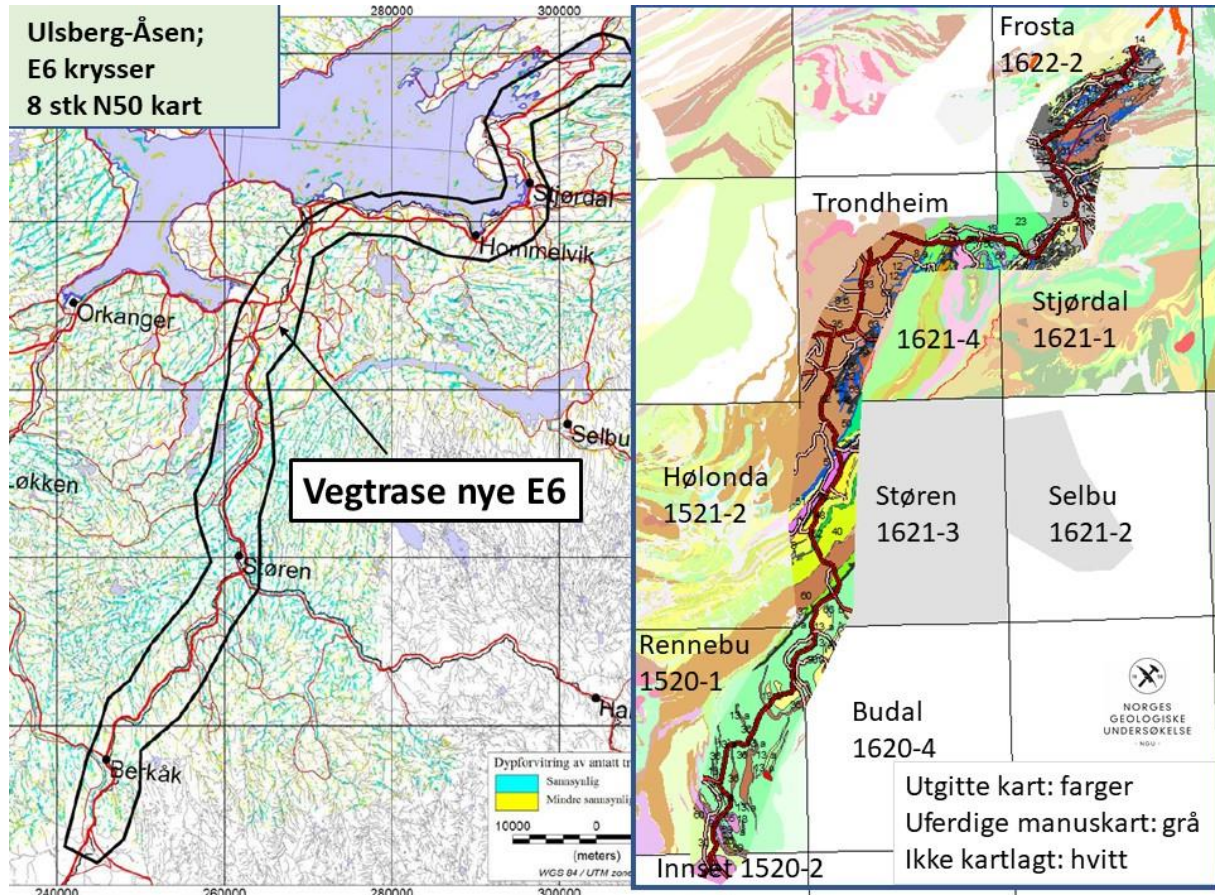
Helt lengst i sør, Kartblad Innset (1520-2): data er hentet fra 1:250.000 databasen, da det ikke finnes manuskartet i dette området. Kartbladet er justert i overgangen mot kartblad Rennebu.

Kartblad Rennebu (1520-1): data er innhentet fra 1:250.000 databasen i den nordøstlige delen, da Rennebu også er et gammelt kart. Selv om flymagnetiske data (Olesen o.a., 2015) og noen nyere punktobservasjoner i tillegg er benyttet, blir det større grad av usikkerhet i datagrunnlag basert på målestokk 1:250.000.

Kartblad Budal (1620-4): data er innhentet fra 1:250.000 databasen, da N50 kartet er et gammelt manuskart, der kun en del av kartbladet er kartlagt, og ikke stemmer godt overens med eksisterende inndeling og definisjoner på tilgrensende kart. (Kartlegging er også gjort uten GPS)

¹ Harmoniseringen av kartblad Rennebu er dels basert på målestokk 1:250.000, da Rennebu er et gammelt kart, samtidig som berggrunnsgeologien avviker i nokså stor grad fra anomalier i de flymagnetiske data.

Støren (1621-3) (og tilgrensende områder); manuskart (kartbladet er under arbeid, fullføres av D. Gasser og T. Grenne i 2019). Data fra prosjektet er importert, men datagrunnlaget er ikke helt komplett pr i dag. Tegnforklaringen er oversatt og bearbeidet så langt det er mulig, (noe informasjon er tatt fra og/eller tilpasset nabokart). Kartgrunnlaget til kartblad Trondheim er brukt for å kunne avslutte noen av bergartsflatene (polygonene). Data er også innhentet fra et annet manuskart (Ler 1:20.000).



Figur 2-1: Den planlagte vegtraséen mellom Ulsberg og Åsen berører åtte berggrunnskart i målestokk 1:50.000. Flere av kartene er ikke publisert. Det tidligere aktsomhetskartet (Baranwal o.a., 2017) er vist som bakgrunn i kartet til venstre.

Usikkerhet

Inntegnede bergartsgrenser på sørlige deler av kartblad Støren langs E6 er hentet fra 1:250.000 databasen, da dette synes å sammenfalle bedre med de strukturene som vises i de flymagnetiske data, enn de inntegnede bergartsgrensene på manuskartet i 1:50.000. I prosjektet er bergartsgrensene her dels tolket, og avviker her i varierende grad fra det geofysiske underlaget. Se også kommentarer under 2.4 Geologi og Figur 2-2.

2.2.3 Harmonisering fra og med kartblad Trondheim og nordover:

Sammenstilling mellom **Kartblad Trondheim (1621-4) – Stjørdal (1621-1)**: bergartsgrenser og polygoner er tatt fra de eksisterende berggrunnskartene. Data fra Trondheimskartets grunnlag (blant annet digitaliserte feltobservasjoner), er benyttet til å oppdatere den vestlige grensen på Stjørdalskartet. Dels er også digital terrengmodell (DTM) med oppløsning 10x10 m (www.hoeydedata.no), samt flyfoto (ortofoto) benyttet som en støtte i tolkningen av dataene i sammenstillingen.

Sammenstilling mellom **Kartblad Frosta (1622-2) – Stjørdal (1621-1)**: kun mindre justeringer er foretatt langs noen av bergartsgrensene mellom de to kartbladene (sør for Forbordsfjellet).

2.3 Tegnforklaring

Det er laget en forenklet tegnforklaring som er samkjørt med harmoniseringen av berggrunnskartene. Den forenklete tegnforklaringen viser de ulike bergartene uavhengig av tektonostratigrafi (som på berggrunnskartene i målestokk 1:50.000 og 1:250.000), se Figur 2-3.

2.4 Geologi

Bergartene langs vegtraséen består av vekslende lag med metasedimentære bergarter i form av konglomerat, gråvakker, kvartsitt, fyllitt, kvarts- og glimmerskifer, leirskifer, stedvis svartskifer, i veksling med omdannede magmatiske bergarter. De omdannede magmatiske bergartene utgjøres i hovedsak av metavulkanske bergarter (grønnstein, grønnskifer, stedvis rhyolitt), men dypbergarter (gabbro) opptrer stedvis, se tegnforklaring.

Metasedimentene er omdannede sedimenter, som opprinnelig ble ført ut i havet ved ulike avsetningsprosesser, og avsatt som vekslende lag med småstein, sand, silt og leire. Sedimentene ble senere skjøvet inn over land sammen med de magmatiske bergartene, og omdannet, under den kaledonske fjellkjededannelsen.

Bergartene langs traséen er foldet i varierende grad, og på ulik skala, gjennom flere episoder. Akseplantrasene har derfor et komplisert forløp. (Se eksisterende 1:50.000 kart og det harmoniserte kartet i prosjektet.)

Flere steder er bergartene isoklinalt foldet, og da utvikles det en sterk foliasjon (akseplansfoliasjon) tilnærmet parallelt med lagningen. Denne foliasjonen er best utviklet i finkornete, glimmerrike enheter.

Intervallet mellom Hommelvik og Forbordsfjellet (kartblad Stjørdal) består av vekslende lag med intenst isoklinalt foldede metasedimenterte i Eknegruppen (leirskifer, fyllitt, kvartsitt eller gråvakke) med overliggende grønnstein og grønnskifer. Både de underliggende metasedimentene og grønnsteinene oppå, er i dette området foldet i en storskala åpen, svakt overbikket synform, som stuper ca 30° mot NØ i området som berøres av den foreslåtte traséen. Folden er definert som Forbordsfjellet synform.

Det bemerkes at underordnede, tynne lag med grafittskifer / svart skifer kan forekomme lokalt i de fyllittiske enhetene (metasedimentene). Kartlegging av dette forutsetter feltarbeid, da informasjon om dette ikke fremkommer av det eksisterende kartbladet.

Akseplanet på Forbordsfjellet synform faller mot NV, og foldeaksen stuper mot NØ. Lagningen langs den nordvestlige foldeflanken faller mot sørøst, og mot nordvest langs den nordøstre foldeflanken, (se harmonisert kartet med målepunkter, ArcGIS-prosjektet).

2.4.1 Bemerkninger til geologien

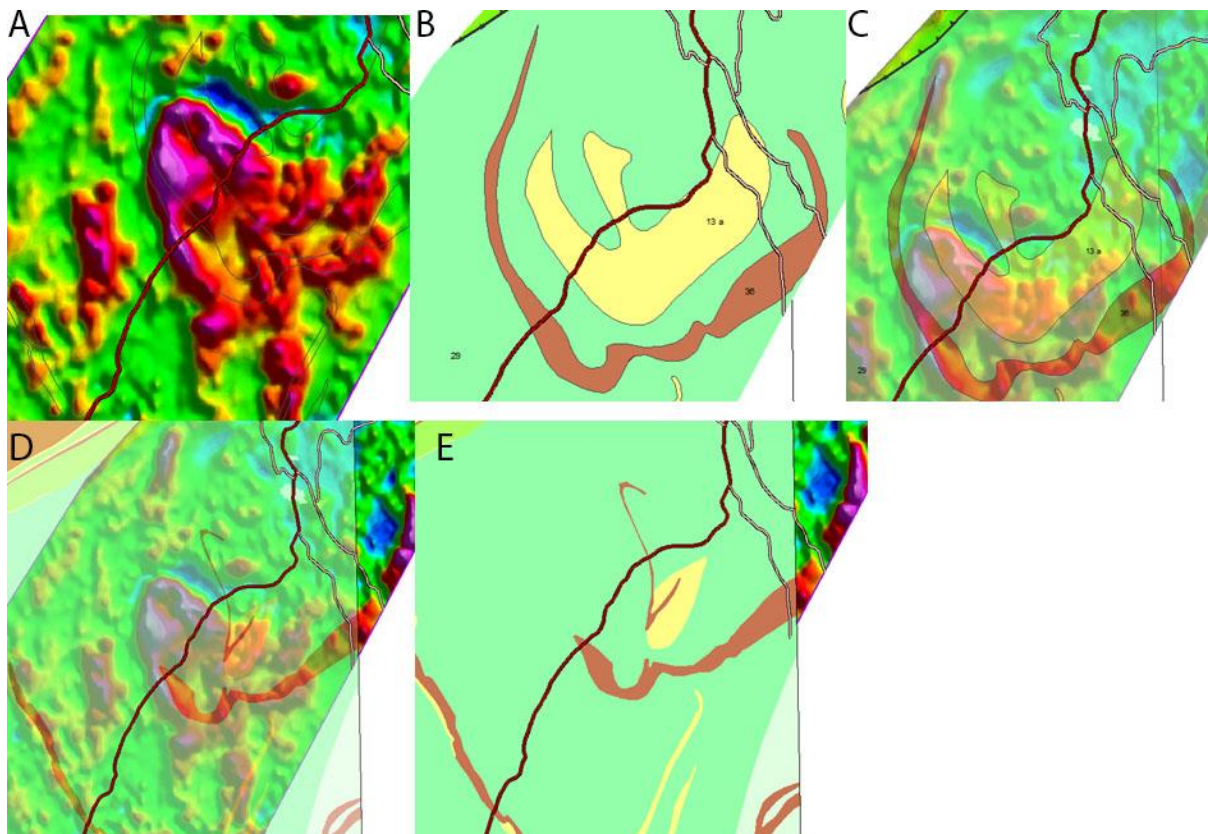
Nr 52 i tegnforklaringen (Figur 2-3) er en grafitt- og sulfidholdig sandstein og skifer.

Nr 29 i tegnforklaringen (Figur 2-3) består av vekslende enheter med biotittfyllitt, glimmerskifer og grafittfyllitt med sulfider.

Nr 43 inneholder også sulfider.

Se også tidligere kommentar til fyllittiske enheter (metasedimenterte) under Forbordsfjellet (kartblad Stjørdal og Frosta).

Inntegnede bergartsgrenser ved Dragset på kartblad Rennebu (se Figur 2-2) er ikke i samsvar med flymagnetiske data, hverken på det berggrunnsgeologiske kartet i målestokk 1:50.000 eller på 1:250.000 kartet. Vi anbefaler at det foretas kartlegging i dette området, da bergartene i dette området i utgangspunktet stedvis er kartlagt som svartskifer (grafittfyllitt på manuskart).



Figur 2-2: Inntegnede bergartsgrenser ved Dragset (kartblad Rennebu, 1520-1), er ikke i samsvar med flymagnetiske data (Olesen, o.a., 2015), hverken på det berggrunnsgeologiske kartet i målestokk 1:50.000 eller på 1:250.000 kartet. A; magnetometri, B; berggrunnsflater i målestokk 1:250.000 og harmonisert, C; B som transparent lag over A. D; berggrunnsflater i målestokk 1:50.000 som transparent lag over A. E; berggrunnsflater i målestokk 1:50.000.

Lineamenter, forkastninger og skjærsoner

Lineamenter inntegnet på det harmoniserte kartet er overført fra både de eksisterende N50-kartene (hvor de dels er tolket), samt at flere er tolket fra bearbeidede DTM-data, med oppløsning på 10 x 10 m. Bearbeiding av DTM- data er utført langs hele traséen, se ArcGIS-prosjektet.

Lineamentene som er basert på bearbeidede DTM-data, er topografiske lineamenter, som kan representere svakhetssoner, sprekker og mulige forkastninger, som har en viss utstrekning. Fallretning, eventuell bevegelsesretning, og oppsprekingsgrad er ikke med, da dette forutsetter observasjoner i felt.

Med en bearbeidet DTM-modell, menes en filtrert og derivert terrengmodell (DTM), hvor det er benyttet et bandpassfilter på den opprinnelige DTM-modellen. Dette betyr at både de mest kortbølgede og de langbølgede signalene i topografien er fjernet, slik at det gjenstår et bilde som i stor grad framhever variasjoner med middels og til dels korte bølgelengder. Bearbeidingen av den opprinnelige DTM-modellen medfører at f.eks. bratte elvedaler og trange kløfter kommer bedre frem, slik som i Figur 2-4.

Svakhetssoner strekningen Støren-Klett: (se harmonisert kart)

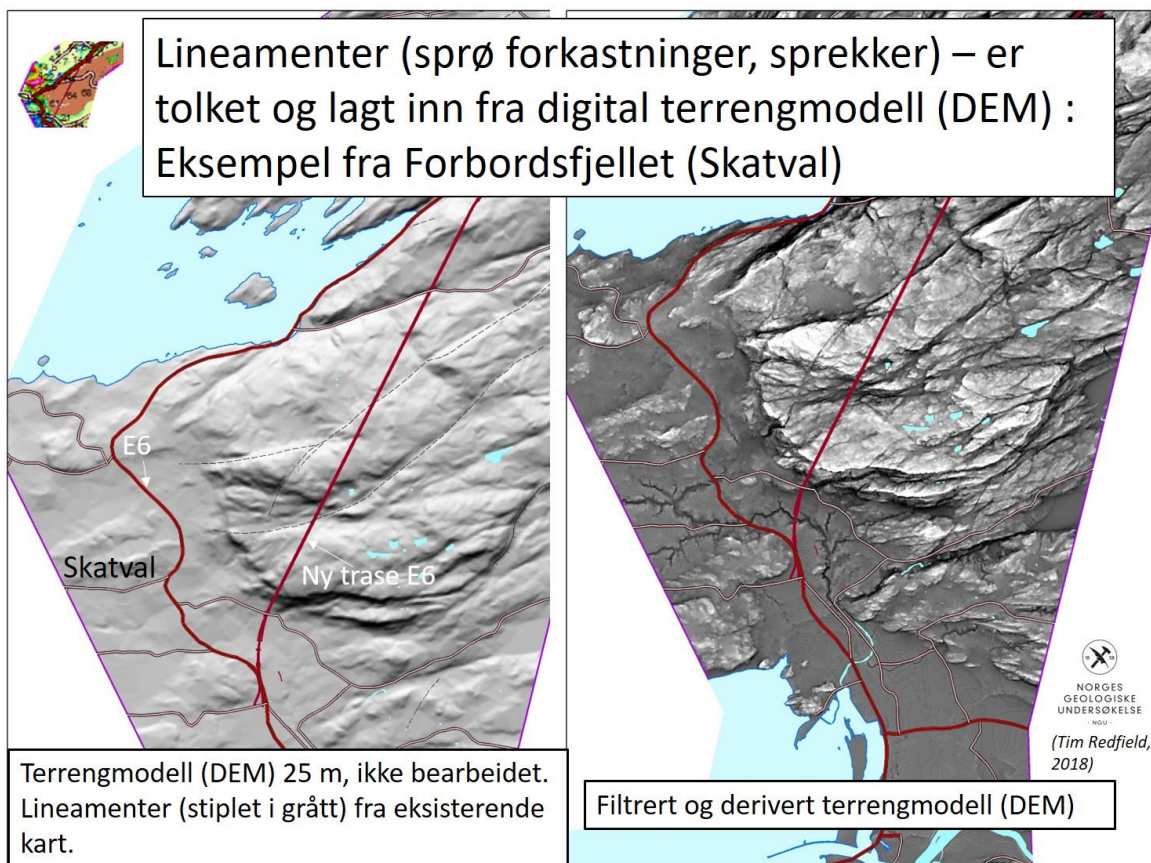
Horgforkastningen er en sprø normalforkastning (se Figur 2-5) og utgjør en svakhetssone. Forkastningssonen er tolket til å falle bratt mot sørøst. (Traséen til forkastningen er tolket under løsmasser.)

Tegnforklaring

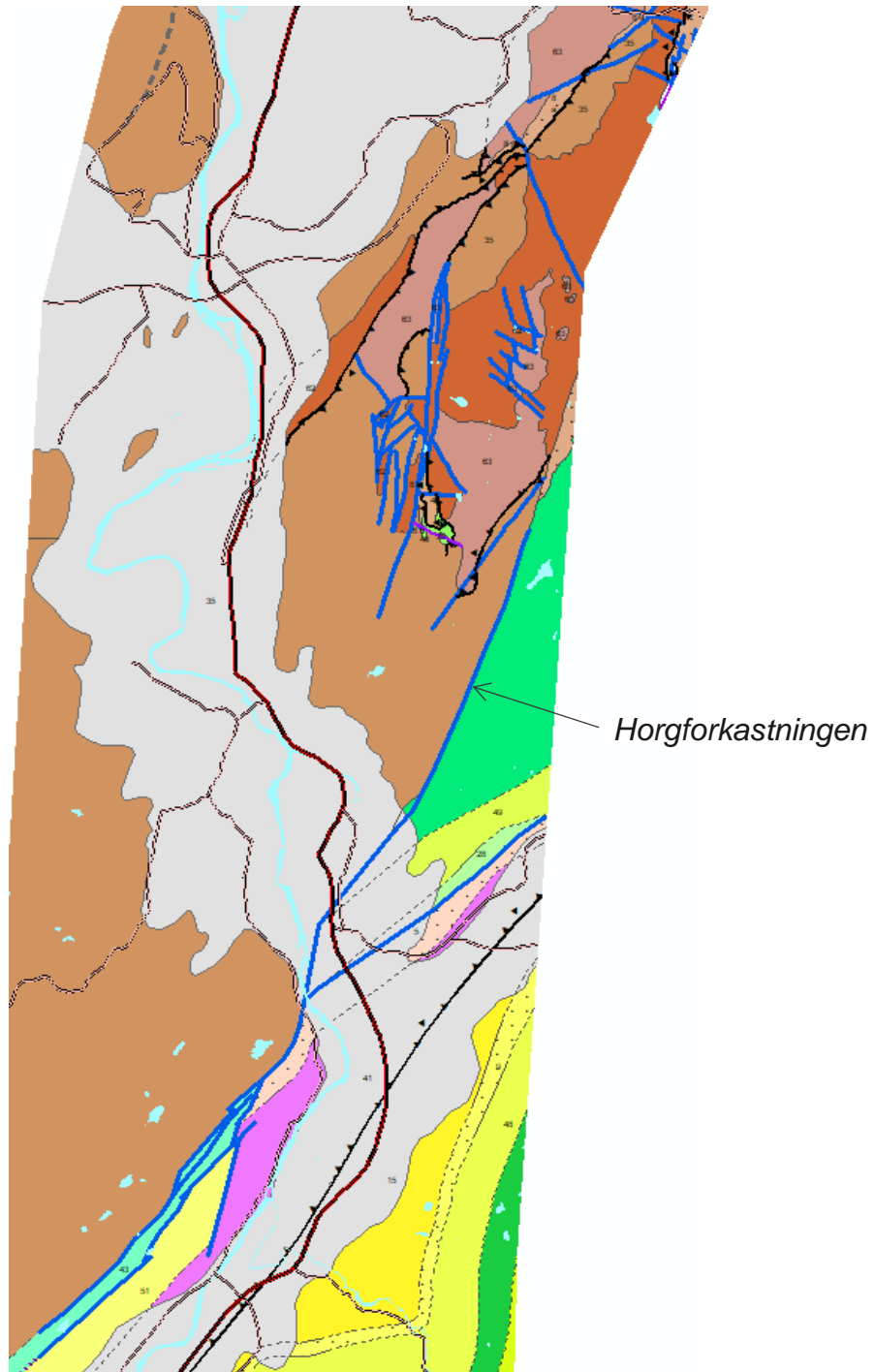
- 1 Konglomerat, med boller hovedsakelig av lys, blågrå kalkstein
- 2 Konglomerat, polymikt, med boller hovedsakelig av jaspis og grønnstein
- 3a Polymikt konglomerat, tildels konglomeratisk metagråvakke
- 3b Polymikt konglomerat, tildels konglomeratisk gråvakke
- 4 Polymikt konglomerat, stedvis grovkornet gråvakke med mange boller
- 5 Polymikt konglomerat med ryolitisk matriks, sand- og siltstein mellomlag og enkelte ryolitlag
- 6 Polymikt konglomerat (Stokkvolakonglomerat)
- 7 Polymikt konglomerat (Hoplakonglomerat)
- 8a Konglomerat, polymikt, stedvis med storboller, fragmenter og blokker av grønnstein, gabbro, trondhemitt, jaspis og hvit marmor i en grønn fyllittgrunnmasse
- 8b Konglomerat, agglomerat, polymikt, med boller og kantete fragmenter av bl.a. grønnstein, jaspis og kvartsitt (blåkvarts)
- 9 Konglomerat med dominerende kvartsitt boller. (Lyngsteinkonglomeratet)
- 10 Konglomerat, polymikt, med boller og storboller hovedsakelig av grønnstein, jaspis og trondhemitt
- 11 Metakalkstein, lys grå til gråblå
- 12 Kalkspatmarmor, hvit til grå, relativt grovkornet, Konglomeratisk langs grensen mot grønnsteinen
- 13 Kvartsitt
- 13a Kvartsitt, båndet
- 13b Kvartsitt, båndet (ukjent stratigrafisk posisjon)
- 14a Metasandstein, metagråvakke, leirskifer og fyllitt i veksling
- 14b Metasandstein, tynnbåndet, grå, (gråvakke) og leirskifer i veksling
- 15 Sandstein og gråvakke med noen konglomeratlag (Sandåsandsteinen)
- 16 Sandstein og skifer, grønn til grå, kalkholdig med enkelte lag av kalkstein og konglomerat
- 17 Sandstein, grønn, middels- til grovkornet, delvis konglomeratisk med enkelte lag av fyllitt, tyffitt og kalkstein. Enheten blir mer fyllittisk mot sydvest
- 18 Sandstein, lysegrønn, delvis konglomeratisk
- 19 Skifer og gråvakke, kalkholdig med enkelte lag med konglomerat
- 20 Skifer, mørkegrå
- 21 Leirskifer eller fyllitt med noen tynne lag av metasandstein
- 22 Leirskifer eller fyllitt med noen tynne lag av metasandstein eller metasiltstein
- 23 Metagråvakke-sandstein med tynne lag av leirskifer
- 25 Fyllitt, mørkegrå, med enkelte lag av sandstein og siltstein
- 26 Fyllitt, grønn, hornblendeglimmerskifer og garbenskifer
- 27 Fyllitt, mørkegrå, med enkelte sandsteinsbenker
- 28 Fyllitt, siltstein og sandstein
- 29 Biotittfyllitt, glimmerskifer og grafittfyllitt, mørk, kalkholdig
- 30 Silt og gråvakke, grønn, udifferensiert (Krokstadsedimenter)
- 31 Flysch sedimenter og tuffitter, grønne
- 32 Basalt, delvis med svært godt utviklet putestruktur, stedvis med lag av putebreksje særlig øverst i enheten

- 35 Grønnstein (metabasalt) og grønskifer udifferensiert. Hovedsakelig deformert putelava med enkelte lag av sur lava, kiselstein, tuffitt, gjennomsett av diabasganger, særlig i den vestre delen
- 36 Amfibolitt, grønnstein, tuffitt
- 37a Basalt
- 37b Grønnstein
- 39a Grønnlig kloritt førende fylliter, siltsteiner og sandsteiner som er isoklinalt foldet, med lag av chert og deformerte tonalitisk ganger (Elgsjøformasjonen)
- 39b Leirskifer og siltstein, grågrønn
- 39c Fyllitt, grønn, hornblendeglimmerskifer og garbenskifer
- 40 Grønn sandstein-siltstein sekvens med noen få konglomeratlag. (Krokstadformasjonen)
- 41 Ryolitt, ryolitt-tuff, polymikt konglomerat, leirskifer, mørk, båndet, og tuffittisk sandstein
- 43 Hovedsaklig kalksiltstein, "carbonaceous" sandsteinslag, og svartskifer. Sterkt foliert.
- 44 Gråvakkessandstein, stedvis kalkholdig med mindre enn 30% leirskifer
- 45 Gråvake-sandstein, grå, tykkbåndet, med tynne lag av leirskifer
- 46 Gråvake og siltstein, grågrønn
- 47 Gråvake med lag av siltstein og fyllitt
- 48 Grå sandstein, dels kalksandstein, dels kvartsrik eller dels finkornet sandstein. enkelte lag med polymikt konglomerat
- 49 Grønngrå sand- og siltstein
- 50 Fyllitt, siltstein og sandstein
- 51 Feltspatisk sandstein, delvis med silt mellom lag
- 52 Svartskifer og svartiltstein med noen få grå sandsteinslag (Dicanograptusskiferen)
- 53 Tuffitt av ryolittisk sammensetning
- 54 Ryolittisk tuff
- 55 Tuff, lys grønngrå, finkornet eller tuffsiltstein; askegrå forvitningsfarge
- 56 Ryolitt, ryolitt-tuff og tuff-sandstein med lag av mørkegrå skifer
- 57 Lapillituff, agglomerat og grønnstein, i veksling
- 58 Kvartskeratofyr, ryodacitt, stedvis granat- og amfibolførende. Opprinnelig antatt finkornete sure lavabergarter og overflatenjure dypbergarter. Datert til 482 ±5 mill. år (U-Pb, zirkon)
- 59 Amfibolitt (omvandlet grønnstein)
- 60 Hovedsaklig putebasalt, massivbasalt, jaspis, chert og putebreksje med underordnet sand- og siltstein
- 61 Metadioritt, metatonalitt
- 62 Diabasganger, del av et gangkompleks
- 63 Gabbro, middels- til grovkornet, omvandlet, stedvis intrudert av diabasganger
- 64 Keratofyr og keratofyr-agglomerat
- 65 Oppdalitt
- 66a Kvarts-biotitt-dioritt (trondhemitt)
- 66b Trondhemitt
- 67 Ultrabasitt-kleberstein
- 68 Grønnstein, tildels med putestruktur, grønskifer
- 900 Kvartsglimmerskifer med kalkspat, aktinolit, klinozoisitt og diopsid
- 901 Biotitt-kvarts-glimmerskifer, kalk- og kalksilikatholdig

Figur 2-3: Tegnforklaring, harmonisert berggrunnskart.



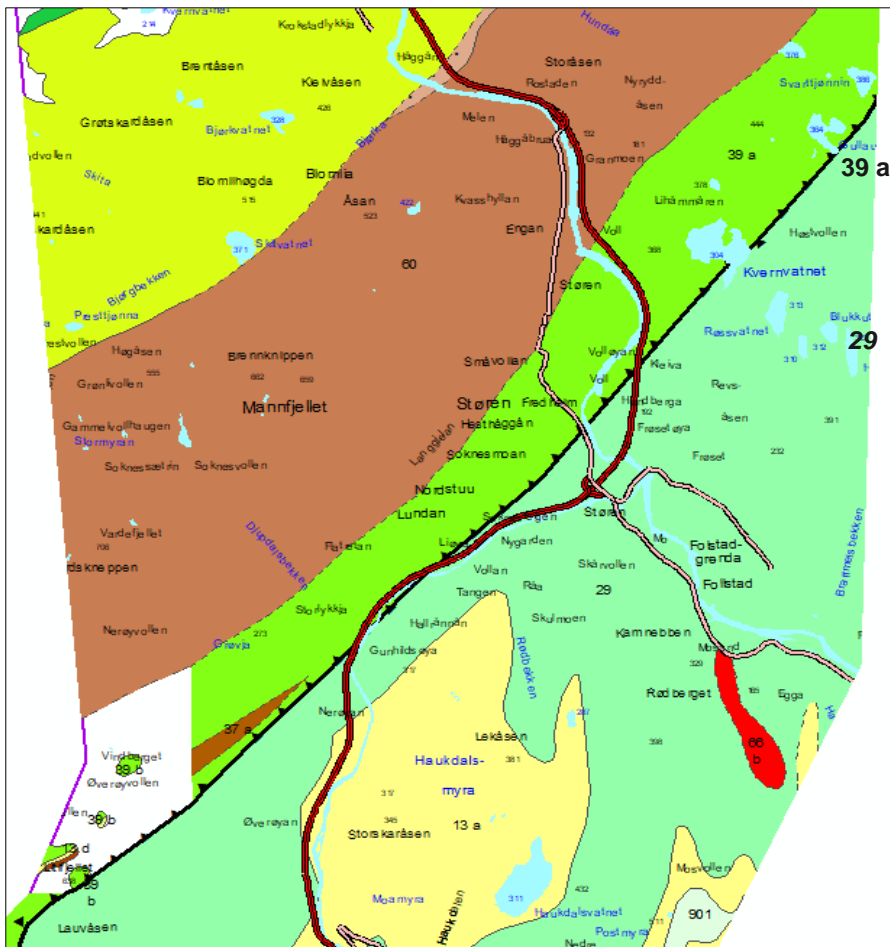
Figur 2-4: Digital terrengmodell (DTM) før bearbeiding t.v., sammenlignet med filtrert og derivert (dDTM) t.h.



Figur 2-5: Sprø forkastninger, deriblant Horgforkastningen, som faller bratt mot SØ, er markert i blått. Skyvesoner er markert i svart. Figuren er klippet fra det harmoniserte kartet, (som her er basert på manuskart 1621-3 Støren, til D. Gasser og T. Grenne).

Sandå skyvesone (nederst på Figur 2-5), er tolket (ikke observert), og kan være en mulig svakhetsone som faller mot NV.

Skyvekontakten mellom bergart nr 39a og bergart nr 29 (biotittfyllitt, glimmerskifer og grafittfyllitt, mørk, kalkholdig) er også en mulig svakhetsone med fall mot NV, se Figur 2-6, og harmonisert kart.



Figur 2-6: Skyvekontakt mellom bergart 39a og 29 er en mulig svakhetszone. Figuren er klippet fra det harmoniserte kartet, (som her er basert på manuskart 1621-3 Støren av D. Gasser og T. Grenne.) Se også tegnforklaring, Figur 2-3.

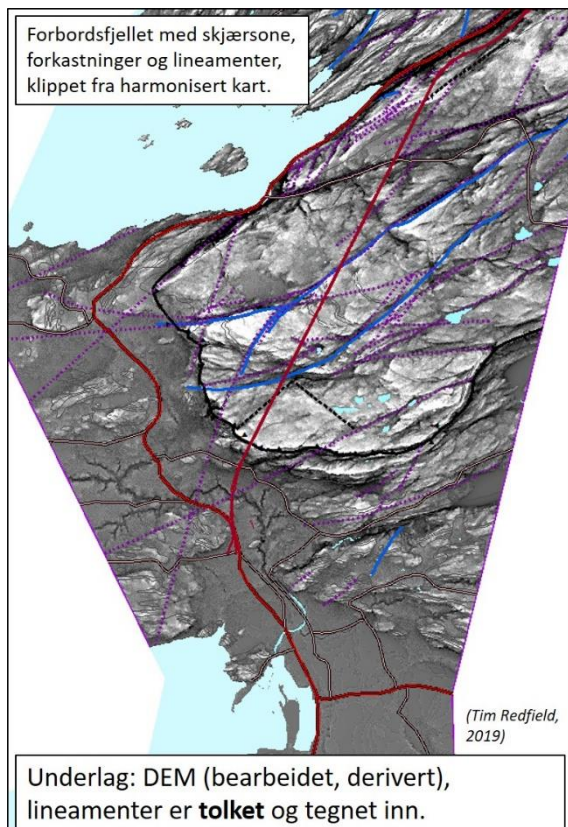
Bemerkninger til skjærsoner og lineamenter på kartblad Frosta:

Skjærsonen mellom metasedimentene og grønnsteinene i Forbordsfjellet følger geometrien til Forbordsfjellet synform (Gromet & Roberts, 2016).

Akseplanet på den synformede skjærsonen faller mot NV, og foldeaksen stuper mot NØ. Både skjærsonen og lagningen langs den nordvestlige foldeflanken på synformen faller mot sørøst, og mot nordvest langs den sørlige foldeflanken, (se harmonisert kart med målepunkter og Figur 2-7 og 2-8).

Utgående av lineamentene er tolket som sprekker og/eller forkastninger, som krysser den planlagte traséen. De har hovedsakelig NØ-SV retning i kartplanet, og antas å falle 70-85° mot NV eller SØ, se Figur 2.7 og 2.8. Tolkningen er basert på filtrert og derivert terrengmodell (dDTM).

Det bemerkes at deler av den planlagte E6-traséen gjennom Forbordsfjellet, ved Vuddudalen, ser ut til å ha en svært lav vinkel med utgående retning av flere av de tolkede lineamentene, se både Figur 2-7 og Figur 2-8.

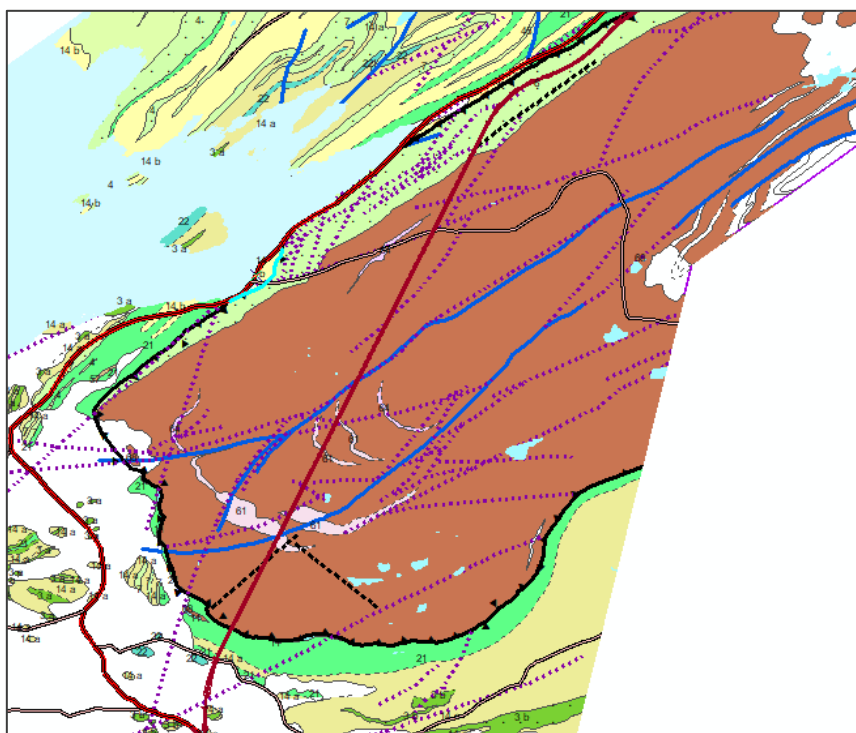


TEGNFORKLARING:

- ↖ Skjærsoner under Forbordsfjellet, uspesifisert.
(Piggene peker i samme retning som fallretningen på skjærsonen)
 - Forkastninger og sprekker på eksisterende N50 kart
 - - - Lineamenter (sprekker, forkastninger): tolket fra filtrert og derivert digital høydemodell (DEM)
 - Eksisterende veger, og ny vegtrase E6 gjennom Forbordsfjellet
- Tolkede og inntegnede lineamenter på bearbeidet DEM, indikerer en mulig reaktivering langs den nordvestre flanken av skjærsonen.*

Deler av den planlagte E6-traseen gjennom Forbordsfjellet synes å ha en svært liten vinkel med utgående retning av flere av de tolkede lineamentene.

Figur 2-7: Forbordsfjellet synform, med sprø strukturer og skjærsoner tegnet inn på grunnlag av dDTM.



Figur 2-8: Harmonisert berggrunnskart med lineamenter tolket fra filtrert og derivert terrengmodell (stiplet fiolett linje). Eksisterende veger og ny vegtrasé markert i mørkerødt, forkastninger og sprekker på eksisterende berggrunnskart i blått. Skjærsonen under Forbordsfjell-tunnelen (Gromet & Roberts, 2016) er i svart, med pigger som peker i samme retning som fallretningen på skjærsonen.

Lenke til kartinnsyn, eksisterende kart: http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil

3. IMPROVEMENT OF ROCK CONSTRUCTION AWARENESS MAP FOR NEW E6 IN TRØNDELAG

Vikas Chand Baranwal

3.1 Summary

This chapter summarizes detailed work performed for preparing a deep-weathering action map for Trondheim and adjacent areas. Earlier deep-weathering action maps were prepared combining depressions in topography and magnetic anomaly. This method was named as AeroMagnetic And GEomorphological Relations (AMAGER). First, a map from Oslofjord was prepared using the AMAGER method in 2006. Later, the map was extended to larger parts of the Oslofjord region in 2013 and 2016. Same methodology was utilized to create the advertency map for large parts of southern Norway in 2017. Present day tunnel planning in the Trondheim region demanded revision of the existing deep-weathering action map. Few deep-weathering locations observed along different valleys in the Trondheim region are not indicated by the existing action map.

The Trøndelag area has relatively low magnetic anomalies in comparison to the Oslofjord region therefore topography alone is used in this version of the action map to delineate the linear zones which may coincide with observed deep-weathering locations. A detailed 10 m topography data available from Statens kartverk is used in this work. Various derivatives of topography are calculated and examined. Negative vertical derivative is found to be best parameter to delineate the lineaments along the steep valleys. A detailed map indicating deep-weathering locations based on topography for the Trøndelag region is presented in this chapter of the report. Observed deep-weathering locations are discussed in detail and with results from the AMAGER method and negative vertical derivative of topography.

Time-domain airborne EM (AEM) data had been acquired by SKYTEM survey and the Norwegian geotechnical institute (NGI) in the Ranheim-Hommelvik area. AEM data can produce resistivity images of the subsurface. Low resistivity in general or changes in the resistivity can be indicative of the deep-weathering zones though they may occur due to several other reasons e.g. marine clay, conductive minerals, ground water etc. The vertical derivative of SKYTEM resistivity shows some correlation with negative vertical derivatives of topography and at the location of observed deep-weathering in the east-west trending Tronggjelet canyon, located 200 m to the south of the present day Være road tunnel.

3.2 Introduction

A lot of problems have been reported in tunnel constructions in Norway due to draining of groundwater and rock falls in clay-bearing zones e.g. in the construction of the Holmenkollen railway tunnel in Oslo in the 1920s (Kirkemo, 2000). The marine clay above the tunnel subsided and was compacted due to lowering of the groundwater table and therefore damaged lot of houses. Another example of a failed tunnel project was the railway tunnel through Lieråsen between Asker and Drammen which was started in 1962 but only half of the tunnel was completed in five years (Huseby, 1968; Palmstrøm et al., 2003). The main problem in that area was the disintegration of bedrock due to physical and chemical alteration along linear weakness zones resulting in rock falls. Water leakage and construction problems were also faced during the construction of the Romeriksporten and the Oslofjord tunnels (Palmstrøm et al., 2003).

Olesen et al. (2007) developed a geophysical method referred to as the AMAGER (AeroMagnetic And GEomorphological Relations) to map the occurrence of deep clay-alteration in the bedrock of the Oslo region. They related the coinciding depressions in topography and aeromagnetic data to clay alteration areas. This research resulted in the first version of "Aktsohmetskart for tunnelplanlegging, Østlandsområdet" (Olesen, 2006). During the COOP project (Crustal onshore offshore project), newly acquired magnetic data for the coastal areas from southern Norway up to Trøndelag were applied to calculate advertency maps for the areas. In this context, the AMAGER method was enhanced by using an AGC (Automatic Gain Correction) to improve signals from areas with low/medium magnetized basement rocks (Brønner et al., 2012). In 2012, new data from west of the Oslo region was available and a second version of the tunnel planning map was created, including the new dataset (Baranwal & Olesen, 2012). The map was updated applying the improved AMAGER method with AGC to amplify the response in low magnetic areas (Baranwal et al., 2013). During the years 2011-2015, NGU conducted several helicopter-borne geophysical surveys in the Telemark area which were subsequently included in the advertency map for the Oslo region by Baranwal et al. (2016).

New airborne magnetic data over the Agder area from South Norway (AFS-16 survey, Novatem, 2017) was collected during October 2016 to June 2017 by Novatem for NGU under the project COOP3. Airborne magnetic data using fixed-wing and helicopter surveys have also been acquired for the Trøndelag area during 1981–2015 (Nasuti et al. 2015, Olesen et al., 2015). Therefore, merger and homogenisation of the

existing maps (previously referred to as deep-weathering tunnel action map) to a new rock construction awareness map covering larger area of South Norway was done by Baranwal et al. (2017).

Deep-weathering zones were reported along steep and profound valleys in Trøndelag namely Styggdalen, Ramdalen and Ratåsdaalen (Brønner et al., 2015; Olesen et al, 2015). These new deep-weathering locations are not identified as weak zones by rock construction awareness map (Baranwal et al., 2017). It is also observed that Trøndelag in general has low magnetic anomaly due to absence of or less magnetite (Olesen et al., 2010) compared to high magnetic anomalies observed in the Oslo-region. Awareness map based on correlation of magnetic and topography depressions may not detect such weak zones when there will be no depression in the magnetic anomaly due to less magnetite in the region. Therefore, weak zones based on topographic depressions alone without magnetic anomaly depressions are delineated. It is assumed that some of these weak zones may indicate the deep-weathering zones as observed in Styggdalen, Ramdalen and Ratåsdaalen.

3.3 AMAGER method

The AMAGER (AeroMagnetic And GEomorphological Relations) method was presented by Olesen et al. (2007) to map the occurrence of deep clay alteration in the bedrock. It was based on correlating the depressions in topography and aeromagnetic data to detect clay alteration areas. Olesen et al. (2007) had carried out a detailed study using forward modeling of the magnetic field to interpret the depth extent of the alteration zones and calculated the average yield of wells located both inside and outside the interpreted weathering zones (classified as 'probable'). Forward modeling of the magnetic data revealed that some of the low-magnetic zones continued to a depth of ca. 300 m below the surface. They reported that average water yield of 1907 groundwater wells drilled outside the interpreted weathered zones had a 47% higher average yield than the 58 wells located inside the interpreted deep-weathering zones. This supported their conclusion that the interpreted weathering zones represented remnants of a more extensive saprolite. The abundance of clay minerals such as smectite and kaolinite clogged the fracture zones and therefore reduced the water permeability of the bedrock. The conclusion was also supported by the fact that most water leakage occurs at great depths (ca. 200 m) i.e. below the lakes Lutvann and Puttjern (Palmstrøm et al., 2003). Olesen et al. (2007) concluded that stability problems will be more frequent at shallow depths while water leakage most probably will occur at greater depths in the weak zones.

In the improved AMAGER method, automatic gain correction (AGC) was used to enhance the low and medium magnetic field areas. It was first introduced by Brønner et al. (2012). Baranwal et al. (2013) also implemented the same approach to the Oslo region. They showed that some of the areas (especially in south-western Norway and the eastern part of the Oslofjord region) with lower and smoother magnetic anomalies showed almost no variation in the magnetic field without application of AGC. However, there was a clear variation in the magnetic fields in such areas after the application of AGC. The improved AMAGER method produced a better coverage and larger anomalies for probable and less probable zones of deep-weathering in such areas (Baranwal et al., 2013). Verification of the AMAGER method or the improved AMAGER method from the Ravnheia tunnel on Lista and other areas are discussed in the reports by Baranwal et al. (2016, 2017).

Figure 3-1 shows an image of the magnetic anomaly map reduced to the pole from South Norway. Most of areas near Oslo has very high magnetic anomaly values of ca.700 nT together with strong negative magnetic anomaly values of ca. -300 nT. However, the Trondheim area shows moderate magnetic anomalies in the range of 0 to -200 nT with some locations showing high magnetic anomalies up to 200 nT. High magnetic anomalies in the Oslo region are due to the presence of magnetite which is either non-existent or very less around Trondheim area. Depressions in the high magnetic anomalies due to tropical weathering and alteration of magnetite into hematite in the Triassic-Jurassic are thought to be an indicator for deep-weathered zones in those areas where it is present. Because, the area around Trondheim doesn't have high magnetic anomalies due to lack of magnetite in the bedrock. The magnetic anomaly map will consequently not help in mapping of the deep-weathering zones in such areas.

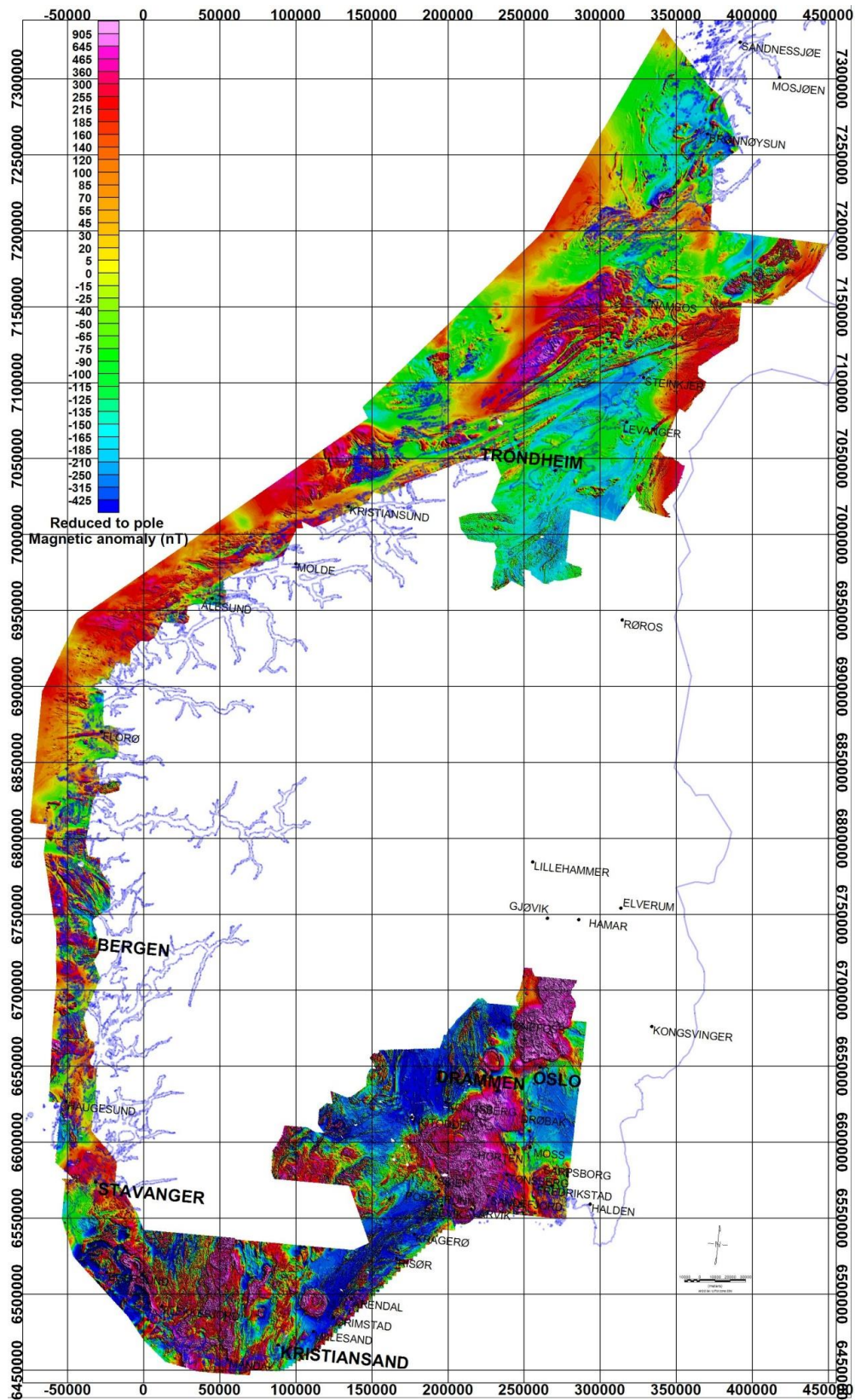


Figure 3-1: A mosaic of recent reduced to pole (RTP) magnetic data for Southern and Mid Norway (Olesen et al., 2013, 2015).

3.4 Awareness map derived only from topography

Figure 3-2 shows the topography image of the area near Trondheim at 10 m grid resolution obtained from Kartverket together with the location of the new E6 corridor (red polygon) which is collected under the

project Nasjonal detaljert høydemodell (www.hoydedata.no). A smaller area is marked by a black rectangle which covers five valleys (Leirdalen, Styggdalen, Ramdalen, Ratåsdaalen and Tronggjelet) and Muruvik where deep-weathering has been observed. This area is zoomed in Figure 3-3 to show the observed deep-weathering locations by red triangles.

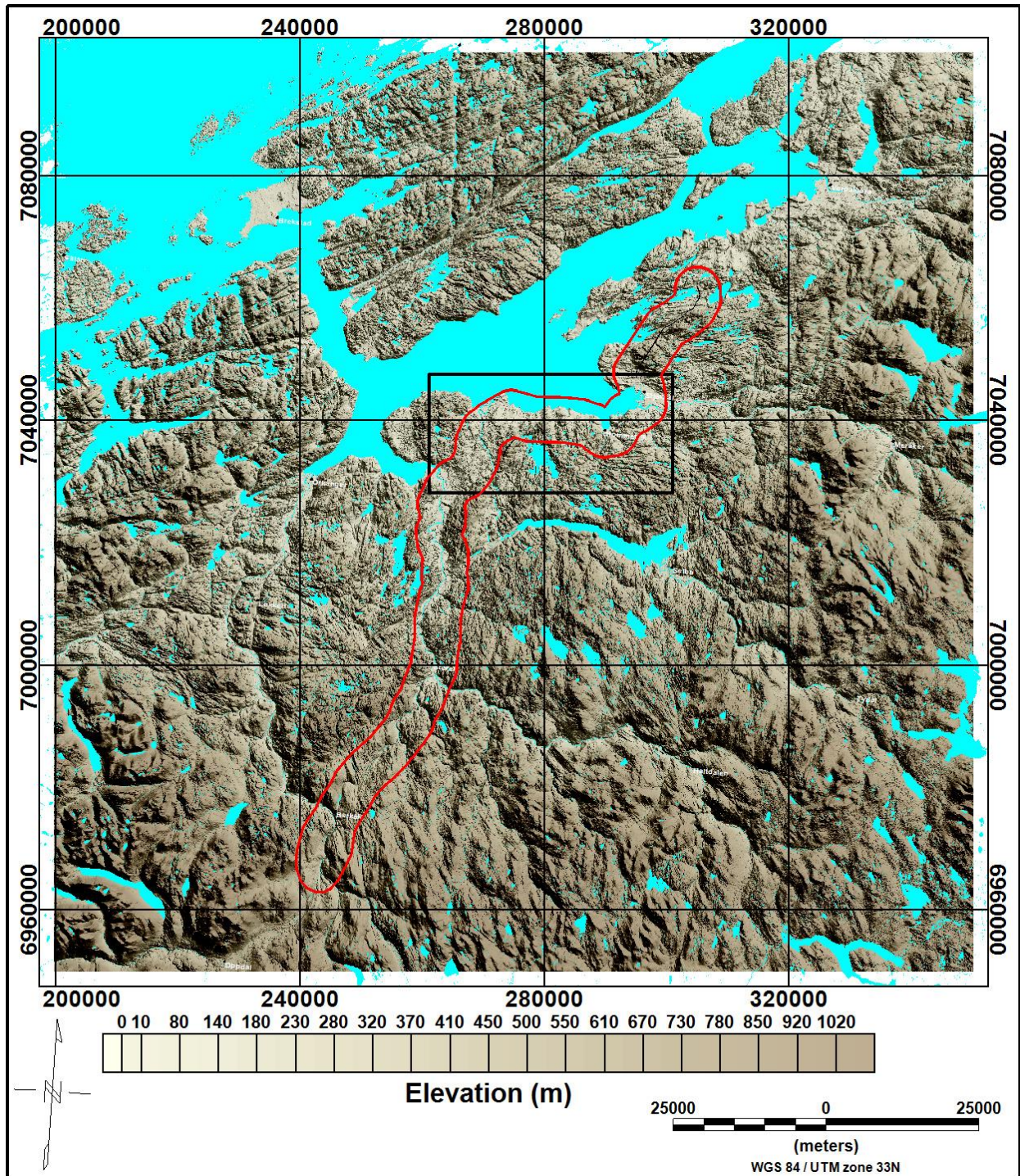


Figure 3-2: Topography of the area at 10 m grid resolution. New E6 corridor is shown by red polygon. Black rectangle shows an area from Stjørdal to Melhus which covers three valleys where deep-weathering is recently observed.

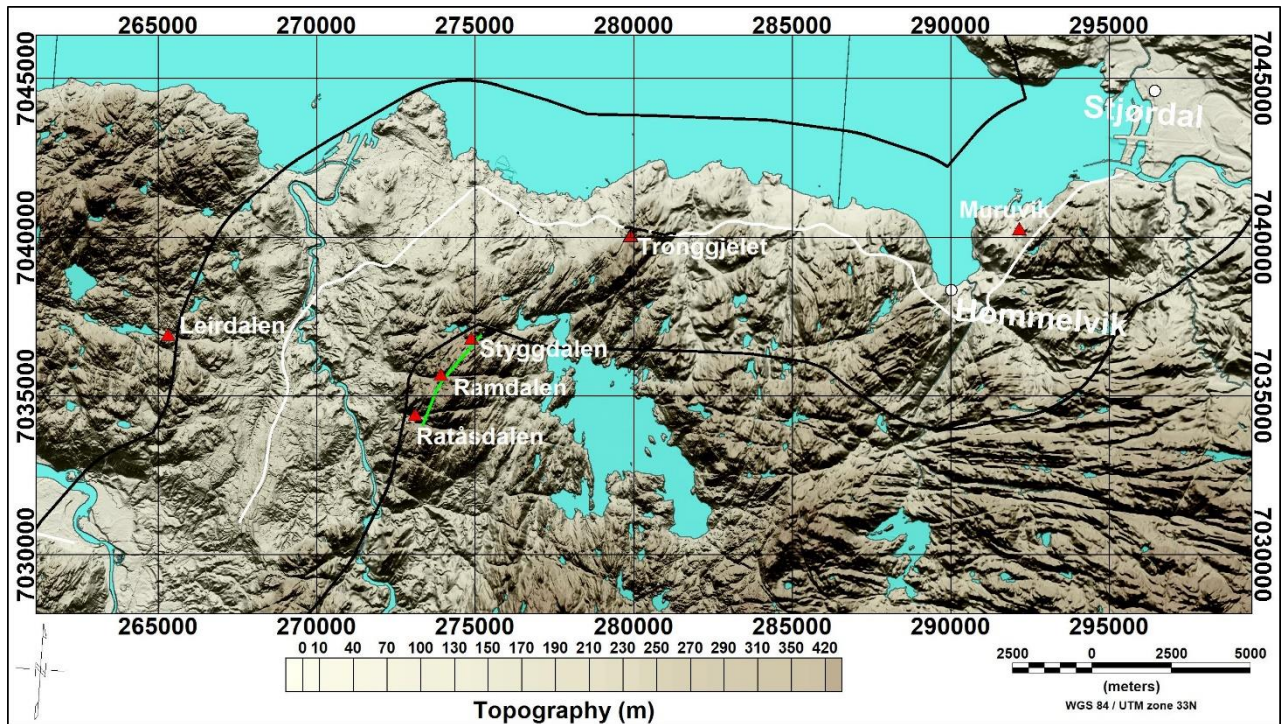


Figure 3-3: Zoomed area (black rectangle in Figure 3-2) showing topography at 10 m grid resolution. Red triangles show locations of observed deep-weathering at five valleys Leirdalen Styggdalen, Ramdalen, Ratåsdalen and Tronggjelet and at Muruvik. The green line shows a profile along which different derivatives are plotted in Figure 3-5. White line shows stretch of E6 with Være tunnel in dashed black line.

We first tried to work with 1 m grid LiDAR (Light Detection and Ranging) data downloaded from Kartverket but it was too large (several gigabytes) to work with for such a large area. We compared 1 m, 10 m and 50 m grids from a small area and found that 10 m grid gave a good balance between resolutions and size of the grid for a large area as shown Figure 3-2. Deep-weathering is observed along the steep valleys Leirdalen, Styggdalen, Ramdalen, Ratåsdalen and Tronggjelet (Olesen et al., 2015; Chapter 4 in the present report, Rueslåtten et al., 2019). Therefore, we tried to extract locations of such valleys by applying various derivative filters on the topography grid e.g. horizontal derivative, vertical derivative, tilt derivative and curvature. Calculation of different derivatives was performed in Oasis Montaj of Geosoft (Geosoft, 2018). We observed that vertical derivative of topography was most effective in extracting the valleys because it has negative values for the valleys and positive values for the ridges. Horizontal derivative calculated slope of the relief and didn't yield unique values for the valleys. It is difficult to give a physical meaning to vertical derivative but numerically it calculates change in the slope in the vertical direction and works as a high-pass filter allowing higher frequency features in vertical direction of the topography. Tilt-derivative and curvature also had negative value for the valleys, but vertical derivative was preferred over them. An image of the vertical derivative of topography from the zoomed area (Figure 3-3) is shown in Figure 3-4. Figure 3-5 shows plots of various derivatives and curvature calculated along a profile from Ratåsdalen to Styggdalen in Estenstadmarka. The horizontal derivative doesn't show a unique trend at these valleys but the vertical derivative and the curvature show a unique trend as low negative values at the locations Ratåsdalen, Ramdalen, Styggdalen and other depressions in topography compared to the surrounding (Figure 3-5).

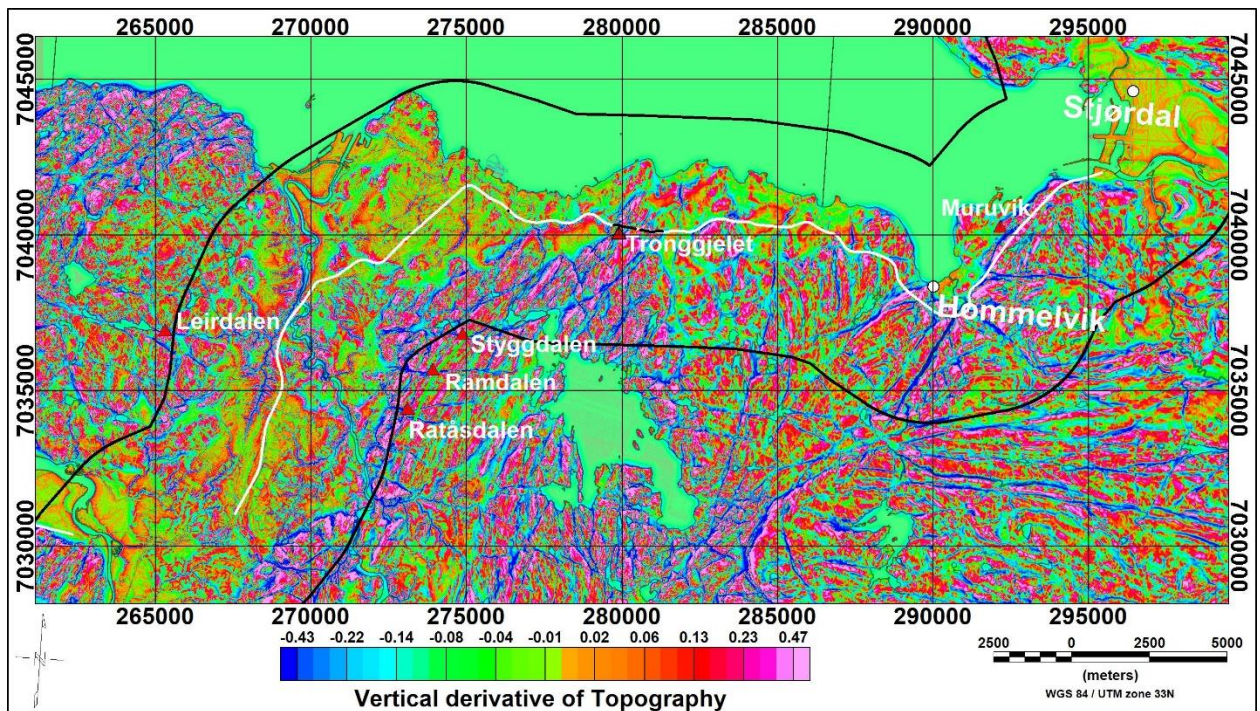


Figure 3-4: Vertical derivative of topography at 10 m grid resolution in the zoomed area.

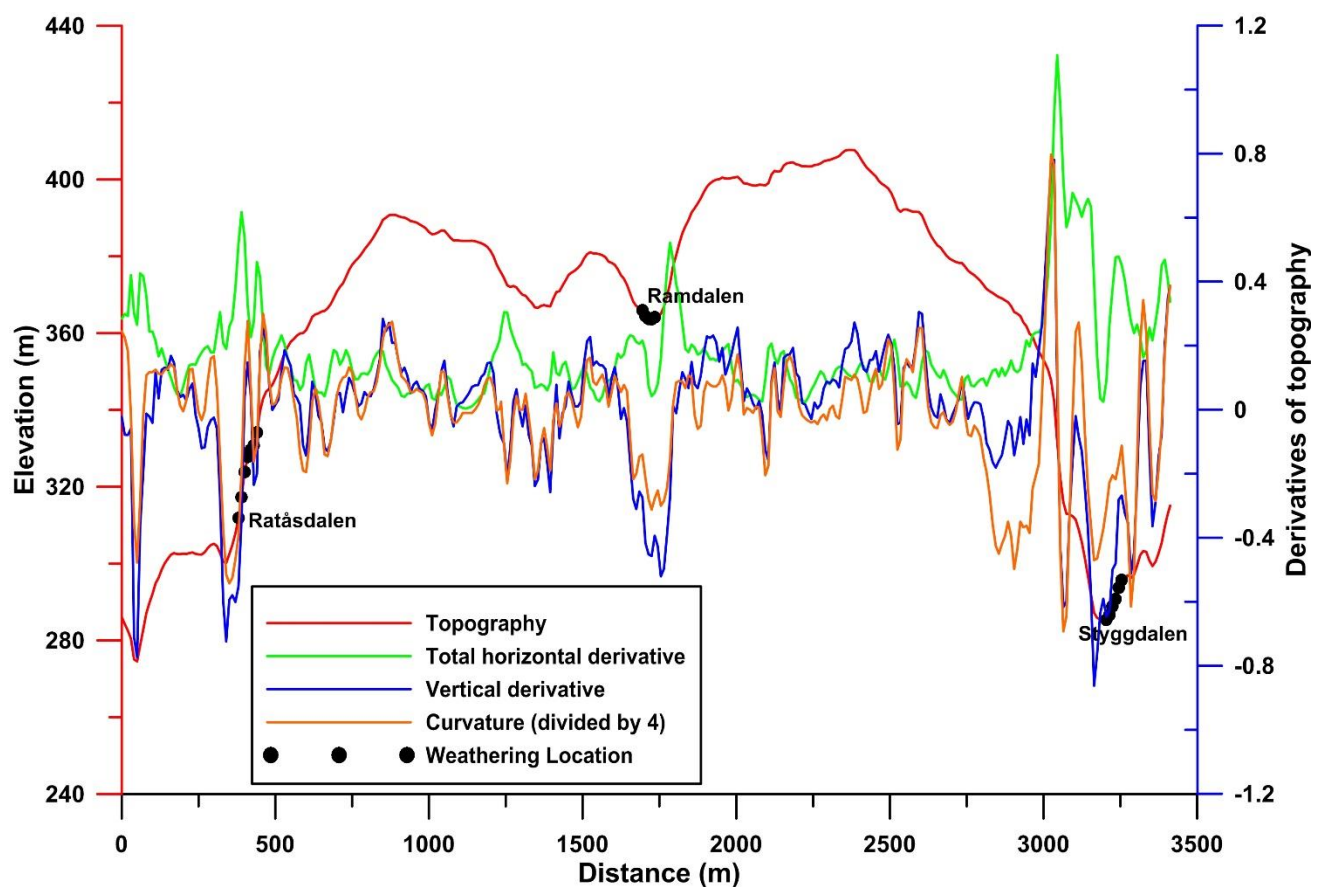


Figure 3-5: Topography and various derivatives along a profile from Ratåsдалen to Styggdalen (green line in Fig. 3-3). Observed deep-weathering locations are plotted with black circles.

Negative vertical derivative was considered a good indicator of the steep valleys. We tried various limits of vertical derivatives and set the two limits <-0.5 (blue in Figure 3-6 and Figure 3-7) to be 'likely deep-weathering' and <-0.3 (pink in Figure 3-6 and Figure 3-7) to be 'less likely deep-weathering'. These two indicators are plotted in Figure 3.6 together with observed deep-weathering locations (red triangles), ERT lines (red lines) and weak weathering zones interpreted from ERT (red diamonds). Figure 3.7 shows these zones together with likely deep-weathering zones (cyan and yellow colored regions) from the AMAGER method (Baranwal et al., 2017).

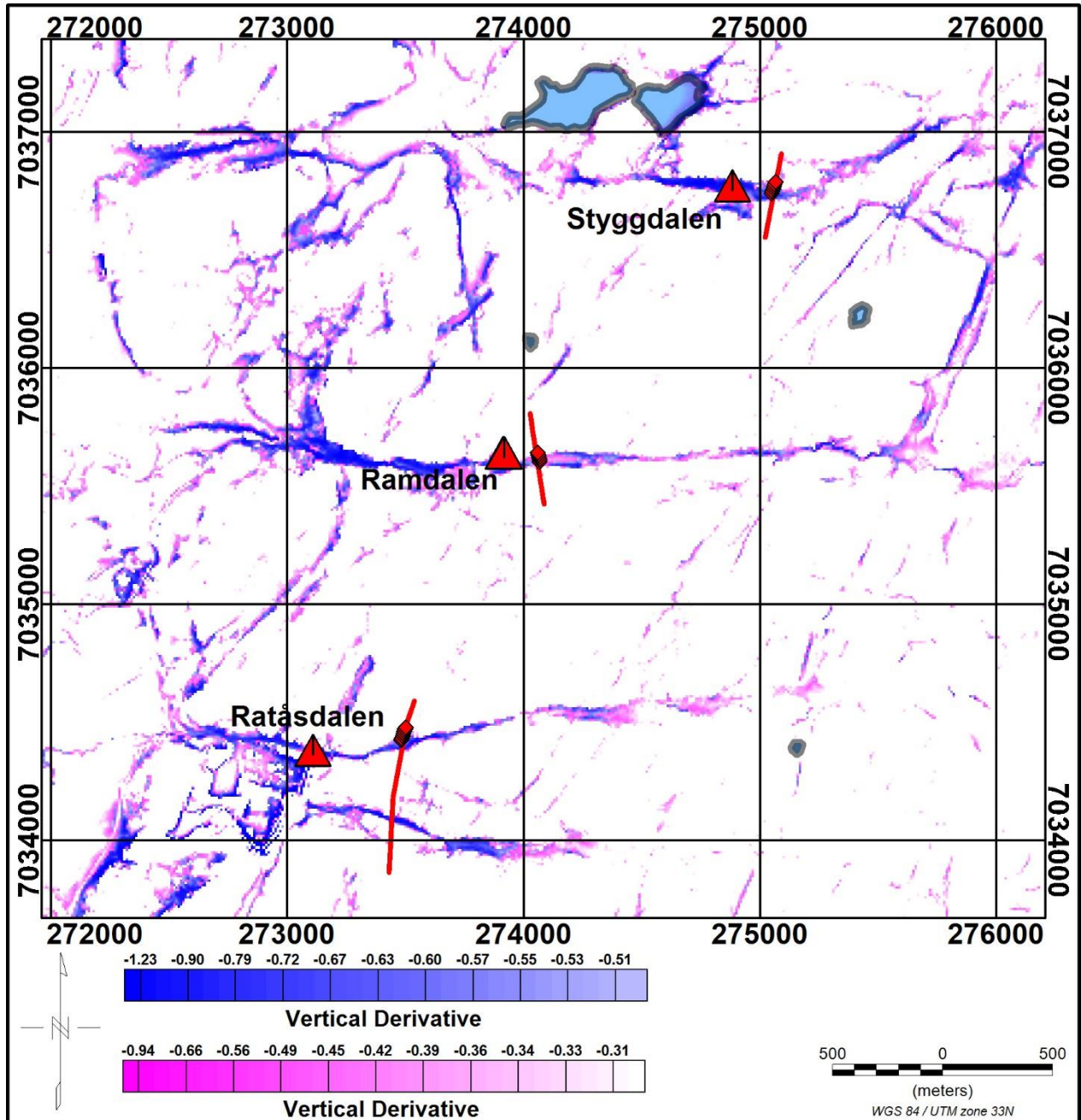


Figure 3-6: Negative vertical derivatives of topography depicting two zones for deep-weathering as likely deep-weathering <-0.5 (blue) and a less likely deep-weathering <-0.3 (pink). Locations of observed deep-weathering are shown by red triangles and locations of weak weathering zones observed at ERT lines (red lines) are shown by red diamonds (Coop2 report, Olesen et al., 2015).

We can clearly see from Figure 3-7 that deep-weathering zones derived from AMAGER method didn't extract weak zones along the valleys and miss to indicate its locations at Styggdalen. We also observe that weak zones were not indicated by the AMAGER method in 2017 (Baranwal et al., 2017) exactly at Ramdalen and Ratåsdalen but in vicinity of these locations.

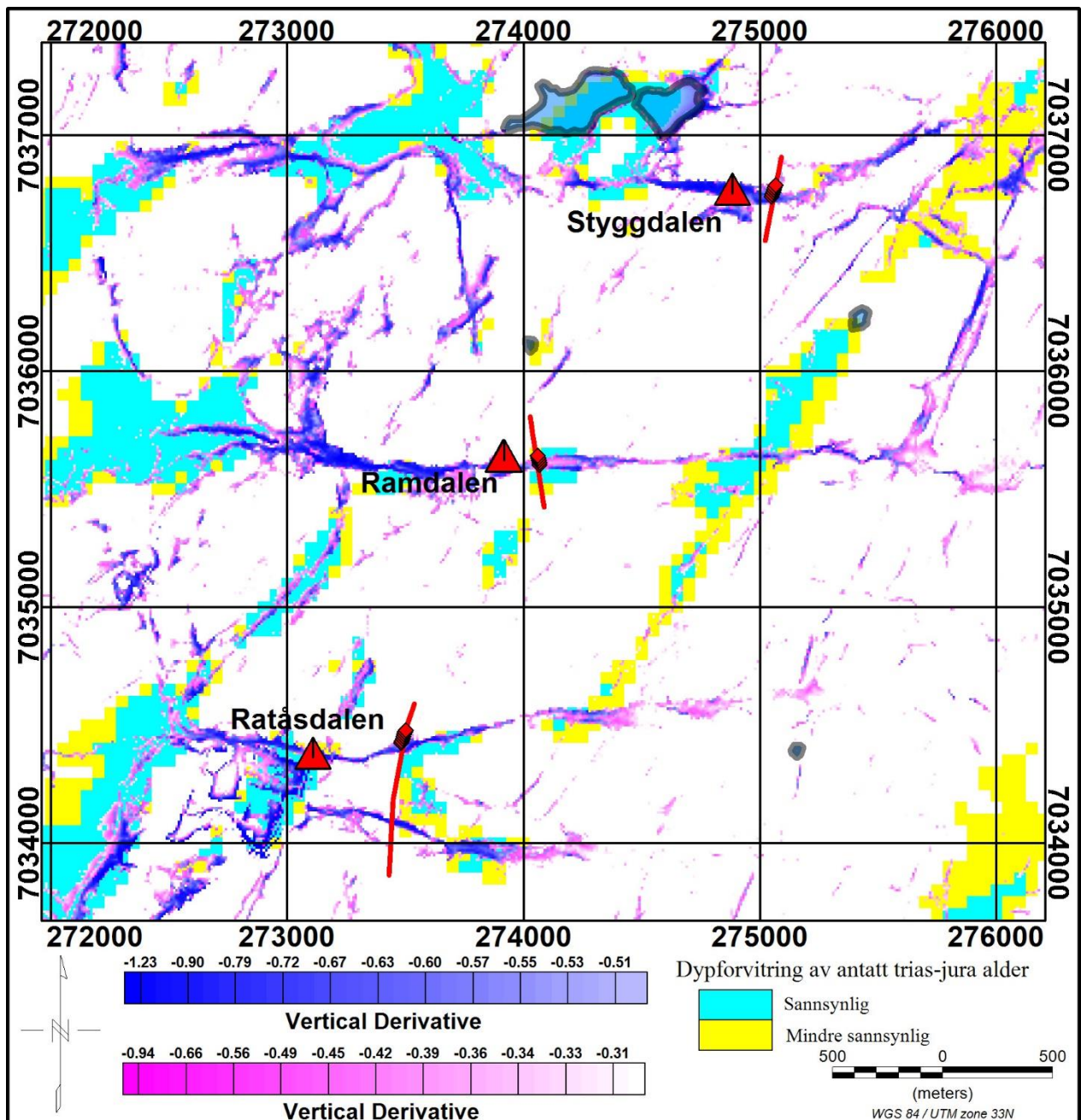


Figure 3-7: Deep-weathering/weak zones are indicated by vertical derivative of topography (as in Figure 3-6) together with AMAGER results (Baranwal et al., 2017). Locations of observed deep-weathering are shown by red triangles and locations of weak zones observed along ERT lines (red lines) are shown by small red diamonds (Coop2 report, Olesen et al., 2015).

Figure 3-8 shows deep-weathering/weak zones for a larger area covering the new E6 corridor in Trøndelag using topography only and using the AMAGER method. The new E6 corridor is shown by the red polygon. Red triangles show the locations of deep-weathering from field observations and sampling. Water bodies are shown by semi-transparent blue color polygons. Areas with thick sediment are marked with semi-transparent white color with gray boundaries. Among all these locations, Leirdalen, Ratåsdaalen, Ramdalen, Styggdalen and Tronggelet have wide and big deep-weathering zones however others are narrow and small.

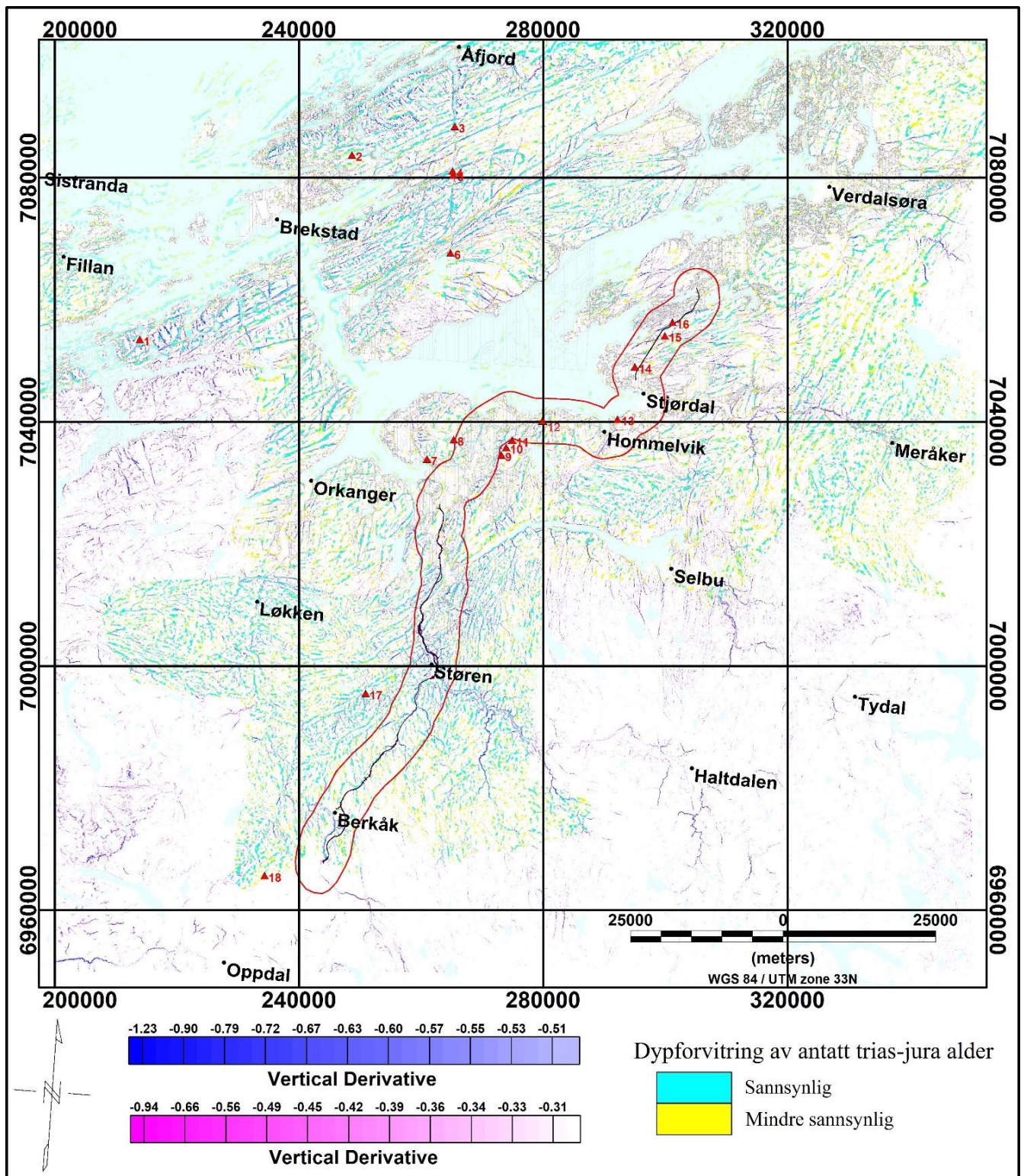


Figure 3-8: Deep-weathering/weak zones indicated by the vertical derivatives of topography as likely deep-weathering zones (<-0.5 , blue), less likely deep-weathering zones (<-0.3 , pink) and by the AMAGER method as likely deep-weathering zones (cyan) and less like deep-weathering zones (yellow). The new E6 corridor is shown by red polygon. Red triangles show the locations of deep-weathering confirmed from field observations and sampling

It is difficult to see the weak zones in detail at such a big scale. Therefore, we have made local zoomed maps around deep-weathering observations from four areas as 1) area around Brekstad (Figure 3-9), 2) area around Trondheim (Figure 3-10), 3) Kvithamar-Forbordsfjellet-Åsen area (Figure 3-11) and 4) Berkåk-Støren area (Figure 3-12) to show the details in these areas. Almost all observed deep-weathering

locations are detected by possible deep-weathering indicators produced using negative vertical derivative. Many of them are detected by the AMAGER method as well. Very few are missed by both methods.

Five out of six weathering locations shown in Figure 3-9 are detected by the negative vertical derivative (location 2 is not detected and appears to be related to shallow weathering) however only four were detected by the AMAGER method (locations 2 and 4 were not detected).

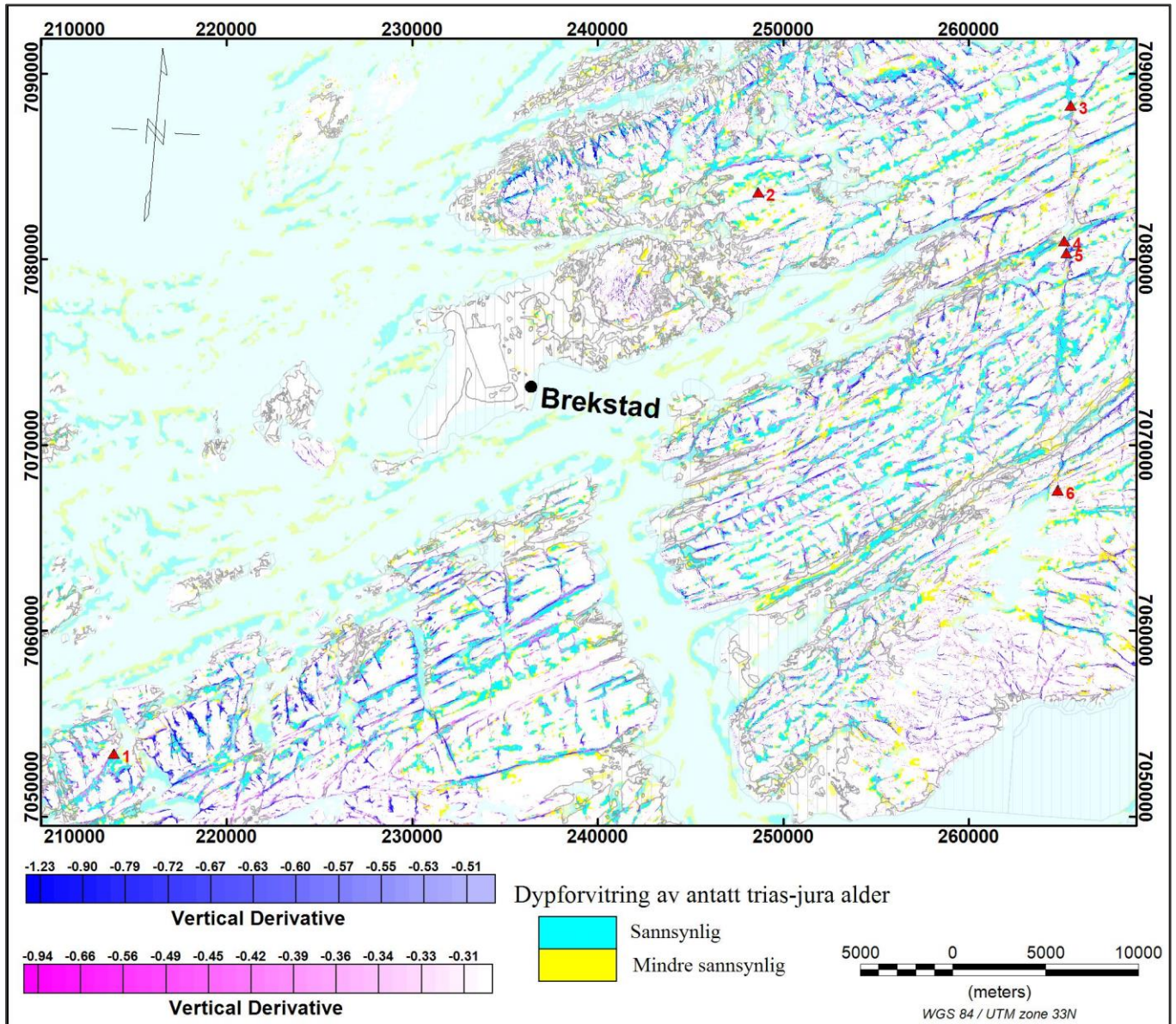


Figure 3-9: Zoomed image from the map shown in Figure 3-8 for weathering locations 1-6 in the outer Trondheimsfjord area.

Figure 3-10 shows that locations 7 and 13 are neither detected by vertical derivative nor by AMAGER. Locations 8, 10, 11 and 12 are detected by vertical derivative but not by AMAGER. Location 9 is detected by both. Locations 7 and 13 show, however, thin weathering zones in the order of decimetres.

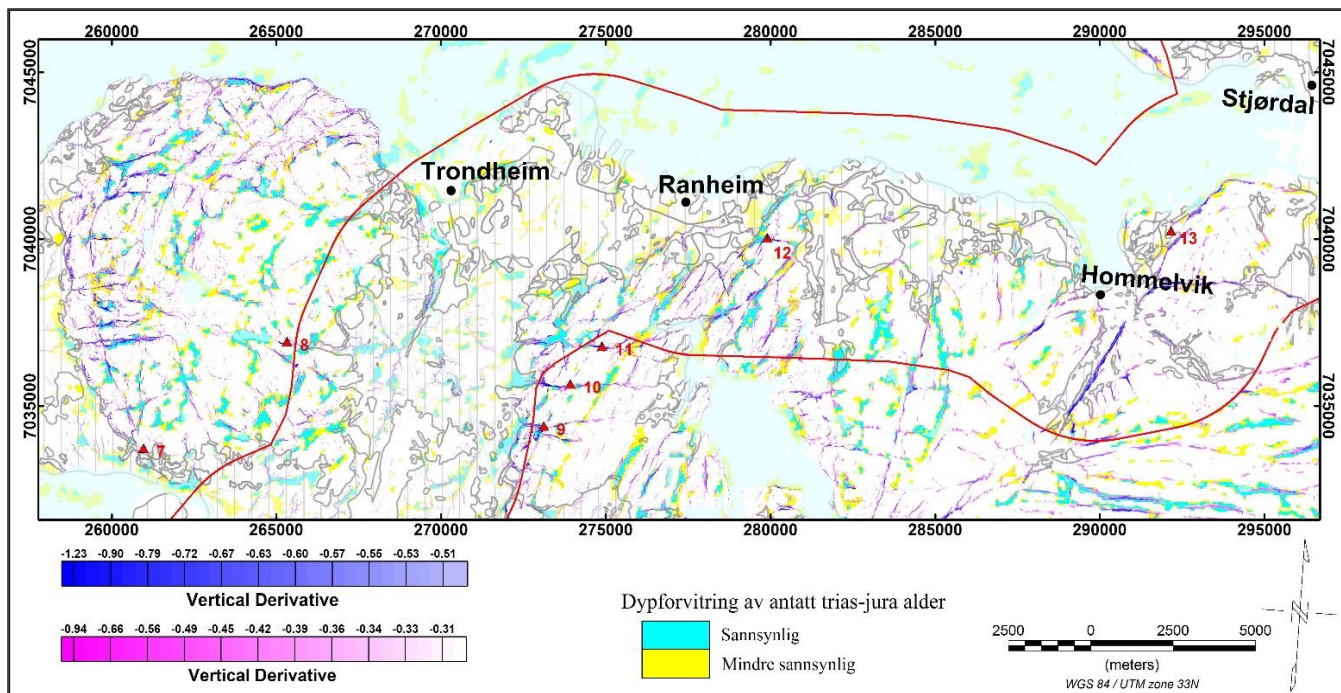


Figure 3-10: Zoomed image from the map shown in Figure 3-8 for weathering locations 7-13 around Trondheim from Byneset to Hommelvik.

All observed deep-weathering locations 14-16 in the Kvithamar to Åsen area (Figure 3-11) fall under the thick sediment zone and only location 15 & 16 are detected by possible deep-weathering indicator by the negative vertical derivative.

Figure 3-12 shows that location 17 to the east of Holsjøen (Figur 1-3) is detected by both methods but location 18 at Gisdalen is detected by only the AMAGER method. Observations made from Figure 3-9 to Figure 3-12 suggest that neither the AMAGER nor the vertical derivative method alone can detect all possible deep-weathering locations. Some of them are detected by both methods however some are detected by only one of the two methods. Few are not detected by any of the two methods. It will be interesting to investigate how wide the deep-weathering zones are at 2, 7, 13 and 14 that they are not detected by both methods. It could be possible that deep-weathering zones at these locations are too small and too local to be detected.

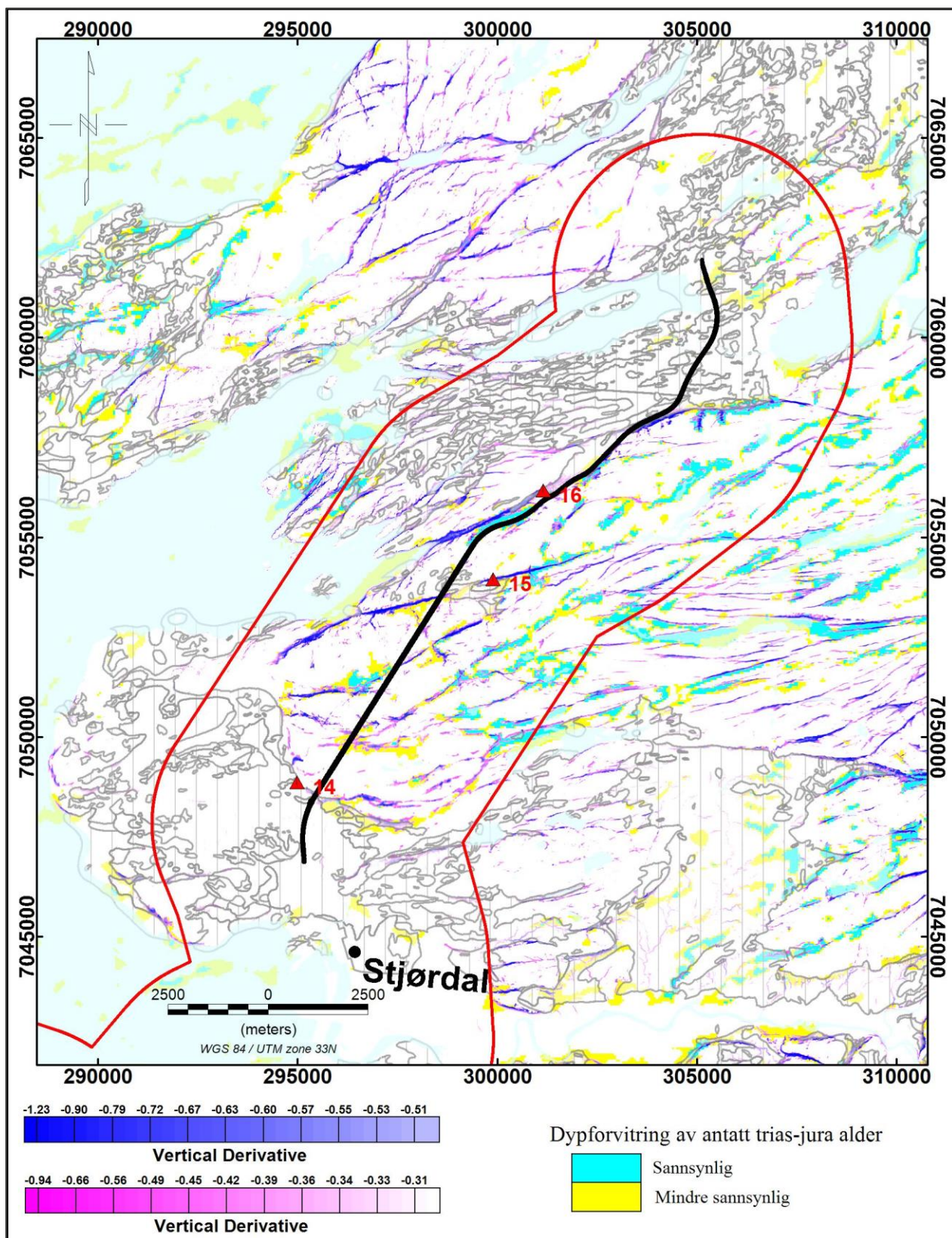


Figure 3-11: Zoomed image from the map shown in Figure 3 8 for weathering locations 14-16 from Kvithammar to Åsen.

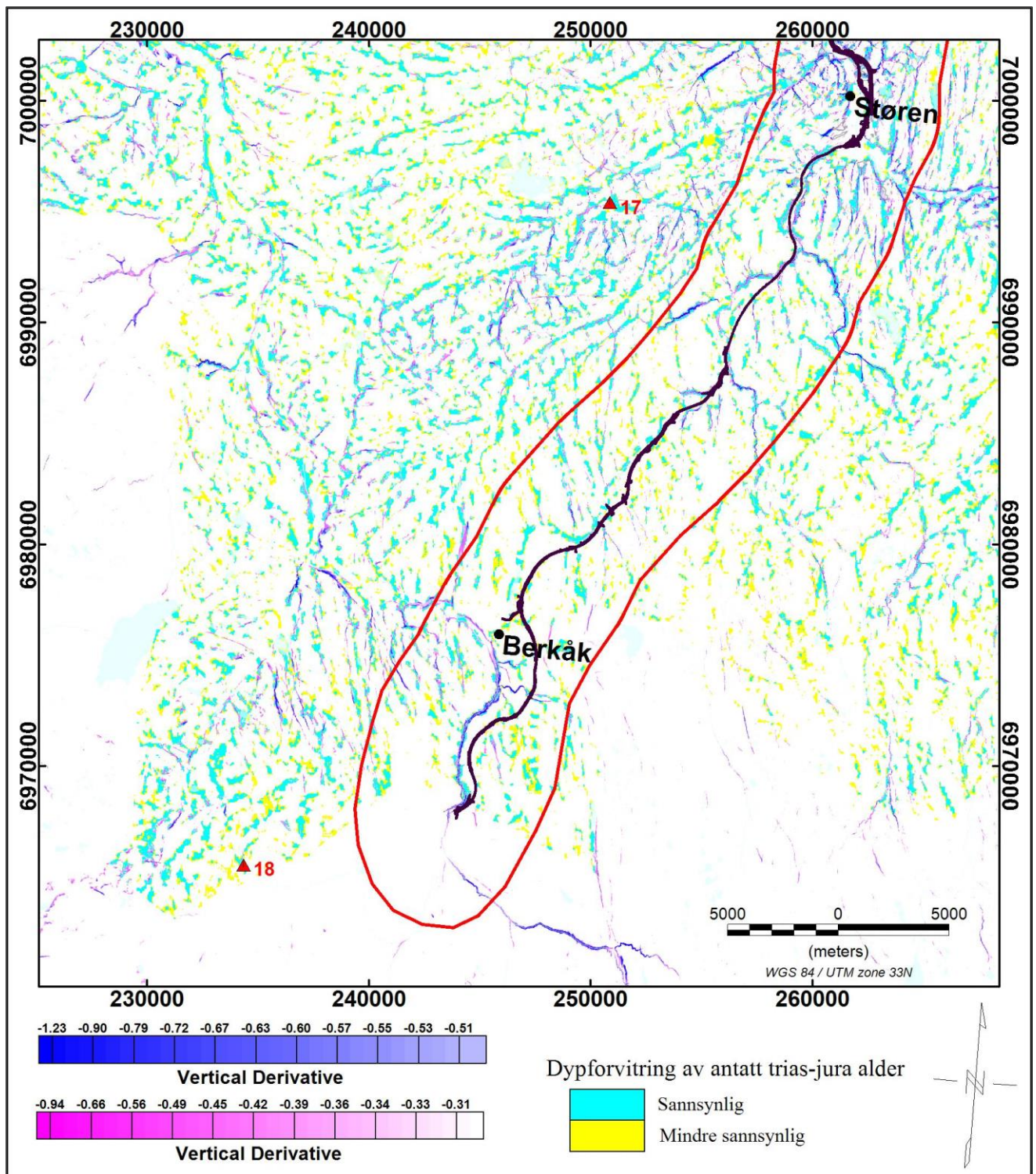


Figure 3-12: Zoomed image from the map shown in Figure 3-8 for weathering locations 17 and 18 in the vicinity of Støren and Berkåk, respectively.

3.5 SKYTEM survey in the Ranheim-Hommelvik area

The transient time-domain EM survey was performed in February 2016 by SKYTEM and NGI (NGI, 2016) in an area between Ranheim and Hommelvik. NGI processed the airborne electromagnetic (AEM) data and interpreted it for the depth to bedrock and thickness of marine clay layers. Figure 3-13 to Figure 3-15 show shaded resistivity images of the survey area for ca. 12 m, 80 m and 375 m depth below the surface, respectively. Most of the survey area is covered by marine clay and moraine. Areas with marine clay deposits are hatched with green coloured lines. The upper marine boundary after the ice age (ca. 10000 years ago) is shown by dashed blue lines. The coastline is shown by light blue colour. Existing highway

(with the Være tunnel) is shown by a black line. Deep-weathering zones from topography (vertical derivatives < -0.3) and deep-weathering zones by the AMAGER method are marked by grey and semi-transparent violet colours, respectively. Deep-weathering location Trongjelet and a recent ERT line are shown by red triangle and red line, respectively. Half-red-coloured circle show location of graphite observation by Erichsen and Finne (2019). We can see from these images that all the hatched areas which are covered by marine sediments were under the sea-water (areas outside the dashed blue lines) before the ice retreat and uplift.

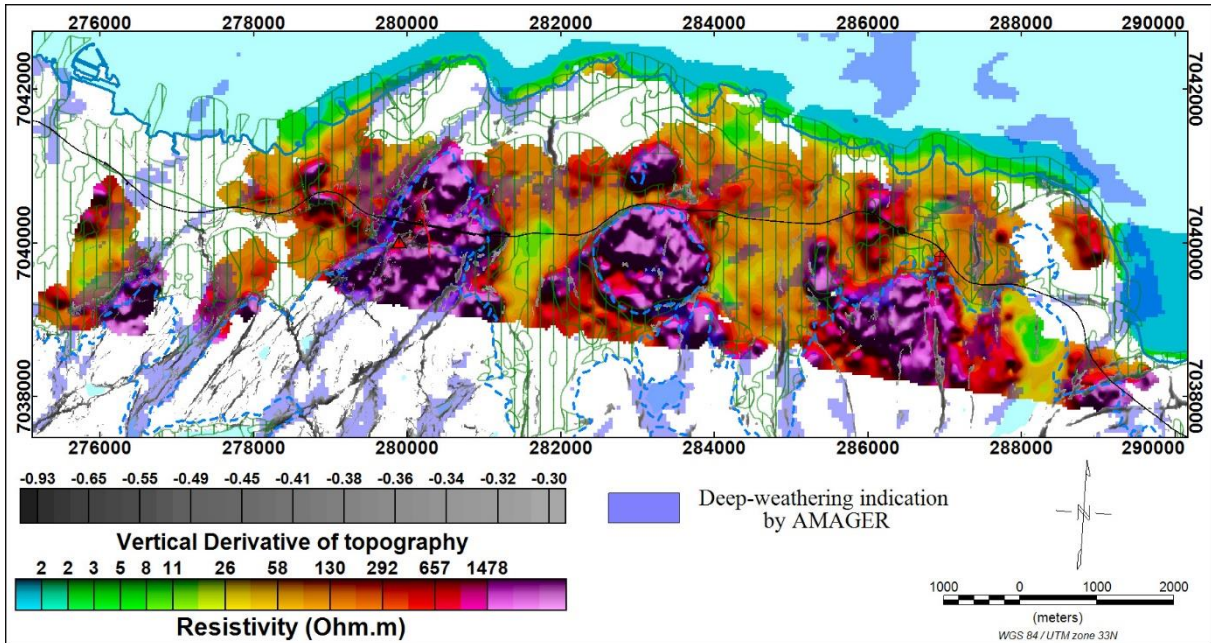


Figure 3-13: SKYTEM resistivity (light blue to pink) between 10 m to 15 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey) and AMAGER results (semi-transparent violet). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black line and dashed blue lines, respectively.

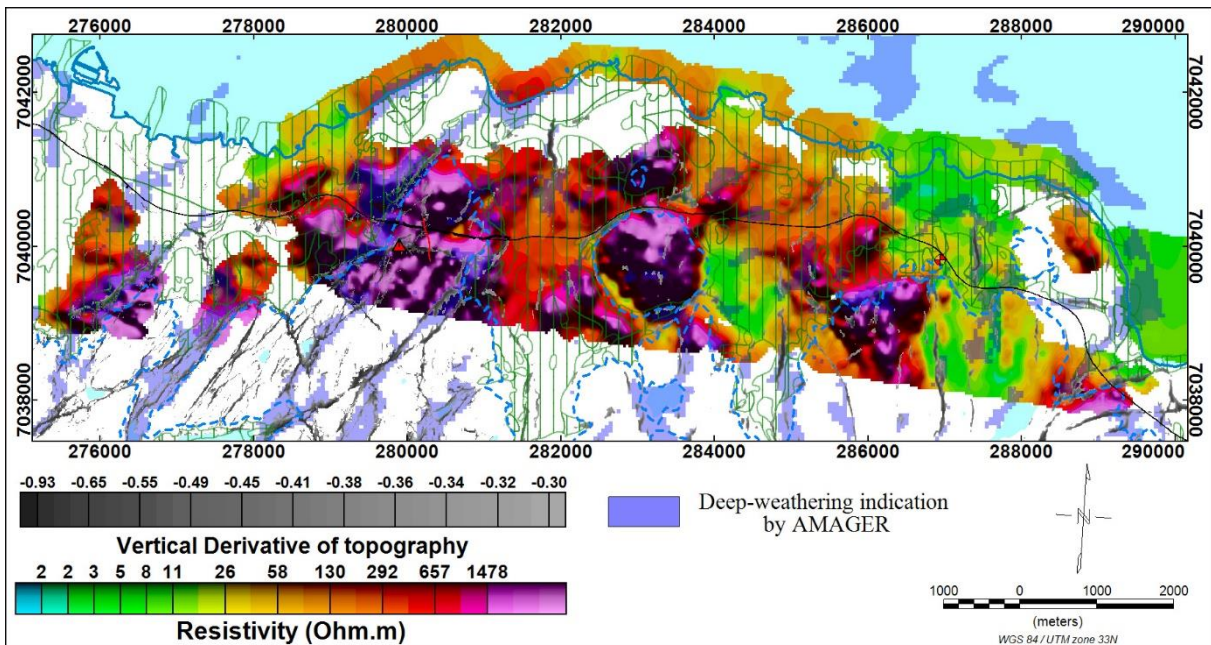


Figure 3-14: SKYTEM resistivity (light blue to pink) between 75 m to 90 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey) and AMAGER results (semi-transparent violet). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black line and dashed blue lines, respectively.

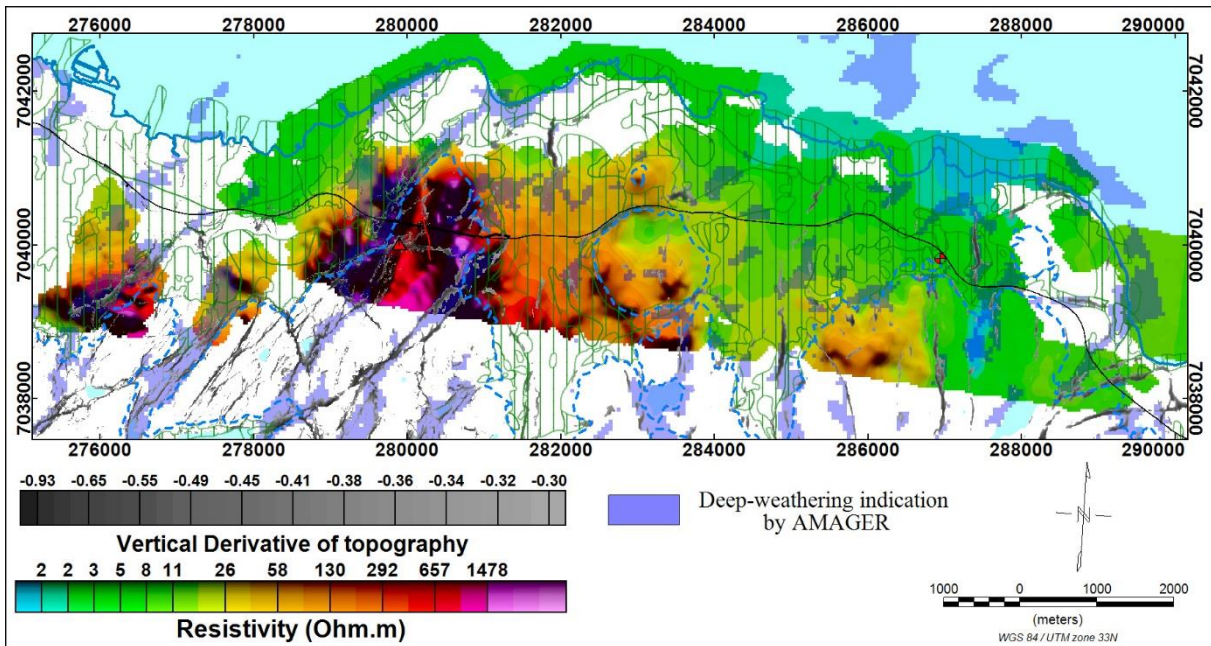


Figure 3-15: SKYTEM resistivity (light blue to pink) between 350 m to 400 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey) and AMAGER results (semi-transparent violet). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black line and dashed blue lines,

respectively.

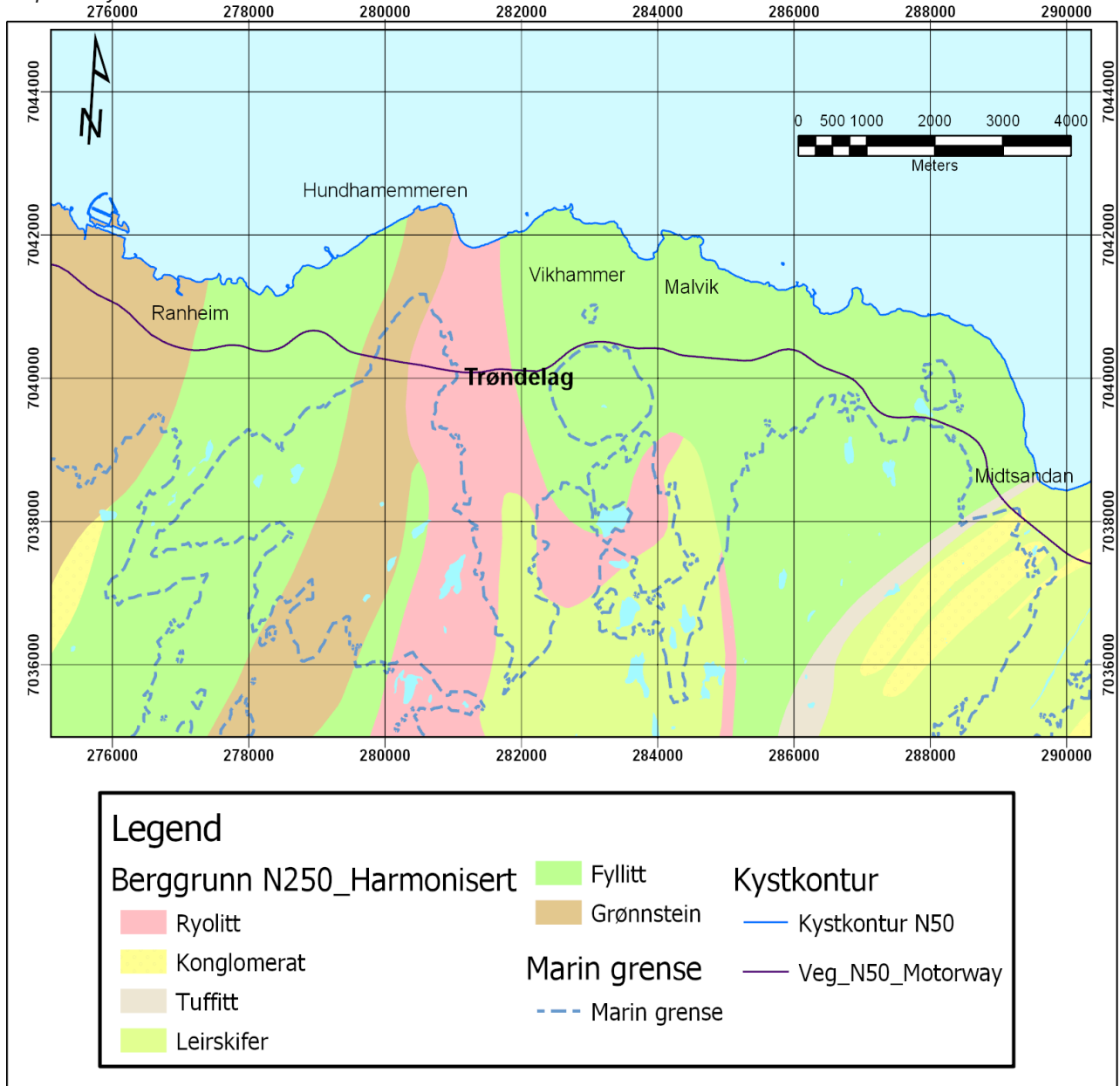


Figure 3-16: Bedrock map from the Ranheim-Hommelvik area.

The hatched areas (covered with marine sediments) show a relatively low resistivity < 100 Ohm.m indicating marine clay deposits. Non-hatched areas show a relatively high resistivity between 200 Ohm.m to 2000 Ohm.m and they are covered by moraine and dry sediments. These areas consist of phyllite, rhyolite and greenstone as shown in the bedrock map in Figure 3-16. Some of the phyllite near coordinate (288 000, 7 038 000) shows very low resistivity specially at greater depths (Figure 3-14 and Figure 3-15) because it contains graphite (Erichsen and Finne, 2019) which is an electronically conductive mineral. We can see some correlation between indicated deep-weathering zones using the vertical derivative of topography and the AMAGER method to the resistivity map (valley patterns in shaded image of resistivity) in these images (Figure 3-13 to Figure 3-15). The SKYTEM survey has a large footprint of ca. 50 m radius area. Therefore, small and narrow low resistivity zones cannot be mapped by this survey. The vertical resolution is ca. 3 m near the surface, and it decreases with depth (e.g. ca. 16 m around 100 m depth). We calculated vertical and horizontal derivatives of the SKYTEM resistivity to find the zones with significant resistivity changes. Horizontal derivative of resistivity didn't show much correlation with indicated deep-weathering zones. It is therefore not presented here. We observe some correlation between the vertical derivative of the SKYTEM resistivity and the indicated deep-weathering zones from the topography (Figure 3-17). Figure 3-17 shows the vertical derivative of resistivity (blue to pink coloured) at ca. 12 m depth below the surface together with indicated deep-weathering zones (grey coloured). We observe some correlation

between the negative vertical derivative of topography and the negative vertical derivative of resistivity (green to blue areas). Most of the hatch areas fall within the yellow colour which indicates zero vertical derivative of the resistivity. Figure 3-18 and Figure 3-19 indicate similar vertical derivative images for resistivity at ca. 80 and ca. 375 m depths, respectively. The correlation between vertical derivatives of resistivity and topography is less at ca. 80 m depth. No correlation can be observed at ca. 375 m depth which indicates that deep weathering may not extend below 375 m depth.

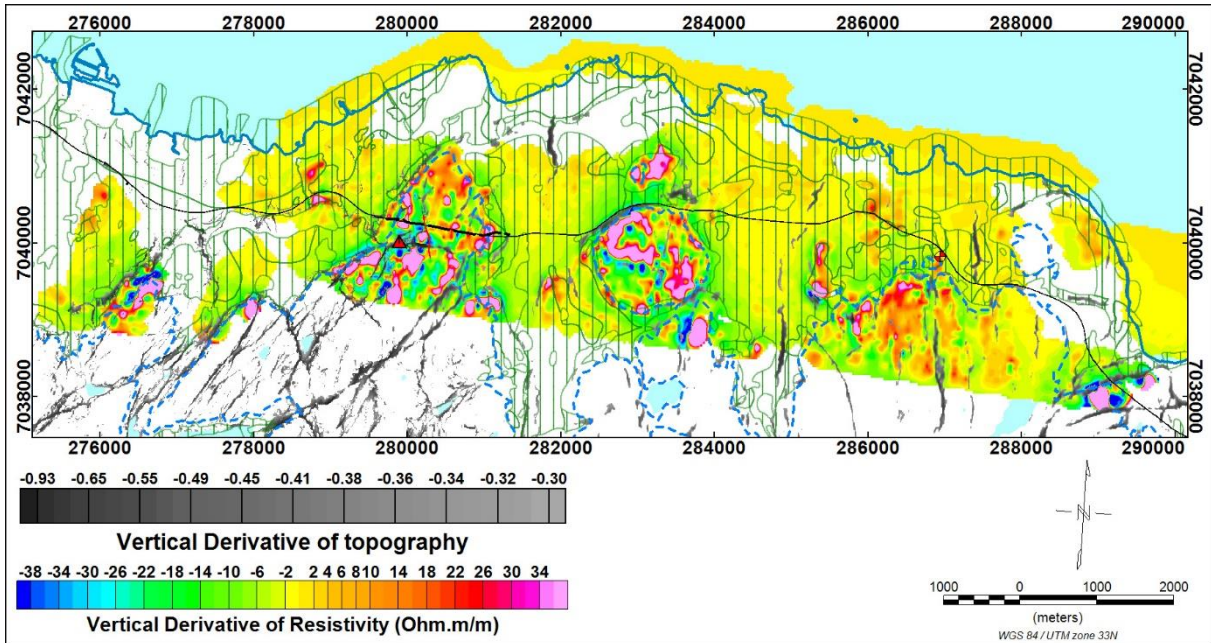


Figure 3-17: Vertical derivative of the SKYTEM resistivity (blue to pink colours) between 10 m to 15 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black line and dashed blue lines, respectively.

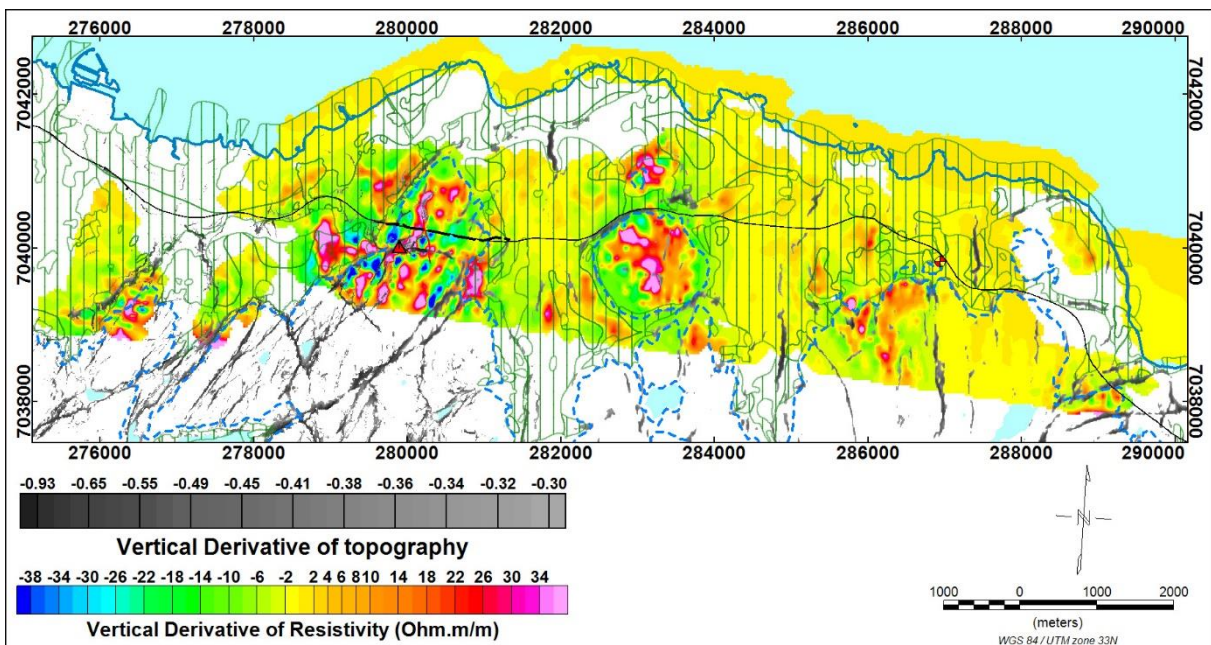


Figure 3-18: Vertical derivative of the SKYTEM resistivity (blue to pink) between 75 m to 90 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black patterned line and dashed blue lines, respectively.

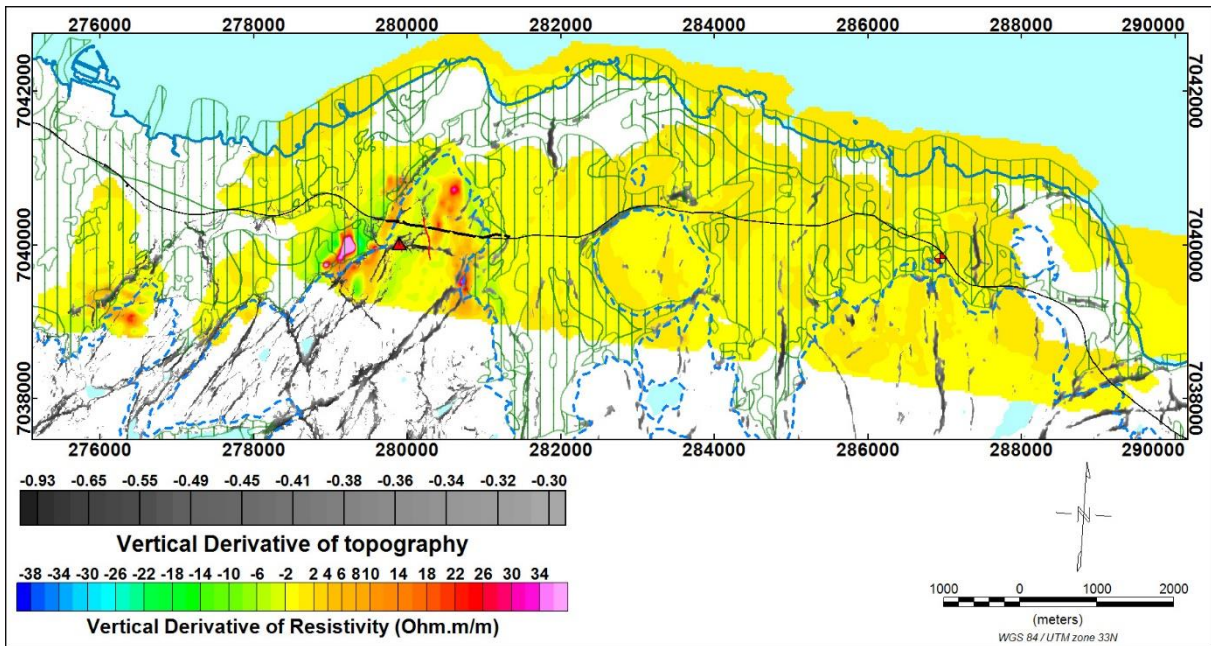


Figure 3-19: Vertical derivative of the SKYTEM resistivity (blue to pink) between 350 m to 400 m depth together with indicated deep-weathering zones using topography alone (grey). Coast line, highway (with Være tunnel) and upper marine limit are shown by blue lines, black line and dashed blue lines, respectively.

3.6 Conclusions

The Trøndelag area has relatively low magnetic anomalies in comparison to the Oslofjord region. The AMAGER method which was based on magnetic and topography did not indicate locations of deep-weathering observations in Leirdalen, Ramdalen, Styggdalen and Tronggjelet. Therefore, an attempt is made to obtain possible deep-weathering zones or locations using only the topography data. 10 m resolution grids of the topography downloaded from Statens kartverk are used for this purpose. Various derivatives of topography e.g. horizontal derivative, vertical derivative, tilt-derivative and curvature are investigated. Vertical derivative of topography indicates these locations very well with its unique negative values. However, few locations of deep-weathering observation could not be detected by the negative vertical derivative of the topography as well. Undetected deep-weathering locations are narrow and small and therefore they cannot be found by this method. New deep-weathering action map based on only topography (negative vertical derivative) indicates most of the known deep-weathering locations in the Trøndelag. However, zones indicated by negative vertical derivative of topography may not always be due to deep-weathering. Indicated zones are steep valleys which may form due to weak zones, fracture zones and depressions in the topography.

Subsurface resistivity obtained from SKYTEM survey does not match directly with deep-weathering indications obtained from the negative vertical derivative of the topography. SKYTEM resistivity from different depths show some resistivity variation at these locations. Vertical derivative of the SKYTEM resistivity indicates resistivity changes better. We observe some correlation between negative vertical derivative of topography and negative vertical derivative of SKYTEM resistivity. Vertical derivative of SKYTEM resistivity suggests that deep-weathering is not extending beyond 375 m depth below the surface. Such low resistivities can also be observed at the locations of marine clay, saltwater, graphite and other conductive minerals.

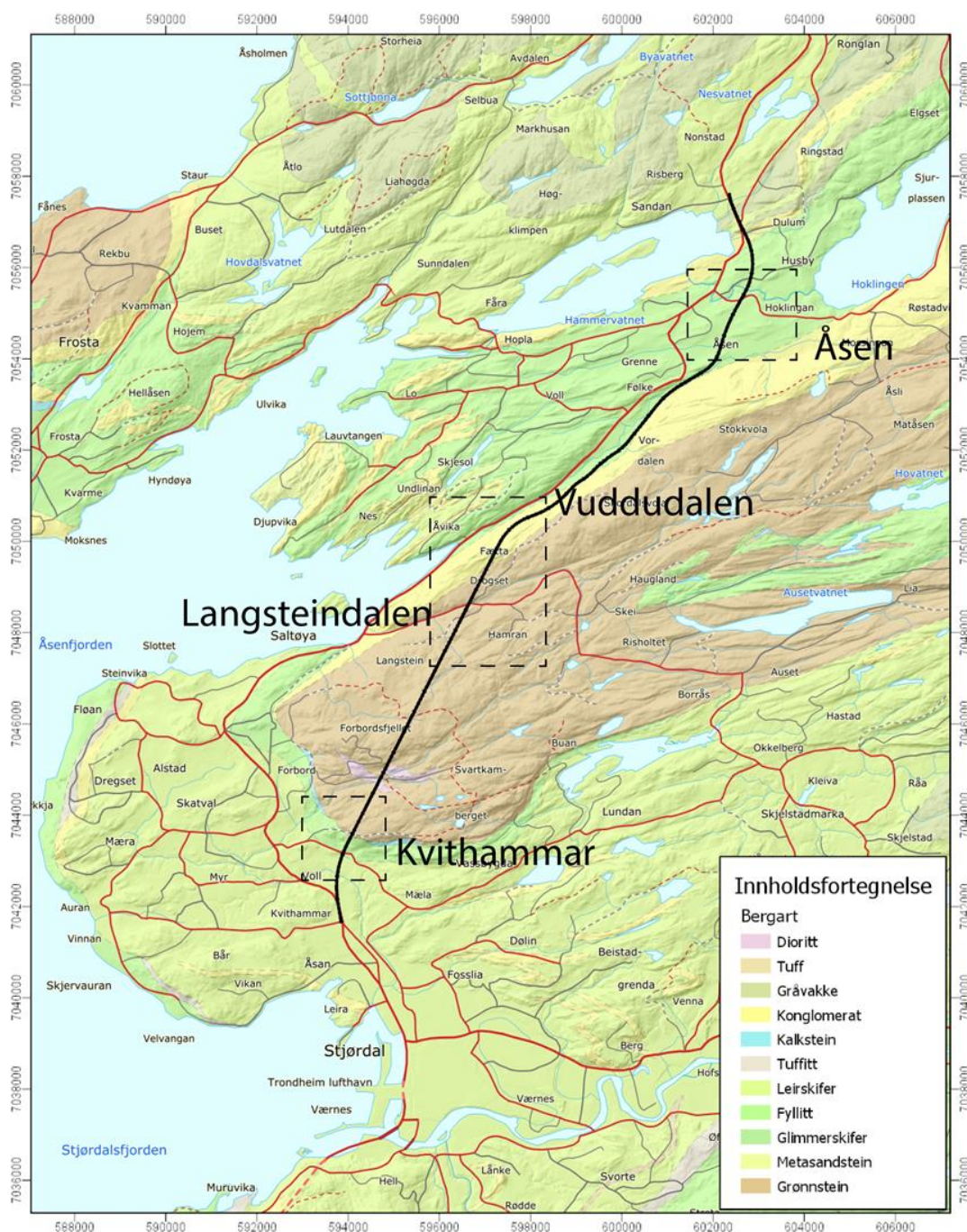
4. RESISTIVITETSUNDERSØKELSER RANHEIM - ÅSEN

Bjørn Eskil Larsen

4.1 Innledning

NGU har høsten 2018 utført fem resistiviteitsprofiler i forbindelse med veiprosjekt Ulsberg – Åsen. Fire av profilene er gjort i forbindelse med Forbordsfjelltunnelen, en ved påhugg Kvithammar (Profil 4), to i Langsteindalen (Profil 1 og 2), en ved påhugg i Vuddudalen (Profil 5) og den siste ved planlagt miljøtunnel på Åsen (Profil 3). Se oversiktskart (Figur 4-1).

Kvithammar - Åsen

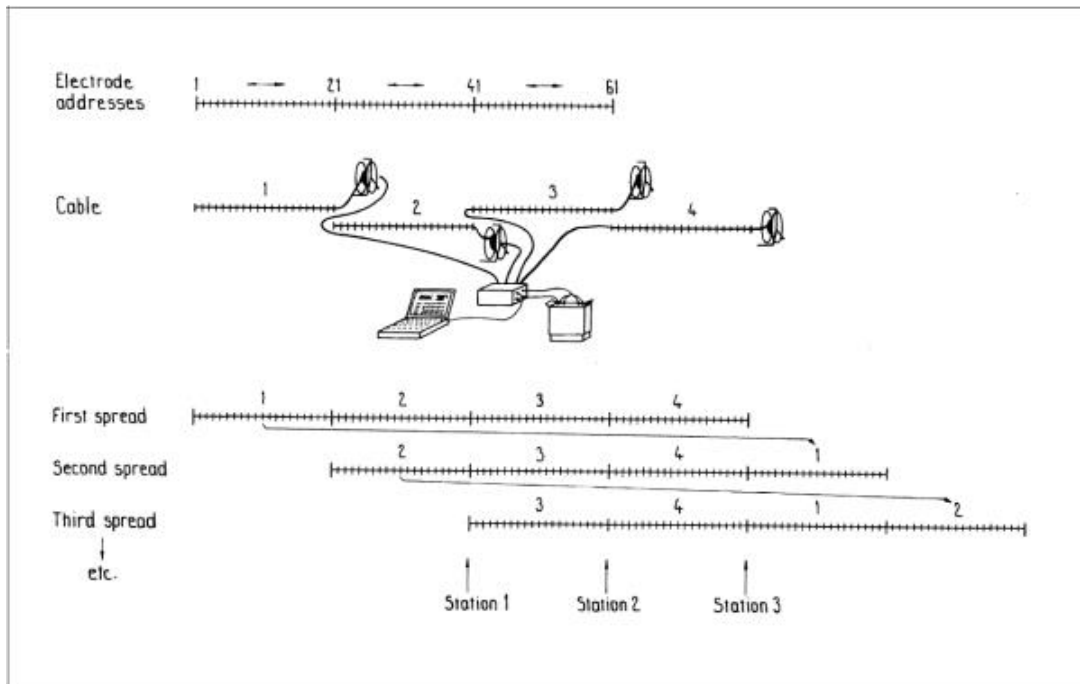


Figur 4-1: Oversiktskart Kvithammar-Åsen.

4.2 ERT metodikk

'Electric Resistivity Tomography' (ERT) utføres ved å sende strøm mellom et elektrodepar samtidig som det måles potensial og motstand mellom et annet elektrodepar. Basert på strømstyrke, målt spenning og elektrodernes posisjon i forhold til hverandre (geometrisk faktor) beregnes tilsynelatende resistivitet.

Utstyret brukt i undersøkelsene er utført med Lund kabelsystem (Dahlin, 1993) og ABEM Terrameter LS (ABEM, 2012). LUND-systemet med fire multi-elektrode kabler er vist i Figur 4.2. Figuren viser også hvordan 'roll-along' systemet fungerer. Fire multielektrode-kabler med 21 elektroder kobles til instrumentet. Så kjøres en protokollfil med elektrodekonfigurasjoner. I denne undersøkelsen ble elektrodekonfigurasjonen Gradient Pluss (Dahlin & Zhou, 2006) brukt.



Figur 4-2: LUND-systemet med fire multi-elektrode kabler. Figuren viser også hvordan 'roll-along' systemet fungerer.

Oppløsning på datasettet styres av elektrodeavstanden. Lav elektrodeavstand gir høyere oppløsning, men det er på bekostning av dybdepenetrasjon. Ved 10 m elektrodeavstand vil fullt utlegg være 800 m langt og pålitelig dybdepenetrasjon være ca. 100 m og ved 5 m elektrodeavstand er den ca. 50 m. Tabell 4-1 viser lengde og elektrodeavstand for alle profiler.

Tabell 4-1: Tabellen viser lengde og elektrodeavstand for målte profiler

Navn	Lengde	Elektrodeavstand
Profil 1 - Langsteindalen	800m	10m
Profil 2 - Langsteindalen	400m	5m
Profil 3 - Åsen	400m	5m
Profil 4 - Skatval	600m	5m
Profil 5 - Vuddudalen	400m	5m
Profil 6 - Tronggjelet	600m	5m

Målte verdier er *tilsynelatende resistivitet* og må inverteres for å få sann resistivitet. All data er invertert med Res2DInv (Loke, 2017) med robust databegrensing.

Ved bruk av ERT kan det forventes å avdekke løsmassetykkelse, grunnvannstand samt grenser mellom geologiske enheter (både løsmasser og bergarter) hvor det forekommer en forskjell i elektriske egenskaper. Figur 4.3 viser typiske resistivitetsverdier i geologiske materialer (Reynolds, 2011). Det tas et forbehold om nøyaktigheten langs dybde-dimensjonen. Nøyaktigheten vil minske med dypet, men generelt er nøyaktigheten i øverste halvdel av profilet godt under elektrodeavstanden.

Table 7.1 Resistivities of common geologic materials			
Material	Nominal resistivity (Ωm)		
Sulphides:			
Chalcopyrite	$1.2 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$	Sherwood sandstone	100–400
Pyrite	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$	Soil (40% clay)	8
Pyrrhotite	$7.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$	Soil (20% clay)	33
Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	Top soil	250–1700
Sphalerite	1.5×10^7	London clay	4–20
Oxides:		Lias clay	10–15
Hematite	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	Boulder clay	15–35
Limonite	$10^3 - 10^7$	Clay (very dry)	50–150
Magnetite	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$	Mercia mudstone	20–60
Ilmenite	$10^{-3} - 5 \times 10$	Coal measures clay	50
Quartz	$3 \times 10^2 - 10^6$	Middle coal measures	> 100
Rock salt	$3 \times 10^{-10} - 10^{13}$	Chalk	50–150
Anthracite	$10^{-3} - 2 \times 10^5$	Coke	0.2–8
Lignite	$9 - 2 \times 10^2$	Gravel (dry)	1400
Granite	$3 \times 10^2 - 10^6$	Gravel (saturated)	100
Granite (weathered)	$3 \times 10^{-5} - 10^2$	Quaternary/Recent sands	50–100
Syenite	$10^2 - 10^6$	Ash	4
Diorite	$10^4 - 10^5$	Colliery spoil	10–20
Gabbro	$10^3 - 10^6$	Pulverised fuel ash	50–100
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$	Laterite	800–1500
Schists (calcareous and mica)	$20 - 10^4$	Lateritic soil	120–750
Schist (graphite)	$10 - 10^2$	Dry sandy soil	80–1050
Slates	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	Sand clay/clayey sand	30–215
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	Sand and gravel	30–225
Consolidated shales	$20 - 2 \times 10^3$	Unsaturated landfill	30–100
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$	Saturated landfill	15–30
Sandstones	$1 - 7.4 \times 10^8$	Acid peat waters	100
Limestones	$5 \times 10 - 10^7$	Acid mine waters	20
Dolomite	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$	Rainfall runoff	20–100
Marls	$3 - 7 \times 10$	Landfill runoff	< 10–50
Clays	$1 - 10^2$	Glacier ice (temperate)	$2 \times 10^6 - 1.2 \times 10^8$
Alluvium and sand	$10 - 8 \times 10^2$	Glacier ice (polar)	$5 \times 10^4 - 3 \times 10^5 *$
Moraine	$10 - 5 \times 10^3$	Permafrost	$10^3 - > 10^4$

* – 10°C to – 60°C, respectively; strongly temperature-dependent. Based on Telford et al. (1990) with additional data from McGinnis and Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds and Paren (1980, 1984) and many commercial projects.

Figur 4-3: Oversikt over typiske resistivitetsverdier i utvalgte geologiske materialer (Reynolds, 2011).

4.3 Resultater

4.3.1 Langsteindalen - Profil 1 og Profil 2

Profil 1 og 2 ligger i sin helhet i grønnstein. Profil 1 (Figur 4-8) viser resistivitetsverdier på under 1000 Ωm i nordlige og sørlige del, noe som er assosiert med oppsprukket fjell eller vannmettet sand. I dette tilfellet er det antatt å være vannmettede løsmasser i sør og dyrket mark i nord som forårsaker de lave verdiene. Ved midten av profilet, nede i dalbunnen ligger det flere lommer med størrelse på ca. 10 meter med resistivitetsverdier på under 100 Ωm . Dette stemmer overens med marin leire, som også er påvist i forbindelse med graving på stedet. Profilet viser også nedsatt resistivitet lengre ned i dypet. Dette kan tyde på oppsprukket og forvitret fjell. Profil 2 (Figur 4-9) går langs dalbunnen på tvers av Profil 1. Den viser et løsmassemektighet som muligens kommer i konflikt med nordgående tunnellop. Det anbefales å bore i dette området for å få bedre kontroll på dyp til friskt fjell.

4.3.2 Åsen - Profil 3

Profil 3 er målt langs planlagt miljøtunnel på Åsen. Målet var å avdekke dyp til fjell samt hvor miljøtunnelen går inn i fjell. Figur 4-10 viser en veldig markert overgang mellom løsmasser og fast fjell. De lave resistivitetsverdiene i løsmassene er på et nivå som ifølge Solberg o.a. (2011) karakteriseres som kvikkleire. Fra sør ser fjellet ut til å ligge på rundt 65 moh. frem til en terskel ca. 140 m langs Profil 3, der stiger fjelloverflaten ca. 15 meter til ca. 80 moh. før den fortsetter mot nord og kommer opp i dagen ved 220 m.

4.3.3 Kvithammar – Profil 4

Profil 4 (Figur 4-11) starter like over planlagt påhugg ved Kvithammar og starter i en fyllitt før den krysser en skyvessone og går over i en grønnstein. Det ligger en kalkstein mellom grønnsteinen og fyllitten, men ikke i området over tunneltraséen. Målet med denne undersøkelsen var å se om det finns soner som kan gi problemer under driving av tunnel.

Det er en tydelig grense mellom fyllitt og grønnstein ca. 440 m langs profilet. Grønnsteinen leder strøm mye dårligere enn fyllitten, derfor blir denne kontakten veldig sterk. Fyllitten ligger stort sett på 500 Ω m, bortsett fra nær overflaten og tre soner med ekstremt lav resistivitet. Overflatesonen med høy resistivitet skyldes nok tørre løsmasser, mens de lave sonene er noe usikker. Fyllitten inneholde organisk materiale og hvis denne blir konsentrert og tilstrekkelig omvandlet kan grafitt dannes, noe som kan forklare de lave verdiene. Andre mineraliseringer som sulfider vil også kunne forklare disse verdiene.

4.3.4 Vuddudalen – Profil 5

Profil 5 (Figur 4-12) starter like nord for planlagte nordlige påhugg for Forbordsfjelltunnelen og følger tunneltraséen sørover. Målet var å avdekke eventuelle svakhetssoner i området rundt påhugget.

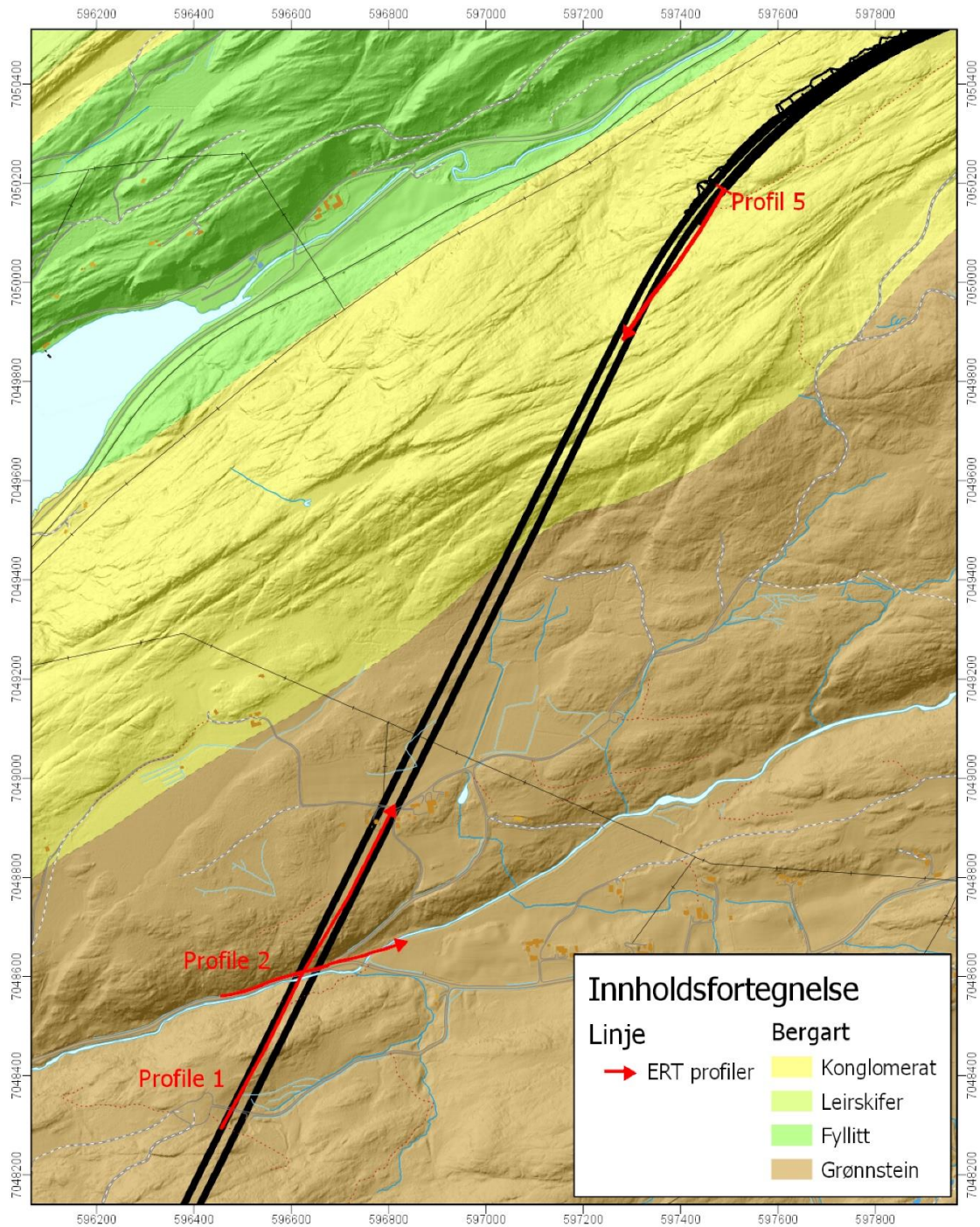
Ifølge NGU sine geologiske kart ligger profilet i sin helhet i et konglomerat. Det er noe nedsatt resistivitet rundt påhugget, men det antas at det skyldes godt ledende sedimenter eller myr. Det er også en sone med nedsatt resistivitet helt sør langs profilet, dette sammenfaller med lineamenter med retning SV-NØ (Figur 4-4 helt sør langs P5). Disse lineamentene kan indikere sprekkesoner men det er vanskelig å si hvor dypt de rekker. Tunnelen ligger nesten 100m under overflaten i dette området.

4.3.5 Tronggjelet – Profil 6

De første 100 meterne langs Profil 6 (Figur 4-13) går langs en traktorsti før det stuper ned i Tronggjelet. Den lave resistiviteten i dalen støtter hypotesen om at dalen utgjør en forvitringssone. Ifølge resistivitetmålingene er sonen mellom 30 m og 40 m bred og har et dyp på minst 80 meter. Hvis forvitringssonen følger dalen og er parallell med Væretunnelen. Dette kan utgjøre et stort problem hvis et nytt tunnellop drives for nær sonen. Dagens løp er ca 250 m fra Tronggjelet og er ca 150 m under overflaten. Videre nordover langs profilet er det to soner til med lav resistivitet i overflaten, den ene ved 400 m og den andre ved 500 m. Sonen ved 400 meter er ca 50 m sør for dagen tunnel, men den har kun et dyp på ca 20 m. Sonen ved 500 meter er ca 20 m bred og følger en dal med retning 060° og er markert på Målingene går ikke dypere enn ca 50 m i denne delen, men sonen virker å fortsette dypere. Den virker også å bli bredere mot dypet. Hvis sonen fortsetter i dypet krysser den både eksisterende og planlagte tunnellop.

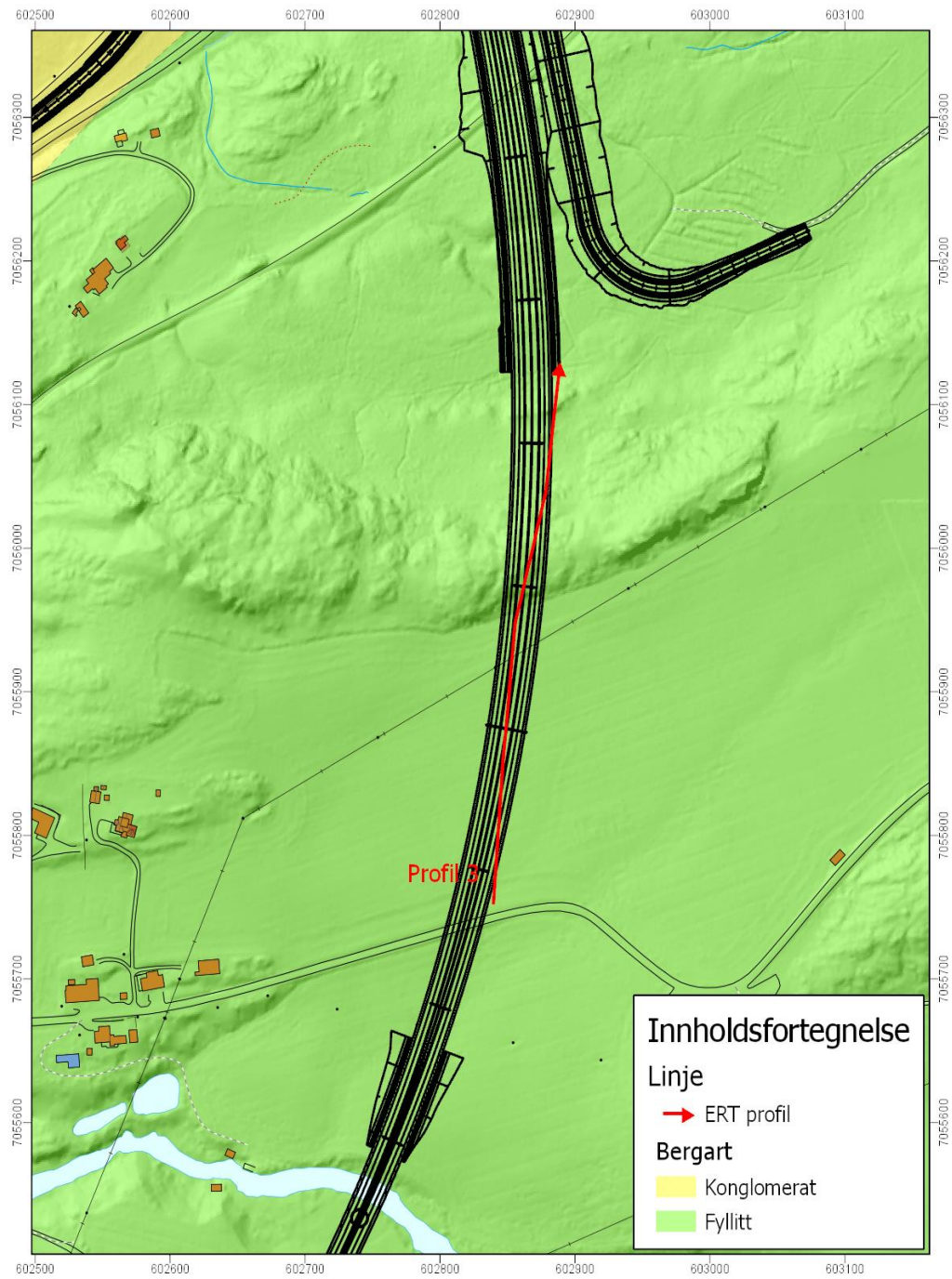
I tillegg til de sonene som starter i overflaten er det en sone i bunnen av profilet ved ca 440 m. Den virker ikke å kommunisere med sonene på overflaten så det er usikkert på om dette skyldes forvitring. Dette kan være en falsk effekt siden det er veldig få datapunkter på dette dypet.

Langsteindalen og Vuddudalen



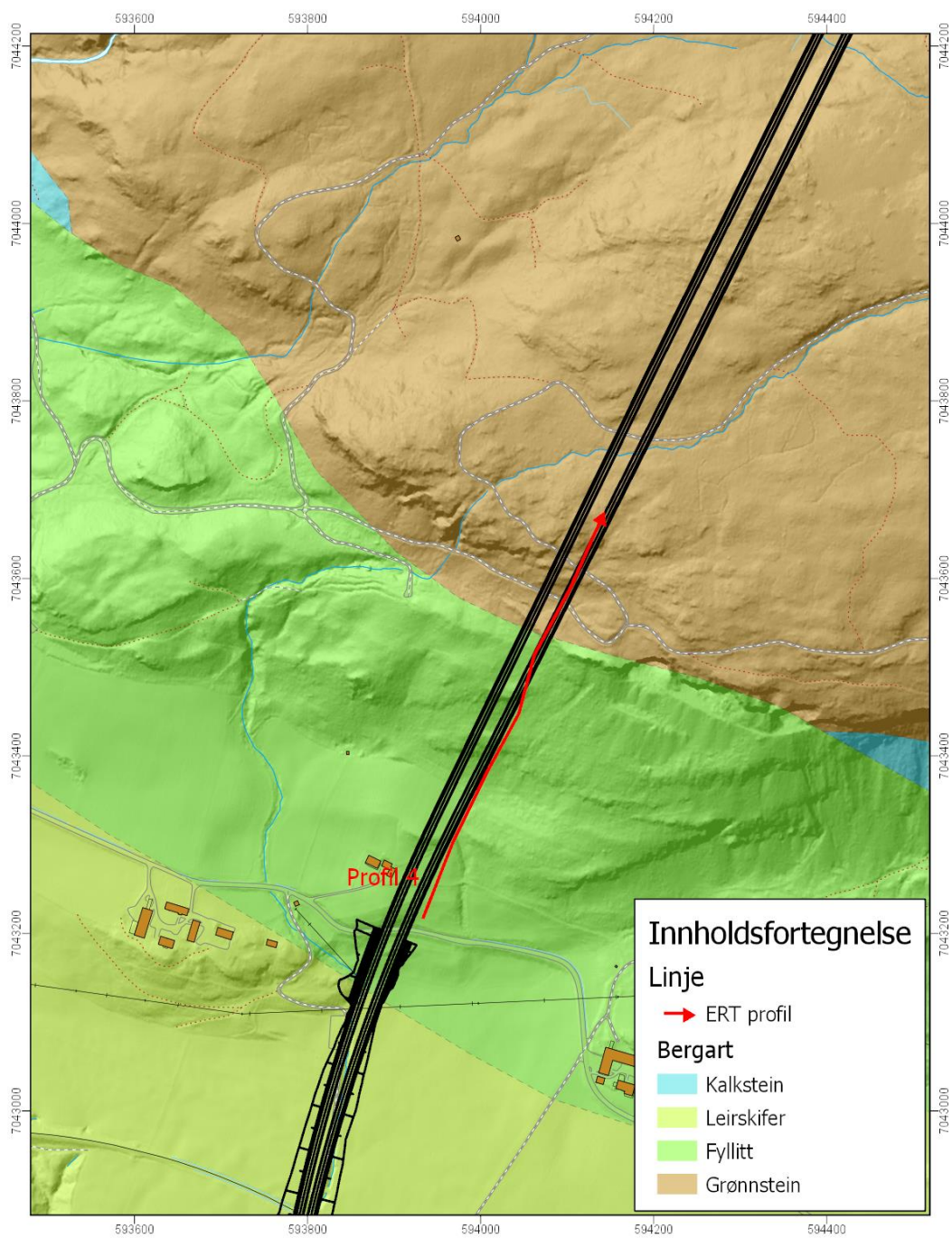
Figur 4-4: ERT profiler i Langsteindalen og Vuddudalen.

Åsen



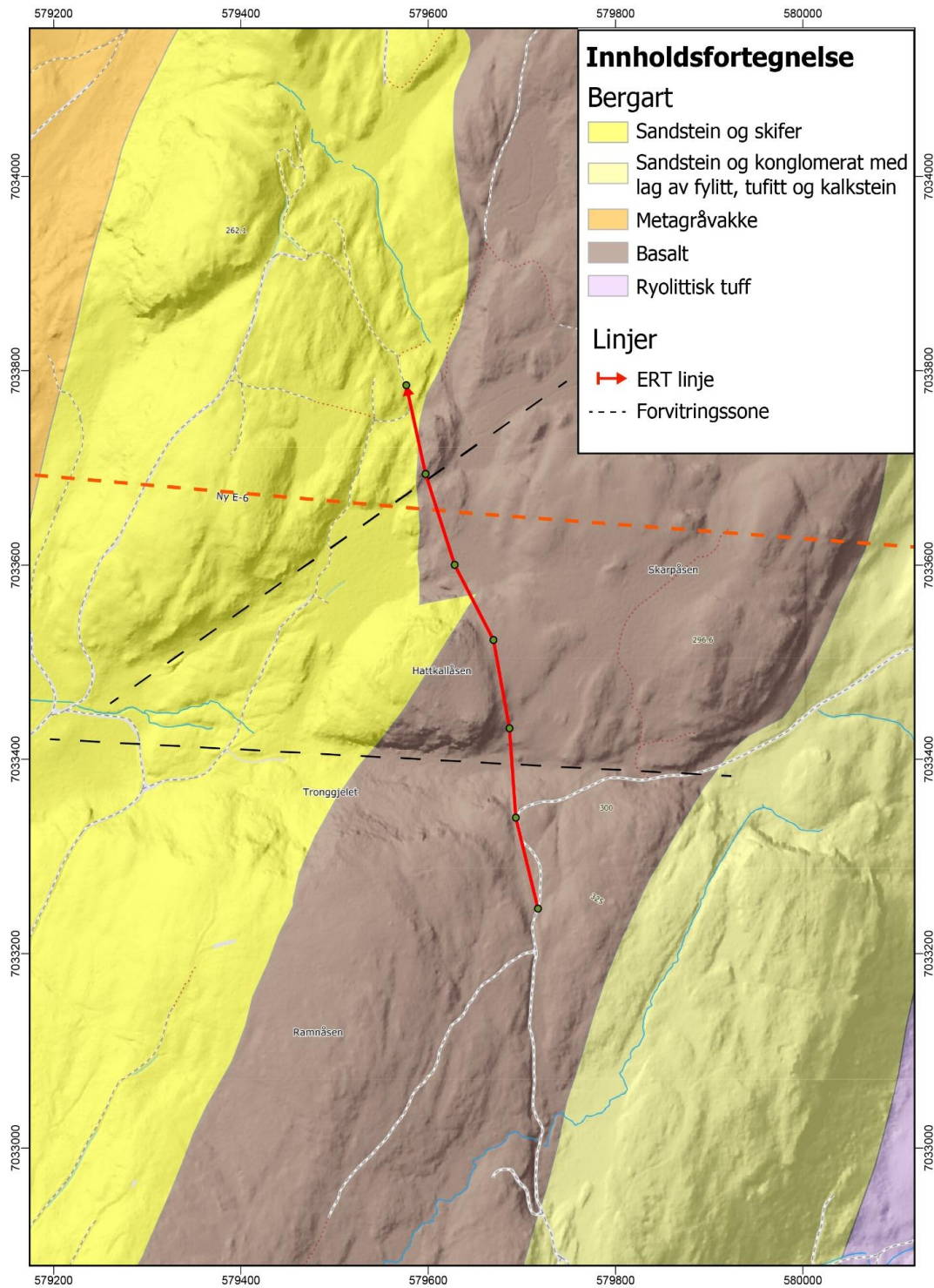
Figur 4-5: ERT profil ved Åsen.

Kvithammar

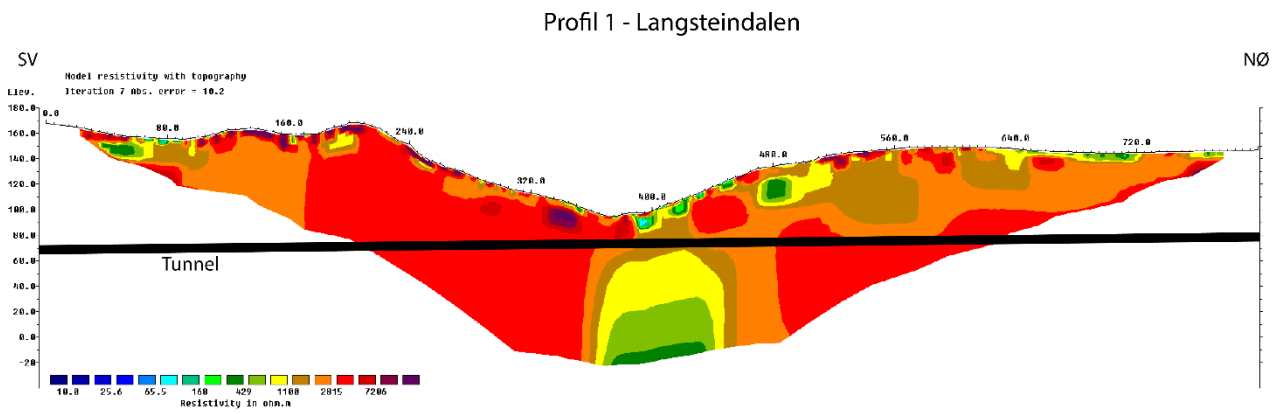


Figur 4-6: ERT profil ved Kvithammar.

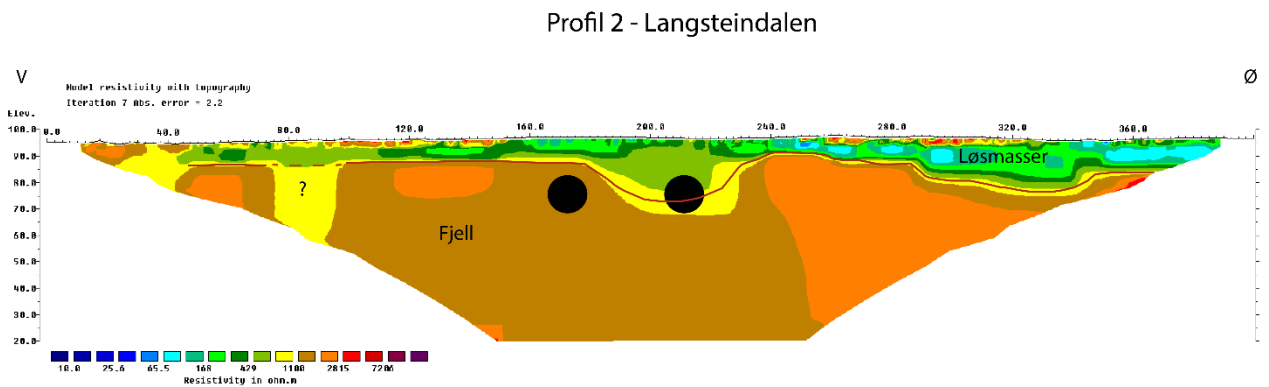
Trongggjelet



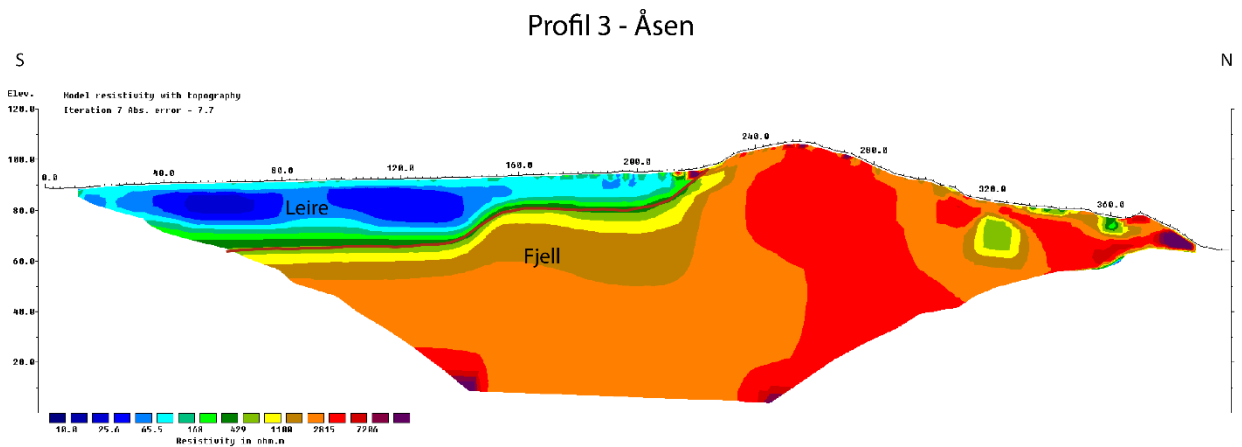
Figur 4-7: ERT profil over Trongggjelet. Væretunnelen er vist med stiptet rød linje.



Figur 4-8: ERT Profil 1 over Langsteindalen.

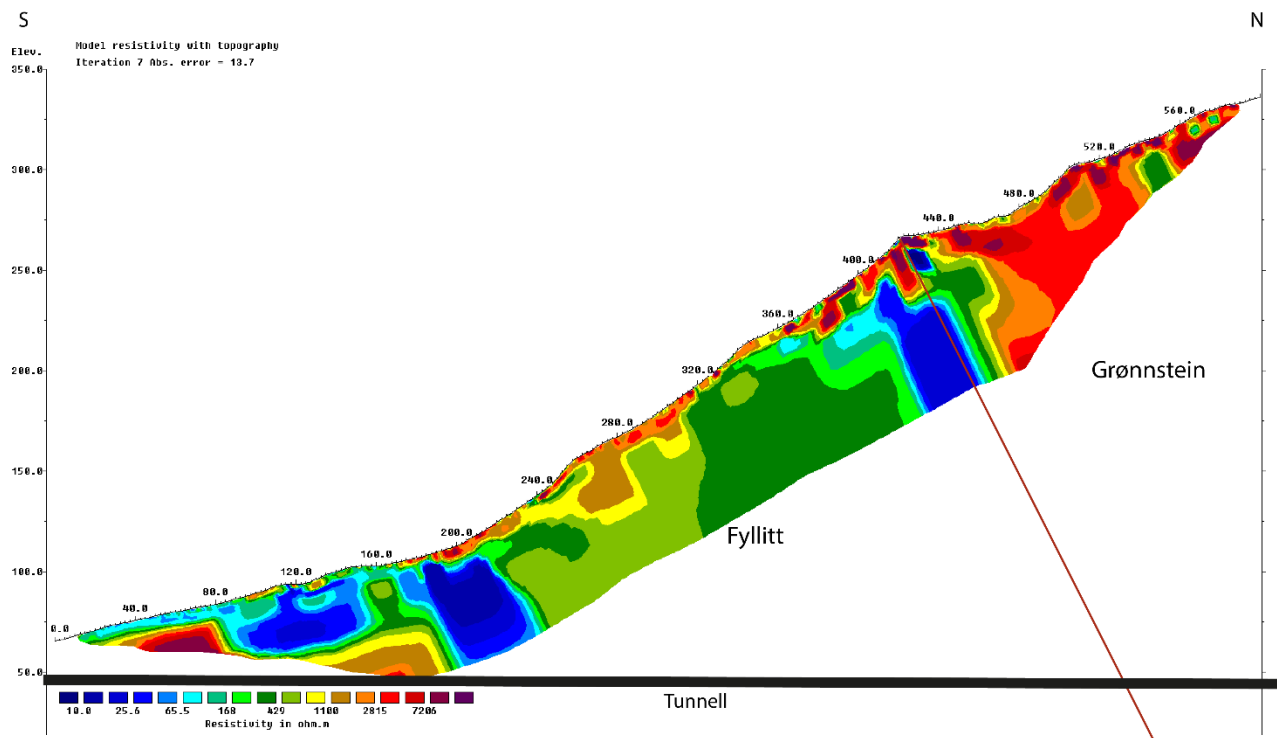


Figur 4-9: ERT Profil 2 langs Langsteindalen.



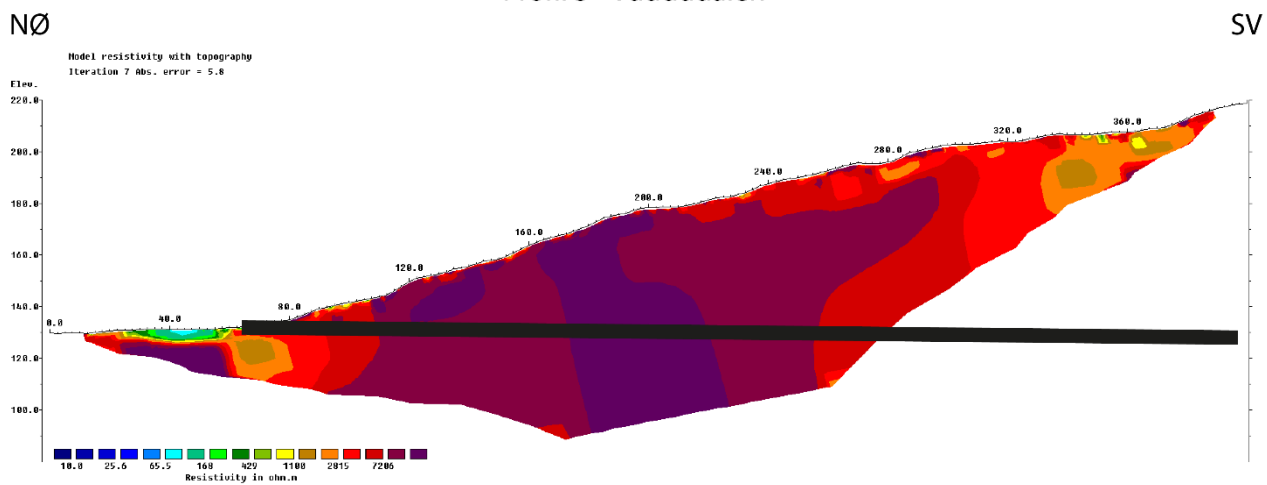
Figur 4-10: ERT Profil 3 ved Åsen.

Profil 4 - Kvithammar



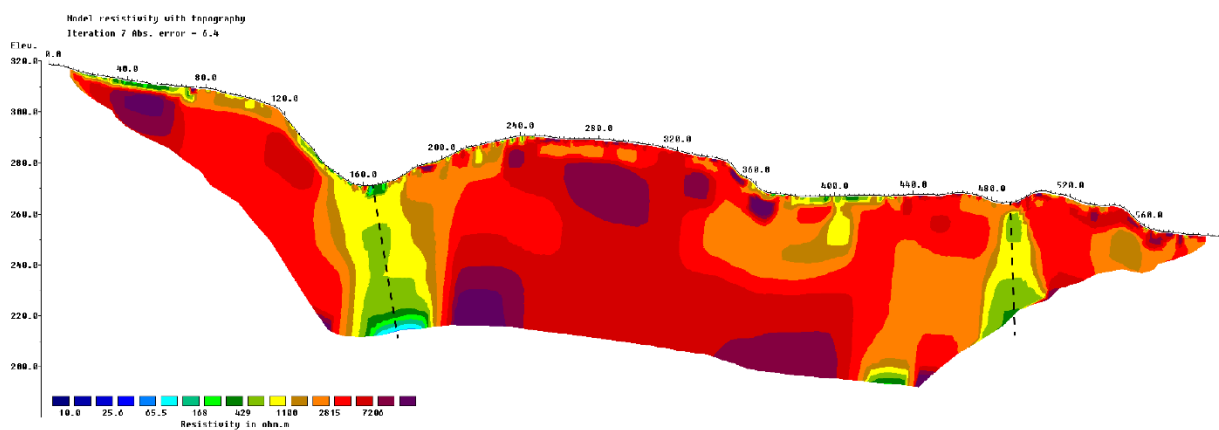
Figur 4-11: ERT Profil 4 ved Kvithammar.

Profil 5 - Vuddudalen



Figur 4-12: ERT Profil 5 i Vuddudalen.

Profil 6 - Tronggjelet



Figur 4-13: ERT Profil 6 over Tronggjelet og Væretunnelen.

Koordinater for ERT profilene.

Tabell 4.2: Koordinater Profil 1 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	596453	7048288
200	596547	7048455
400	596619	7048600
600	596717	7048760
800	596807	7048937

Tabell 4.3: Koordinater Profil 2 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	596451	7048560
100	596547	7048586
200	596643	7048613
300	596738	7048639
400	596832	7048669

Tabell 4.4: Koordinater Profil 3 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	602839	7055751
100	602846	7055849
200	602856	7055948
300	602878	7056039
400	602889	7056126

Tabell 4.5: Koordinater Profil 4 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	593932	7043215
100	593968	7043302
200	594009	7043384
300	594044	7043448
400	594062	7043514
500	594104	7043590
600	594141	7043671

Tabell 4.6: Koordinater Profil 5 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	597490	7050188
100	597441	7050106
200	597392	7050035
300	597336	7049966
400	597280	7049882

Table 4.7: Koordinater Profil 6 (ETRS89 – UTM32).

STASJON	X	Y
0	579717	7033246
100	579694	7033340
200	579687	7033432
300	579670	7033523
400	579628	7033600
500	579597	7033694
600	579577	7033785

5. MINERALSK SAMMENSETNING AV NOEN FORVITRINGSSONER I TRØNDELAG

Håkon Rueslåtten, Jasmin Schönenberger, Odleiv Olesen og Trond Slagstad

Sammendrag

'Nye veier' vurderer alternative traséer for E6 på strekningen Ranheim til Åsen, og dette inkluderer også valg av tunnel-traséer. I den forbindelse er fire soner med dyp forvitring og dannelse av leire i nærheten av tunnel-traséene undersøkt nærmere. De fire sonene som er undersøkt og prøvetatt er i Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik, og Geilhaugen (Skatval). I tillegg er kjernene fra to borer inn mot planlagt tunnel-trasé ved Drogset i Langsteindalen, undersøkt. Undersøkelsene er kombinert med geofysiske målinger over antatte svakhetssoner. Prøvene av 'friske bergarter' fra de fire lokalitetene viser store variasjoner i mineralsammensetning, og det gjør også prøvene av sleppemateriale. Alle prøvene av sleppemateriale inneholder svelleleire (smektitt), men relativt små mengder. Det er foretatt svelletryksmålinger av fraksjonene <20 mikrometer for prøvene, (med unntak av Langsteindalen, som hadde for lite finstoff). Som forventet viste prøvene lave svelletrykk; fra 0,03 til 0,04 MPa. Prøver med svelletrykk <0,1 MPa klassifiseres som «Leirer med lavt svelletrykk».

Prøvenes innhold av tungmetaller og svovel ble også undersøkt. Mengden tungmetaller var opptil 800 mg/kg, og i de friske bergartene synes tungmetallene å være assosiert med svovel (kis-mineraler). I sleppesonene var innholdet av svovel mye lavere enn i 'friske' bergarter. Dette kan forklares ved at sulfidene her er oksidert og utvasket som vannløselige sulfater, mens tungmetallene er anriktet som oksider og hydroksider.

Kjerneprøvene fra Borehull-A og -B ved Drogset i Langsteindalen er beskrevet litologisk. Kjernene fra Borehull-A viste ingen betydelige sleppesoner med leiromvandling, mens det i kjernene fra Borehull-B ble påvist tre betydelige sleppesoner. Sleppemateriale fra de to største sonene ble prøvetatt og analysert mht. svelleleire. Begge inneholdt små mengder svelleleire (4-5 vekt-% smektitt). Basert på svelletryksmålinger av sleppeleirer prøvetatt i tilsvarende soner i dagsonen, antas det at det påviste smektitt-innholdet kun vil gi lave svelletrykk (<0,1 MPa). Prøvene fra borekjernene var for små for måling av svelletrykk.

5.1 Prøvelokaliteter

Gjentatt abrasjon av isbreer i kvartærtiden har fjernet det meste av forvitringmateriale fra overflaten av grunnfjellet. Dette er illustrert i Figur 5-1 som viser overflaten av grunnstein i Stjørdal (koordinater 63.4735°N, 10.8932°Ø), med tydelige skuringsstriper og plastisk skulpturerte former (dannet av vann under stort trykk). Før-kvartære dype forvitringssoner finner vi derfor hovedsakelig i sprekker og forkastninger, slik vi ser i de fire prøvelokalitetene. Bilder av disse er vist i Figur 5-2 til Figur 5-5.



Figur 5-1: Breskuring av grønnstein i Stjørdal (koordinater 63.4735, 10.8932). Forvitret overflate er fjernet ved den glasiiale abrasjonen, men ikke dyp forvitring i sprekker og forkastninger.



Figur 5-2: Muruvik steinbrudd – prøvested for leirsleppe og 'friskt berg'.



Figur 5-3: Vuddudalen – prøvested for leirsleppe og 'friskt berg'.



Figur 5-4: Langsteindalen – prøvested for leirsleppe og 'friskt berg'.



Figur 5-5: Geilhaugen steinbrudd (venstre bilde) med markert forkastningssone ovenfor personen i bildet. Sleppesonen er vist i nærbilde til høyre.

5.2 Behandling og analyse av prøvene

Prøve-ID, prøve-nr., prøvested, og koordinater (EUREF89 (WGS 84)) for de innsamlete prøvene er vist i Tabell 5-1. I hver lokalitet ble det tatt prøver av sleppe-materialet og prøve av 'frisk' bergart som var i kontakt med sleppen.

Tabell 5-1: Prøve-ID, prøve-nr., prøvested og koordinater (EUREF89 (WGS 84)) for de innsamlete prøvene

NGU prøvenr.	Prøve ID	Sone+N/S	Øst (m)	Nord (m)	Prøvested og prøve:
198451	VUD-A	32	598946	7051425	Vuddudalen: leirsleppe
198452	VUD-B	32	598946	7051425	Vuddudalen: frisk bergart
198453	LAN-A	32	597900	7049100	Langsteindalen: leirsleppe
198454	LAN-B	32	597900	7049100	Langsteindalen: frisk bergart
198455	MUR-A	32	591476	7034755	Muruvik: leirsleppe
198456	MUR-B	32	591476	7034755	Muruvik: frisk bergart
198457	GEIL-A	32	593488	7043573	Geilhaugen: leirsleppe
198458	GEIL-B	32	593488	7043573	Geilhaugen: frisk bergart

5.2.1 Fraksjonering av prøvene

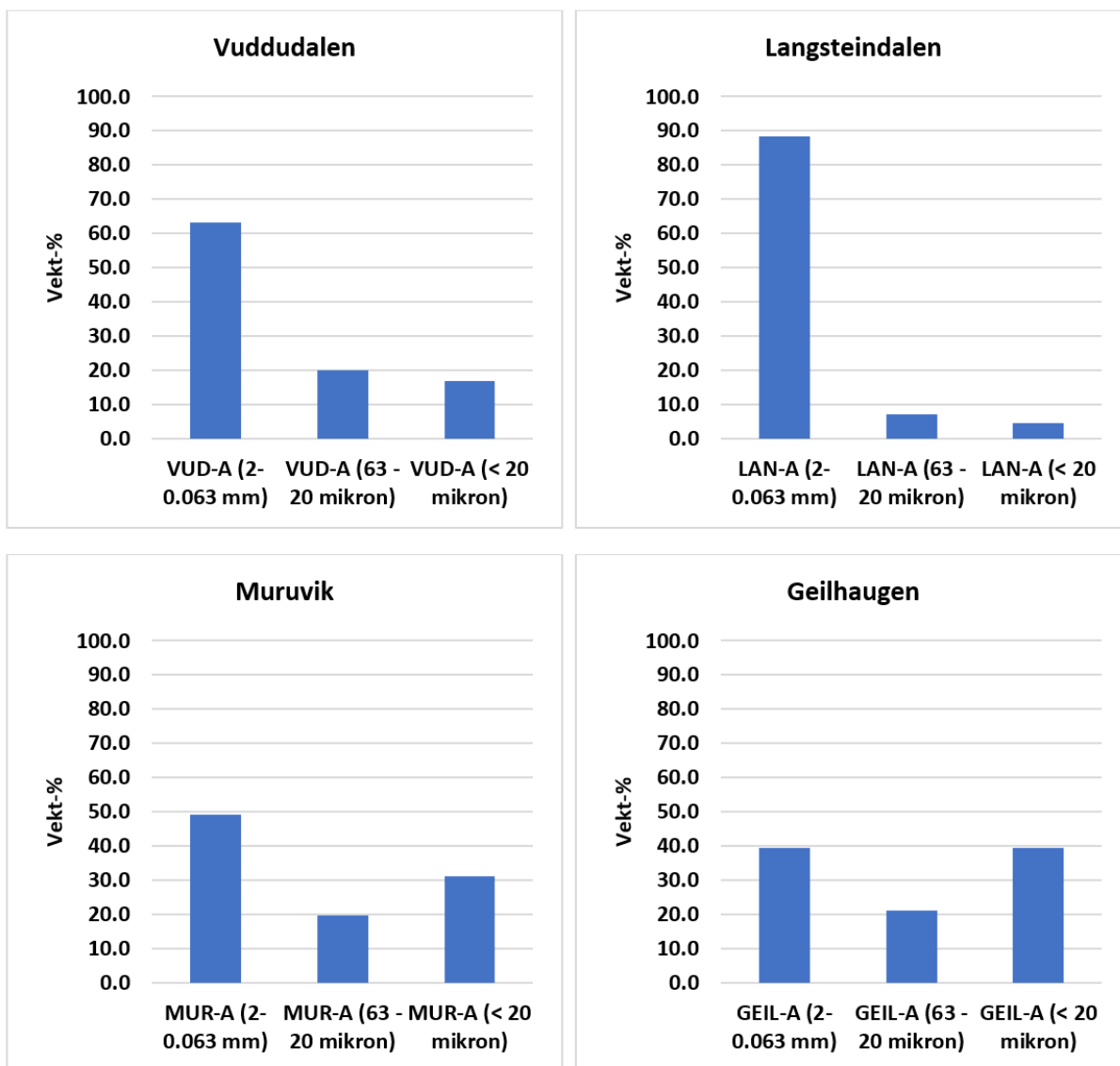
Sleppeprøvene ble splittet i to deler, og en del ble tørket, veid, og siktet gjennom en 2 mm sikt. Materialet <2 mm blir referert til som «bulk» materiale, og dette materialet ble mikronisert, preparert, og analysert på XRD (for mineral-bestemmelse) og på XRF (for kjemisk analyse). Den andre delen av sleppeprøven ble våtsiktet gjennom 2 mm og 63 mikrometer sifter, og fra fraksjonen <63 mikrometer ble fraksjonen <20 mikrometer separert ut i sedimentasjonssylinder. Denne fraksjonen (<20 mikrometer) ble analysert på XRD, og deretter sendt til Sintef for måling av svelletrykk, siden XRD analysene viste at alle inneholdt svelleleire (smektitt og kloritt/smektitt blandsjikt).

Svelletrykkmålingen krever 20 g av fraksjonen <20 mikrometer, og prøven fra Langsteindalen oppfylte ikke dette kravet, og ble derfor ikke målt. Den har også minst innhold av svelleleire.

Mengden finstoff (<20 mikrometer) i sleppeprøvene gir ofte et hint om hvor mye de sveller, og dette ble derfor målt, og resultatet er vist i de fire diagrammene i Figur 5-6.

Prøvene fra Geilhaugen og Muruvik hadde høyest innhold av finstoff (<20 mikrometer), og de ga høyest svelletrykk.

Prøvene av 'friske' bergarter ble knust og mikronisert før analyse på XRD og XRF for bestemmelse av mineralogisk og kjemisk sammensetning.



Figur 5-6: Kornstørrelsesfordeling (i vekt-%) av sleppeprøvene fra Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik, og Geilhaugen. Alle prøvene er siktet gjennom 2 mm sikt, og her vises vekt-fordelingen mellom fraksjonene 2mm-63 mikron (sand); 63mikron-20 mikron (grovsilt); og <20 mikron (mellomsilt + finsilt + leirfraksjon). Fraksjonene <20 mikron er brukt til måling av svelletrykk (unntatt den fra Langsteindalen, pga. for lite materiale).

5.2.2 Mineral-bestemmelser på XRD

Prøvenes mineralsammensetning fra XRD analysene er bestemt ved bruk av 'Rietveld'-metoden. Usikkerheten ved denne metoden er 1-2 vekt-% for hovedmineralene, og <1 vekt-% for de øvrige mineralene. For prøver som inneholder dårligere krystalliserte leirmineraler, er det utført manuell tolkning av røntgen-diffraktogrammene, 'kalibrert' med de kjemiske analysene.

Resultatet av XRD-analysene for 'bulk'-prøvene er gitt i Tabell 5-2 ('friske bergarter') og Tabell 5-3 (leirslepper 'bulk'). I Tabell 5-3 er gitt mineralsammensetningene for finfraksjonen av leirsleppeprøvene (<20 mikrometer).

Som vi ser av tabellene er det store forskjeller i mineralogi for de 'friske' bergartene; f.eks. inneholder alle prøvene karbonater, hovedsakelig kalsitt, men det varierer fra 5 til 30 vekt-%. Også de forvitrede prøvene er forskjellige, og prøvene fra Langsteindalen skiller seg særlig ut, siden de ikke har kvarts, lite glimmer, og mye plagioklas og kloritt.

Prøvene fra Vuddudalen er spesielle idet den 'friske' prøven har 30% karbonat, mens sleppesonen ikke har karbonater. Den er dominert av glimmer og kloritt (Tabell 5-2 og Tabell 5-3). Om dette skyldes at kalsitten i sleppesonen har blitt oppløst, eller om det ikke har vært noen kalsitt der i utgangspunktet, er vanskelig å vurdere.

Alle finfraksjonene (<20 mikrometer) inneholder svellende leirmineraler, men prøven fra Langsteindalen har ikke ren smektitt, men et kloritt/smektitt blandsjiktmineral med begrenset svelleevne. Leirmineralene i denne sleppesonen (LAN-B) er dominert av tre forskjellige blandsjiktmineraler, hvorav kloritt/smektitt er det ene. De andre to er de ikke-svellende blandsjiktmineralene illitt/kloritt og illitt/vermikulitt. De øvrige tre sleppeprøvene (Vuddudalen, Muruvik, og Geilhaugen) har fra 6 til 13 % smektitt (Tabell 5-4).

Tabell 5-2: XRD analyser av 'friske' bergarter (vekt-%) nær tunnel-traséene, fra Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik, og Geilhaugen

Prøvenr.	Prøve#	Kvarts	Plagioklas	Glimmer	Kloritt	Karbonat	Amfibol	Pyritt	Rutil	Annet
198452	VUD-B	33	12	15	9	30			1	
198454	LAN-B	0	42	7	17	21	10		spor	3Px
198456	MUR-B	26	24	34	10	5		1		
198458	GEIL-B	28	14	22	11	25		spor		Sp.Kfsp

Forkortelser: Karbonat= kalsitt, dolomitt, aragonitt; Kfsp= kalifeltspat; Px= pyroksen; Sp=spor.

Tabell 5-3: XRD analyser av leirslepper <2 mm (vekt-%) nær tunnel-traséene, fra Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik, og Geilhaugen.

Prøve nr.	Prøve# <2mm	Kvarts	Plag.	Glimmer + Illitt	Kloritt	Smektitt + ML	Karb.	Amf.	Rutil	Pyritt	Pyro-fyllitt
198451	VUD-A	17	7	42	29	3			2		
198453	LAN-A	spor	26	spor	23	18ML	14	12	2	3	2
198455	MUR-A	20	27	36	15	spor	1			1	
198457	GEIL-A	17	8	32	16	spor	25		2	1	

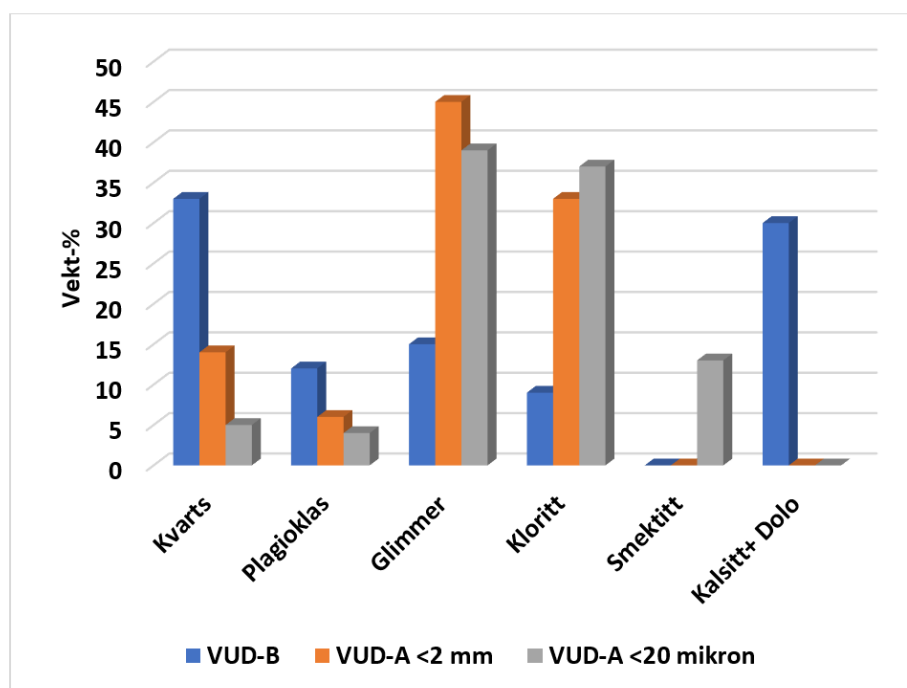
Forkortelser: ML= blandsjiktmineralene smektitt/kloritt + illitt/kloritt + illitt/vermikulitt; Karb= kalsitt, dolomitt, aragonitt; Pyf= pyrofyllitt; Plag.= plagioklas; Kfsp= kalifeltspat; Sp=spor.

Tabell 5-4: XRD analyser av fraksjonene <20 mikron. Smektitt er det viktigste mineralet for økt svelletrykk. Blandsjikt-mineralene i LAN-A: 19ML= 7% Kloritt/Smektitt + 5% Illitt/Vermikulitt + 7% Illitt/Kloritt (tolket manuelt).

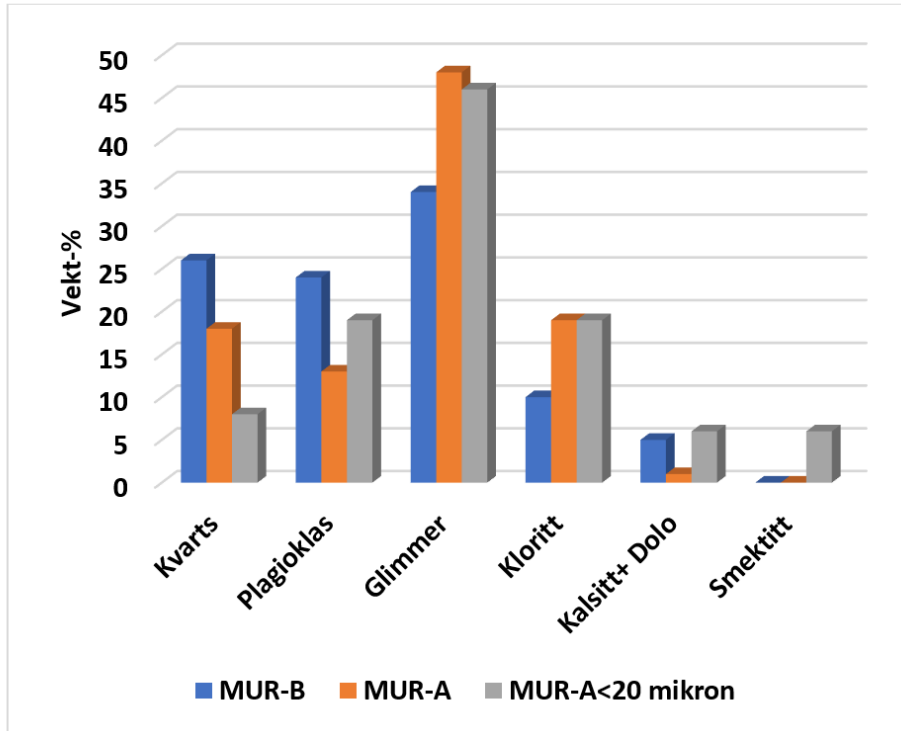
Prøve nr.	Prøve #	Kvarts	Plag.	Illitt	Kloritt	Smektitt+ ML	Brookit+ Rutil	Karbonat	Amf.	Annet
19845 1	VUD-A	5	4	39	37	13	2			
19845 3	LAN-A	spor	18	1	47	19 ML	-	2	8	2Pyf+3Cr
19845 5	MUR-A	8	19	46	19	6	3			
19845 7	GEIL-A	8	3	25	14	7	1	40		1Kfsp

Forkortelser: Kfsp= kalifeltspat; Plag= plagioklas; Amf= amfibol; Pyf= pyrofyllitt; Cr= cristobalitt.

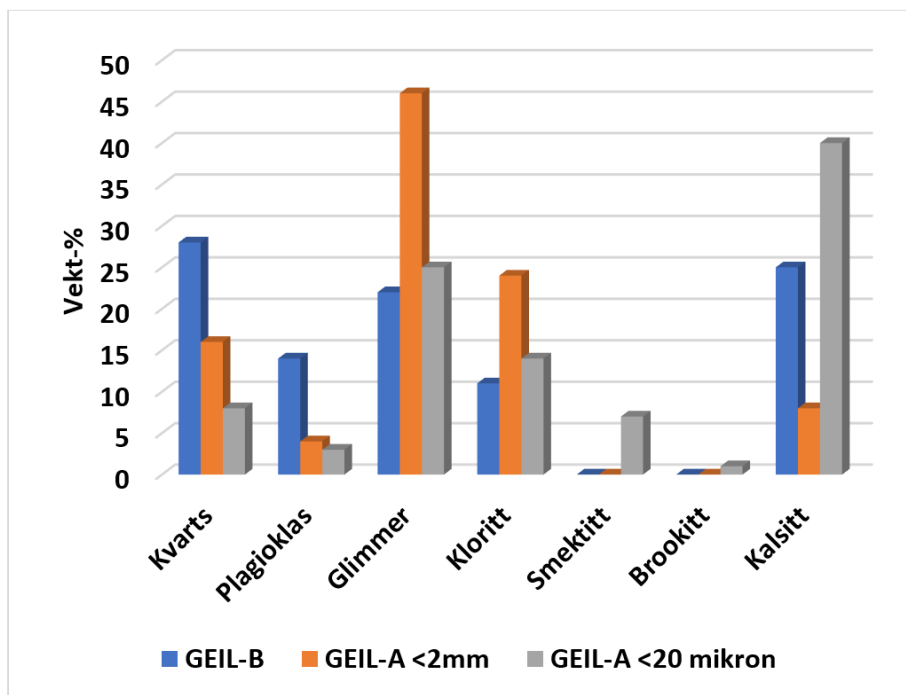
For å få en bedre oversikt over variasjonene mellom forvitrete og 'friske' bergarter, og for å se utviklingen i finfraksjonene (<20 mikrometer), er alle prøvene illustrert som 'stolpe-diagrammer' i Figur 5-7-5.10Figur 5-12.



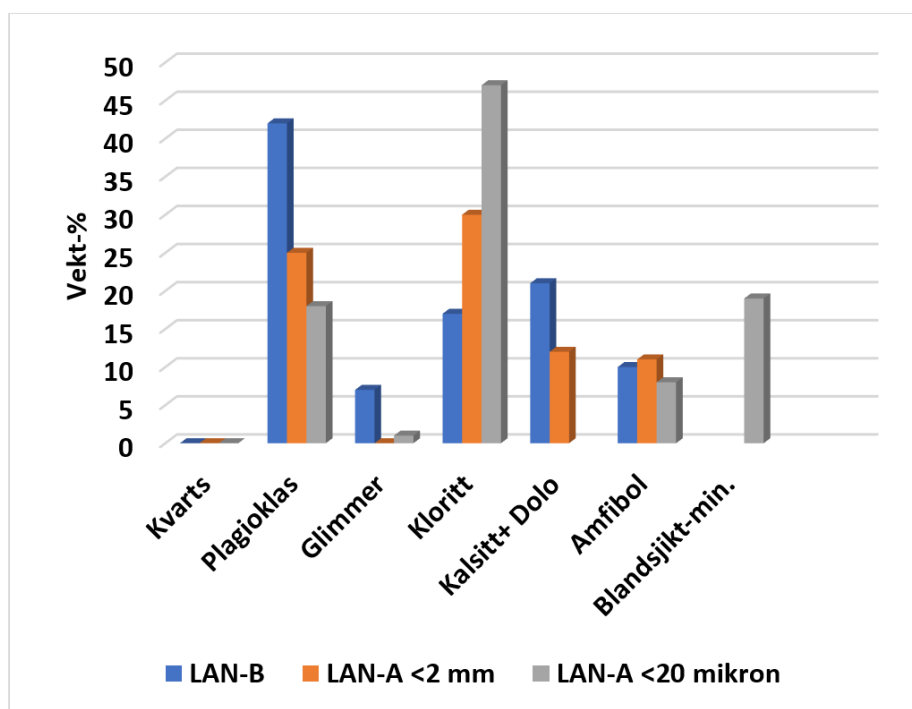
Figur 5-7: Mineral-sammensetningen i friske og forvitrete prøver fra Vuddudalen, illustrert som 'stolpe-diagram'. Den 'friske' prøven (VUD-B) er svært forskjellig fra sleppesonen, med all kalsitten, kvarts, og lite glimmer og kloritt. Dette tyder på at VUD-B ikke er kilden til VUD-A, men at VUD-A opprinnelig var en mere glimmer- og kloritt-rik sone.



Figur 5-8: Mineral-sammensetningen i friske og forvitrete prøver fra Muruvik, illustrert som 'stolpe-diagram'. Her er sleppesonen mer lik den 'friske' bergarten enn foregående prøve, men sleppesonen ('bulk') har også her mere glimmer og kloritt enn den 'friske' bergarten.



Figur 5-9: Mineral-sammensetningen i friske og forvitrete prøver fra Geilhaugen, illustrert som 'stolpe-diagram'. Den 'friske' prøven (GEIL-B) er svært forskjellig fra sleppesonen, med sitt høye innhold av kvarts, plagioklas, og kalsitt. Sleppesonen har også her, mere glimmer og kloritt.



Figur 5-10: Mineral-sammensetningen i friske og forvitrete prøver fra Langsteindalen illustrert som 'stolpe-diagram'. Den 'friske' prøven (LAN-B) er forskjellig fra sleppesonen med sitt høye innhold av plagioklas og kalsitt, mens sleppesonen har mere kloritt. Leirmineralene (blandsjiktmineralene) er sekundær-dannelser i sleppesonen..

5.2.3 Svelletrykksmålinger

Finfraksjonene (<20 mikrometer) fra prøvene Vuddudalen, Muruvik og Geilhaugen ble sendt til Sintef for måling av svelletrykk. Her ble prøvene tørket ved 105 grader C, og deretter pakket i stålsylindere og konsolidert med 10 MPa trykk. Selve målingen foregår ved at stempelet låses, og prøvene kan suge opp vann, mens svelletrykket måles. Resultatet av målingene er at prøven fra Vuddudalen gir et svelletrykk på 0,04 MPa, mens de to andre prøvene begge gir et svelletrykk på 0,03 MPa.

Målingene kommer i klassen 'Lave svelletrykk', som går opp til 0,1 MPa. Prøvene viser altså svært lave svelletrykk.

5.3 Kjemiske analyser

De kjemiske analysene utført med XRF, omfatter både hovedelementer og noen viktige sporelementer. Resultatene er gitt i Tabell 5-5 og Tabell 5-6.

Tabell 5-5: Kjemiske analyser (XRF) av de geologiske hovedelementene samt glødetap (i vekt-%).

Prøve #	Prøve ID	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Glødetap	Sum
VUD-A	198451	48,1	20,6	9,17	1,19	7,02	0,727	0,81	4,01	0,033	0,200	6,93	98,7
VUD-B	198452	46,4	9,03	3,83	0,500	3,00	17,4	1,24	1,51	0,084	0,093	16,1	99,2
LAN-A	198453	40,4	13,3	12,8	2,44	4,72	12,4	3,55	0,582	0,155	0,283	8,31	98,9
LAN-B	198454	37,9	12,5	11,3	2,37	4,68	15,2	3,67	0,717	0,160	0,249	10,2	98,9
MUR-A	198455	57,1	19,8	6,02	0,849	2,80	1,33	2,89	3,78	0,087	0,197	3,88	98,7
MUR-B	198456	56,9	17,7	5,56	0,710	2,61	3,54	2,58	3,40	0,065	0,178	5,45	98,7
GEIL-A	198457	38,9	13,8	7,55	0,792	4,23	13,9	0,81	2,53	0,041	0,137	16,2	98,9
GEIL-B	198458	45,7	11,7	5,42	0,520	3,72	14,4	1,44	1,90	0,078	0,112	14,1	99,2

Tabell 5-6: Kjemiske analyser (XRF) av noen viktige sporelementer (i mg/kg).

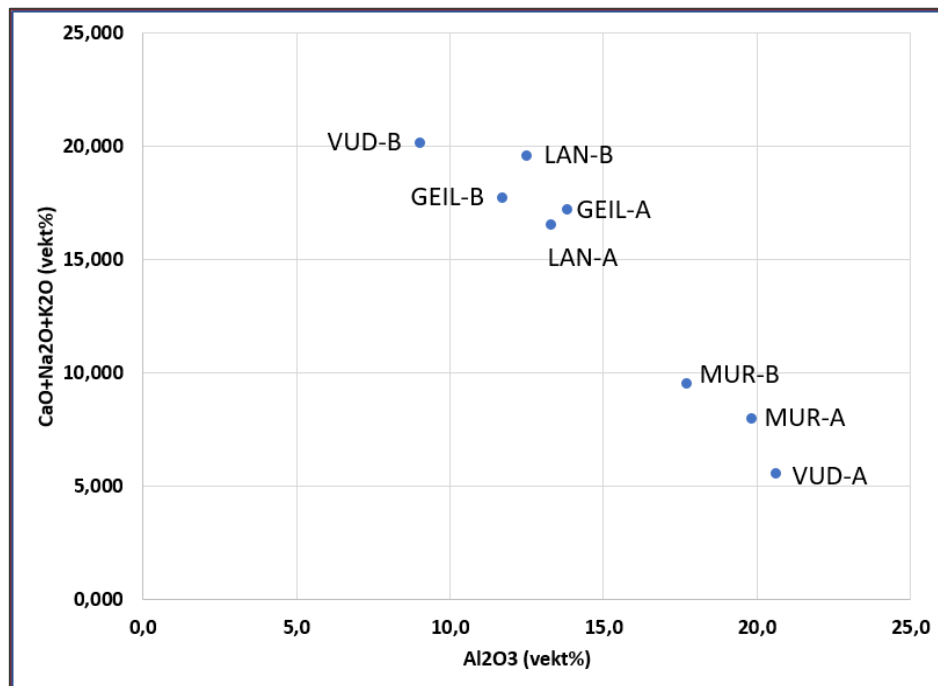
Prøve #	Prøve ID	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	V	Zn	Zr	S
VUD-A	198451	626	35	239	64	168	56	<50	158	144	283	986
VUD-B	198452	242	<30	105	<50	56	<50	401	66	<50	123	2970
LAN-A	198453	<100	54	168	114	71	<50	277	367	100	162	526
LAN-B	198454	<100	43	157	96	53	<50	230	358	87	158	2760
MUR-A	198455	750	<30	92	<50	61	<50	241	109	116	248	1630
MUR-B	198456	526	<30	87	<50	<50	<50	271	96	67	220	4930
GEIL-A	198457	363	34	153	127	195	<50	300	104	117	176	1410
GEIL-B	198458	316	<30	122	<50	82	<50	457	78	73	123	3850

Sammensetningen av hovedelementene matcher mineral-analysene som er diskutert ovenfor. Også de kjemiske analysene gir informasjon om graden av kjemisk forvitring i sleppesonene, og de gir indikasjoner på hvor dypt de går.

5.3.1 Graden av kjemisk forvitring vurdert fra hovedelementene

I forvitringssoner vil basekationene Ca, Na, og K vaskes ut, mens Al blir igjen (i leirmineraler). En slik trend sees også her; Figur 5-11. Størst forskjell ser vi på prøvene fra Vuddudalen, med utvasking av basekationer i sleppesonen, og dannelse av smektit. Men som nevnt ovenfor, er det generelle inntrykket at de 'friske' bergartsprøvene (B-prøver) er ganske forskjellig fra sleppematerialet (A-prøver), og derfor ikke alltid er kilden til A-prøvene. Dette gjør det vanskelig å tolke forskjellen i kjemisk sammensetning mellom de to

prøvematerialene. Uansett viser de en klar trend i Figur 5-11, med økende innhold av aluminium ved avtagende innhold av basekationer.



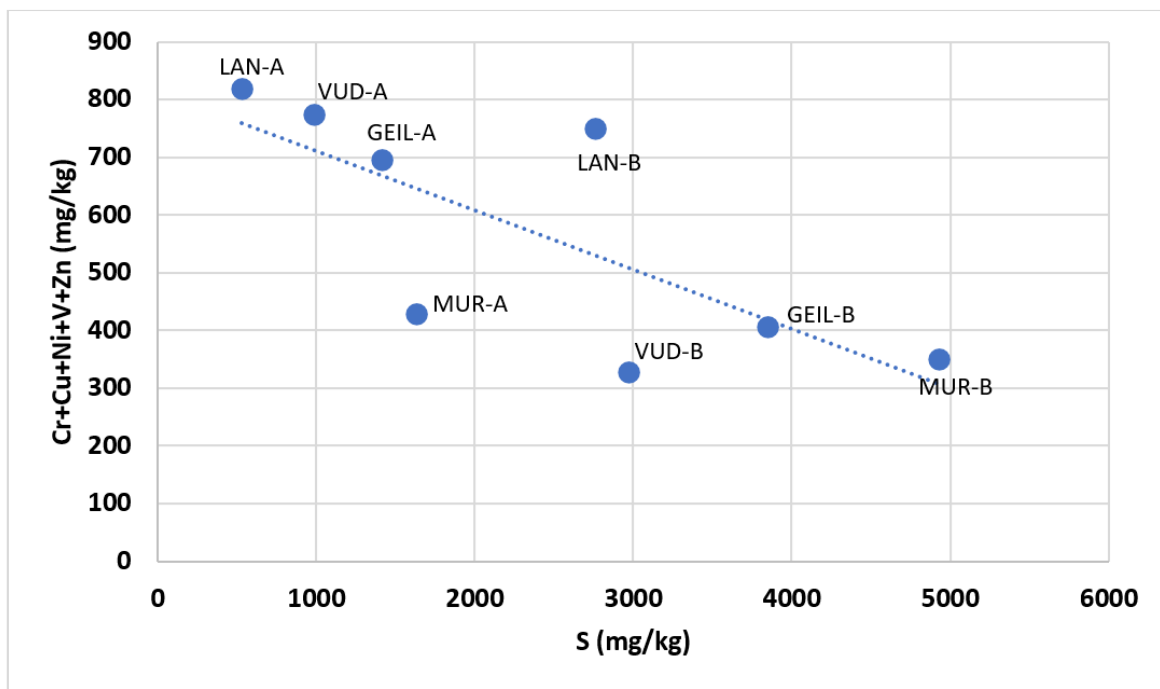
Figur 5-11: Mengde basekationer versus Al_2O_3 viser en trend med at de 'friske' bergartene har høyere innhold av basekationer enn sleppesonene. Størst forskjell ser vi på prøvene fra Vuddu, (VUD-B versus VUD-A) hvor det også er mest smektitt i sleppesonen.

5.3.2 Tungmetaller og sulfider

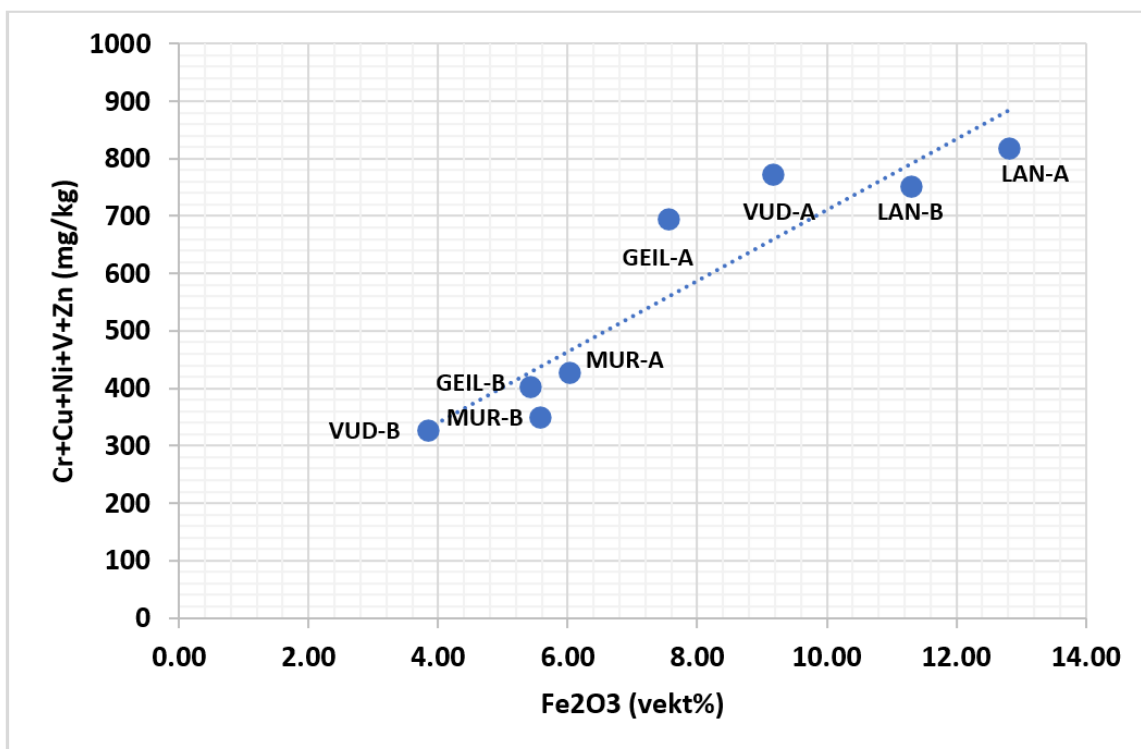
Summen av noen viktige tungmetaller i Tabell 5-6 (Cr, Cu, Ni, V, og Zn) er plottet mot svovelinnholdet i prøvene; dette for å vurdere om tungmetallene er bundet til reaktive kis-mineraler i bergartene, og om de er anriket i sleppesonene; Figur 5-12. Vi finner pyritt i uforvitret berg, og mye av tungmetallene i sleppesonene stammer nok fra sulfider. Sulfider er reaktive i kontakt med oksidert vann, og kan føre til avrenning av svovelsure løsninger med tungmetaller, under og etter tunneldrivingen.

Figur 5-12 viser en klar trend, med høyere svovelinnhold i de 'friske' bergartene, mens sleppesonene er anriket på tungmetaller (opptil ca. 800 mg/kg i LAN-A) sammenlignet med de 'friske' bergartene. Dette tyder på en prosess med oksidasjon av sulfider i sleppesonene, og utvasking av svovelsure løsninger, samtidig som tungmetallene anrikes i sleppene. Her har tungmetallene trolig blitt utfelt sammen med jern, som metall-oksihydroksider.

En bekreftelse på denne prosessen er gitt i Figur 5-13, der tungmetallene er plottet mot jern. Her ser en at tungmetallene følger jern, både i 'friske' og forvitrete prøver, men alle prøvene har relativt mer jern i de friske bergartene enn i sleppesonene.



Figur 5-12: Summen av tungmetallene Cr, Cu, Ni, V, og Zn plottet mot svovelinnholdet i prøvene. En klar trend ses, med høyere svovelinnhold i de 'friske' bergartene. Sleppesonene er anriket på tungmetaller (opptil 800 mg/kg).



Figur 5-13: Summen av tungmetallene Cr, Cu, Ni, V, og Zn plottet mot jerninnholdet i prøvene. En klar trend ses, med høyere jerninnhold i prøvene med mye tungmetaller, og særlig i sleppesonene.






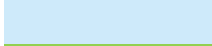



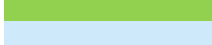












5.4 Analyser av kjernene fra Borehull-A og -B i Langsteindalen

'Nye veier' har fått boret opp to profiler inn mot den planlagte tunneltraséen ved Drogset, Langsteindalen; Borehull-A og -B. Borekjernene ble sendt til NGU for kjernebeskrivelse og analyse av utvalgte prøver. Kjernebeskrivelsen er gjengitt nedenfor.

5.4.1 Kjernebeskrivelse for Borehull-A, Drogset, Langsteindalen

Kjerneprøvene fra Borehull-A er karakterisert ved relativt ensartet grønnstein. Generelle kornstørrelser er markert med farger: Mørk grønn er medium-kornet og lysere grønn er finkornet grønnstein. Noe breksjering og knusningssoner er observert; merket med grå-grønn farge. De største knusningssonene (>1 m) er funnet i nivåene 19,2 - 24,4 m, 29,9 – 31 m, og 223 – 226 m. Ingen betydelige sleppesoner med leiromvandling er påvist.

Kjernebeskrivelse for Borehull-A:

Fra	Til	Enheter klassifisert med farger	
0	1,7	Lite eller ingen kjerne	
1,7	7,5	Mediumkornet grønnstein, endel kvarts-epidotårer, omvandling langs årer	
7,5	8,6	Finkornet, mørk grønnstein, lokalt endel kvarts-epidotårer	
8,6	9,1	Mediumkornet grønnstein, lokalt plagioklasfyrisk	
9,1	16,5	Mediumkornet grønnstein, lokalt plagioklasfyrisk, lokalt hornblendefyrisk	
16,5	19,2	Finkornet, mørk grønnstein, spredte kvarts-epidotårer	
19,2	24,4	Finkornet, heterogen, noe breksjert grønnstein	
24,4	29,9	Finkornet, heterogen, grønnstein, en del kvarts-epidotårer	
29,9	31	Finkornet, heterogen, noe breksjert grønnstein	
31	35,1	Finkornet, mørk grønnstein, lokalt endel kvarts-epidotårer, lokalt plagioklasfyrisk	
35,1	35,7	Finkornet, heterogen, noe breksjert grønnstein	
35,7	36,2	Finkornet, plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt	
36,2	37,9	Finkornet, relativt homogen grønnstein	
37,9	43,3	Mediumkornet, heterogen grønnstein, lokalt endel kvarts-epidotårer	
43,3	53,2	Mediumkornet, relativt lys og homogen grønnstein, spredte kvarts-epidotårer	
53,2	54,7	Mediumkornet, relativt lys og homogen grønnstein med 5-10 mm delvis prismatiske plagioklasfenokryster	
54,7	56,7	Mediumkornet, relativt lys og homogen grønnstein lokalt med 5-10 mm delvis prismatiske plagioklasfenokryster	
56,7	69,9	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein, lokalt mye kvarts-epidotårer, lokalt plagioklasfyrisk	
69,9	75,4	Mediumkornet, relativt lys grønnstein, lokalt med omvandlingsårer, lokalt med 5-10 mm delvis prismatiske plagioklasfenokryster	
75,4	86	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein, lokalt mye kvarts-epidotårer, lokalt plagioklasfyrisk	
86	87	Finkornet, relativt lys grønnstein med 1-5 mm hornblendefenokrystaller	
87	92,2	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein, lokalt mye kvarts-epidotårer	
92,2	94,8	Mediumkornet, relativt lys og homogen grønnstein, spredte kvarts-epidotårer	

94,8	100,8	Fin- til middelskornet, relativt mørk, heterogen grønnstein, lokalt med kvarts-epidotårer
100,8	104,4	Finkornet, relativt lys grønnstein med 1-5 mm hornblendefenokrystaller
104,4	109,6	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein, lokalt mye kvarts-epidotårer
109,6	117,1	Finkornet, mørk, relativt homogen grønnstein med spredte kvarts-epidotårer
117,1	123,3	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein med spredte kvarts-epidotårer
123,3	127,1	Finkornet, mørk, homogen grønnstein
127,1	130	Finkornet, mørk, grønnstein, noe heterogen med spredte kvarts-epidotårer
130	132,9	Finkornet, relativt lys grønnstein, heterogen med spredte kvarts-epidotårer
132,9	134	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
134	140	Finkornet, mørk, grønnstein, noe heterogen med spredte kvarts-epidotårer
140	143,4	Finkornet, relativt lys grønnstein, heterogen med spredte kvarts-epidotårer, lokalt plagioklasfyrisk
143,4	158	Finkornet, mørk, grønnstein, noe heterogen med spredte kvarts-epidotårer
158	162,5	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
162,5	176,2	Mediumkornet, heterogen grønnstein, en del kvarts-epidotårer
176,2	177,8	Mediumkornet, relativt lys grønnstein, lokalt med omvandlingsårer, 5-10 mm delvis prismatiske plagioklasfenokryster, 1-3 mm hornblendefenokryster
177,8	182,4	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
182,4	182,7	Oppknuet, finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
182,7	185,1	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
185,1	194,6	Finkornet, relativt lys grønnstein, heterogen med en del kvarts-epidotårer og en stor langsgående kvartsåre
194,6	203,4	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen med spredte kvarts-epidotårer
203,4	213,5	Finkornet, mørk, heterogen grønnstein, lokalt mye kvarts-epidotårer
213,5	223	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen med spredte kvarts-epidotårer
223	226	Sterkt oppsprukket, finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen med spredte kvarts-epidotårer
226	228	Mediumkornet med spredte kvarts-epidotårer
228	229,9	Finkornet, relativt lys grønnstein, heterogen med en del kvarts-epidotårer
229,9	233,8	Finkornet, mørk, relativt homogen grønnstein med spredte kvarts-epidotårer
233,8	235	Finkornet, relativt lys grønnstein, heterogen med en del kvarts-epidotårer
235	236,4	Finkornet, mørk grønnstein, relativt homogen
236,4	251,8	Mediumkornet, heterogen grønnstein, en del kvarts-epidotårer



5.4.2 Kjernebeskrivelse for Borehull-B, Drogset, Langsteindalen

Kjerneprøvene fra Borehull-B er også dominert av grønnstein. Breksjering og knusningssoner er observert, og det er identifisert tre markerte soner med sterk breksjering, forvitring og leiromvandling (Figur 5-14):

- A. Sonen 26 → 30 m dyp: Hovedsakelig breksjert grønnstein med leiromvandling. Litt sulfider langs enkelte sprekker (ingen kjerne 29 – 29.3 m).
- B. Sonen 72 → 84 m dyp: Hovedsakelig finkornet grønnstein, sterkt breksjert, med mye leiromvandling.
- C. Sonen 85,5 → 109,8 m dyp: Finkornet grønnstein, sterkt breksjert, mye leiromvandling. Enkelte klaster er ganske rundet og kan opprinnelig ha vært et agglomerat.

Kjernebeskrivelse for Borehull-B:

0 – 21 m: Ingen kjerner.

21 – 21.8 m: Oppsprukket grønnstein, noen kvartsårer

21.8- 23.8 m: Finkornet felsisk bergart med 2–5 mm ekvidimensjonale kvartsfenokryster.

23.8 – 24.1 m: Finkornet, plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt

24.1 – 26 m: Oppsprukket grønnstein

26 – 29 m: Breksjert grønnstein med leiromvandling. Litt sulfider langs enkelte sprekker

29 – 29.3 m: Ingen kjerne

29.3 – 30 m: Delvis breksjert og leiromvandlet grønnstein

30 – 32.1 m: Fin-/middelskornet grønnstein med 3–8 mm plagioklasfenokrystaller, noe grynete tekstur. Noe oppsprukket

32.1 – 35 m: Fin-/middelskornet grønnstein, noe grynete tekstur. Noe oppsprukket

35 – 37.1 m: Fin-/middelskornet grønnstein. Oppsprukket

37.1 – 37.5 m: Middelskornet felsisk lag. Oppsprukket

37.5 – 40.5 m: Finkornet grønnstein. Variert oppsprukket

40.5 – 40.8 m: Middelskornet felsisk lag. Oppsprukket

40.8 – 42.7 m: Fin-/middelskornet grønnstein. Oppsprukket

42.7 – 43.5 m: Finkornet grønnstein med mange kvartsårer. Oppsprukket

43.5 – 45 m: Finkornet grønnstein med noen kvartsårer. Oppsprukket

45 – 54.2 m: Finkornet grønnstein med en del kvarts-epidotårer. Oppsprukket med sulfider langs en del av sprekkene

54.2 – 54.4 m: Finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Oppsprukket

54.4 – 54.7 m: Finkornet grønnstein. Oppsprukket

54.7 – 54.9 m: Mediumkornet felsisk lag. Oppsprukket.

54.9 – 55.2 m: Finkornet grønnstein. Oppsprukket

55.2 – 55.7 m: Finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Oppsprukket

55.7 – 56.2 m: Mediumkornet felsisk lag med mye pyritt. Noe oppsprukket. Prøve200022

56.2 – 59.2 m: Finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Noe oppsprukket

59.2 – 64.7 m: Finkornet grønnstein. Noe oppsprukket

64.7 – 70 m: Hovedsakelig finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt, med dm-tykke lag av finkornet grønnstein. Mulig gang-/putekompleks. Oppsprukket

70 – 71 m: Finkornet grønnstein

71 – 71.5 m: Finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Sterkt oppsprukket

71.5 – 72 m: Finkornet grønnstein. Sterkt oppsprukket

72 – 74.7 m: Fin-/middelskornet grønnstein, heterogen med mange tynne kvarts-epidotårer og noen tykkere kvartsårer, noen soner med breksjering og leiromvandling

74.7 – 79.5 m: Finkornet grønnstein, sterkt breksjert, mye leiromvandling

79.5 – 80 m: Ingen kjerne

80 – 84 m: Finkornet grønnstein, sterkt breksjert, mye leiromvandling. Enkelte klaster er ganske rundet og kan opprinnelig ha vært et agglomerat.

84 – 85.5 m: Fin-/middelskornet grønnstein, heterogen med mange tynne kvarts-epidotårer. Oppsprukket

85.5 – 109.8 m: Finkornet grønnstein, sterkt breksjert, mye leiromvandling. Enkelte klaster er ganske rundet og kan opprinnelig ha vært et agglomerat.

109.8 – 117.9 m: Finkornet grønnstein med noen kvartsårer, lokalt sterkt oppsprukket, men ikke tydelig breksjert

117.9 – 119.6 m: Finkornet, spredt plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Oppsprukket

119.6 – 119.8 m: Fin-/middelskornet grønnstein. Oppsprukket

119.8 – 120.7 m: Finkornet, spredt plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt. Oppsprukket

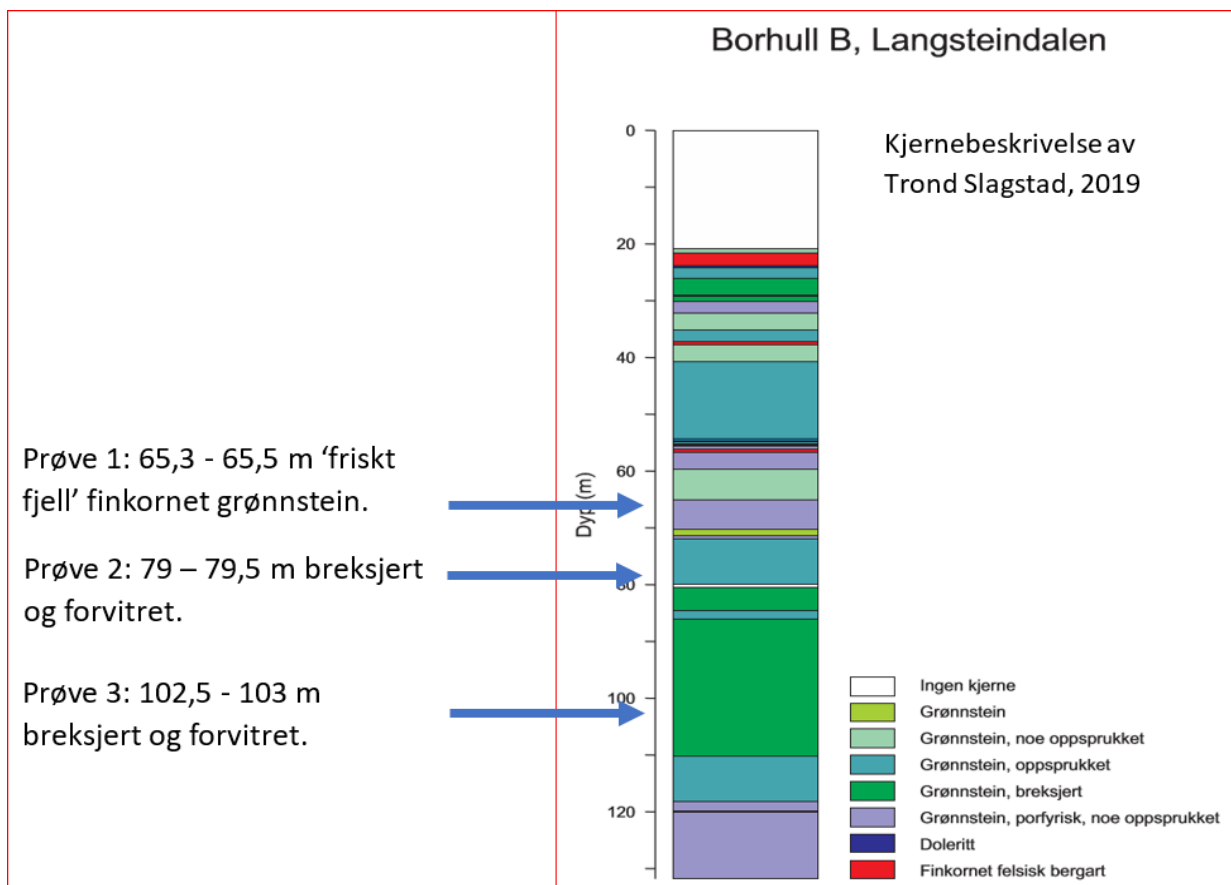
120.7 – 131.8 m: Fin-/middelskornet grønnstein, heterogen med mange tynne kvarts-epidotårer og noen tykkere kvartsårer. Noe oppsprukket.

5.4.3 Prøvetaking av kjernemateriale fra Borehull-B, Drogset

Det ble valgt ut prøver fra de to dypeste og mektigste sleppesonene for videre analyser; sonene 79 - 79,5 m dyp (Sone B) og 102,5 – 103 m dyp (Sone C).

I tillegg ble det tatt en referanseprøve fra antatt friskt fjell, på 65,3 - 65,5 m dyp, beskrevet som: «Hovedsakelig finkornet plagioklasfyrisk grønnstein, mulig doleritt, med dm-tykke lag av finkornet grønnstein. Mulig gang-/putekompleks. Oppsprukket».

Prøvepunktene er vist på kjernebeskrivelsen i Figur 5-14.



Figur 5-14: Illustrasjon av kjernebeskrivelsen fra Borehull-B, Drogset, og de tre prøvepunktene.

Bilder av kjerneboksene der prøvene ble tatt, er vist i Figur 5.15, 5.16 og 5.17.



Figur 5-15: Kjerneboksen der prøve av 'frisk' bergart ble tatt, ved 65,3 - 65,5 m dyp



Figur 5-16: Kjerneboksen der prøve av forvitret prøve ble tatt på 79-79,5 m dyp (Sone B). Breksje kittet sammen med finstoff, inkludert leirmineraler.



Figur 5-17: Kjerneboksen der forvitret prøve ble tatt på 102,5-103 m dyp (Sone C). Breksje kittet sammen med finstoff, inkludert leirmineraler.

5.4.4 Analyser av kjernemateriale fra Drogset

Resultatene av XRD («X-Ray Diffraction») analysene for de tre prøvene fra Borehull-B, Drogset, Langsteindalen, er gitt i Tabell 5-7. Alle analysene er utført på 'bulk' prøver, og for prøvene fra sleppesonene betyr det materialet finere enn 2 mm; dette for å unngå 'fortynning' av sleppeprøvene med fragmenter av 'friskt' berg.

Den 'friske' bergartsprøven (65,5 m dyp) er en plagioklas-porfyr med høyt kvartsinnhold, der summen av kvarts og feltspat (plagioklas) utgjør 94 vekt-%. Dette er svært forskjellig fra materialet i sleppe-sonene, som bare har ~1% kvarts, mens plagioklas og kloritt er hovedmineraler.

Innholdet av svelleleire (smektitt) i de to sleppesonene er 4 til 5%. Det er ikke utført måling av svelletrykk på disse prøvene, da det er for lite tilgjengelig materiale av fraksjonen <20 mikrometer i kjerneprøvene. Basert på likheten i sammensetning med sleppeprøvene som er beskrevet ovenfor, så er det grunn til å anta at svelletrykket er lavt, og langt under 0,1 MPa.

Tabell 5-7: XRD bulk-analyser (vekt-%) av tre prøver fra Borehull-B, Drogset, Langsteindalen. Det svellende leirmineralet i sleppesonene er smektitt/kloritt blandsjikt, og innholdet varierer rundt 5%. Den 'friske' bergartsprøven er en plagioklas-porfyr med høyt kvartsinnhold (44%), og derfor svært forskjellig fra materialet i sleppesonene, som bare har ~1% kvarts.

Prøve nr.	Prøve-dyp (m)	Kvarts	Plagioklas	Glimmer	Kloritt	Smektitt	Amfibol	Pyro-fyllitt	Pyritt
198466	65,5	44	50	<0,5	1	<1	3	spor	1
198467	79,5	1	41	1	38	4	10	3	2
198468	103	1	36	1	35	5	14	4	4

De kjemiske analysene av prøvene er utført på XRF («X-Ray Fluorescence») med smeltede piller (prøvemateriale smeltet sammen med litium-tetraborat), og det er benyttet samme prøvemateriale som for XRD analysene. Resultatet er gitt i Tabell 5-8. Den 'friske' bergarten har 76,2 vekt-% SiO₂, noe som er et resultat av det høye innholdet av kvarts og plagioklas. De to sleppeprøvene er svært lik hverandre både mineralogisk og kjemisk. Det lave innholdet av glimmer gjenspeiles i de lave innholdene av kalium, og det høye glødetapet for de to sleppeprøvene (sammenlignet med 'frisk' bergart) gjenspeiles i det høye innholdet av kloritt og smektitt.

Tabell 5-8: XRF bulk-analyser (vekt-%) av tre prøver fra Borehull-B, Drogset, Langsteindalen. Det høye innholdet av kvarts og plagioklas i den 'friske' prøven fører til et SiO₂ innhold på 76,2 vekt-%.

Prøve nr.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Glødetap	Sum
198466	76,2	11,8	1,79	0,113	0,76	0,984	6,68	0,049	0,031	0,014	0,330	98,8
198467	45,5	15,5	11,3	1,61	7,73	9,44	3,33	0,165	0,177	0,136	4,21	99,2
198468	45,9	15,5	10,5	1,40	7,87	10,5	3,05	0,102	0,172	0,144	3,99	99,1

5.5 Konklusjoner

Alle analyserte sleppeprøver (< 20 mikrometer og <2 mm) inneholder svelleleire (smektitt), fra 4 til 13 vekt-%. Svelletrykkene som er målt (på Sintef) viser likevel svært lave svelletrykk, fra 0,03 til 0,04 MPa. Slike svelletrykk kommer i klassen 'Lave svelletrykk', som er definert <0,1 MPa.

Bulkanalyser av prøver fra to sleppesoner i kjernene fra Borehull-B, Drogset, Langsteindalen, viser også 4 til 5 vekt-% smektitt (svelleleire). Det er for lite materiale i kjerneprøvene til at svelletrykk kan måles, men

basert på erfaringen fra sleppeleirene beskrevet ovenfor, antas det at svelletrykket vil være av samme størrelsesorden; dvs. $<0,1$ MPa.

Sleppesonene er anrikt på tungmetaller (Cr, Cu, Ni, V, og Zn) i forhold til de friske bergartene; opptil 800 mg/kg. I de friske bergartene er tungmetallene assosiert med svovel (kis-mineraler), mens det i sleppesonene er lite svovel. Dette er tolket som en oksidasjon av sulfider i sleppesonene, med utvasking av sulfat, mens tungmetallene er utfelt som oksihydroksider; dvs. mindre reaktive og mindre mobile enn metall-sulfider.

Sammensetningen av prøvene fra sleppesonene er generelt forskjellig fra de 'friske' bergartene fra samme lokalitet. Sleppe-prøvene er rikere på sjiktmineraler (glimmer og kloritt) enn de 'friske' bergartene, og dette kan tyde på at sleppesonene delvis er utviklet i soner med en noe annen mineralogi. Men i tillegg til en breksjering og geokjemisk omvandling, med dannelse av leirmineraler, inkludert svelleleire (smektitt), er det sannsynlig at sleppesonene også har gjennomgått hydrotermale omvandlinger i en tidligere fase. En indikasjon på dette er innholdet av pyrofyllitt i sleppesonen ved Drogset, Langsteindalen. Dette mineralet dannes ved hydrotermale prosesser i temperaturintervallet 150-300 grader C, og er påvist i flere sleppesoner på Fosen. (Se Rueslåtten o.a. i kommende sluttrapport for Coop3 prosjektet.)

Hvor dypt sleppesonene når, er målt med resistivitets-profiler over forkastningssonene (se kapittel 4 i innværende, Larsen 2019).

6. 3D MODELL

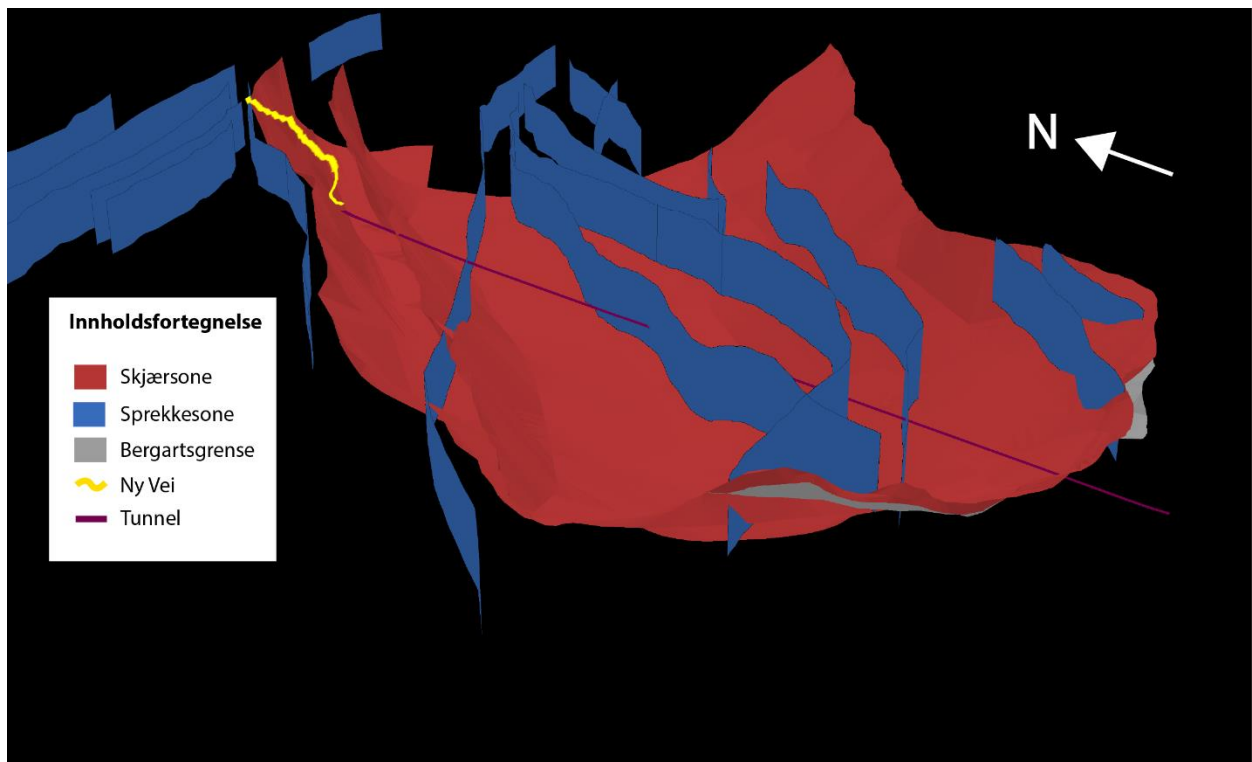
Bjørn Eskil Larsen

Basert på harmoniseringen 1:50 000 berggrunnsgeologiske kart presentert i kapittel 2 (Svendby o.a., 2019) er det utviklet en 3D-modell av geologien langs planlagte veitrasé mellom Åsen i nord og Ulsberg i sør. Det er også gjort en sprekkeanalyse basert på topografisk LiDAR-data (kapittel 2 i innværende rapport, Baranwal, 2019).

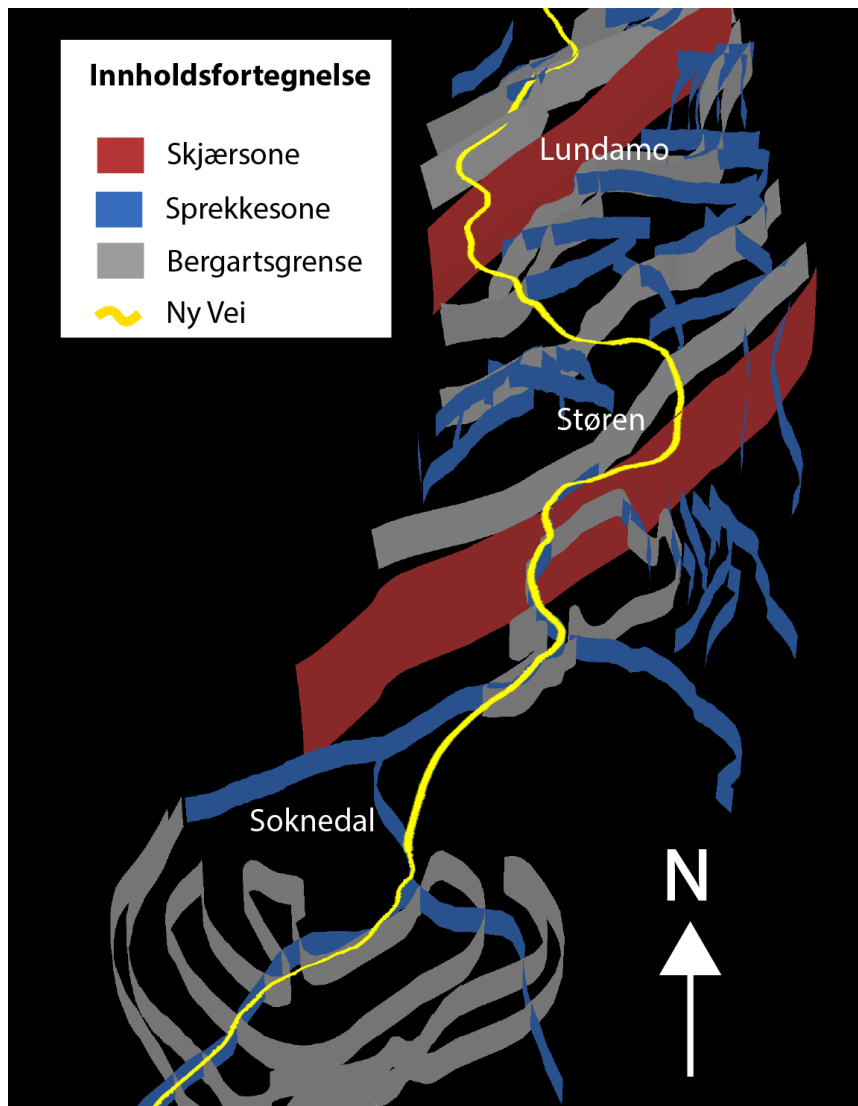
Det harmoniserte kartet er noe forenklet stedvis på grunn av veldig høyt detaljnivå på enhetene. Dette gjelder spesielt rundt Stjørdal hvor det er kartlagt veldig mange tynne konglomerat- og askelag (tuff) i en metasandstein. Disse er forent til én litologi med oppdatert beskrivelse som inkluderer disse tynne lagene.

Modellen er laget i programmet 3D Move av Midland Valley (2018). Geometriene er laget enten ved å forlenge linjegeometrien til bergartsgrensene mot dypet eller ved å tegne inn et nettverk av linjer i dypet som skal utgjøre en bergartsgrense for så å interpolere en overflate mellom disse. I disse tilfellene ble algoritmen *Delaunay Triangulation* brukt. Denne lager trekkanter mellom kjente punkter langs linjene som flettes sammen til en sammenhengende overflate. Geometriene ble så konvertert via FME til ArcGIS-formatet *multipart* og lagret i en *filgeodatabase*.

For å interpolere bergartsgrenser i dypet er det brukt strukturmålinger fra NGU sine databaser og struktursymboler på de geologiske kartene. Der det finns tolkninger om geometri i dypet, fra for eksempel geologiske snitt, er disse inkludert i modellen. Alle skjærsoner er tegnet til et dyp på 2000 meter bortsett fra Forbordsfjellet hvor skjærsonen har en synform, nesten som en stor skål som er åpen i nordøstlige ende. Det er begrenset informasjon om hvor dyp denne synformen går, men siden flankene antas å være steile vil nok tunnelen krysse grensene relativt nær der grensene er på overflaten. De geologiske grensene er forlenget til 800 meter under overflaten. Alle sprekkesoner tolket fra topografisk data antas å være vertikale og forlenget til et dyp på 500 meter under overflaten. Figur 6-1 og Figur 6-2 viser to utvalgte områder fra modellen.



Figur 6-1: 3D modell over Forbordsfjellet uten topografisk overflate



Figur 6-2: 3D modell over sørlige del av prosjektområdet uten topografisk overflate.

7. KALKSTEIN OG KARST-POTENSIALE I FORBORDSFJELLET OG ÅSEN

Agnes Raaness & Janja Knežević

7.1 Hva er karst?

Karst er en landskapsform med karakteristiske formasjoner som opptrer både på og under bakken. Karstlandskap dannes i områder med relativt lettoppløselige bergarter, i hovedsak kalkholdige bergarter som kalkstein, dolomitt og marmor, men også kalkglimmerskifer, under bestemte geologiske, hydrogeologiske og hydrologiske forhold.

Mineralet kalkspat/kalsitt som finnes i disse bergartene løses i svake syrer i vannet. Oppløseligheten øker med økende innhold av kalkspat, mens innhold av sand, leire etc. reduserer karstdannelsen. Sekundær porøsitet, sammen med geodynamiske prosesser som oppretter sprekker og forkastninger, har en betydelig rolle for å utvikle karstifiseringprosessen.

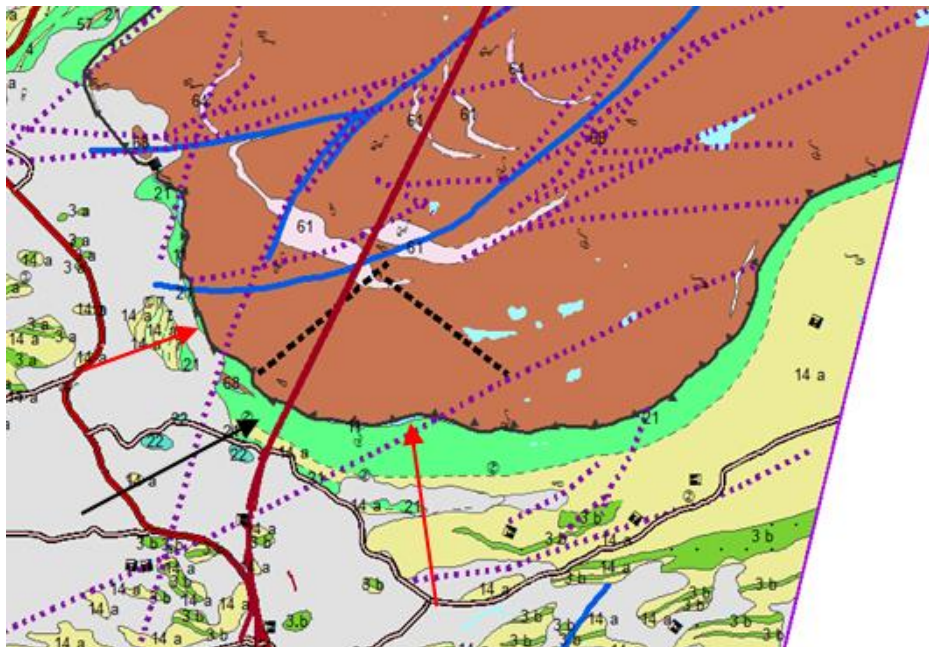
Kjemisk og mekanisk påvirkning av syreholdig vann utvider sprekker som over tid danner hulrom i fjellet (grottekanaler etc.). De kalkførende bergartenes porøsitet avtar normalt mot dypet, slik at også karstintensiteten reduseres med dypet. Unntaket er karstdannelse langs soner med høyere konsentrasjon av sprekker og forkastninger (Kresić, 1988).

7.2 Hvorfor bør man være obs på karstdannelse?

Ettersom lett syreholdig vann løser opp deler av bergartene vil de kunne bli porøse, noe som kan påvirke stabiliteten og også føre til jordfallshull og vanninntrengning i tunneler.

7.3 Kalkstein og marmor i ny E6-trasé

Det har ikke blitt gjort nye undersøkelser i felt, men vurderinger er basert på sammenstilling av eksisterende kunnskap om kalkførende bergarter langs traséen, tolkning av LiDAR-data og resultater fra andre deler av prosjektet.

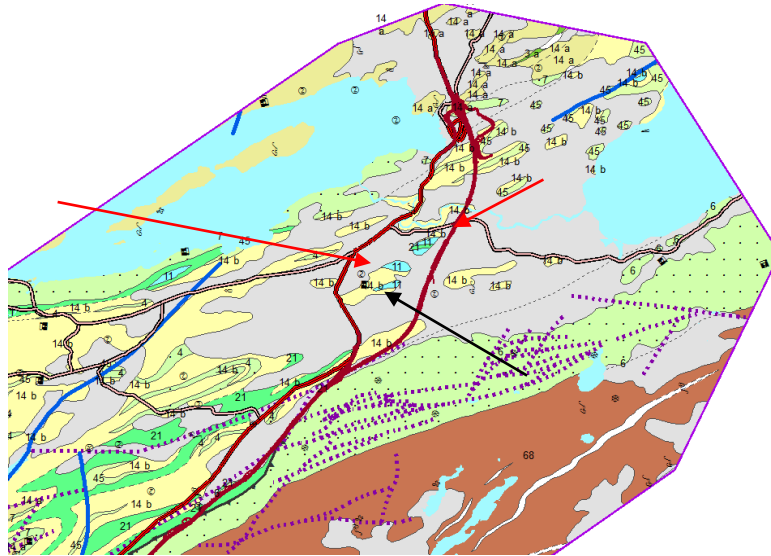


Figur 7-1 Røde piler peker på kartlagte kalkholdige enheter (Roberts, 1985). Geologi fra kapittel 2, Svendby o.a. (2019). Sort pil peker på stedsangivelse for Holan kalksteinsbrudd.

7.3.1 Forbordsfjellet:

Ved Forbordsfjellet er det kjent at det finnes kalkstein og kalkholdig glimmerskifer, men karstdannelse og grotter er p.t. ikke kjent fra Forbordsfjell-området.

Data fra Industrimineraldatabasen hos NGU viser blant annet nedlagte Holan kalksteinsbrudd (nedlagt 1961) ikke langt unna det sørlige tunnelpåslaget ved Kvithamar. Denne bergartsenheten er beskrevet som en 25 m mektig kalkstein som ligger under skyvegrensen mellom grønnstein og leirskifer.



Figur 7-2 Røde piler peker på kartlagte kalksteinsområder (Roberts, 1985) mens sort pil peker på Åsen kalksteinsbrudd. Geologi fra kapittel 2, Svendby o.a. (2019).

Det er ukjent hvordan kalksteinen opptrer mot dypet og om den kan ekstrapoleres ned mot tunnelen eller om den kiler ut lenger opp. Basert på ekstrapoleringer av strøk/fall-målinger på overflaten kan kalksteinen i teorien treffe tunnelen omtrent etter 450 m, men det er nødvendig med kjerneboringer langs traséen for å bekrefte eller avkrefte dette.

Tolkning av LiDAR-data avslører ikke potensielle grotter i overflaten av karbonatsonene langs traséen.

Logging av borekjerne fra Langsteindalen (Slagstad, 2019, pers.med., kapittel 5, Rueslåtten o.a. 2019) viser ikke kalkholdige bergarter nær svakhetssonene, men her er kalkholdige bergarter heller ikke kjent i overflaten.

Resistivetsmålingen fra tunnelpåhugget ved Holan (Kapittel 4, Larsen, 2019) viser ikke tegn på dannelse av hulrom.



Figur 7-3 Røde piler peker på kartlagte kalksteinsområder (Roberts, 1985), mens sort pil peker på Åsen kalksteinsbrudd. Geologi fra kapittel 2, Svendby o.a. (2019).

Legger man de bufrede lineamentene fra nedbørsfeltanalysen (kapittel 10. Seither o.a., 2019a,b) til grunn sammen med det berggrunnsgeologiske kartet ser man at sannsynligheten for å finne velutviklet karst i området er relativt lav.

7.3.2 Åsen

Det er sannsynlig at miljøtunnelen vil krysse områder av kalkstein. I NGUs industrimineraldatabase finnes data om Åsen kalkbrudd (nedlagt 1963), hvor det er beskrevet en 20 m mektig kalkstein.

Karstgrotter er kjent fra Åsen-området, men disse befinner seg ikke i nærheten av traséen.

7.4 Oppsummering

Det er kjente forekomster av kalkstein i både Forbordsfjellet og Åsen, men karstdannelse er ikke kjent langs traséen.

For Forbordsfjellet er det ukjent hvor langt kalksteinen strekker seg mot dypet eller om den kiler ut, og om inntrengning av vann via sprekkesystemer (jfr. Kapittel 10, Seither et al, 2019b) og om eventuell dypforvitring kan ha ført til karst-dannelse.

Basert på tolkning av ERT-målinger og sekundær porøsitet anses sannsynligheten for velutviklet karstdannelse i Forbordsfjellet som lav.

8. BYGGERÅSTOFF ÅSEN-ULSBERG

Eyolf Erichsen

Sammendrag og konklusjon

Materialtekniske analyser utført av NGU tilsier at kvaliteten for flere av bergartene som kan opptre langs vegtraséen kan være egnet til vegfundament (bære- og forsterkningslag). Det er lite sannsynlig at bergartsmaterialet vil tilfredsstillende kravene for tilslag i vegdekke med høy trafikkbelastning.

Det er ønskelig ut fra både et miljø- og kostnadsperspektiv å kunne nyttiggjøre seg mest mulig av massene fra anleggsarbeid i forbindelse med store infrastrukturprosjekt. Masser av akseptabel kvalitet bør i størst mulig grad utnyttes som byggeråstoff, enten internt i byggprosjektet eller ved andre prosjekter, framfor kun å bli kjørt på deponi. Ved anlegg der det produseres store mengder med overskuddsmasser bør en vurdere muligheten for mellomlagring for eventuelt senere bruk. Det er eksempler på at flere deponi med overskuddsmasser fra kraftverkstunneler som i ettertid har blitt utnyttet for anvendelse som byggeråstoff.

Prøver fra NGUs Pukkdatabase, som kan relateres til en del av bergartene som opptre langs E6 traséen mellom Åsen og Ulsberg, viser analyseresultater som tilfredsstillende kravene til vegfundament (bære- og forsterkningslag) for høyt trafikkerte veier. En bør vurdere kost-/nytteverdien som en omfattende prøvetaking og analysering av de materialtekniske egenskapene til de ulike bergartsmaterialene innen prosjektet. Ved tidlige undersøkelser av steinkvaliteten kan man planlegge for mulig bruk av disse massene. Miljø- og kostnadmessige fordeler ved optimal utnyttelse av de utsprenge massene fra prosjektet bør vurderes og sammenlignes med tilsvarende kostnader ved å få fraktet og kjøpt masser fra råstoffleverandører.

8.1 Bakgrunnsmateriale

Deler av ny vegtrasé langs E6 mellom Åsen og Ulsberg passerer gjennom bergartssoner som er prøvetatt og analysert av NGU med hensyn til materialtekniske egenskaper. Resultatene inngår i NGUs Grus- og pukkdatabase med prøver enten tatt i steinbrudd/pukkverk eller som såkalte typeprøver av bergarten. De fleste av prøvene (76 stk.) er prøvetatt før 2000-tallet og er analysert med testmetoder som var i henhold til Statens vegvesens håndbok «Vegbygging» gjeldende fram til 2005. 10 av prøvene er analysert med de nye felles europeiske standardiserte testmetodene og som det i dag stilles krav til.

8.2 Materialtekniske Egenskaper

Prøver og analyseresultater som kan relateres til deler av berggrunnsgeologien langs E6-traséen mellom Åsen og Ulsberg er gitt i Vedlegg 8.1. For prøve med samme lokalitet (koordinater) er det bevist valgt den prøven med best analyseresultat.

Kravene til de «gamle testmetodene» er gitt i Tabell 8-1 og gjelder for steinklasse (gitt ved en kombinasjon av sprøhet- og flisighetstall), abrasjonsverdi og Sa-verdi (produktverdi av $[\sqrt{\text{sprøhetstallet}} \times \text{abrasjonsverdien}]$). I perioden fram til 2005 var det en overgangsperiode med krav til de «gamle testmetodene» og de nye som Los Angeles-verdi og mølleverdi.

Tabell 8-1: Gamle krav (Statens vegvesen Håndbok-018, 1999 utgave)

Lagtype	St.kl.*	Abr*.	Sa-verdi*	LA*	AN*
Asfaltdekke	1/2	0,40/0,45	2,0/2,5	15/20	6/9
Bærelag, mekanisk-/bitumen-stabilisert	3/4	0,65	-	25/30	-
Forsterkningslag, øvre	4	0,75		30	
Forsterkningslag, nedre	5	0,75		30	

* Krav for veiger med ÅDT >15000 / 5001-15000

St.kl. - Steinklasse, Abr. - Abrasjonsverdi, Sa-verdi, LA - Los Angeles-verdi, AN - Mølleverdi.

De nye kravene, som ble revidert i juni 2018, er vist i Tabell 8-2. Ettersom vegnettet mellom Åsen og Ulsberg har en trafikkmengde >5000 er det i Tabell 8-1 og Tabell 8-2 kun tatt med krav for veiger med gjennomsnittlig årsgjennsnitts trafikk (ÅDT) større enn 5000.

I de fleste tilfellene er de gamle og nye testmetodene sammenliknbare sett i forhold til de materialtekniske kravene som stilles til tilslagsmateriale til ulike typer bruksområder til vegformål og trafikkbelastning. Resultatene i rapporten for de totalt 76 prøvene er derfor vurdert under ett uavhengig om de er utført etter

gamle eller nye testmetoder og gamle/nye krav. Prøvematerialet er enten knust ned kontrollert etter standard rutine med kjeftknuser i laboratoriet (Statens vegvesen Håndbok-014 Laboratorieundersøkelser, kap. 14.457) eller siktet ut fra produksjonsknust materiale i verk før testing. Undersøkelser utført av NGU viser at laboratorieknust materiale har noe bedre resultater for de materialtekniske egenskapene i forhold til produksjonsknust materiale (Eyolf Erichsen, unpubl.data, NGU). En kan ikke se bort ifra at «hardt sprengte» tunnelmasser ved konvensjonell drift kan gi betydelig mer finstoff og påvirke de materialtekniske egenskapene negativt.

For de prøvetatte pukkforekomstene som er med i datagrunnlaget, kan produsentene operere andre analyseverdier enn det som er blitt registrert av NGU i pukkdata-basen. Mange av NGUs analyser er basert på prøver tatt for mer enn 20 til 30 år siden, så noe variasjon kan forekomme, men NGU forventer at resultatene vil ligge i samme størrelsesorden.

Tabell 8-2: Nye krav (Statens vegvesen Håndbok N200, 2018 utgave).

Lagtype	LA*	AN*	MDE*	< 0,63µm [^]
Asfaltdekke	≤ 20/25	≤ 7/10	-	-
Bærelag, mekanisk stabilisert	≤ 35	-	≤ 15	3%
Bærelag, bitumen stabilisert	≤ 30	-	≤ 15	
Forsterkningslag	≤ 35	-	≤ 20	5%
Frostsikringslag	-	-	-	7%

* Krav for veger med ÅDT >15000/5001-15000.

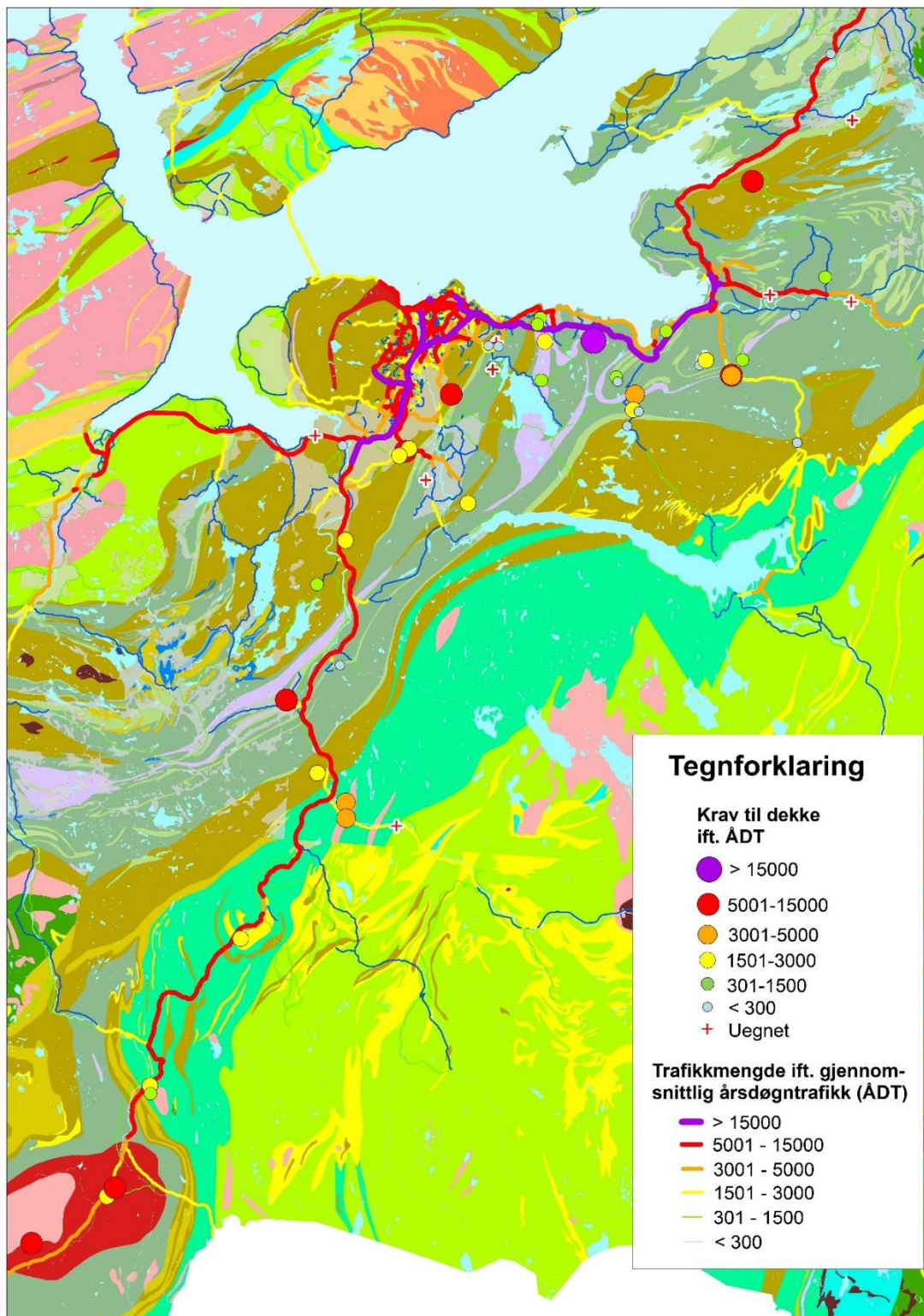
[^] - Maksimalverdi avhengig av sortering.

LA - Los Angeles-verdi, AN - Mølleverdi, MDE - Micro-Deval koeffisient

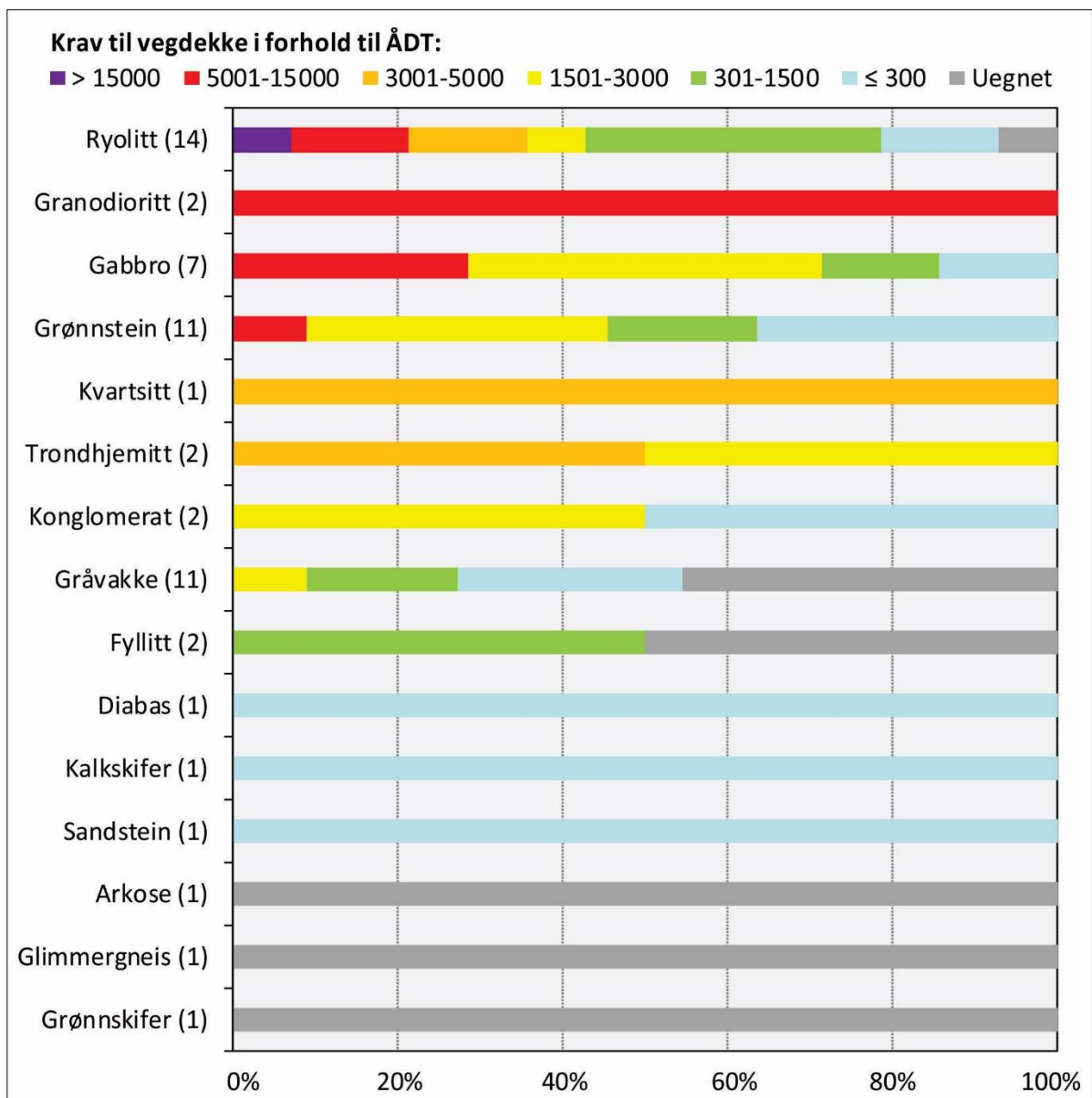
Mekanisk stabilisert bærelag benyttes ikke ved ÅDT > 5001.

8.2.1 Egnethet til Vegdekke

Det forventes ikke at bergartsmateriale langs traséen vil kunne tilfredsstille kravene for tilslag i vegdekke med høy trafikkbelastning (Tabell 8-1). Tre enkeltprøver viser analyseverdier som dekker kravene for ÅDT > 5001. Det er til dels stor variasjon i kvalitet for de ulike bergartene, som framgår spesielt for bergartstyper med mange analyser, og som er prøvetatt på forskjellige steder (Tabell 8-2).



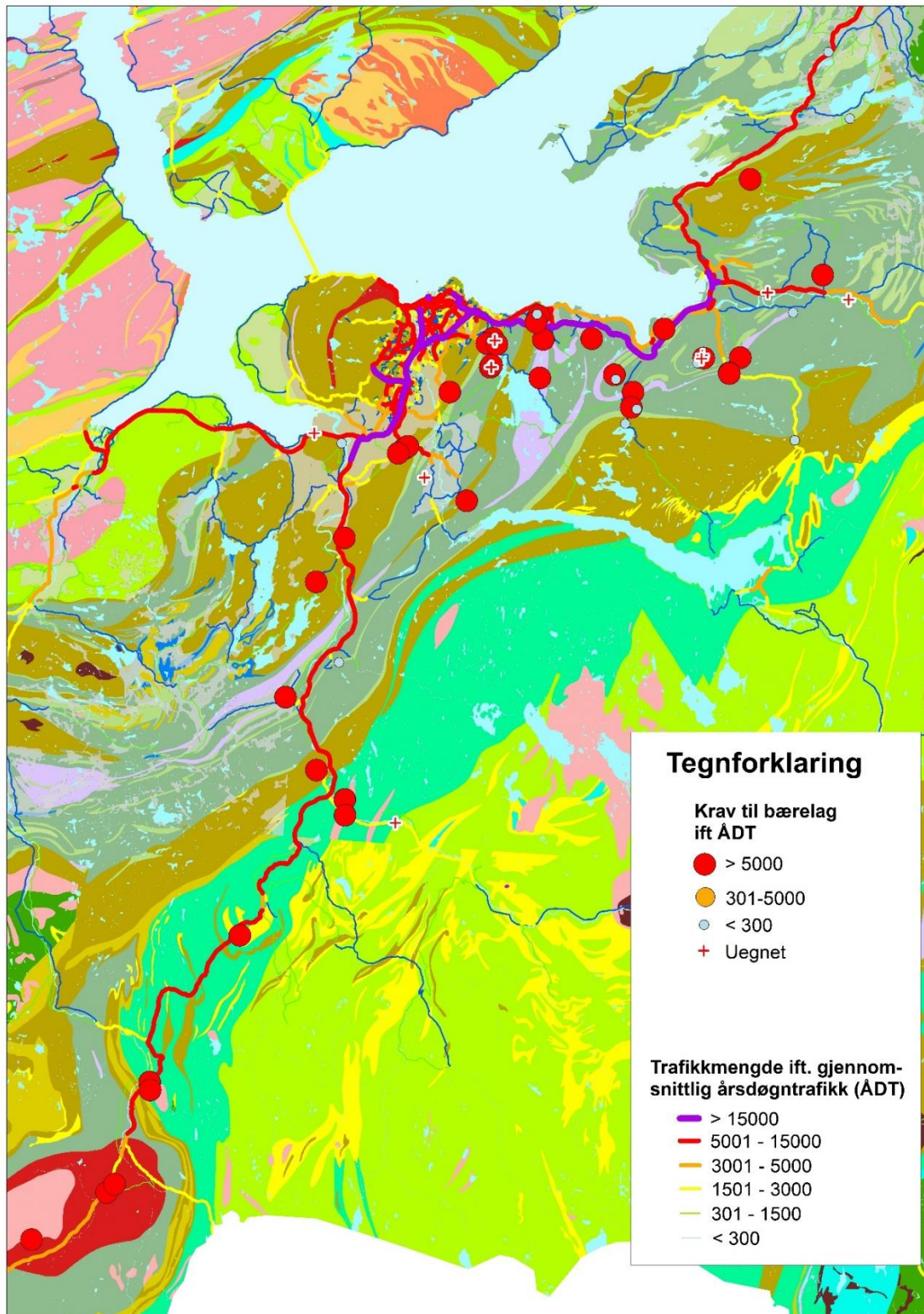
Figur 8-1: Krav til vegdekke i forhold til trafikkmengden gitt ved årsdøgntrafikk (ÅDT).



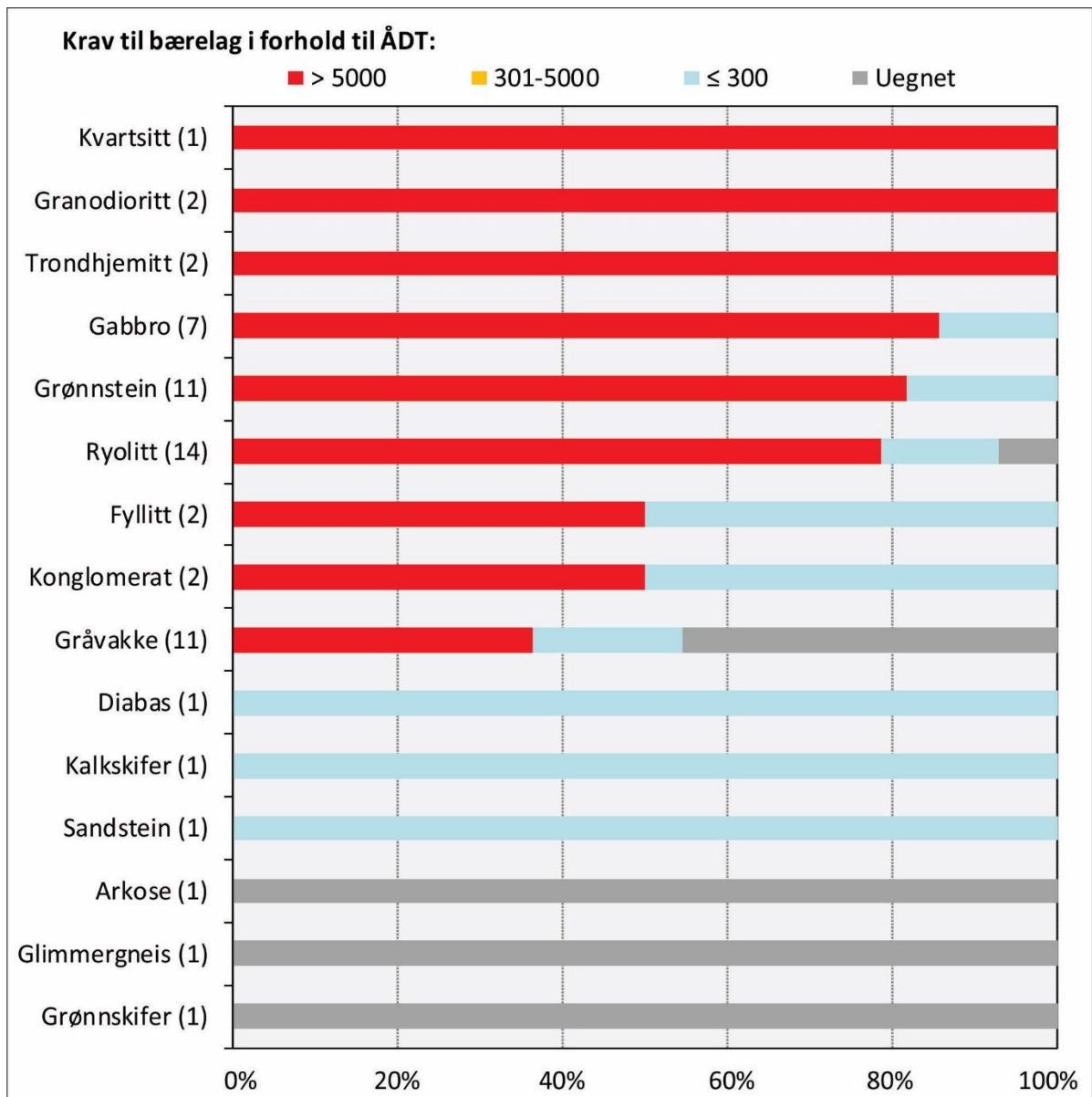
Figur 8-2: Variasjon i forhold til krav til vegdekke. Antall prøver for de ulike bergartene er oppgitt i parentes.

8.2.2 Egnethet til bærelag

Flere av prøvene tilfredsstillte de strengeste kravene for tilslag til bærelag (Figur 8-3). Få analyser for enkelte av bergartstypene gjør at det er liten variasjon i kvalitet (Figur 8-4). Variasjonen ville sannsynligvis øke med økt prøveantall.



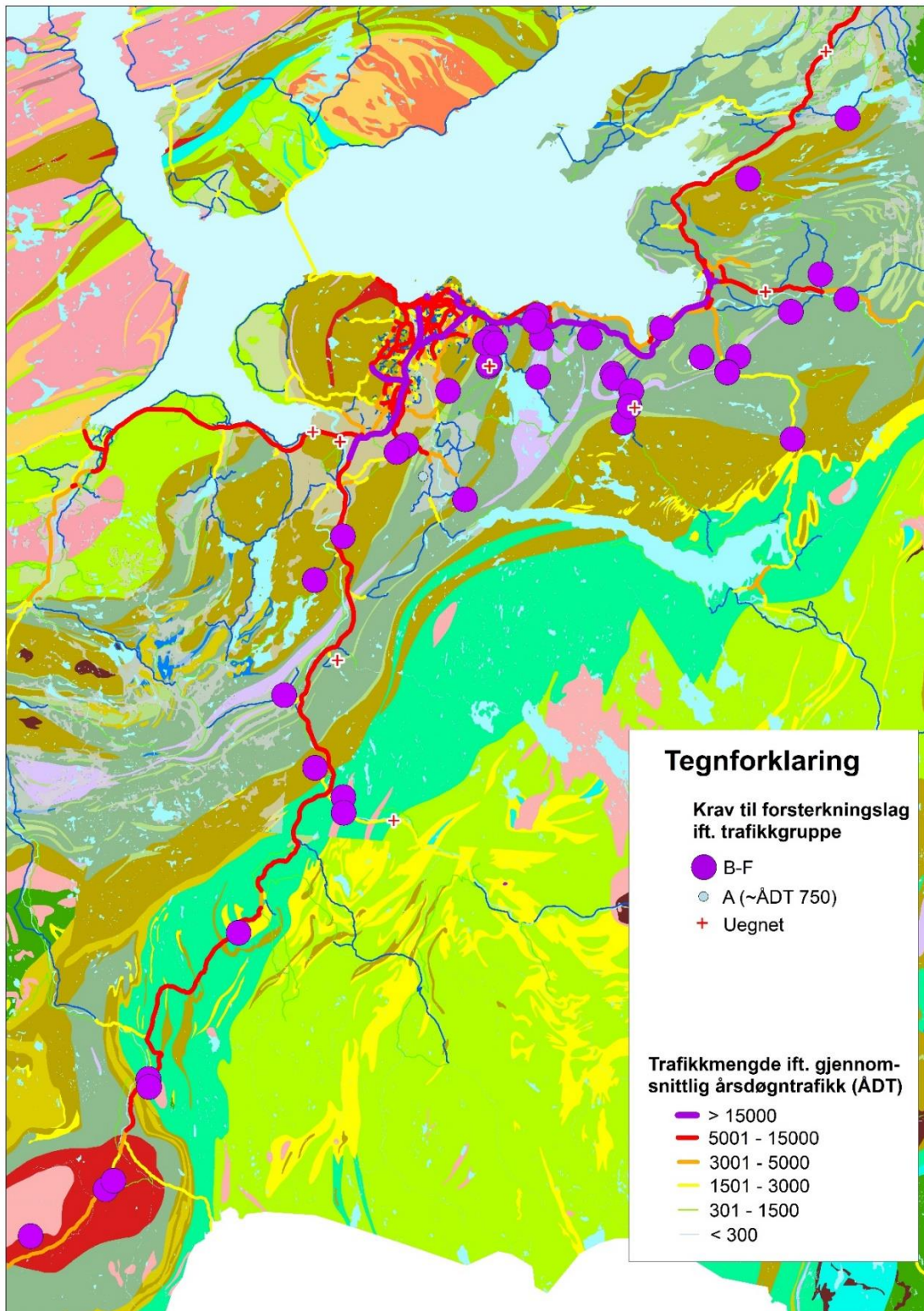
Figur 8-3: Krav til bærelag i forhold til trafikkmengden gitt ved årsdøgntrafikk (ÅDT).



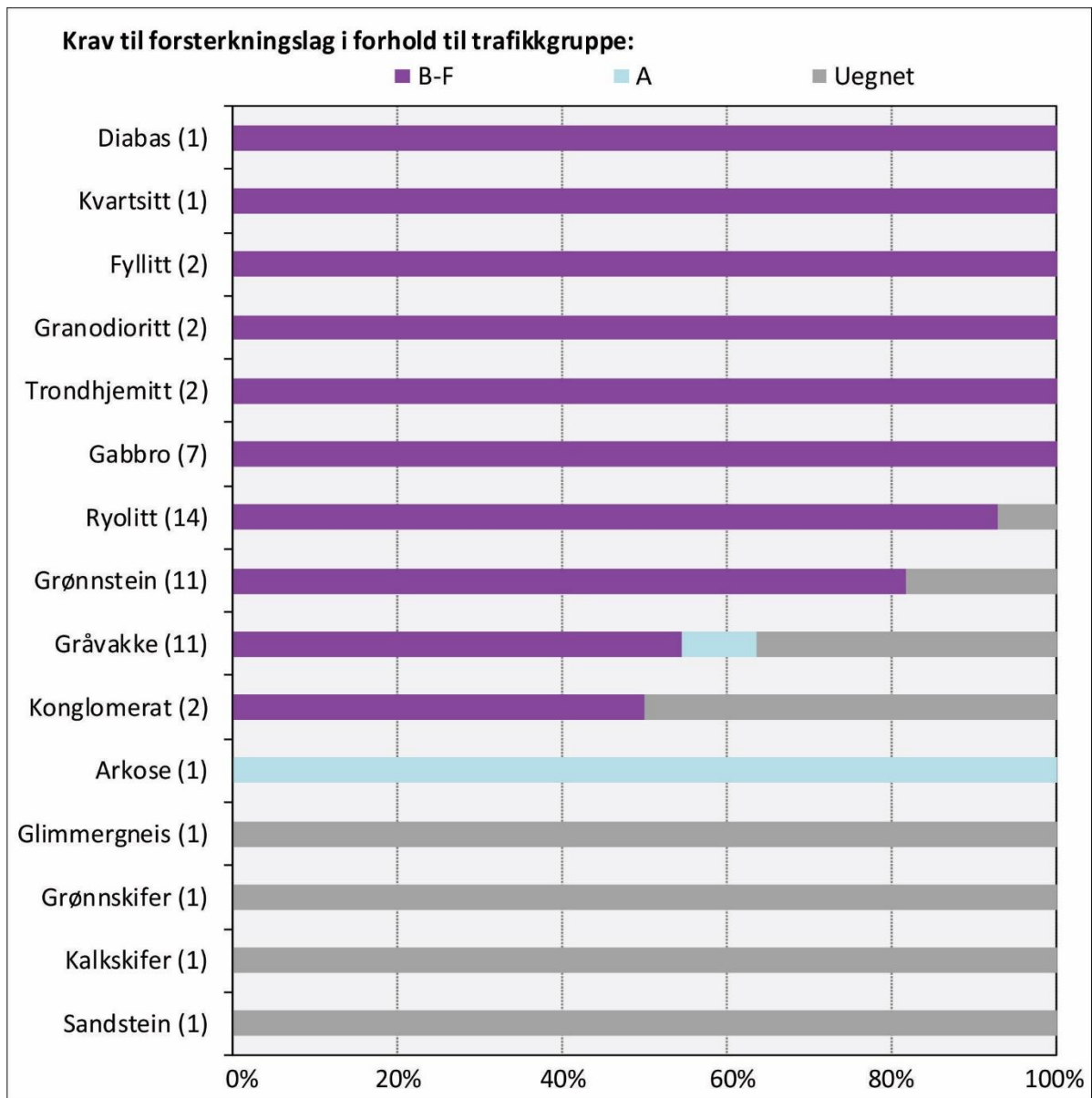
Figur 8-4: Variasjon i forhold til krav til bærelag. Antall prøver for de ulike bergartene er oppgitt i parentes.

8.2.3 Egnethet til forsterkningslag

Mange av prøvene tilfredsstillende de strengeste kravene for tilslag til forsterkningslag (Figur 8-5). Som for bærelag er det liten variasjon i kvalitet (Figur 8-6).



Figur 8-5: Krav til forsterkningslag i forhold til trafikkmengden gitt ved årsdøgntrafikk (ÅDT).



Figur 8-6: Variasjon i forhold til krav til forsterkningslag. Antall prøver for de ulike bergartene er oppgitt i parentes.

VEDLEGG 8.1

Forekomstnummeret er referansenummer som er benyttet i NGU's Grus- pukkdatabse.

Forekomst nummer	Navn	Sone (WGS84)	UTMX	UTMY	Bergart	Densitet	Stein-klasse	Abrasjons-verdi	Sa-verdi	Mølle-verdi	Los Angeles-verdi	Micro-Deval koeffisient
1 601 501	Lia pv	32	572809	7027062	Grønnstein	2,97	1	0,44	2,6	9,9	12,1	7,4
1 601 502	Vassfjell pv	32	569219	7021613	Gabbro	3,00	1	0,33	1,9	9,6	11,5	7,1
1 601 506	Vasseljemoen	32	580719	7029063	Ryolitt	2,72	2	0,55	3,7			
1 601 507	Skjøla pv	32	569539	7021872	Grønnstein	3,00	1	0,47	2,6	12,5	10,8	9,8
1 601 508	Simsåsen	32	576219	7029593	Ryolitt	2,70	2	0,58	3,8			
1 601 508	Simsåsen	32	576311	7029796	Ryolitt	2,70	2	0,60	3,6			
1 601 508	Simsåsen	32	576218	7029793	Ryolitt	2,72	3	0,71	4,9			
1 601 508	Simsåsen	32	576319	7029592	Ryolitt	2,70	5	0,76	5,7			
1 601 509	Vikåsen	32	576219	7032193	Grønnstein	2,94	2					
1 601 509	Vikåsen	32	576418	7031993	Gråvakke	2,70	5					
1 601 509	Vikåsen	32	575719	7031692	Grønnstein	2,90	3					
1 601 509	Vikåsen	32	576619	7031692	Gråvakke	2,70	3					
1 634 503	Donalia	32	542618	6948092	Granodioritt	2,76	2	0,40	2,4	9,7	23,0	7,2
1 635 502	Gisnås	32	548919	6952892	Gabbro	2,90	1	0,61	3,3			
1 635 503	Skamfersæter	32	551819	6963092	Gabbro	2,89	1	0,58	3,3	11,4	16,3	
1 635 504	Markøya	32	549550	6953714	Granodioritt	2,89	2	0,52	3,2	9,5	14,8	
1 635 505	Tosetveien	32	551936	6962389	Fyllitt	2,83	2	0,57	3,6	14,3	13,0	11,2
1 648 501	Follstad steinbrudd	32	566865	6989896	Trondhemitt	2,70	2	0,50	3,4	9,9	29,0	6,7
1 648 503	Sandsvingen	32	567018	6988492	Kvartsitt	2,75	1	0,48	2,8			
1 648 504	Furukollen	32	564100	6992271	Grønnstein	2,96	2	0,49	3,2	16,6		
1 648 505	Solberg steinbrudd	32	558644	6976914	Trondhemitt	2,70				11,8	15,5	8,0
1 648 506	Aune	32	571574	6988200	Glimmergneis	2,76				39,9	39,6	27,9
1 653 501	Udduvollen	32	563619	7021592	Grønnstein	2,90	3	0,76	5,4		30,0	
1 653 502	Sørtømme	32	560735	6998504	Ryolitt	2,70	1	0,38	2,1			

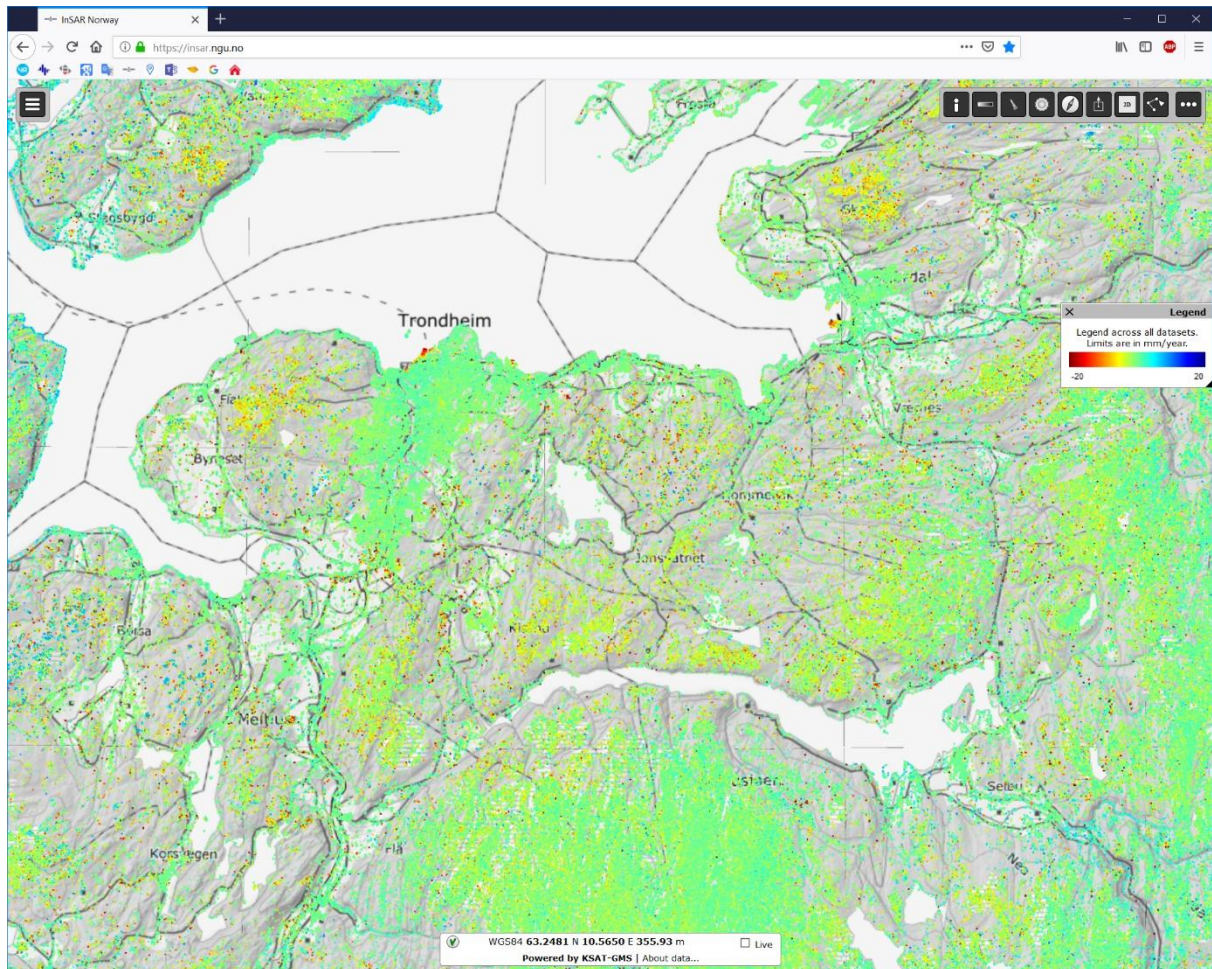
Forekomst nummer	Navn	Sone (WGS84)	UTMX	UTMY	Bergart	Densitet	Stein-klasse	Abrasjons-verdi	Sa-verdi	Mølle-verdi	Los Angeles-verdi	Micro-Deval koeffisient
1 653 504	Skjerdingsstad	32	564646	7013187	Grønnstein	3,00				10,8	10,5	
1 653 506	Øysand pv	32	561109	7022230	Grønnskifer	2,89	3	0,75	5,5	30,8		
1 653 508	Meraftaåsen	32	562497	7009032	Grønnstein	2,89				15,9	12,8	11,8
1 653 509	Rødde	32	568729	7021163	Gabbro	3,06				13,5	17,7	11,4
1 653 50x	Høgsteinen	32	565200	7002050	Sandstein	2,71	2	0,83	5,1			
1 662 501	Forset	32	571301	7019202	Arkose	2,73				28,7	17,1	24,7
1 662 502	Ståggån	32	575232	7017506	Grønnstein	2,96				12,6	10,9	10,8
1 663 501	Lium pukkverk		580718	7032532	Ryolitt	2,76	2	0,51	3,2			
1 663 502	Aune	32	579948	7034713	Grønnstein	2,92	3	0,95	6,5			
1 663 502	Aune	32	580118	7034592	Grønnstein	2,99	2	0,60	3,8			
1 663 503	Muruvika	32	591394	7034464	Gråvakke	2,71				16,9	11,1	
1 663 504	Merkespynten	32	587339	7029962	Ryolitt	2,68	2	0,58	3,6			
1 663 505	Brannåsen	32	587509	7029572	Ryolitt	2,73	2	0,69	4,3			
1 663 506	Storfossen	32	589149	7028572	Ryolitt	2,71	1	0,46	2,7			
1 663 507	Aunåsen	32	579919	7033992	Gabbro	3,00	2	0,64	3,9			
1 663 508	Verket	32	588719	7025692	Diabas	2,88	1	0,67	3,5			
1 663 509	Brannlia	32	585019	7032992	Ryolitt	2,69	1	0,50	2,9	6,7	14,9	
1 663 510	Follahaugen	32	589119	7027192	Gråvakke	2,91	1	0,58	3,1			
1 663 510	Follahaugen	32	589619	7027093	Kalkskifer	2,82	2	0,91	5,9			
1 714 501	Bergskeiva	32	600334	7038549	Gråvakke	2,73	2	0,88	6,6	29,4		
1 714 502	Kleivollen	32	603967	7025638	Gabbro	2,95	3	0,70	5,0			
1 714 503	Knottbakkan	32	605068	7040591	Gråvakke	2,74	1	0,63	3,6	17,6	18,2	
1 714 508	Øfsti	32	602747	7036992	Gråvakke	2,88	1	0,75	4,3	14,9		
1 714 509	Furuberget	32	598418	7032542	Ryolitt	2,71	2	0,62	4,0	9,5		
1 714 510	Lauvåsen	32	595046	7032425	Gråvakke	2,75	2	1,16	7,5	29,4		
1 714 510	Lauvåsen	32	594993	7032106	Gråvakke	2,74				23,5	16,5	21,5
1 714 510	Lauvåsen	32	594645	7031706	Konglomerat	2,74	2	0,78	4,8	17,6		

Forekomst nummer	Navn	Sone (WGS84)	UTMX	UTMY	Bergart	Densitet	Stein- klasse	Abrasjons- verdi	Sa-verdi	Mølle- verdi	Los Angeles- verdi	Micro-Deval koeffisient
1 714 510	Lauvåsen	32	595163	7032205	Konglomerat	2,75	1	0,53	3,1	17,8		
1 714 511	Fuldseth	32	607604	7038590	Gråvakke	2,72				34,8	20,0	
1 714 512	Hamran	32	597815	7048516	Gabbro	2,99				9,6	11,6	7,4
1 714 518	Fossberga	32	597559	7031092	Ryolitt	2,67	1	0,42	2,9	7,3	16,3	5,8
1 714 518	Fossberga	32	597582	7031034	Ryolitt	2,60	2	0,46	3,0			
1 719 502	Kolsum	32	603709	7060502	Gråvakke	2,78	2	0,77	4,9			
1 719 507	Mossing	32	606193	7054763	Fyllitt	2,78				21,9	16,2	18,4

9. INSAR NORGE

Marie Keiding

Norges geologiske undersøkelse lanserte i november 2018 en ny nettbasert karttjeneste for InSAR data. InSAR er en forkortelse for Interferometrisk syntetisk apertur-radar, også kalt radarinterferometri. Det er en metode som brukes til å måle bevegelser i landskapet. Ved hjelp av nye radardata og avanserte algoritmer kan man bestemme millimeterskala bevegelser i for eksempel byområder eller infrastruktur med innsynkning eller ustabile skråninger i terrenget.



Figur 9-1: Skjermdump fra karttjenesten for InSAR data.

9.1 Hvordan fungerer InSAR?

Karttjenesten er basert på målinger fra to satellitter, kalt Sentinel-1A og -1B, som er en del av EUs Copernicus program for jordobservasjon. Satellittenes radarer avgir pulser av radarenergi som beveger seg som en bølge mot jordens overflate. Når en slik puls av radarenergi rammer jordens overflate spres den ut, og en del av signalet reflekteres tilbake til radaren.

Ved å kombinere (eller interferere) målinger fra samme område på to forskjellige tidspunkter kan man med veldig stor nøyaktighet bestemme om det har skjedd bevegelser i landskapet i tiden mellom de to målingene. Ved å kombinere målinger fra mange forskjellige tidspunkt kan man lage tidsserier over bevegelsene.

Dataene viser endring i avstand fra jordoverflaten til satellitten. Bevegelsene som måles, skjer i all hovedsak i vertikal retning. Det er primært områder med lokal innsynkning som måles.

Hvor fungerer det?

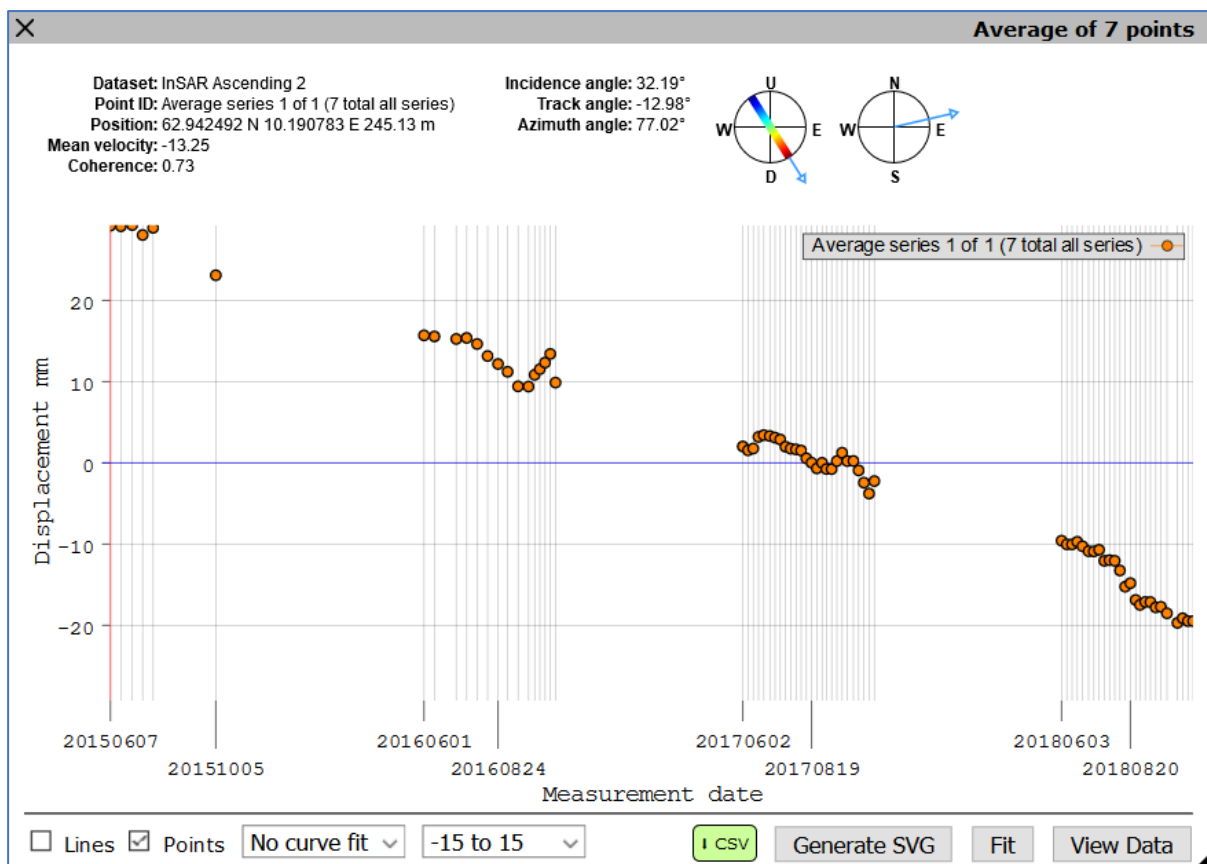
Man får målinger der det er noe på jordoverflaten som er stabilt og bra til å reflektere radarsignalet. Det kan for eksempel være et hustak eller en blotning av fjell i terrenget. I områder med mye vegetasjon får man

ikke gode refleksjoner. InSAR fungerer derfor best i byer og bart terreng. Snø kan føre til endringer i signalet som skyldes vanninnhold i snøen. I det landsdekkende kartet brukes derfor kun data fra perioden i året med generelt lite snødekke (juni-oktober).

9.2 Karttjenestens funksjonalitet

Det er enkelt og raskt å navigere rundt i karttjenesten for å se på områder av interesse. Tjenesten kan vises enten i 2D eller 3D, og man kan velge topografisk kart eller ortobilder som bakgrunn. Datasettet er delt opp i fire (kalt ascending 1, ascending 2, descending 1, descending 2), som kan slås til og av i menyen i øvre venstre hjørne. «Ascending» og «descending» henviser til om satellittbanen har retning mot nord eller mot sør, men det har ingen betydning for bevegelse i vertikal retning.

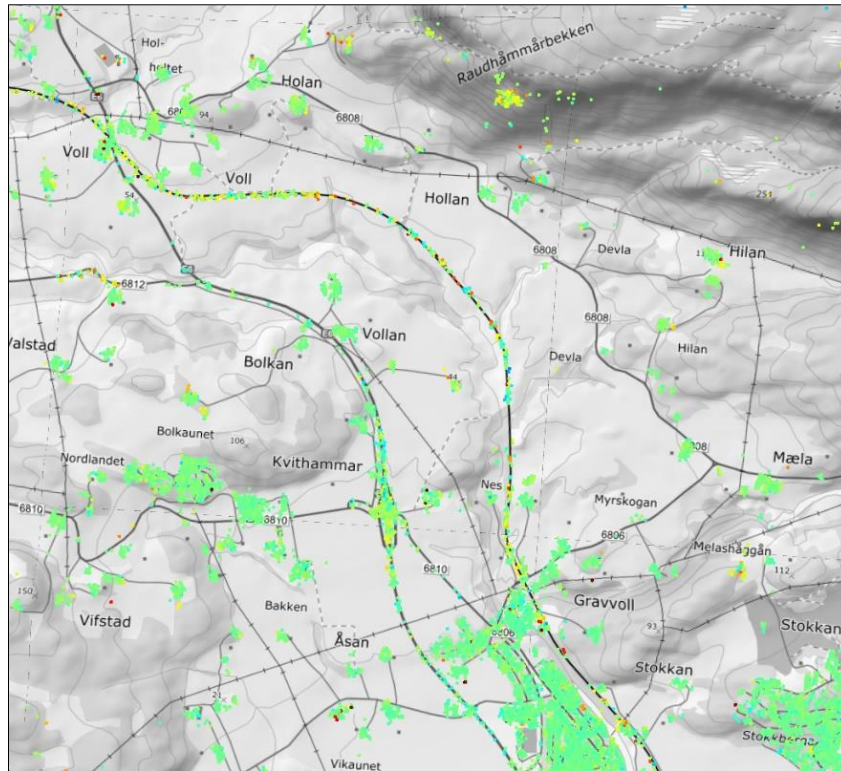
Når man klikker på et punkt, åpnes et vindu med tidsserien for punktet. Ved hjelp av et polygonverktøy kan man velge flere punkter og få opp den gjennomsnittlige tidsserien for punktene (Figur 9-2). Via vinduet med tidsserien for flere punkter kan man nedlaste en CSV-fil med koordinater og all annen informasjon for de valgte punktene. Funksjonaliteten for å nedlaste data er inntil videre begrenset til 50 000 punkter, men større områder kan fås ved henvendelse til NGU.



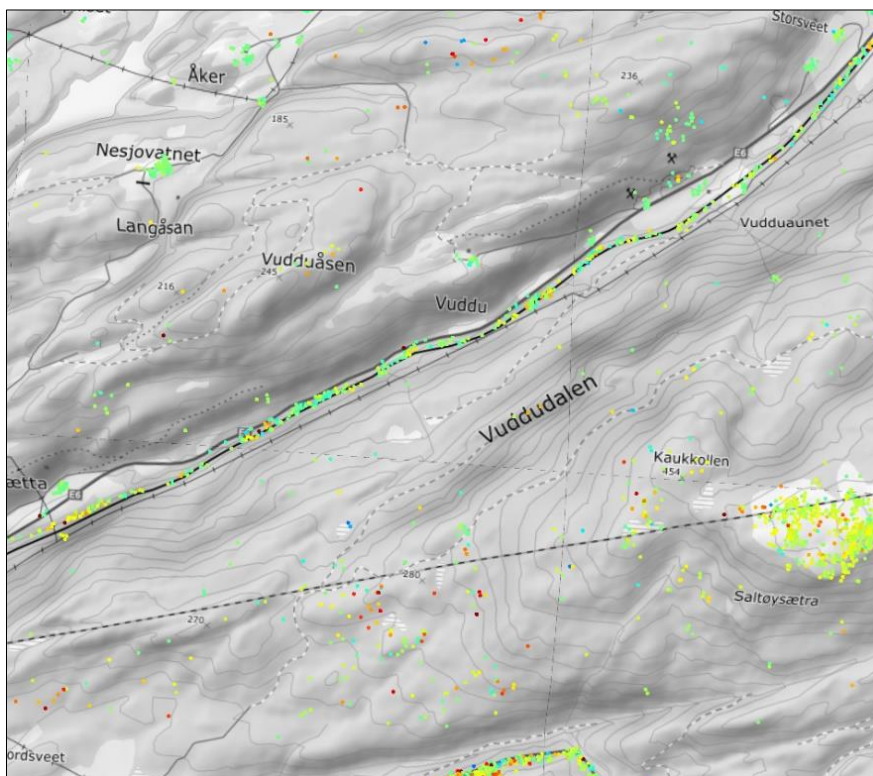
Figur 9-2: Tidsserie med gjennomsnitt av 7 punkter valgt ved hjelp av polygonverktøy. Koordinater og data for punktene kan lastes ned ved å klikke på den grønne CSV-knappen nederst.

9.3 Bevegelser langs E6 traséen

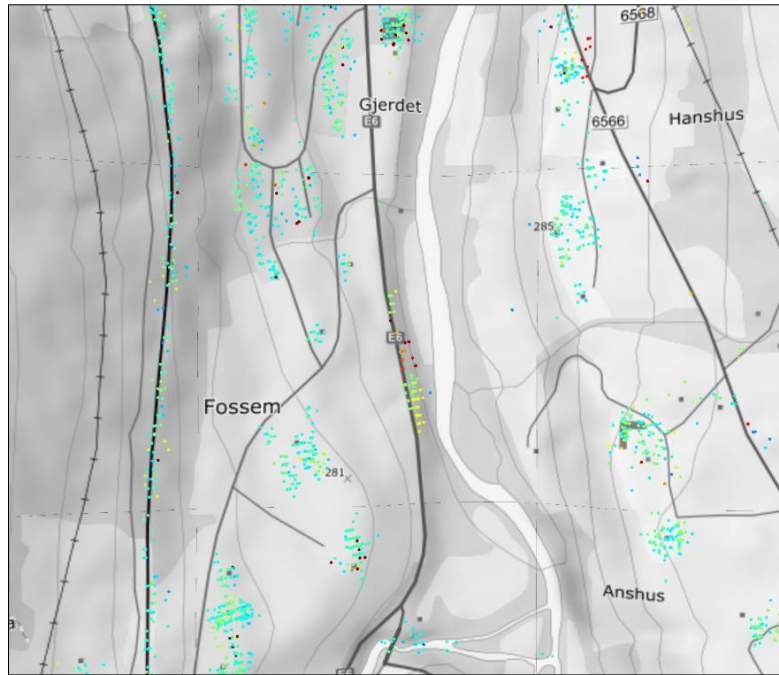
Langs E6 traséen er det ikke mange tegn på bevegelser. Det sees mest områder med stabile InSAR-punkter langs nåværende E6, som for eksempel i Kvithamar (Figur 9-3) eller områder med få InSAR-punkter pga. vegetasjon, som for eksempel Vuddudalen (Figur 9-4). Men det er også mindre områder som viser innsynkning. Et eksempel på dette sees nær Vindåsliene (Figur 9-5). Utenfor nåværende infrastruktur er det generelt dårlig dekning på InSAR-kartet fordi områdene er dekt av vegetasjon.



Figur 9-3: Kartutsnitt nær Kvithamar med primært stabile punkter langs nåværende E6. Grønne punkter er stabile punkter.



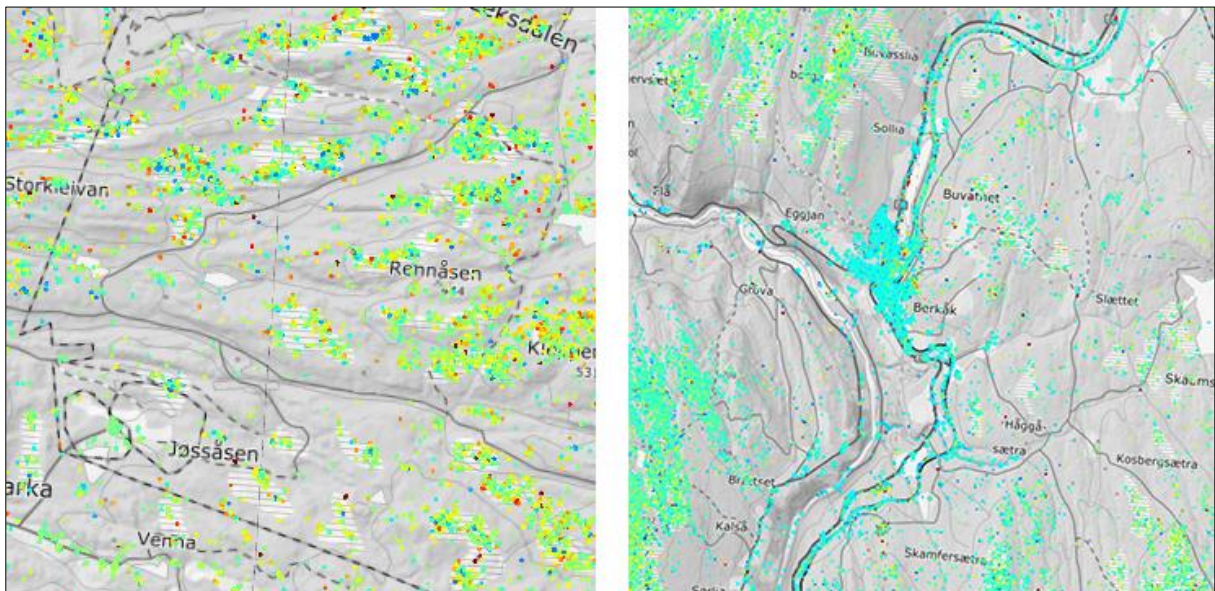
Figur 9-4: Kartutsnitt over Vuoddalen med få punkter pga. tett vegetasjon.



Figur 9-5 Kartutsnitt nær Vindåsliene som viser område med innsynkning langs nåværende E6. De røde punktene viser innsynkning på ca. 15 mm/år.

9.4 Kjente problemer med datasettet

Karttjenesten er fortsatt under utvikling frem til 2020. Det offentliggjorte datasettet er derfor en foreløpig utgave med visse problemer. Problemene sees blant annet i våtområder der sesongvariasjoner i vanninnhold skaper stor variasjon i punktene, nesten som om man hadde strødd salt og pepper over bildet (Figur 9.6). Problemene sees likeledes i dalstrøk der det inntil videre er manglende korreksjon for lagdelt atmosfære (Figur 9-6). Begge effekter vil bli fjernet i kommende utgave av datasettet.



Figur 9-6 Kartutsnitt som viser problemer med den nåværende prosesseringen i våtområder (venstre) og dalstrøk (høyre).

Link til karttjenesten: www.insar.ngu.no

For mer informasjon se: www.insar.no

10. EN ANALYSE AV POTENSIALET FOR INNLEKKASJE AV VANN FOR FORBORDSFJELLTUNNELEN - NYE E6 MELLOM KVITHAMMER OG ÅSEN I TRØNDELAGE FYLKE²

Anna Seither, Atle Dagestad og Guri Venvik

Introduksjon

Forbordsfjelltunnelen skal gå i fjell med krystalline bergarter uten primær porøsitet og som kan betraktes som tette masser. Vann forekommer derfor i sprekker og svakhetssoner, også kalt sekundær porøsitet. Vurderingen av innlekkasjepotensialet er basert på en nedbørsfeltanalyse i kombinasjon med lineamenter i terrenget, i hovedsak tolket fra digitale terrengmodeller (DTM 10 m). Lineamentene er antatt å representere overflatespor av sprekker, svakhetssoner og forkastninger, som ikke angir bevegelse (Pettersen, Redfield & Svendby, 2018). Lineamentene supplementerer tidligere kartlagte forkastninger og sprekkesoner i felt og delvis fra flyfoto (Roberts, 1985). Lineamentene utgjør sannsynlig svake soner i fjellet som kan være vannførende. Denne analysen er en skrivebordstudie basert på eksisterende data (2018) hvor strømningsmønster av overflatevann i terrenget er sett i sammenheng med lineamenter som krysser tunneltraséen for nye E6 gjennom Forbordsfjellet.

10.1 Datagrunnlag for analysen

Utgangspunkt for nedbørsfeltanalysen er en høyoppløselig terrengmodell (1x1m), som ble avledet fra lidardata (Kartverket). Lineamentene i terrenget ble tolket fra DTM (10 m), avledet av lidardata. Målestokkreferansen til lineament-dataene er 1:50.000. FKB data for veier, bekkeløp osv. er innhentet fra Geodata online (Figur 10-1).

10.2 Metode for nedbørsanalyse

Nedbørsfelt er områder med felles avrenning av overflatevann til et bestemt utløpspunkt. Målet er å identifisere nedbørsfelt til svakhetssoner som kan føre til innlekkasje i tunnelen. Det viktigste datagrunnlaget for denne analysen er en digital høydemodell med oppløsning 1x1 m. Nedbørsfeltanalysen er gjennomført i ArcGIS (ESRI) og baserer seg på arbeidstrinnene som er beskrevet i dette avsnittet (Figur 10-1). Hver celle i rasterfilen til terrengmodellen må ha en avrenningsverdi. Dette er en viktig forutsetning for nedbørsfeltanalysen. I første del av analysen identifiseres forsenkninger uten utløp i noen retning. Disse blir ansett som feil i terrengmodellen og vil bli korrigert; cellene vil bli gitt en avrenningsverdi. Analysen er dermed ikke egnet for områder med vann uten utløp, der vannbalansen blir styrt av avdamping eller infiltrasjon til undergrunnen. I neste del av terrenganalysen undersøkes hvilken retning overflatevann vil strømme i terrenget. Det skrives en verdi som angir strømningsretning fra hver rastercelle (1x1m) i terrengmodellen.

Basert på trinnene over i rasteranalysen beregnes strømningsveiene i terrenget. For hver celle identifiseres et antall celler oppstrøms som har avrenning til denne cellen. Resultatet blir et veldig detaljert strømningsnettverk, tilsvarende elver, bekker, grøfter eller forsenkninger i terrenget. Strømningsveier med lavt antall oppstrøms celler, har følgelig et lite nedbørsfelt, og vil ikke være vannførende hele året (Figur 10.1).

Nedbørsfelt er områder med felles avrenning til et bestemt utløpspunkt. I dette arbeidstrinnet velges antall og posisjonen til disse utløpspunktene. Punktene plasseres på strømningsveier i undersøkelsesområdet. Deretter konverteres punktene til en raster. I forbindelse med tunnelen er det potensielle innlekkasjepunkter man velger i dette trinnet. Ved hjelp av rasterfilen som angir strømningsretning av overflatevann i terrenget beregnes så nedbørsfelt for de valgte utløpspunktene. Av praktiske årsaker konverteres den resulterende rasterfilen til polygoner, tilsvarende nedbørsfelt til valgte utløpspunkt. I dette studiet er det punkt hvor sprekkesoner krysser tunneltraséen (Figur 10-1).

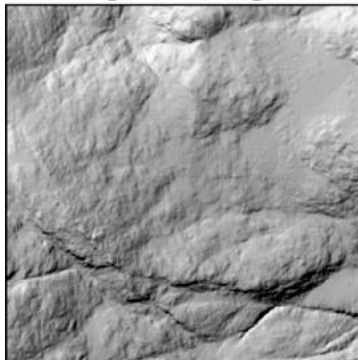
10.3 Analyse og resultat

I arbeidet ble det valgt ut fire scenarier for analysen:

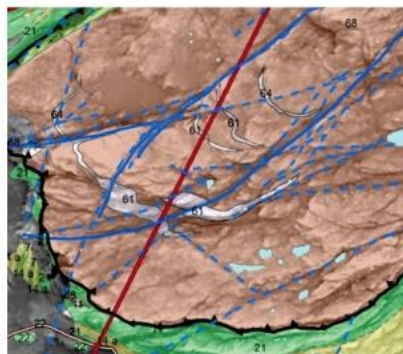
Scenario 1 Innlekkasjepunkt ved krysning av sprekker med tunneltraséen, Scenario 2 har en 50 m bred buffersone langs tunneltraséen, i Scenario 3 er denne buffersonen rundt tunneltraséen økt til 100 meter. I Scenario 4 er det valgt å legge en 20 m bred buffersone langs lineamenter (Figur 10-10-2).

² Sammendrag av «En analyse av potensialet for innlekkasje av vann for Forbordsfjelltunnelen - Nye E6 mellom Kvithammer og Åsen i Trøndelag Fylke». NGU RAPPORT. 2019.005, av Anna Seither, Atle Dagestad og Guri Venvik.

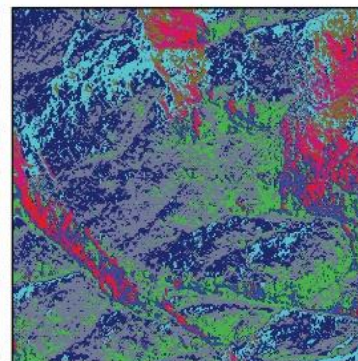
Datagrunnlag



DEM

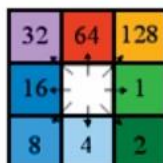


Bedrock geology

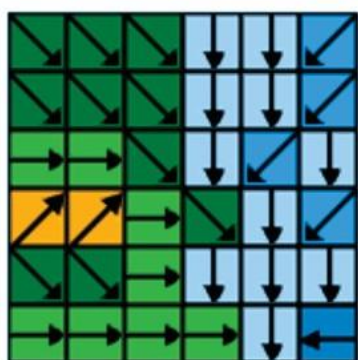


Water flow direction

Metode



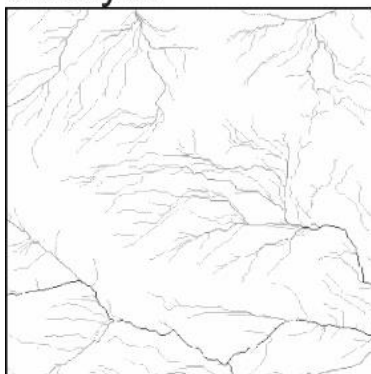
Strømningsretning



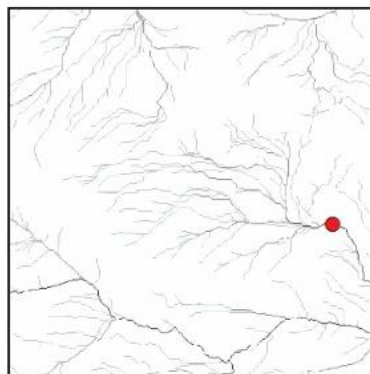
Strømningsveier

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	1

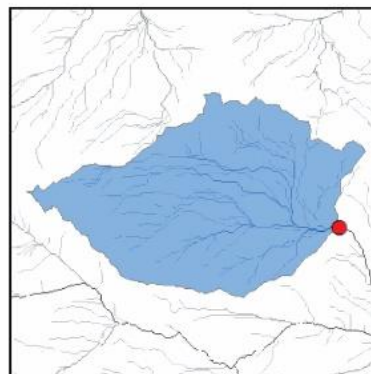
Analyse



Strømningsveier



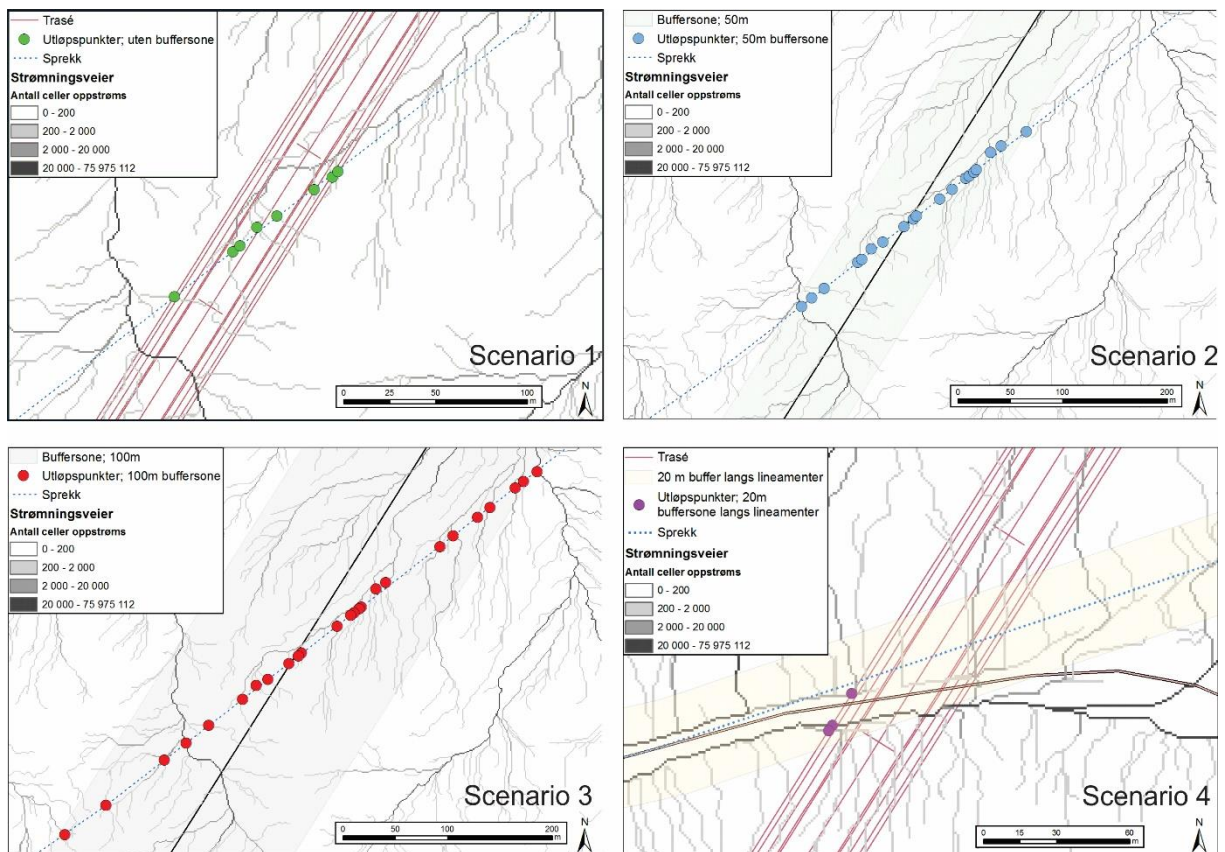
Punktkilde



Nedbørsfelt til punkt

Figur 10-1: Skjematisk fremstilling av datagrunnlag, metode og analyse som er brukt i arbeidet for analyse av potensialet for innlekkasje av vann i Forbordsfjelltunnelen.

Lineamentene vist i kartgrunnlaget er avledet fra berggrunnskart målestokk 1:250 000 og 1:50 000, samt tolket fra Lidardata med målestokk 1:50 000. Lineamentene har dermed noe større unøyaktighet knyttet til plasseringen i forhold til målestokk som brukes i nedbørsfeltanalysen (mellom 1:1000 og 1:500). Dette kan gi store utslag i beregninger av nedbørsfelt. Derfor er det valgt å legge en buffersone rundt lineamentene i scenario 4 (Figur 10.2). Et eksempel på dette er lineamentet som utgjør Langsteindalen. Dette lineamentet er stedvis tegnet inn slik at det ligger i dalsidene og ikke nede i dalbunnen, for eksempel der hvor tunneltraséen krysser Langsteindalen, som vist i Figur 10.2. For å kompensere for unøyaktigheter i plassering av lineamentet er det utført nedbørsfeltberegninger med 20 meter buffersone på begge sider av lineamentet. I beregningene i scenario 4 er det ikke benyttet buffersone langs tunneltraséen.



Figur 10-10-2: Eksempel for plassering av innlekkasjepunkter ved krysning av en sprekk med tunneltraséen, ved de fire scenarioene som er valgt. I **scenario 1** er innlekkasjepunktene satt der lineament krysser tunneltrase (oppe til venstre). I **scenario 2** er det lagt en 50 meter bred buffersone på tunneltraseen for å fange opp vannførende sprekker som ikke er kartlagt (oppe høyre). I **scenario 3** er buffersonen rundt tunneltraseen økt til 100 meter (nede venstre). I **scenario 4** er buffersonen langs lineamentene har en bredde på 20 m på begge sider. Utsnittet på kartet viser krysningen mellom tunnel og lineament i Langsteindalen (nede høyre).

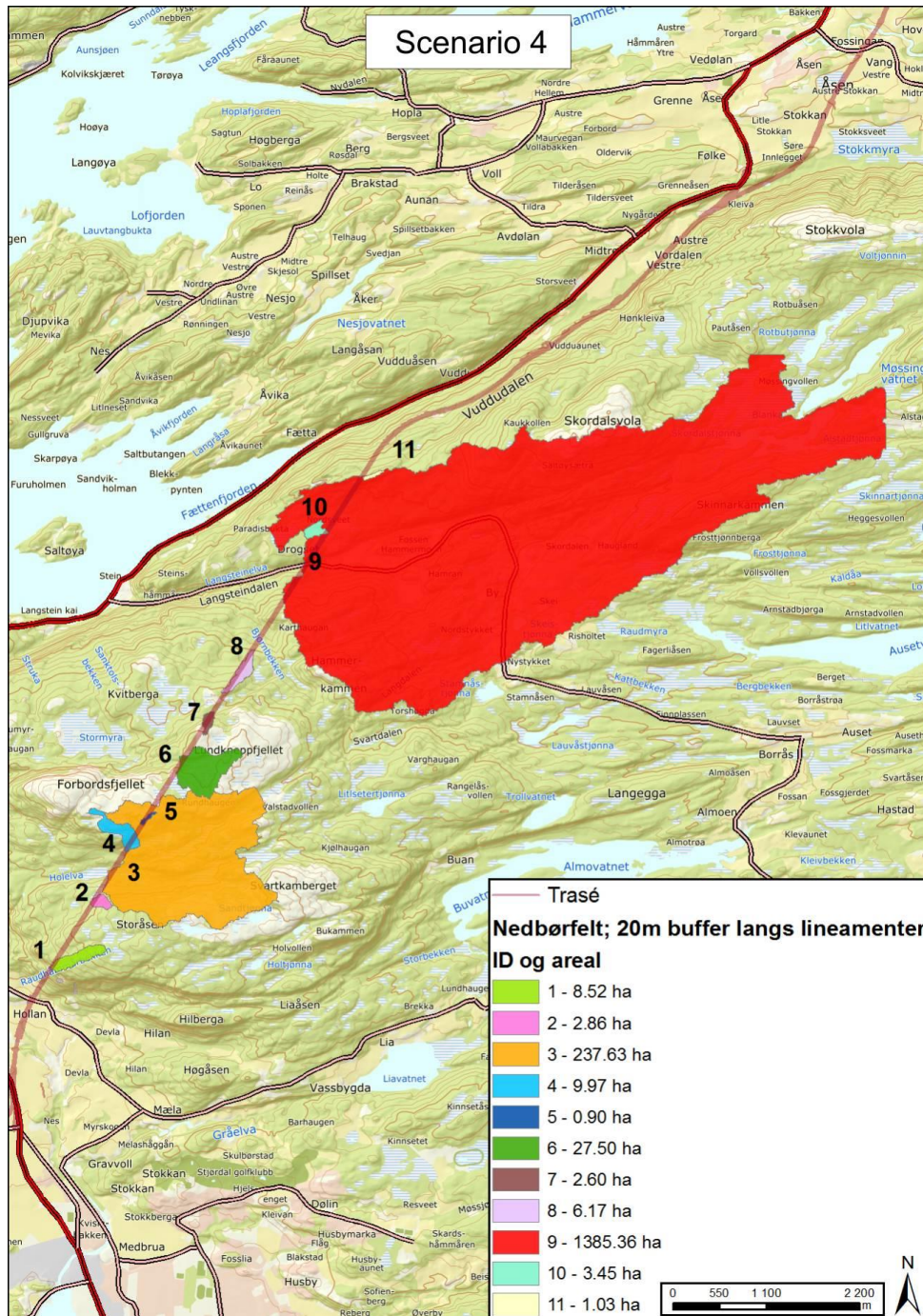
I dette sammendraget er det valgt å kun vise resultater fra scenario 4, som inkluderte en buffersone på 20 m på begge sider av lineamentene (Figur 10-3), fordi den analysen har størst betydning for tunnelbygging. Nedbørsfelt 9, som drenerer til krysspunktet av tunneltraséen med Langsteindalen, blir veldig stort i dette scenarioet. Arealet øker fra 1.1 hektar i scenario 1 til over 1300 hektar. I nordøst når nedbørsfelt grensen til den tilgjengelige terrengmodellen og nedbørsfeltet er følgelig enda større enn det som er tegnet inn på kartet. Overdekket ved krysningene mellom lineamentet og tunneltraséen er kun mellom 20 og 30 m i Langsteindalen. Sannsynligheten for innlekkasje er dermed stor gitt det store nedbørsfeltet.

Resultatene er basert på antakelsen at lineamentene ikke er nøyaktig plassert på kartgrunnlaget. 2D-resistivetsprofilen som krysser Langsteindalen (Se kapittel 4, Larsen, 2019) viser en svakhetsone i dalbunnen, noe som støtter antakelsen for scenario 4.

Nedbørsfelt 3 er også veldig stort, men endrer seg ikke mye i størrelsen sammenlignet med scenario 1. Nedbørsfelt 6 blir betydelig større enn i scenario 1-3, men ved krysningpunktet mellom lineamentet og tunneltraséen er overdekket på 400 m over tunnelen og sannsynligheten for innlekkasje er derfor liten. For andre resultater se hovedrapporten (Seither o.a. 2019a, NGU Rapport 2019.005).

Fire forskjellige scenarioer er gitt for analysen, der potensialet for innlekkasje hvor lineamenter krysser tunneltraséen er beregnet ut ifra nedbørsfeltet. Scenario 1 er det enkleste, hvor det ikke er lagt inn noen buffersoner rundt tunneltraséen. Her er det lineamentet ved Fordbordfjellet som får størst potensialet for innlekkasje, nedbørsfelt 3. I scenario 2 er det gitt en buffersone på 50 meter på hver side av tunneltraséen for å fange opp flere lineamenter som potensielt kan berøre tunneltraséen. Dette gir tilsvarende resultat som 1, men nedbørsfeltene øker i areal. I scenario 3 er buffersonen økt til 100 meter. I denne analysen er

det flere lineamenter som blir utslagsgivende for innlekkasje for tunneltraséen. For scenario 4 er en 20 meter buffersone lagt til på hver side av lineamentene. Dette er gjort for å kompensere for mulig unøyaktig plassering av lineamenter på kartgrunnlaget. Dette har vist seg å ha stor effekt på beregninger av lekkasjepotensialet, der spesielt lineamentet i Langsteindalen fremkommer med meget stort potensiale for innlekkasje, nedbørsfelt 9 (Figur 10-3). I tillegg er nedbørsfelt 3 ved Forbordsfjellet fortsatt stort og lineamentet har følgelig stort innlekkasjepotensial.



Figur 10-3: Kart som viser nedbørsfelt til potensielle innlekkasjepunkter i scenario 4 = 20 m buffersone langs lineamenter. Inntegnede lineamenter (basert på DTM 10 m), representerer potensielle svakhetssoner, tolket som sprekker eller sprø forkastninger.

Overdekning til tunneltraséen vil normalt påvirke potensialet for innlekkasje, der liten overdekning gir større innlekkasjepotensial. Lineamentet som krysser tunneltraséen i Langsteindalen har liten overdekning, rundt 20-30 meter, noe som gjør at dette området bør få spesielt mye oppmerksomhet i videre planlegging av Forbordsfjelltunnelen.

For å øke forståelsen for risikoen for innlekkasje til Forbordsfjelltunnelen er det nødvendig med oppfølgende kartlegging i felt. Feltobservasjoner kan angi fallretning på lineamentene, grad av oppsprekking, og om sprekene er åpne og kan føre vann. Dette gjelder spesielt lineamentet som er tilknyttet nedbørsfelt 3 og nedbørsfelt 9, 10, 11, som har stort nedbørsfelt og dermed stort lekkasjepotensial.

11. KONKLUSJONER

1. Sammenstilling og harmonisering av åtte berggrunnskart langs ny planlagt E6 gjennom Trøndelag gir et forbedret grunnlag for valg av traséer og effektiv bruk av utsprengt masse. Berggrunnen langs den nye E6-traséen gjennom Trøndelag består i stor grad av lavmagnetiske metavulkanitter (grønnsteiner) og metasedimenter.
2. Det er utviklet et nytt aktsomhetskart for tunnelplanlegging basert på den vertikaldेरiverte av en 10x10 m høydemodell. Denne filtreringsmetoden beskriver kjente dypforvitningslokaliteter bedre enn andre filtreringsmetoder som ble testet (horisontalderiverte og andrederiverte [kurvatur]).
3. SKYTEM transient EM målinger gir informasjon om marin leire og svartskifer. Den vertikaldेरiverte av beregnet resistivitet gir også informasjon om dypforvitningssoner (f.eks. Tronggjelet som ligger 200 m sør for Væretunnelen).
4. Resistivitetmålinger på bakken (ERT-profiler) viser en markert, ca. 20 m bred leirromvandlet sone i Langsteindalen og grafittholdige fyllitter ved Kvithammar (sørlige påhugg til Forbordsfjelltunnelen). Nordlig påhugg i Vuddudalen består sannsynligvis av massive, friske bergarter (konglomerat).
5. Resistivitetmålinger over Tronggjelet 200 m sør for eksisterende Væretunnel viser at gjeldet skyldes en ca. 20 m bred Ø-V-gående leirholdig svakhetssone. Den representerer sannsynligvis en dypforvitningssone av samme type som i Styggdalen. En smalere (5-10 m bred) NØ-SV-gående svakhetssone krysser Væretunnelen.
6. Resistivitetmålinger over planlagt miljøttunnel ved Åsen antyder kvikkleire i undergrunnen. Dyp til fjell varierer langs profilet, fra ca. 25 m i sør til 0 m i nord.
7. XRD-analyser av leirholdige svakhetssoner fra Vuddudalen, Langsteindalen, Muruvik og Geilhaugen (ved Kvithammar) viser alle innehold av smektitt (svelleleire), men målinger av svelletrykk gir lave verdier.
8. Prøver fra borehull B i Langsteindalen inneholder 4-5 % smektitt.
9. En 3D modell av berggrunnen ned til et dyp på 800 m langs traséen fra Åsen til Ulsberg er laget.
10. Det er ikke funnet indikasjoner på karstdannelse ved de planlagte tunnelpåhuggene til Forbordsfjelltunnelen.
11. Materialtekniske analyser viser at kvaliteten for flere av bergartene som kan opptre langs vegtraséen mellom Åsen og Ulsberg kan være egnet til vegfundament (bære- og forsterkningslag). Det er lite sannsynlig at bergartsmaterialet vil tilfredsstille kravene for tilslag i vegdekke med høy trafikkbelastning.
12. Utsprengte masser av akseptabel kvalitet bør i størst mulig grad utnyttes som byggeråstoff, enten internt i byggprosjektet eller ved andre prosjekter, framfor å bli kjørt på deponi. Ved anlegg der det produseres store mengder med overskuddsmasser bør en vurdere muligheten for mellomlagring for eventuelt senere bruk.
13. InSAR data langs planlagt E6 trasé gir ikke mange tegn på bevegelse. Men innenfor nåværende infrastruktur er det generelt dårlig med dekning på InSAR kartet fordi områdene er dekt av vegetasjon.
14. Der er utført en GIS-analyse av potensialet for vannlekkasje i den planlagte traséen for Forbordsfjelltunnelen. Lineamentet som krysser tunneltraseen i Langsteindalen har liten overdekning, kun 20-30 meter, noe som gjør at området bør få spesielt mye oppmerksomhet i videre planlegging av Forbordsfjelltunnelen.

12. REFERANSER

- ABEM. (2012). *ABEM Terrameter LS. Instruction Manual, release 1.11*. Sundbyberg: ABEM Instrument AB, Sweden.
- Banks, D., Rohr-Torp & Skarphagen, H. 1992: An integrated study of a Precambrian granite aquifer, Hvaler, Southeastern Norway. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin 422*, 47-66.
- Baranwal, V.C. & Olesen, O. 2012: Aktsomhetskart for tunnelplanlegging, Østlandsområdet, Geofysisk tolkning av dypforvitring, Ver. 2, M 1:150.000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Baranwal, V.C., Olesen, O. & Rønning J.S. 2013: Preparation of Action map for tunnel planning around Oslo region: Mapping of deep-weathered weak zones. NGU Report 2013.003, 26 pp.
- Baranwal, V.C., Olesen, O. & Rønning, J.S. 2016: Action map for tunnel planning, Oslofjord – Telemark region: Mapping of deeply-weathered weakness zones. NGU Report 2016.015, 29 pp.
- Baranwal V.C., Brønner M., Olesen O. & Nasuti A., 2017: Rock construction awareness map from South Norway. NGU report 2017.048, 38 pp.
- Brønner, M., Dalsegg, E., Fabian, K., Rønning, J.S. & Tønnesen, J.F. 2012: Geophysical methods. In Olesen, O., Bering, D., Brønner, M., Dalsegg, E., Fabian, K., Fredin, O., Gellein, J., Husteli, B., Magnus, C., Rønning, J.S., Solbakk, T., Tønnesen J.F. & Øverland, J.A. (eds.): Tropical Weathering In Norway, TWIN Final Report. NGU Report 2012.005, pp. 19–26.
- Brønner, M., Olesen, O., Dalsegg, E., Larsen, B.E. & Rønning, J.S. 2015: Deeply weathered basement along the Norwegian coast and implications for the strandflat. In Olesen, O., Baranwal, V.C., Brønner, M., Dalsegg, E., Dumais, M.-A., Gellein, J., Gernigon, L., Heldal, T., Larsen, B.E., Lauritsen, T., Lutro, O., Maystrenko, Y., Nasuti, A., Roberts, D., Rueslåtten, H., Rønning, J.S., Slagstad, T., Solli, A. & Stampolitis, A. (eds.): Coop Phase 2 Crustal Onshore-Offshore Project. *NGU Report 2015.063*, 81–106.
- Dahlin, T. 1993: *On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Dr. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University*, 187 pp. ISBN 91-628-1032-4.
- Dahlin, T., & Zhou, B. 2006: Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D. *Near Surface Geophysics 4, No 2*, 113-123.
- Erichsen, E. & Finne, T.E. 2019: Nye Veier, E6 trasé Ranheim-Værnes. Bruksegenskaper til bergartsmateriale langs traséen. NGU Rapport 2019.010, 20 s.
- Fredin, O., Viola, G., Zwingmann, H., Sørli, R., Brønner, M., Lie, J.-E., Grandal, E.M., Margreth, A., Vogt, C. & Knies, J., 2017: The inheritance of a Mesozoic landscape in western Scandinavia. *Nat. Commun. 8*, 14879 doi: 10.1038/ncomms14879.
- Ganerød, G. V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B. & Braathen, A., 2006: Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bull Eng Geol Env 65*, 231 – 243). ISSN: 1435-9529 (Paper) 1435-9537 (Online).
- Geosoft 2018: Oasis Montaj 9.4: Mapping and Processing System. Geosoft, Toronto, Canada.
- Gromet, L.P. & Roberts, D. 2016: U-Pb ages of felsic rocks in the Forbordfjell ophiolite fragment, Støren Nappe, Mid-Norwegian Caledonides. *Norwegian Journal of Geology 96*, 1-9.
- Huseby, F.C.A. 1968: Lieråsen tunnel. Del II: Geofysiske og videre geologiske undersøkelser. *Tekniske meddelelser – NSB, teknisk tidsskrift for Norges Statsbaner 3*, 11 s.
- Ihlen, P.M., Ineson, P.R. & Mitchell, J.G. 1978: K–Ar dating of claymineral alteration associated with ore deposition in the northern part of the Oslo Region. In Neumann, E.-R. & Ramberg, I.B. (eds.): *Petrology and Geochemistry of Continental Rifts*, Dordrecht, D. Reidel Publ. Comp., pp. 255–264.
- Ihlen, P.M., Ineson, P.R., Mitchell, J.G. & Vokes, F.M. 1984: K–Ar dating of dolerite dykes in the Kongsberg–Fiskum District, Norway, and their relationships with the silver and base metal veins. *Norsk Geologisk Tidsskrift 64*, 87–96.
- Ineson, P.R., Mitchell, J.G. & Vokes, F.M. 1975: K–Ar dating of epigenetic mineral deposits: An investigation of the Permian metallogenic province of the Oslo Region. *Economic Geology 70*, 1426–1436.

- Ineson, P.R., Mitchell, J.G. & Vokes, F.M. 1978: Further K–Ar determinations on clay mineral alteration associated with fluorite deposition in southern Norway. In Neumann, E.-R. & Ramberg, I.B. (eds.): *Petrology and Geochemistry of Continental Rifts*, Dordrecht, D. Reidel Publ. Comp., pp. 265–275.
- Kirkemo, K. 2000: Tunneldrift for 88 år siden. *GEO* 5, 40-41.
- Kitchka A.A., Kuzmanenko G.O., Shnyukova K.Ye., Solomyanyi A.R., Kozar M.O., Shurko M.M., Kutas R.I., Petrovskyy O.P., Fedchenko T.O. & DEPROIL Ltd. Team 2016: Multidisciplinary Research of the Weathered Crystalline Crust (WCC) in Ukraine - Crustal Onshore-Offshore Project (Coop3). *NGU Report 2016.051*, 316 pp.
- Kresić, N. 1988: Karst i pećine Jugoslavije
- Larsen, B.E. 2019: Resistivitetsundersøkelser Ranheim-Åsen. I *Kapittel 4 i Forundersøkelser E6 trasé Åsen-Ulsberg, Coop3 for Nye Veier*. Olesen, O., Baranwal, V.C., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Knežević, J., Larsen, B.E., Pettersen, E., Redfield, T.F., Rueslåtten, H.G., Raaness, A., Schönenberger, J., Seither, A., Slagstad, T., Svendby, A.K & Venvik, G. (red.). NGU Rapport 2019.025, 41-53.
- Lidmar-Bergström, K. 1995: Relief and saprolites through time on the Baltic Shield. *Geomorphology* 12, 45-61.
- Lidmar-Bergström, K., Olsson, C.D. & Roaldset, E. 1999: Relief features and palaeoweathering remnants in formerly glaciated Scandinavian basement areas. In: Thiry, M. & Simon-Coinçon, R. (eds.): *Palaeoweathering, palaeosurfaces and Related Continental Deposits*. International Association of Sedimentologists, Special Publications 27, 275-301.
- Loke, M.H. 2017: RES2DINV ver. 3.4. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual Res2DInv 4.07., [//www.geotomosoft.com/](http://www.geotomosoft.com/).
- Låg, J. 1945: Weathering of syenite in Kjøse, Vestfold. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 25, 216-224.
- Midland Valley. 2018. *3D Move Release Notes 2018.2*. User Manual, Edingburgh: Petroleum Experts Ltd.
- Nasuti, A., Olesen, O., Barnawal, V. & Dumais, M.A. 2015: Compilation of aeromagnetic data. In Olesen, O., Baranwal, V.C., Brønner, M., Dalsegg, E., Dumais, M.-A., Gellein, J., Gernigon, L., Heldal, T., Larsen, B.E., Lauritsen, T., Lutro, O., Maystrenko, Y., Nasuti, A., Roberts, D., Rueslåtten, H., Rønning, J.S., Slagstad, T., Solli, A. & Stampolitis, A. (eds.): *Coop Phase 2 Crustal Onshore-Offshore Project*. NGU Report 2015.063, pp. 11–24
- NGI, 2016: AEM-målinger Trondheim S - Stjørdal, Datarapport, NGI report No. 20150686-01-R, 59 pp.
- Olesen, O. 2004: Problemene skyldes dypforvitring. *GEO* 7, 18-20.
- Olesen, O. 2006: Aktsomhetskart for tunnelplanlegging, Østlandsområdet, Geofysisk tolkning av dypforvitring, M 1:100.000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Olesen, O., 2014: Strandflaten – ett skritt nærmere en løsning på gåten. *GEO* 17-5 , 48-52.
- Olesen, O. 2017: Valkyrien-thriller fra virkeligheten. Retro-spalte. *Anleggsmagasinet* 4, 2017, 104-106.
- Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, J., Henriksen, H., Kihle, O. & Lundin, E. 2007: Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region – a new tool for improved planning of tunnels. *Norwegian Journal of Geology* 87, 253-267.
- Olesen O., Brønner M., Ebbing J., Gellein J., Gernigon L., Koziel J., Lauritsen T., Myklebust R., Pascal C., Sand M., Solheim D. & Usov S., 2010: New aeromagnetic and gravity compilations from Norway and adjacent areas: methods and applications. *Geol. Soc. London, Petroleum Geology Conference series*, 7, 559-586.
- Olesen, O., Bering, D., Brønner, M., Dalsegg, E., Fabian, K., Fredin, O., Gellein, J., Husteli, B., Magnus, C., Rønning, J.S., Solbakk, T., Tønnesen J.F. & Øverland, J.A. 2012: Tropical Weathering in Norway, TWIN Final Report. *NGU Report 2012.005*, 188 pp.
- Olesen, O., Kierulf, H.P., Brønner, M., Dalsegg, E., Fredin, O. & Solbakk, T. 2013: Deep weathering, neotectonics and strandflat formation in Nordland, northern Norway. *Norwegian Journal of Geology* 93, 189–213.
- Olesen, O.; Baranwal, V.C., Brønner, M., Dalsegg, E., Dumais, M.-A., Gellein, J., Gernigon, L., Heldal, T., Larsen, B.E., Lauritsen, T., Lutro, O., Maystrenko, Y., Nasuti, A., Roberts, D., Rueslåtten, H., Rønning, J.S., Slagstad, T., Solli, A., Stampolidis, A. 2015: Coop Phase 2 Crustal Onshore-Offshore Project, NGU report: 2015.063 (410 pp.)
- Palmstrøm, A., Nilsen, B., Borge Pedersen, K. & Grundt, L. 2003: Miljø og samfunnstjenlige tunneler. Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. *Vegdirektoratet, Teknologivdelingen Publikasjon 101*, 132 s.
- Reusch, H.H. 1878: lagttagelser over isskuret Fjeld og forvitret Fjeld. *Christiania Videnskabs-Selskabs Forhandl.* 7, 1-28.

- Reusch, H.H. 1902: Vore dale og fjelde. Hvordan formen af Norges overflade er dannet. *Naturen* 26, 29-142.
- Reynolds, J.M. 2011: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Chichester, West Sussex: Wiley-Blackwell.
- Riis, F. 1996: Quantification of Cenozoic vertical movements of Scandinavia by correlation of morphological surfaces with offshore data. *Global and Planetary Change* 12, 331–357.
- Roaldset, E., Riis, F., & Johnsen, S.O. 1993: Weathered basement rocks below Mesozoic sediments, Norwegian North Sea. In D. Ford, B. McCann & S. Vajoczki (eds.): *Third International Geomorphology Conference, 23-28 August, Hamilton, Ontario, Canada, Programme with Abstracts*, p. 229.
- Roberts, D. 1985: Frosta, Berggrunnskart 1622-2. M 1:50.000, foreløpig utgave. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Rueslåtten, H.G., Schönenberger, Olesen, O. & Slagstad, T. 2019: Mineralsk sammensetning av noen forvittringssoner i Trøndelag. I *Kapittel 5 i Forundersøkelser E6 trasé Åsen-Ulsberg, Coop3 for Nye Veier*. Olesen, O., Baranwal, V.C., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Knežević, J., Larsen, B.E., Pettersen, E., Redfield, T.F., Rueslåtten, H.G., Raaness, A., Schönenberger, J., Seither, A., Slagstad, T., Svendby, A.K & Venvik, G. (red.). NGU Rapport 2019.025. 55-81.
- Rønning, J.S. 2003: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser. Statens vegvesen, Publikasjon nr. 102.
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H. & Storrø, G. 2003: Characterization of fracture zones in bedrock using 2D resistivity. Proceedings 9th EEGS Meeting in Prague, P005.
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Dehls, J.F., Haase, C., Nordgulen, Ø., Olesen, O., Saintot, A. & Solli, A. 2006: Geological and geophysical investigations for the ROGFAST project. NGU Rapport 2006.076, 91 s.
- Rønning, J.S., Olesen, O., Dalsegg, E., Elvebakk, H. & Gellein, J. 2007: Dypforvitring i Oslo-regionen. Påvisning og oppfølgende undersøkelser. NGU Rapport 2007.034. 50 s.
- Scott, K.M. & Pain, C.F. 2008 (eds.): *Regolith science*. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia and Springer, Dordrecht, The Netherlands, 461 pp.
- Seither, A., Dagestad, A. & Venvik, G. 2019a: En analyse av potensialet for innlekkasje av vann for Forbordsfjelltunnelen. Nye E6 mellom Kvithammar og Åsen i Trøndelag fylke. NGU rapport 2019.005. 26 s.
- Seither, A., Dagestad, A. & Venvik, G. 2019b: En analyse av potensialet for innlekkasje av vann for Forbordsfjelltunnelen - Nye E6 mellom Kvithammar og Åsen i Trøndelag fylke. I *Kapittel 10 i Forundersøkelser E6 trasé Åsen-Ulsberg, Coop3 for Nye Veier*. Olesen, O., Baranwal, V.C., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Knežević, J., Larsen, B.E., Pettersen, E., Redfield, T.F., Rueslåtten, H.G., Raaness, A., Schönenberger, J., Seither, A., Slagstad, T., Svendby, A.K & Venvik, G. (red.). NGU Rapport 2019.025, 99-103.
- Solberg, I.-L., Hansen, L., Rønning, J. S., & Dalsegg, E. 2011: Veileder for bruk av resistivitetmålinger i potensielle kvikkleireområder. NGU Rapport 2010.048.
- Sturt, B., Dalland, A. & Mitchell, J. 1979: The age of the Sub-Mid-Jurassic tropical weathering profile of Andøya, northern Norway, and the implications for the Late Palaeozoic palaeogeography in the North Atlantic region. *Geologische Rundschau* 68, 523-542.
- Svendby, A.K, Pettersen, E. & Redfield, T. 2019: Harmonisering av eksisterende berggrunnskart i målestokk 1:50.000 og 1:250.000 langs den planlagte utbyggingstraséen for E6 fra Ulsberg til Åsen. I *Kapittel 2 i Forundersøkelser E6 trasé Åsen-Ulsberg, Coop3 for Nye Veier*. Olesen, O., Baranwal, V.C., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Knežević, J., Larsen, B.E., Pettersen, E., Redfield, T.F., Rueslåtten, H.G., Raaness, A., Schönenberger, J., Seither, A., Slagstad, T., Svendby, A.K & Venvik, G. (red.). NGU Rapport 2019.025, 11-20.
- Sørensen, R. 1988: In-situ rock weathering in Vestfold, southeastern Norway. *Geografiska annaler* 70, 299-308.
- Wolff, F.C. 1989: Berggrunnskart M 1:250.000 Trondheim. 3. opplag med rettinger. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.

Lenker:

Industrimineraldatabasen, NGU (2019): http://geo.ngu.no/kart/mineralressurser_mobil/

FKB data Kartverket (November 2018)

LidarData Kartverket (November 2018)

Berggrunnskart: http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil

Brønndatabasen Granada: http://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/

Løsmassekart: http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/



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