

**NGU RAPPORT
2019.003**

Grunnundersøkelser ved Raudsand,
Neset kommune, Møre og Romsdal.
Supplerende undersøkelser i 2019.



Rapport nr.: 2019.003		ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)		Gradering: Åpen	
Tittel: Grunnundersøkelser ved Raudsand, Nesset kommune i Møre og Romsdal. Supplerende undersøkelser i 2019.					
Forfatter: Jan S. Rønning, Vikas Baranwal, Marco Brønner, Harald Elvebakk, Carl Fabian, Claudia Haase, Håkon Rueslåtten og Henrik Schiellerup			Oppdragsgiver: Bergmesteren Raudsand as		
Fylke: Møre og Romsdal			Kommune: Nesset		
Kartblad (M=1:250.000) Ålesund			Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1320-I Tingvoll		
Forekomstens navn og koordinater: Raudsand UTM 32 V 455000 – 6967000			Sidetall: 38 Kartbilag: 0		Pris: Kr 180,-
Feltarbeid utført: Jan., Mars & Sept. 2017		Rapportdato: 25.01.2019		Prosjektnr.: 373900	Ansvarlig: <i>Oystein Nordmark</i>
Sammendrag: NGU har på oppdrag fra Bergmesteren Raudsand AS utført grunnundersøkelser ved mulig deponi for farlig uorganisk avfall i fjellhaller ved Raudsand. Det er tidligere utført geofysiske målinger fra helikopter og borehullslogging. Foreliggende rapport beskriver resultater fra magnetisk modellering av en mulig ny jernmalm, en lineamentstudie ved Raudsand og en utfyllende analyse av grunnvannskvaliteten. Magnetisk modellering uten noe magnetisk remanens har vist at den nye mulige malmkroppen kan ligge grunt og ha begrenset størrelse. Modellering med magnetisk remanens viser imidlertid at den nye mulige jernmalmen kan være betydelig større og strekke seg mye dypere enn først modellert. Uten eksakt kjennskap til den remanente magnetiseringens styrke og retning (inklinasjon og deklinasjon) blir magnetisk modellering en for usikker metode til å bestemme størrelse og beliggenhet til den nye mulige malmkroppen. Som jernmalm er dette trolig ikke drivverdig i dag. Verdien kan være mer interessant dersom denne nye mulige malmkroppen inneholder betydelige mengder vanadium som et kritisk element. Både ut fra en mulig konflikt med et deponi i haller ved havnivå og en vurdering av malmverdi anbefaler NGU tyngdemålinger med påfølgende modellering for å redusere usikkerheter knyttet til den nye mulige malmkroppens størrelse og beliggenhet. Lineamentstudiet på LIDAR-data viser at de lengste lineamentene går i ca. retning 70° – 250°, men at det finnes kortere lineamenter i flere retninger mellom de lengste. Måten disse lineamentene er prosessert frem favoriserer mulige sprekke-/forvittringssoner. NGU vurderer dette mønsteret som gunstig for etablering av lagringshaller for farlig uorganisk avfall; dette fordi det indikerer dårlig kommunikasjon mellom hoved-sprekkesystemene. Ny logging av vannkvalitet med nyrenovert sonde etter pumping viser verdier mer i samsvar med analyser for vannets elektriske ledningsevne og pH på vannprøver fra brønnene. Relativt høye verdier for elektrisk ledningsevne, pH over 7 og lav oksygenmetning i grunnvannet indikerer at vannet har oppholdt seg lenge i fjellet og vitner om lav gjennomstrømning. Dette bekreftes av relativt lav vanngiverevne i brønnene og at grunnvannet står høyt i brønnene til tross for en høyde på ca. 350 m over havet ca. 1500 m fra sjøen. Unntaket her er Bh1 som ligger utenfor hallområdet, men nært inntil adkomsttunnelen. pH-analyser på vannprøver og -logging av borehull viser svakt basisk grunnvann som bufres naturlig til pH 8,2 i berggrunnen ved Raudsand. Dette tilsier utfelling av karbonat på de vannførende sprekke og derved tetting over tid. Basisk grunnvann, slik det opptrer ved Raudsand, vil ikke løse tungmetaller fra avfallet. Det har oppstått usikkerheter knyttet til hvor dypt den mulige nye jernmalmkroppen stikker og dette bør undersøkes ved f. eks. tyngdemålinger og modellering.					
Emneord: Geofysikk		Magnetisk modellering		Jernmalm	
Lineamenter		Borehullslogging		Grunnvannskvalitet	
Eh-pH		Grunnundersøkelse		Fagrapport	

Innhold

1. INNLEDNING	7
2. TIDLIGERE VURDERINGER OG UNDERSØKELSER.....	7
3. VURDERING AV DEN NYE MALMKROPPENS STØRRELSE OG VERDI	9
3.1 Modellering av den nye malmkroppens størrelse	9
3.1.1 Modelleringens utførelse.....	10
3.1.2 Resultater fra modellering uten remanent magnetisering	11
3.1.3 Resultater fra modellering med magnetisk remanens.....	14
3.1.4 Vurdering av modelleringsresultatene.....	17
3.2 Vurdering av den nye jernmalmsonen verdi og beliggenhet.	17
4. LINEAMENTSTUDIE PÅ LIDAR-DATA.....	19
4.1 Datagrunnlag for analyse	19
4.2 Analyse av den digitale terrengmodellen.....	19
4.3 Resultater fra analyse av digital terrengmodell.....	22
4.4 Vurdering av lineamenters opptreden.....	25
5. GRUNNVANNSKVALITET OG VEKSELVIRKNING MED BERGGRUNNEN ...	27
5.1 Ny logging med vannkvalitetssonde	27
5.1.1 Metode og utførelse	27
5.1.2 Resultater	27
5.2 Bergart-vann vekselvirkning generelt	32
5.2.1 'Sure og basiske bergarter'	32
5.2.2 Karbonatsystemet styrer pH	33
5.2.3 Grunnvannets pH og kjemiske sammensetning i Raudsand området...	34
5.2.4 Mobilitet av tungmetaller	34
5.2.5 Sulfider i malmen	35
5.3 Hydrogeologiske forhold.....	36
5.3.1 Hydraulisk kommunikasjon i grunnvannsmagasinet på Raudsand	36
5.3.2 Utskifting av vannet i grunnvannsmagasinet på Raudsand	36
6. KONKLUSJONER	37
7. REFERANSER.....	38

1. INNLEDNING

Norges geologiske undersøkelse (NGU) utførte i 2015 på oppdrag fra Miljødirektoratet en vurdering av mulige fremtidige lokaliteter for nasjonalt lager for uorganisk farlig avfall (Cramer m. fl. 2015). De gamle gruvene ved Raudsand var foreslått, men ble funnet uaktuell som deponi. I løpet av dette arbeidet kom det et forslag fra firmaet Bergmesteren Raudsand (BMR) om deponi i fjellhaller vest for gruvene ved Raudsand. Geologien i området (berggrunn-, struktur- og hydrogeologi) samt gunstige og mindre gunstige aspekter ved lagring, er beskrevet i nevnte rapport (Cramer m.fl. 2015).

På direkte forespørsel fra BMR har NGU utført grunnundersøkelser i det aktuelle området vest for Raudsand. Første fase besto i geofysiske målinger fra helikopter inklusive tolkninger av resultatene. Fase 2 omhandlet borehulls-logging og tolking av disse resultatene. En mer detaljert beskrivelse av arbeidene følger i kapittel 2. Ved nye diskusjoner rett før jul i 2018, foreslo NGU en tredje fase bestående av magnetisk modellering av størrelsen og beliggenheten til en ny jernmalmforekomst, en lineamentstudie i området rundt Raudsand og en utfyllende analyse av grunnvannsdata.

Den magnetiske modelleringen er utført av forsker Claudia Haase mens Henrik Schiellerup har sett på verdien av den nye mulige malmforekomsten. Forsker Karl Fabian har vurdert remanent magnetisering på prøver fra de gamle jernmalmgruvene ved Raudsand. Forsker Vikas Baranwal har utført lineamentstudien ved bruk av høyoppløselig LIDAR-data mens innleid konsulent Håkon Rueslåtten har sett på grunnvannskjemien og fysiske data. Harald Elvebakk utførte ny vannkvalitetslogging i september 2017. Disse data er tidligere meddelt BMR i notats form men rapporteres også her som bakgrunn for utfyllende grunnvanns-analyser.

Takk til forsker Atle Dagestad for gode diskusjoner og konstruktive innspill til rapportteksten.

2. TIDLIGERE VURDERINGER OG UNDERSØKELSER

Representanter fra firmaet BMR kontaktet NGU høsten 2016 og ba om et møte for å avklare hva NGU visste om geologien ved Raudsand ut fra tidligere tiders gruvedrift. Under diskusjoner på det avholdte møtet kom det frem at flere forhold var nyttig å få avklart, og NGU foreslo å utføre geofysiske målinger fra helikopter for å få svar på noen av de aktuelle spørsmålene:

1. Finnes det hittil ukjente jernmalmkropper i det aktuelle området for fjellhaller?
2. Finnes det dypforvitret fjell som vil skape byggetekniske problemer ved etablering av fjellhaller (stabilitetsproblemer, innlekkasje av grunnvann)?
3. Er det sulfider i bergartene som kan bidra til surt grunnvann som kan skape problemer ved avfallsdeponi i fjell?
4. Finnes det radioaktive elementer (uran og thorium) i berggrunnen i slike mengder at det kan bidra til uheldig arbeidsmiljø i lagringshallene?

NGU utførte magnetiske, elektromagnetiske og radiometriske målinger fra helikoptermålinger i det aktuelle området i begynnelsen av oktober 2016. Datainnsamling og prosessering av måledata er beskrevet i egen NGU Rapport (Ofstad 2016). En tolkning av oppnådde resultater og anbefaling om videre undersøkelser ble beskrevet i NGU Rapport 2016.043 (Rønning m.fl. 2016). Ved denne undersøkelsen ble det:

1. indikert en ny jernmalmkropp som kunne komme i kontakt med deponihaller i forlengelsen av Z-malmen.
2. påvist mulig dypforvitring som kunne skape problemer ved etablering og drift av fjellhaller
3. ikke påvist større massive sulfidforekomster, men mindre sulfid-impregnasjoner i malmkroppene kunne ikke utelukkes
4. ikke påvist dagnære unormale forhøyede konsentrasjoner av de radioaktive elementene uran, thorium og kalium, men undersøkelsene gir ingen informasjon om konsentrasjonen av radioaktive elementer mot dypet.

For å avklare disse problemstillingene nærmere, og i tillegg skaffe informasjon om bergartsfordeling, bergmassekvalitet, grunnvannets opptreden og grunnvannskjemi, anbefalte NGU grunnboringer med oppfølgende borehullslogging. I alt 5 brønner ble boret ved årsskiftet 2016-2017 og disse ble logget geofysisk av NGU i slutten av januar 2017. Brønnene ble prøvepumpet også av NGU i midten av mars 2017 og det ble tatt grunnvannsprøver for fysikalske og kjemisk analyser.

Resultatene fra NGUs borehulls-undersøkelser ble presentert i NGU Rapport 2017.024 (Rønning m.fl. 2017). Rapporten fokuserte på:

- Berggrunnsgeologi inklusive en påvist ny mindre forekomst av mulig jernmalm
- Bergmassekvalitet generelt og en mulig dypforvitringssone
- Mulige sulfider og radioaktive elementer i berget
- Grunnvannets opptreden og kvalitet
- Temperaturforhold.

På grunnlag av NGUs innsamlede data har Multiconsult foretatt en «Bergteknisk vurdering av deponi» (Arnesen 2017). Denne rapporten beskriver hvordan byggingen av deponihallene tenkes utført.

Norconsult har utført en «Miljøriskovurdering» knyttet til deponering av farlig uorganisk avfall ved Raudsand (Tuttle 2018). Denne rapporten vurderer risiko for miljøødeleggelser knyttet til deponering av farlig uorganisk avfall.

Miljødirektoratet har på grunnlag av tilgjengelig informasjon høsten 2018 vurdert etablering av avfallsdeponi i fjellhaller ved Raudsand opp mot deponi i eksisterende gruveganger ved Brevik i Porsgrunn kommune i Telemark (Svinndal 2018). Ved denne vurderingen ble det avdekket forhold som ikke var tilstrekkelig avklart ved NGUs første arbeider eller forhold som ikke var godt nok kommunisert. BMR ønsket derfor at NGU utførte noen tilleggsundersøkelser som herved rapporteres.

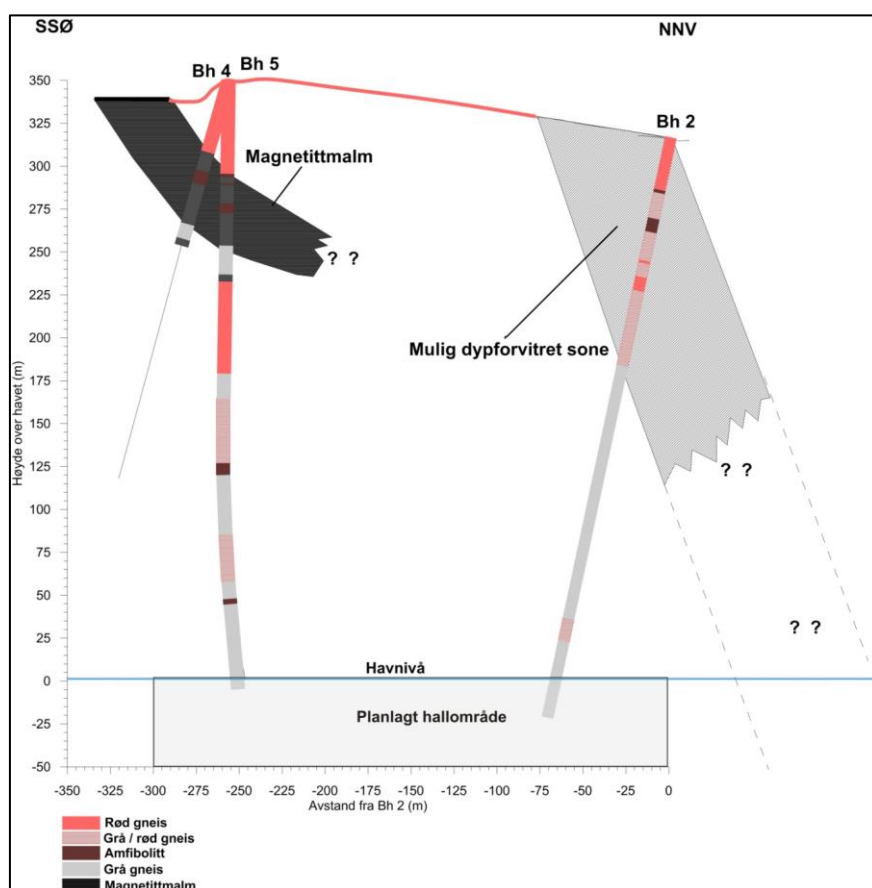
3. VURDERING AV DEN NYE MALMKROPPENS STØRRELSE OG VERDI

Magnetiske målinger fra helikopter (Ofstad 2016) avdekket en ny magnetisk kropp. Logging av to borehull som skjærer kroppen (Bh4 og Bh5, Rønning m. fl. 2016) viste så høy magnetisk susceptibilitet at dette må være en magnetittmineralisering. Størrelsen og dybde av denne er nå forsøkt vurdert ved hjelp av magnetisk modellering hvor data nevnt ovenfor benyttes. I tillegg har NGU vurdert verdien av forekomsten.

3.1 Modellering av den nye malmkroppens størrelse

Figur 1 viser en mulig tolking av den nye magnetittmalmens forløp mot dypet som vist i tidligere arbeid (Rønning m.fl. 2017). Det ble her antatt at mineraliseringen hadde utgående i dagen og forløpet mot dypet var ikke kjent. For å få klarhet i dette forløpet og det totale volum malm, er det foretatt magnetiske modellberegninger langs tre profiler. Modelleringen går ut på å finne en kropp med gitte magnetiske egenskaper som kan forklare den magnetiske anomalien målt fra helikopter. Ved denne første modelleringen kjente en ikke til mulig remanent (permanent) magnetisering av malmkroppen, noe som gjør resultatet fra modellering meget usikker.

Etter denne første modelleringsrunden har NGU skaffet informasjon om remanent magnetisering på prøver fra Z-malmen og det er foretatt modellering både uten og med remanent magnetisering.

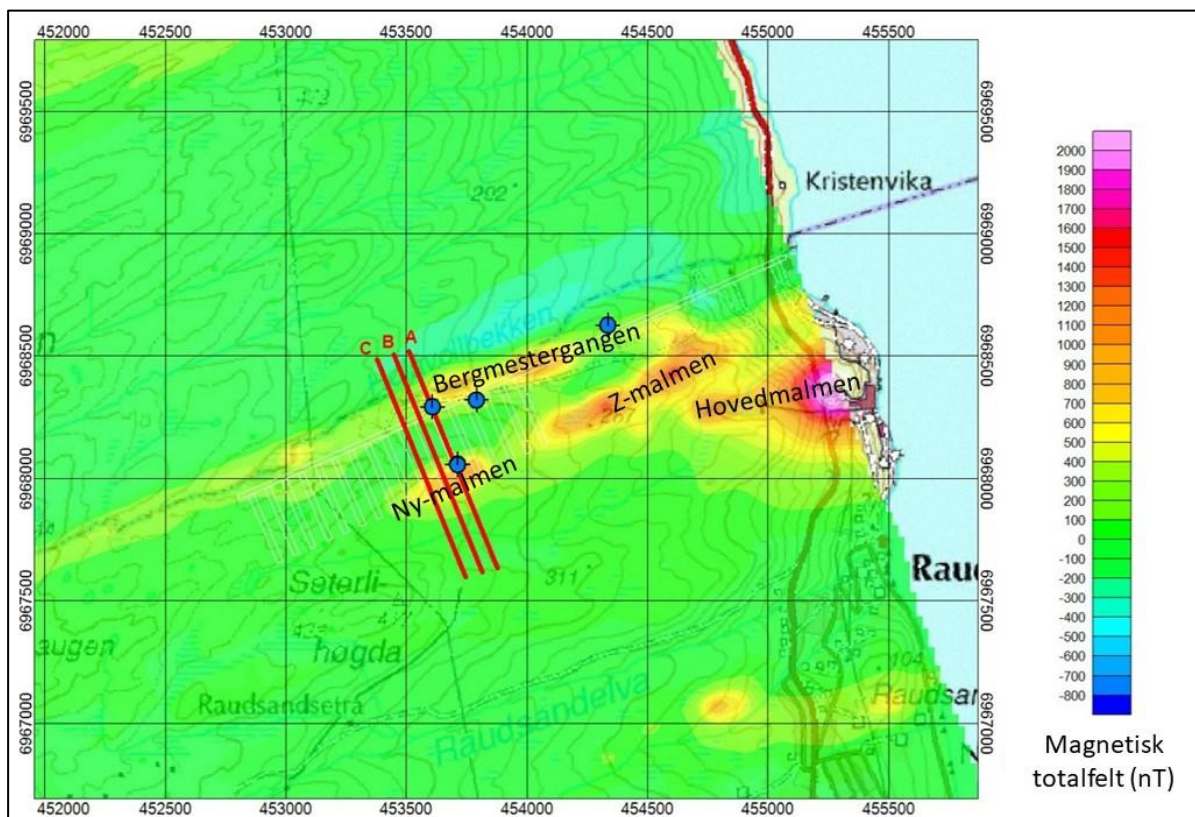


Figur 1: Berggrunnsgeologi, forløp av magnetittmalm og forløp av forvitringssone i et profil gjennom borehullene 2, 4 og 5 (fra Rønning m. fl. 2017).

3.1.1 Modelleringens utførelse

Lokaliseringen av de tre linjene som er modellert er vist i Figur 2. Modelleringen er foretatt med programmet GM-SYS 2D (Northwest Geophysical Associates Inc. 2006 og referanser deri) hvor de modellerte kroppene har uendelig utstrekning på tvers av profilet. Ved modelleringen med remanent magnetisering ble det benyttet rutiner som begrenset den magnetiske kroppens utstrekning på tvers av profilet ($2\frac{3}{4}$ D). Under modelleringen er all kjent informasjon om mineraliseringen benyttet. Mineraliseringens opptreden i Bh4 og Bh5 og manglende opptreden i Bh2 og Bh3 er lagt inn som begrensninger i mineraliseringens form. Mineraliseringens og sidebergets magnetiske susceptibilitet er hentet fra borehulls-logging i Bh4 og Bh5 (Elvebakk 2017, Rønning m. fl. 2017). Disse målingene viser en gjennomsnittlig magnetisk susceptibilitet i mineraliseringen på 0,7 (SI enhet) og maksimalverdien er 1,6. Tilsvarende middelverdi for sideberget (gneiser av ulike slag) er 0,015 (SI enhet). Ved modelleringen ble den magnetiske susceptibiliteten i den mulige nye malmsonen satt til 0,5 og dette vil da kunne estimere en maksimal størrelse av mineraliseringen. Den første modelleringen tar ikke hensyn til en eventuell remanent magnetisering men denne inkluderes i runde nummer to.

Ved modelleringen er det lagt vekt på å tilpasse en kropp som kan forklare anomalien over den nye mineraliseringen, men siden nærliggende magnetiske kropper også påvirker anomaliforløpet, er også responsen fra Bergmestergangen forsøkt modellert inn. Modelleringen er utført av forsker Claudia Haase.



Figur 2: Magnetisk anomali målt fra helikopter og lokalisering av modellerte magnetiske linjer (A, B og C) og borehullene (blå markeringer).

3.1.2 Resultater fra modellering uten remanent magnetisering

Resultatene fra modelleringene uten remanent magnetisering er vist i Figurene 3, 4, 5, og 6. Siden responsen fra Bergmestergangen også påvirker formen på anomalien over den nye mineraliseringen, er de to kroppene modellert sammen. NGU valgte her å ikke bruke så mye tid på å tilpasse anomaliforløpet mot nord-nordvest da denne delen har liten innflytelse på anomalien over den nye mulige malmsonen.

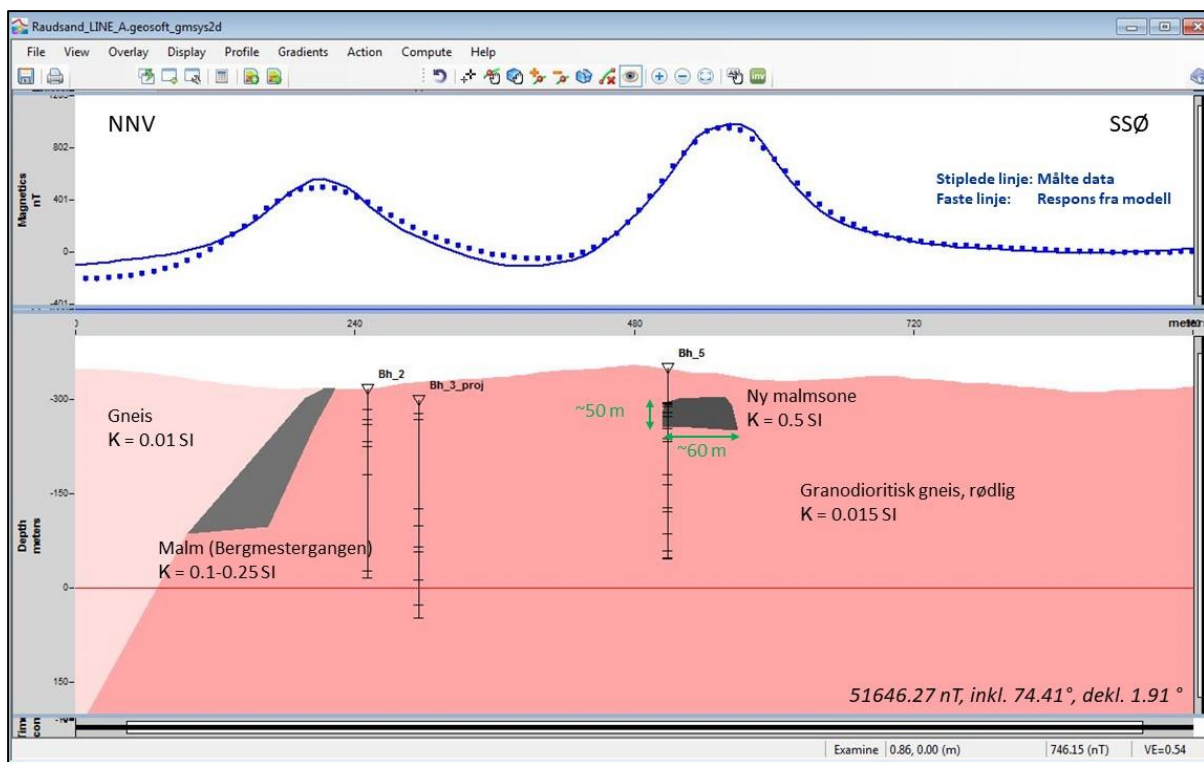
Modelleringen langs linje A (Figur 3), som ligger tilnærmet i plan med Bh2, Bh4 og Bh5, viser at anomalien over den nye mulige malm-sonen kan forklares med en kropp som er ca. 50 m høy og ca. 60 m bred. Kroppen ligger på ca. 40 meters dyp og stikker derved ikke dypere enn ca. 90 m under bakken. Dette betyr at avstand ned til de planlagte deponihallene er ca. 250 m.

Modelleringen langs de to andre linjene B og C (Figurene 4 og 5) viser tilsvarende resultater, men siden den magnetiske anomalien langs disse to linjene er noe mindre enn langs linje A (se Figur 2), blir også kroppene noe mindre. Dette betyr igjen at avstand ned til de planlagte deponihallene også her er ca. 250 m.

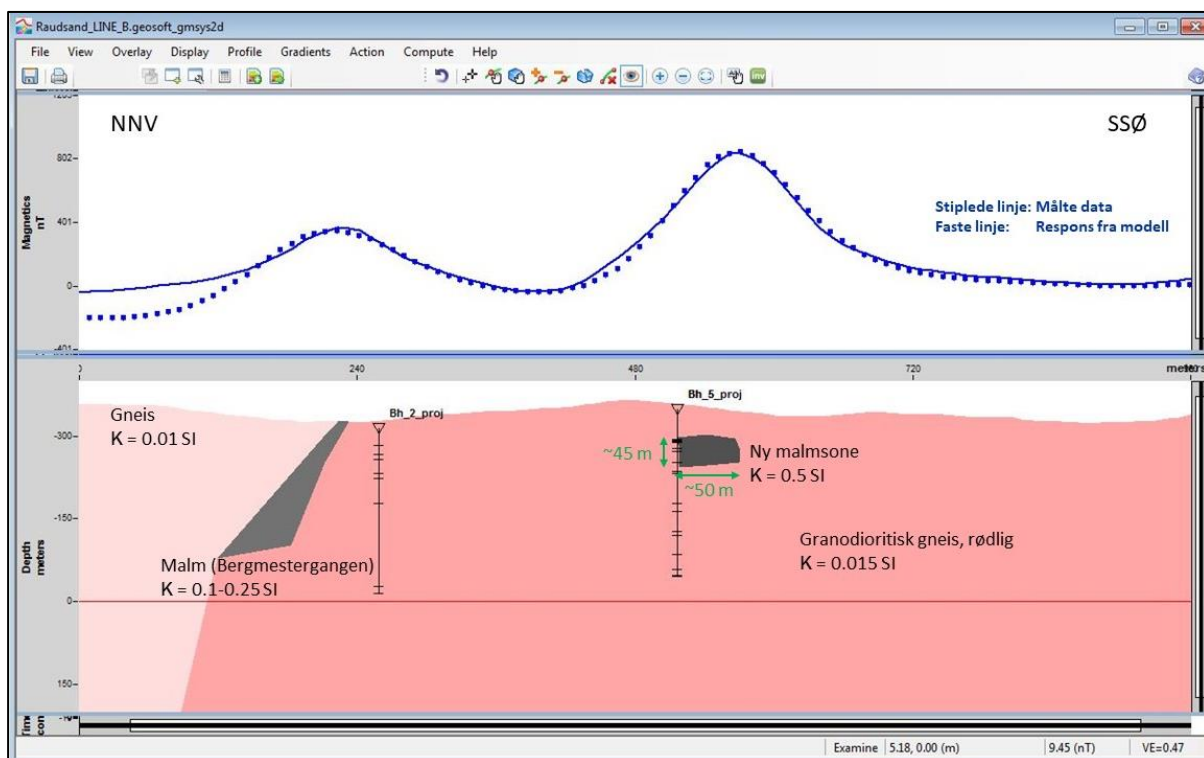
Det er også gjort et forsøk på å se hvordan anomalien over den nye mulige malm-sonen blir hvis mineraliseringen strekker seg ned til havnivå (Figur 6). Den målte anomalien er på ca. 850 nT. Dersom malmkroppen strekker seg ned til havnivå vil anomalien bli ca. 2200 nT, over dobbelt så stor.

Oppsummering.

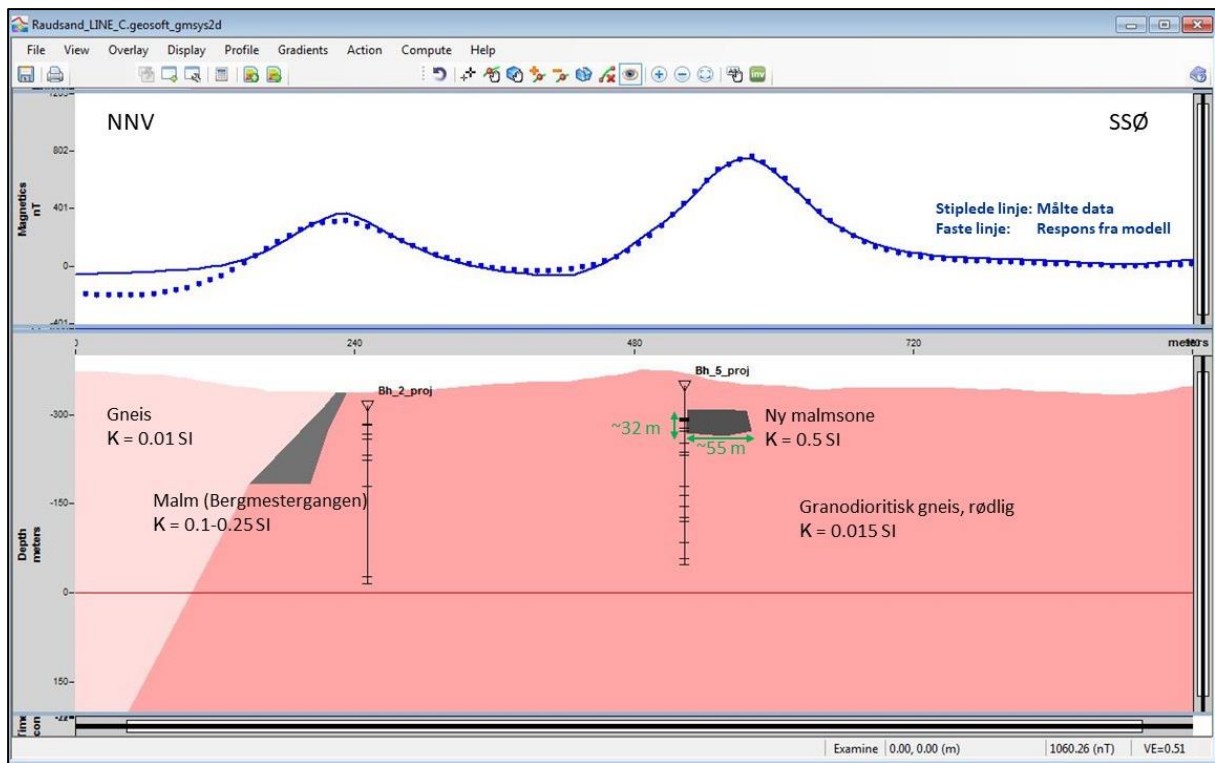
Dersom det ikke er knyttet remanent magnetisering til kroppen kan en se helt bort fra at den nye malmkroppen strekker seg vesentlig dypere enn ca. 90 m under bakken noe sted, og det vil være ca. 250 m ned til deponihallene.



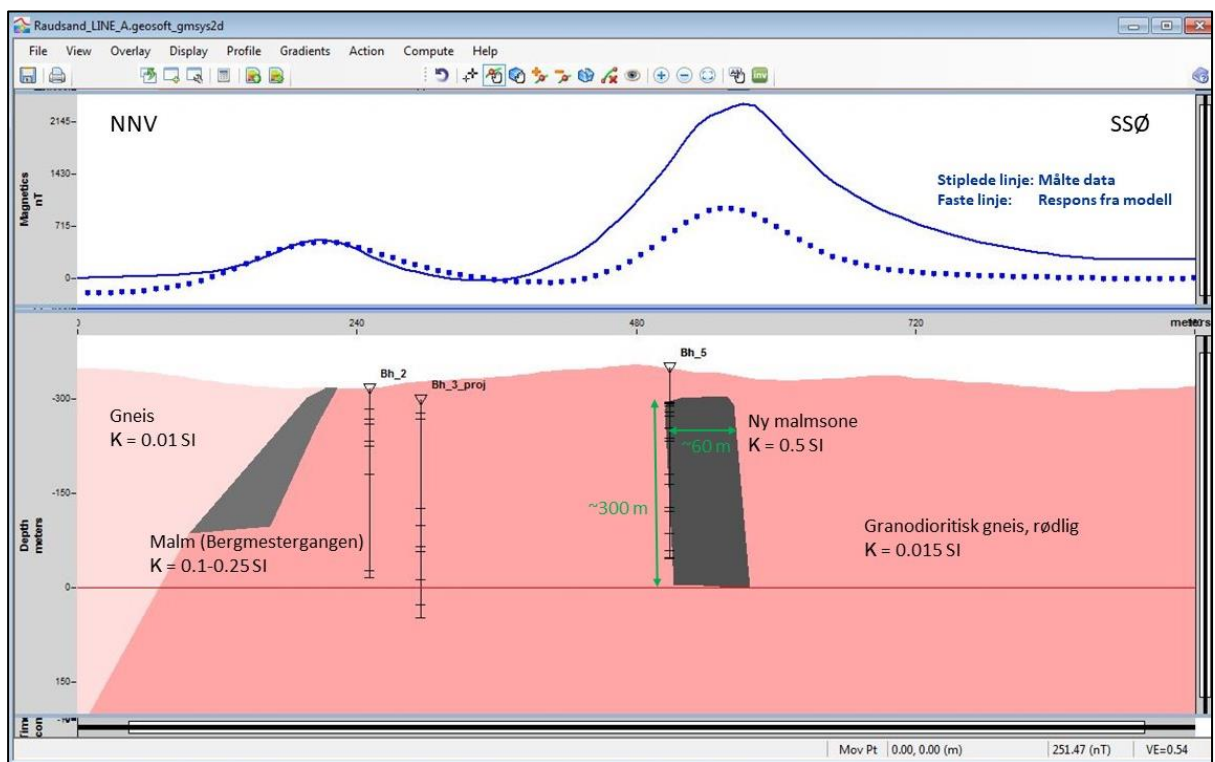
Figur 3: Magnetisk modellering langs profil A (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen.



Figur 4: Magnetisk modellering langs profil B (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen.



Figur 5: Magnetisk modellering langs profil C (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen.



Figur 6: Magnetisk modellering langs profil A hvor den nye malmsonen går ned til hallnivå som er havnivå (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen.

3.1.3 Resultater fra modellering med magnetisk remanens

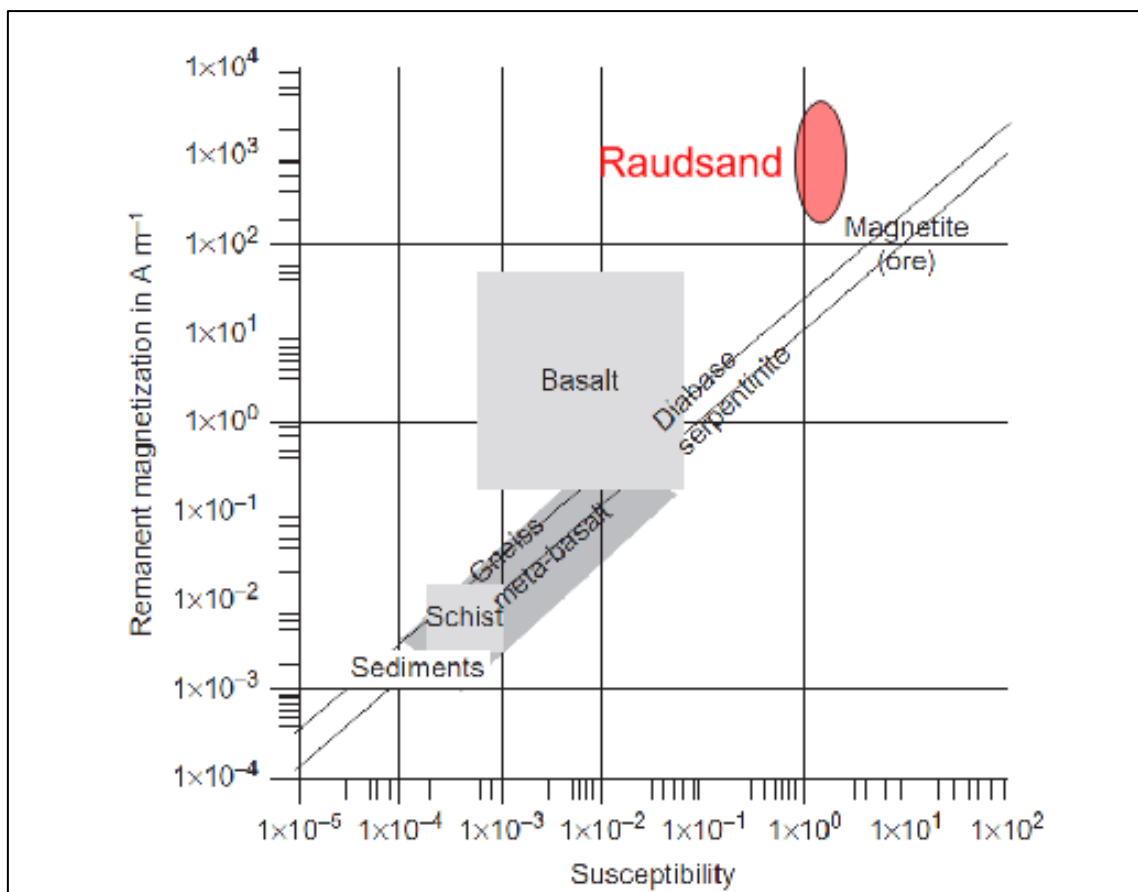
Modelleringen som først ble foretatt tar ikke hensyn til eventuell remanent magnetisering i den mulige nye malmkroppen. Remanent magnetisering kan ha meget stor betydning for resultatene av en slik modellering. Det finnes ikke prøvemateriale fra den nye mulige jernmalmineraliseringen som ligger i forlengelsen av Z-malmen (se Figur 2). For å få et bilde av mulig remanent magnetisering har NGU utført analyser på fem prøver fra Z-malmen vist i Tabell 1 (data fra NGU Lab. rapport 2019.0015). Prøvene er hentet ut fra NGUs kjernelager på Løkken.

Tabell 1: Målt tetthet og magnetisk remanens på jernmalmprøver fra Z-gangen Raudsand.

Prøve ID Bh nr. og dyp	UTM Sone	UTM X	UTM Y	Volum (cm ³)	Tetthet (g/cm ³)	Remanens (mA/m)
Bh529 138,2 - 138,35	32	455153	6968597	97,20	3,66	198289
Bh529 139,6 - 139,7	32	455153	6968597	61,02	4,00	705769
Bh533 125,8 - 126,0	32	455371	6968661	107,99	4,12	595757
Bh533 129,3 - 129,45	32	455371	6968661	89,90	3,62	518796
Bh533 159,6 - 159,75	32	455371	6968661	85,62	3,97	377379

Måledata viser ekstremt høye verdier for magnetisk remanens. NGU tvilte på disse høye måleverdiene og utførte kontrollmålinger på NTNU med mer avanserte måleutstyr (JR6A, Kappabridge) hvor også magnetisk susceptibilitet ble målt. Presentasjonen av måleresultatene i **Figur 7** viser at susceptibiliteten ligger i et område som forventet for magnetittmalm, men at den magnetiske remanensen ligger ekstremt høyt.

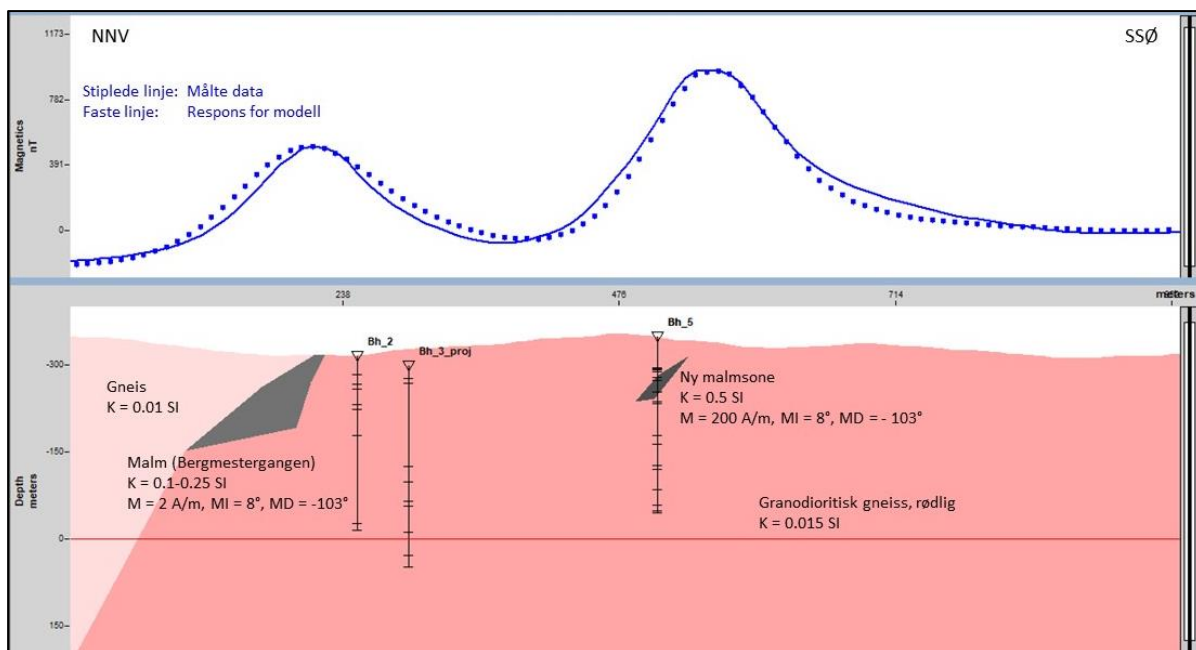
Ut fra målinger på disse fem prøvene er gjennomsnittlig tetthet for Raudsandmalmen 3,87 g/cm³.



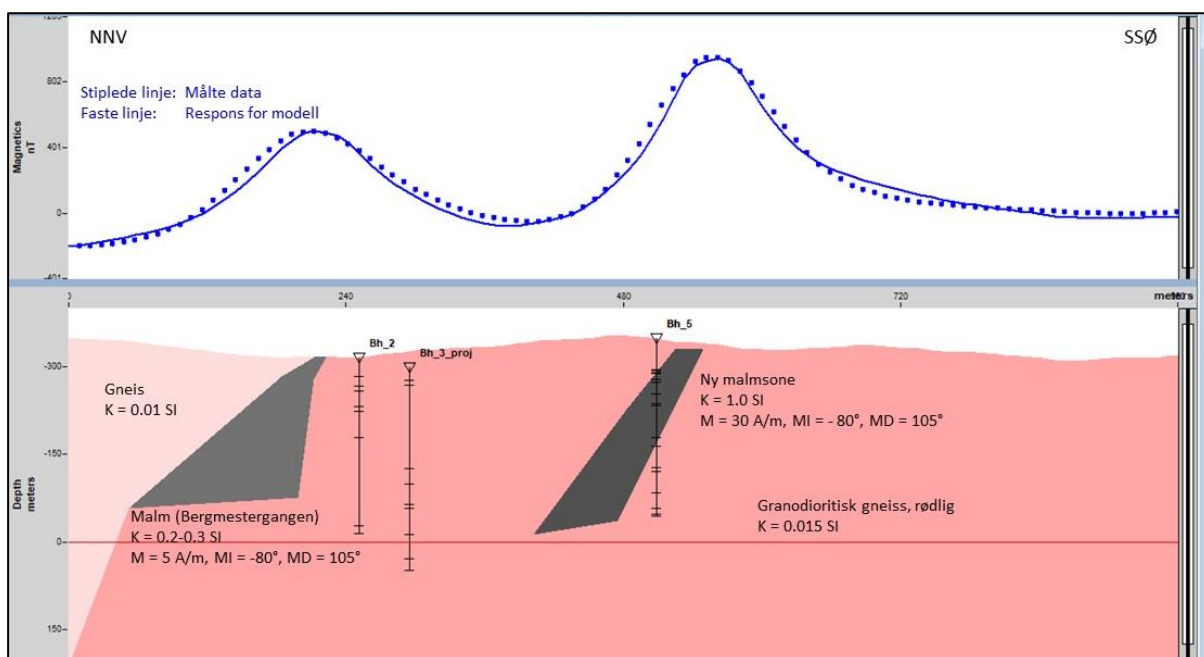
Figur 7: Remanent magnetisering plottet mot magnetisk susceptibilitet for prøvene fra Raudsand og noen andre bergartstyper. De to linjene viser Koenigsbergers forhold $Q = 1$ for magnetfeltet ved polene og ved ekvator (modifisert fra Schön 2011).

Dessverre finnes det ingen informasjon om retningen til denne remanensen (inklinasjon og deklinasjon), og modellering blir derfor vanskelig. NGU har likevel gjort en rekke forsøk på modellering hvor en har prøvd å finne mulige modeller som kan forklare de magnetiske måledata med en viss remanens. Dette for å vise hvor store utslag en slik høy remanens kan gi. Figurene 8 og 9 viser to ekstreme modeller langs profil A. Denne modelleringen er utført som nesten 3D modellering, dvs. modellen er gitt begrenset lengde mot øst og vest, henholdsvis 150 og 300 m.

Ved modelleringen i **Figur 8** ble det for den mulige nye malmkroppen benyttet en gjennomsnittlig magnetisk susceptibilitet på 0,5 (SI), magnetisk remanens på 200 A/m, remanensens inklinasjon 8° (fra horisontalt) og remanensens deklinasjon -103° (fra nord). Tilsvarende data for Bergmestergangen ble valgt for å kunne få en god tilpasning til måledata også for denne forekomsten. Med disse verdiene kan måledata forklares med en mulig ny malmkropp som ligger på ca. 50 meters dyp og som er ca. 50 m høy, ca. 15 m bred og som er ca. 450 m lang (som tidligere antatt). Dette er en betydelig mindre kropp enn den som kom frem ved modellering uten magnetisk remanens.



Figur 8: Minimumsversjon, magnetisk modellering med remanens langs profil A (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen mens M, MI og MD uttrykker henholdsvis magnetisk remanens (A/m), remanensens inklinasjon og -deklinasjon.



Figur 9: Maksimumsversjon, magnetisk modellering med remanens langs profil A (se Figur 2 for beliggenhet). K uttrykker magnetisk susceptibilitet benyttet ved modelleringen mens M, MI og MD uttrykker henholdsvis magnetisk remanens (A/m), remanensens inklinasjon og -deklinasjon.

Ved modelleringen i **Figur 9** ble det for den mulige nye malmkroppen benyttet en gjennomsnittlig magnetisk susceptibilitet på 1,0 (SI), magnetisk remanens på 30 A/m, remanensens inklinasjon -80° (fra horisontalt) og remanensens deklinasjon 105° (fra nord). Tilsvarende data for Bergmestergangen er også her valgt for å kunne få en god

tilpasning til måledata for denne forekomsten. Med disse verdiene kan måledata forklares med en mulig ny malmkropp som ligger på ca. 15 meters dyp og som er ca. 300 m høy, ca. 50 m bred og som er ca. 450 m lang (som tidligere antatt). Denne kroppen er betydelig større enn den som kom frem ved modellering uten magnetisk remanens noe som skyldes at denne noe modererte remanensen (30 A/m) har retning tilnærmet mot jordfeltets inklinasjon (ca. + 72°).

3.1.4 Vurdering av modelleringsresultatene

Det er åpenbart at kunnskap om den remanente magnetiseringens styrke og retning er avgjørende for resultatet fra modelleringen. Tabell 2 gir en oppsummering av modelleringen i form av en minimumskropp modellert med remanent magnetisering, en mulig modell modellert uten remanens og en maksimumskropp ut fra modellering med remanent magnetisering. Kroppenes høyde og bredde er hentet fra modellering langs profil A. Tonnasje er beregnet ut fra en tetthet på 4 g/cm³ (tonn/m³) som er tilnærmet middelerdi for tettheten for de fem prøvene fra Z-malmen (Tabell 1). Den magnetiske anomalien avtar mot endene av den mulige nye malmkroppen og data fra modellering langs linje A vil derfor representere et maksimalt volum og derved maksimal tonnasje.

Tabell 2: Beregnet volum og tonnasje for tre mulige forskjellige malmkropper ut fra modellering uten magnetisk remanens (Mulig versjon) og med magnetiske remanens (Minimums- og maksimumsversjon).

Modellversjon	Ca. høyde (m)	Ca. bredde (m)	Ca. lengde (m)	Volum (1000 m ³)	Tonnasje (mill. tonn)
Min. versjon	50	15	450	338	1,35
Mulig versjon	50	60	450	1.350	5,4
Maks. versjon	300	50	450	6.750	27,0

NGUs helikoptermålinger ble iverksatt bl.a. for å lokalisere eventuelle nye jernmalm-mineraliseringer ved Raudsand. Målingene dekker et område på 70 km² vest-sørvest for Raudsand. I nærområdet til det foreslåtte deponiet ved Raudsand, opptrer ingen andre anomalier som kan skyldes jern-malmer av betydning. Lengst sørvest i området, ca. 6 km fra det foreslåtte deponi-området, opptrer noe forhøyet magnetfelt (Ofstad 2016), og dette bør undersøkes videre med henblikk på interessante mineraler.

3.2 Vurdering av den nye jernmalmsonen verdi og beliggenhet.

NGU har ingen prøver av den mulige nye malmsonen og må derfor benytte data fra den gamle kjente malmen på Raudsand som indikator for verdien. Malmen som ble drevet på ved Raudsand (Rødsand Gruber) besto av 25-30 % magnetitt, 3,5-4 % ilmenitt og 0,15-0,2 % vanadium (Sanetra 1985). I løpet av ca. 80 års drift ved Rødsand Gruber fra starten av 1900-tallet ble det tatt ut 15 Mt malm, hvor hovedproduktet var et magnetittkonsentrat med 64 % jern, 2 % titanoksyd og 0,5 % vanadium.

Magnetittkonsentratet ble benyttet for produksjon av ferrovanadium og råjern. Ifølge rapporter står det igjen ca. 11 Mt malm, hovedsakelig på dypet under Sunndalfjorden, men vannfylt gruve, forurensset gruvevann og flere ras i gruva gjør at dette er vanskelig tilgjengelig. Eventuell drivverdig malm blir da den nye malmsonen som en ikke kjenner kvaliteten av.

En ren jernmalm på klart mindre enn 6 Mt vil ikke være drivverdig i nærmeste fremtid. Det er også tvilsomt om maksimumsversjonen på 27 Mt er drivverdig på jern alene. Dersom denne nye kroppen inneholder like mye og kanskje mer vanadium enn de kjente malmkroppene ved Raudsand, kan den være interessant av den grunn. Et engelsk firma, VTI Resources Pty Ltd, har sikret seg leterettigheter i området i 2018. Vanadium er karakterisert som et kritisk element, og prisen på vanadium har steget 400 % i løpet av det siste året.

Den første modelleringen NGU utførte viste at den vertikale avstanden mellom nedre del av mineraliseringen og de planlagte deponihallene ville være på ca. 250 m. NGU så derfor ikke noen konflikt mellom et deponi under havnivå og drift på en mindre malmforekomst 250 m til 300 m over havet. Modelleringen med magnetisk remanens i kroppen viser imidlertid at ved et spesielt samspill mellom indusert magnetisme og spesielle kombinasjoner av remanensens styrke, inklinasjon og deklinasjon kan den nye mulige malmkroppen strekke seg ned mot havnivå og derved hallnivå. Spørsmålet blir da: Hvor sannsynlig er et slik samspill?

NGU vil poengtere at prøvene det er målt magnetisk remanens av ikke stammer fra selve forekomsten som blir modellert, men fra Z-malmen ca. en km lengre mot øst. Det finnes ingen kunnskap om remanensens retning (inklinasjon og deklinasjon), og det er også usikkerheter knyttet til remanensens grunnleggende styrke. NGU har utført forsøk på de-magnetisering av prøvene med et alternerende magnetfelt av ulik styrke. Denne testen viser at den ekstremt sterke remanensen lett kan tas bort, og dette kan være en indikasjon på at de høye verdiene er påført prøvene under boring, lagring eller ved senere behandling av prøvene.

Konklusjon.

Konklusjonen på dette arbeidet blir at magnetisk modellering i dette tilfellet er en for usikker metode til å vurdere den nye mulige malmkroppens størrelse. Dersom dette er avgjørende for utviklingen av prosjektet med deponihaller for farlig uorganisk avfall ved Raudsand, anbefaler NGU tyngdemålinger i felt med påfølgende tyngdemodellering.

4. LINEAMENTSTUDIE PÅ LIDAR-DATA

Et lineament defineres som en lineær struktur som fremstår på topografiske eller geofysiske kart og som avspeiler underliggende geologiske strukturer. Disse strukturene kan være bergartsgrenser, skjærsoner, sprekkesoner, gangbergarter, foldinger eller forkastninger. Lineamentene fremstår som forhøyninger eller fordypninger i terrenget eller tilsvarende variasjoner på et geofysisk datasett. Ved Raudsand har Vikas Baranwal utført en lineamentstudie på LIDAR-data i et ca. 70 km² stort område vest for Raudsand. Det er her fokusert på fordypninger i terrenget som kan skyldes sprekkesoner som øker vannstrømmingen i den ellers tette berggrunnen.

4.1 Datagrunnlag for analyse

Ved denne analysen ble det gjort forsøk med Kartverkets «Digitale Terrengmodell» (DTM) basert på LIDAR-data med celledimensjon 1m x 1m (Kartverket 2019). De første analysene viste at disse data var for detaljerte og det ble derfor lastet ned et datasett med celledimensjon 10m x 10m og utført analyser på dette.

Figur 10 viser terreng-modellen belyst med en fiktiv sol fra retning 70° (nordøst-øst) og 45° over horisonten (morgensol). Høyden over havet er angitt som fargekode. Belysning fra nordøst-øst fremhever topografiske lineamenter som går mer eller mindre vinkelrett på denne retningen ved at de kaster skygge (mørkere farge). Som det fremgår av figur 7 er det ingen større lineamenter som går vinkelrett på denne retningen (70°).

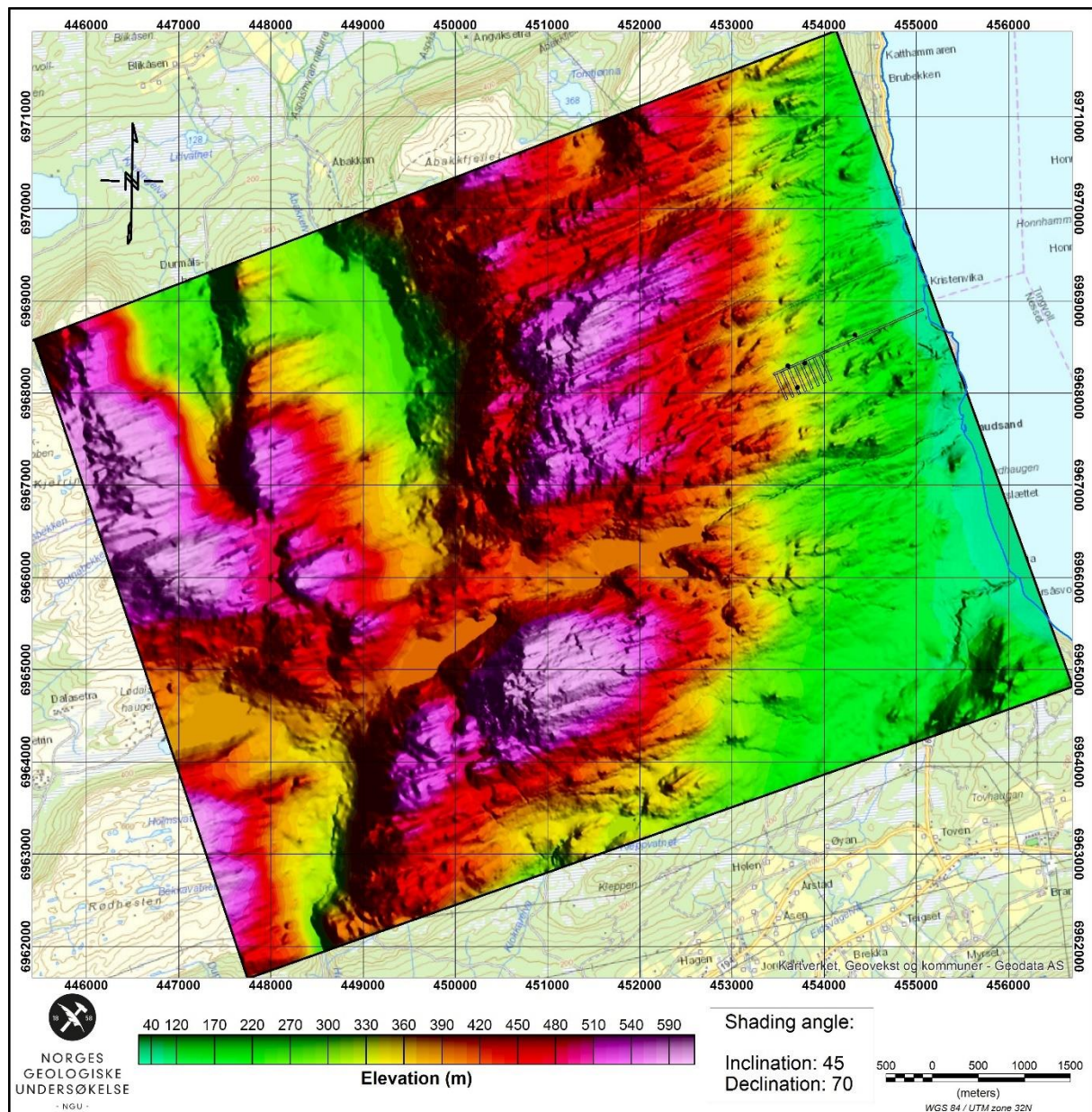
Figur 11 viser den samme høydemodellen, men nå med en fiktiv sol 45° over horisonten fra retning 160° (sør-sørøst, formiddagssol). Med denne belysningen fremstår langt flere skygger, noe som avspeiler at lineamentene hovedsakelig går i retning 70° – 250°. I følgende blir dette kvantifisert.

4.2 Analyse av den digitale terrengmodellen

Ved analyse av den digitale terrengmodellen ble en spesiell rutine kalt «CET-analysis» (Centre for Exploration Targeting) innenfor programsystemet Geosoft Oasis Montaj benyttet (Geosoft 2012). Prosesseringstrinnene var som følger:

1. Beregning av første vertikalderiverte (Geosoft 2012).
2. Identifisering av fordypninger i terrenget ved å benytte negative verdier av første vertikalderiverte.
3. Lage vektorer av hvert enkelt lineament (start og slutt).
4. Sortere lineamenter etter lengde, (20 -100 m, 100m – 500m og > 500m).
5. Visualisering ved plotting på topografisk kart.

Ved trinn 4 ble alle linje-segment med avvik over mer enn 2 celler (20m) registrert som eget lineament. I den videre analysen ble det laget rosedigram, et diagram som viser lineamentenes lengde fordelt på retning og histogram over lineamentenes retning. Til dette ble programmet Grapher versjon 9.3 (Golden Software) benyttet.

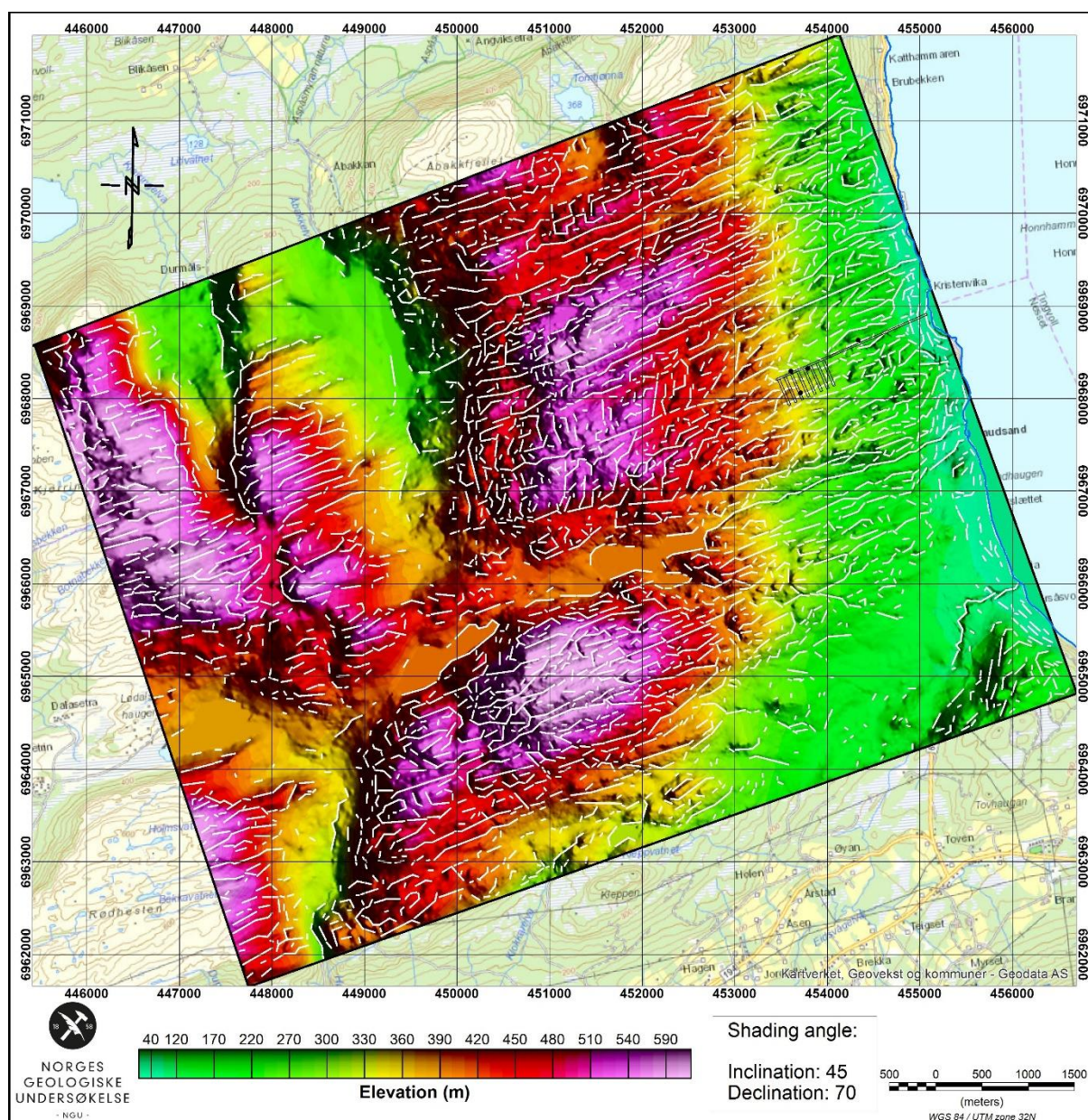


Figur 10: Digital terrengmodell (10m x 10m) fra LIDAR-data vest for Raudsand. Data er belyst med fiktiv sol 45° over horisonten fra retning 70° (NØ-Ø).



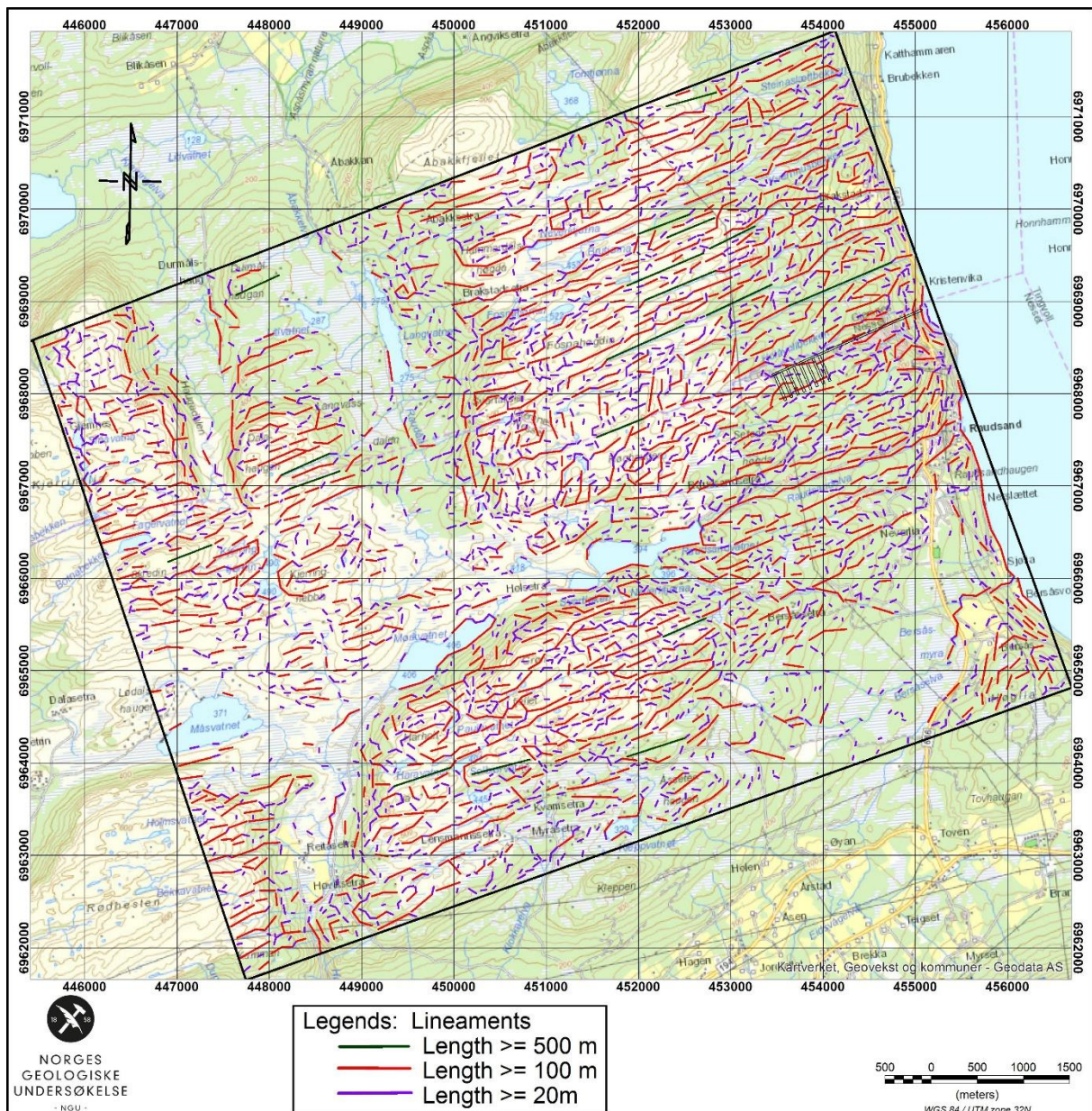
4.3 Resultater fra analyse av digital terrengmodell

I det følgende blir resultatene fra analysen av den digitale terrengmodellen presentert.



Figur 12: Alle indikerte lineamenter plottet i hvitt på digital terrengmodell. Data er belyst med fiktiv sol 45° over horisonten fra retning 70° (NØ-Ø).

Figur 12 viser alle indikerte lineamenter plottet på den digitale terrengmodellen (cellestørrelse 10m x10m). I figur 13, er de samme lineamentene gruppert etter lengde og plottet på et vanlig topografisk kart. I dette bildet er det mulig å se hvorfor lineamentene uteblir i enkelte områder.



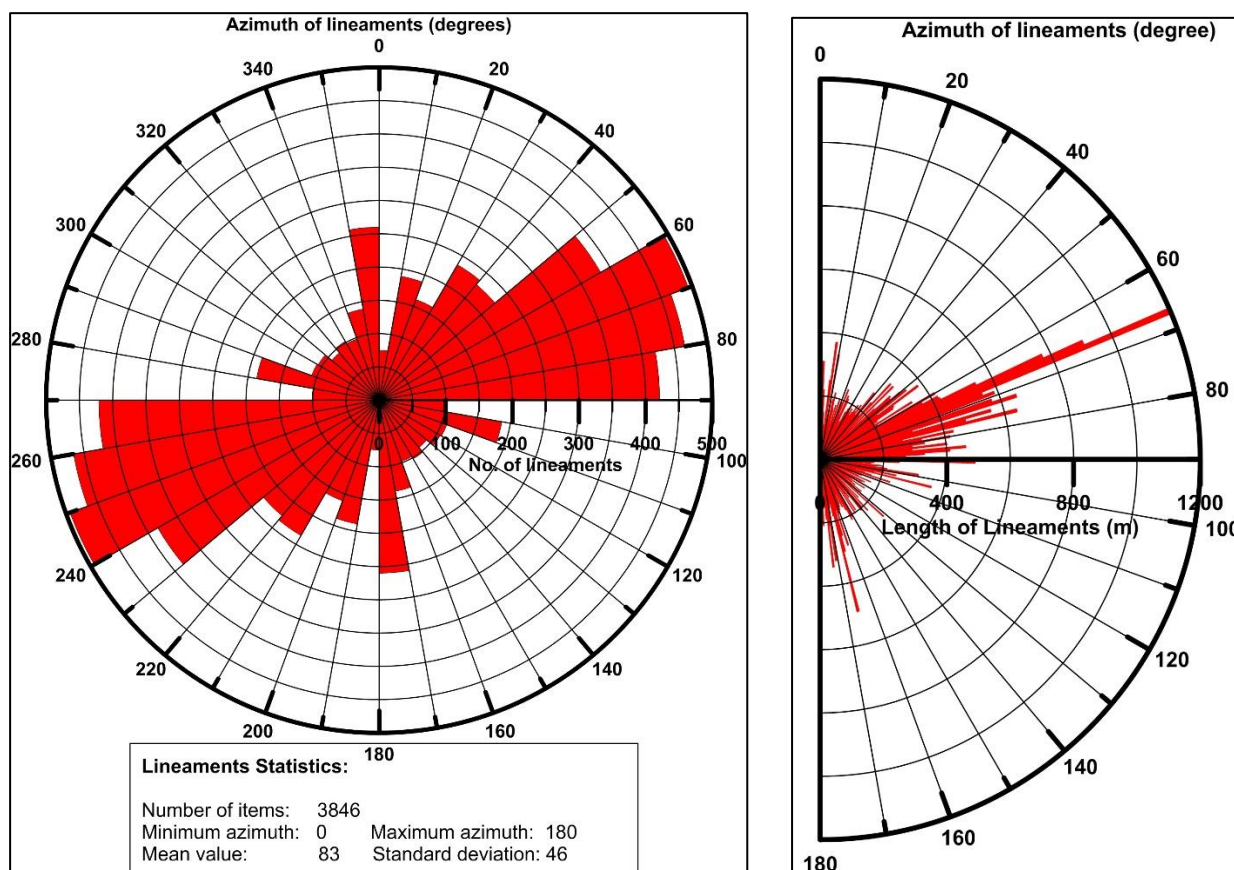
Figur 13: Indikerte lineamenter gruppert etter lengde for området vest for Raudsand. Grønne lineamenter er lengre enn 500 m, røde ligger mellom 100 og 500 m mens fiolette lineamenter er mellom 20 og 100 m lange.

Figur 13 viser automatisk tolkede lineamenter i det ca. 70 km² store området vest for Raudsand. Lineamenter lengre enn 500 m fremstilles i grønt, lineamenter med lengde mellom 100 og 500 m i rødt mens korte lineamenter (20 – 100 m) er plottet i fiolett farge. Lineamenter kortere enn 20 m er tatt ut. Visuelt kan en se at de aller fleste lange lineamentene går tilnærmet i retning ØNØ-VSV. Denne retningen er også dominerende for de røde lineamentene, mens de fiolette har en mer tilfeldig retning. Områder med manglende lineamenter består av innsjøer, myrområder eller områder med andre løsmasser som dekker over eventuelle lineamenter.

De automatisk tolkede lineamentene faller svært ofte sammen med forsenkninger i terrenget eller langs brattskrenter. Dette er en indikasjon på at de representerer

forvitringssoner (se Rønning 2017), rene sprekkesoner men også mindre forkastninger. I noen tilfeller kan lineamentene representere erosjon i løsmasser.

I Figur 14 er alle lineament (3846 i alt) plottet i rosedigram. Dominerende retning er NØØ-SVV, men en ser også lineamenter stort sett i alle retninger. Høyre del av figur 14 viser lineamentenes lengde fordelt på retning. Her går det klart frem at alle lineamenter lengre enn 500 m går i ca. retning 65° til 75°. Majoriteten av lineamentene med lengde 200 til 500 m går også i samme retning, mens lineamenter kortere enn 200 m ikke har en foretrukket retning.

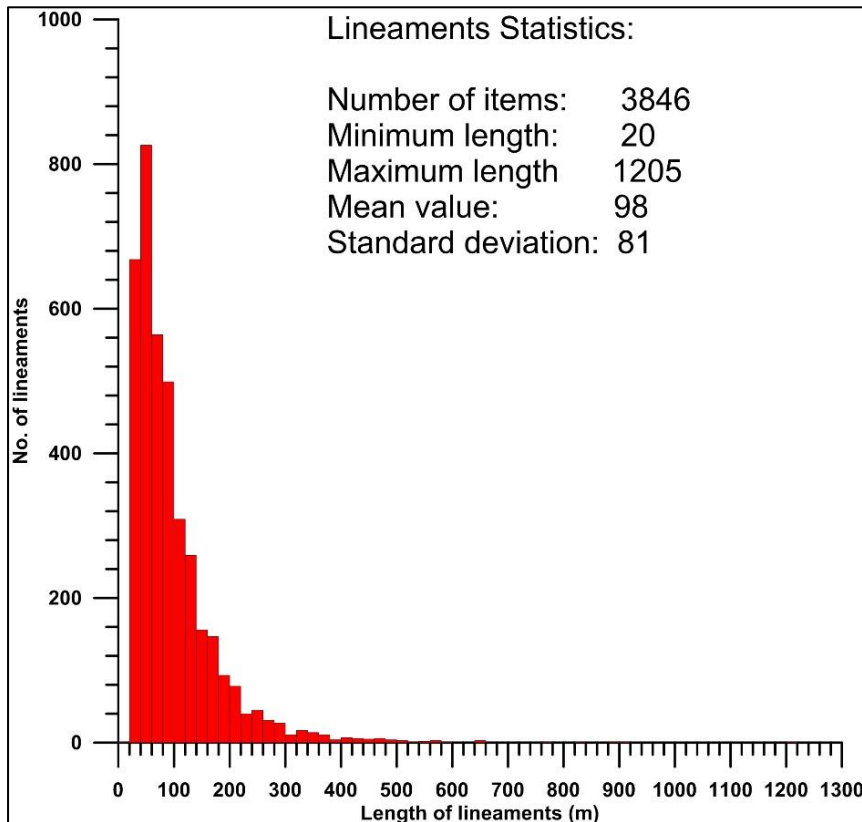


Figur 14: Rosediagram som viser dominerende lineamentretning (til venstre) og diagram som viser lineamentenes lengde fordelt på retning (til høyre) vest for Raudsand.

Tabell 3: Statistikk over retningen til lineamenter fordelt på lengder.

Parameter	Lineament 20 m – 100 m	Lineament 100 m – 500 m	Lineament > 500 m
Antall	3846	1307	18
Min. retning (°)	0	0	63,9
Maks. retning (°)	180	180	75,5
Midlere retning (°)	86,0	76,6	68,5
SDEV retning (°)	49,4	37	3,3

Statistikken i tabell 3 viser at de korteste lineamentene, lengde 20 – 100 m, går stort sett i alle retninger. Det samme kan sies om lineamentene med lengde 100 til 500 m, men her er det en større samling rundt retning 76,6°. De lengste lineamentene, lengre enn 500 m, går alle innenfor retningsintervallet 64° til 75°.



Figur 15: Histogram over lineamentenes lengde vest for Raudsand.

Figur 15 viser et histogram over lineamentenes lengde og statistikk over lengde er vist i tabell 4. Av totalt 3846 lineamenter er 2520 kortere enn 100 m, og bare 18 er lengre enn 500m.

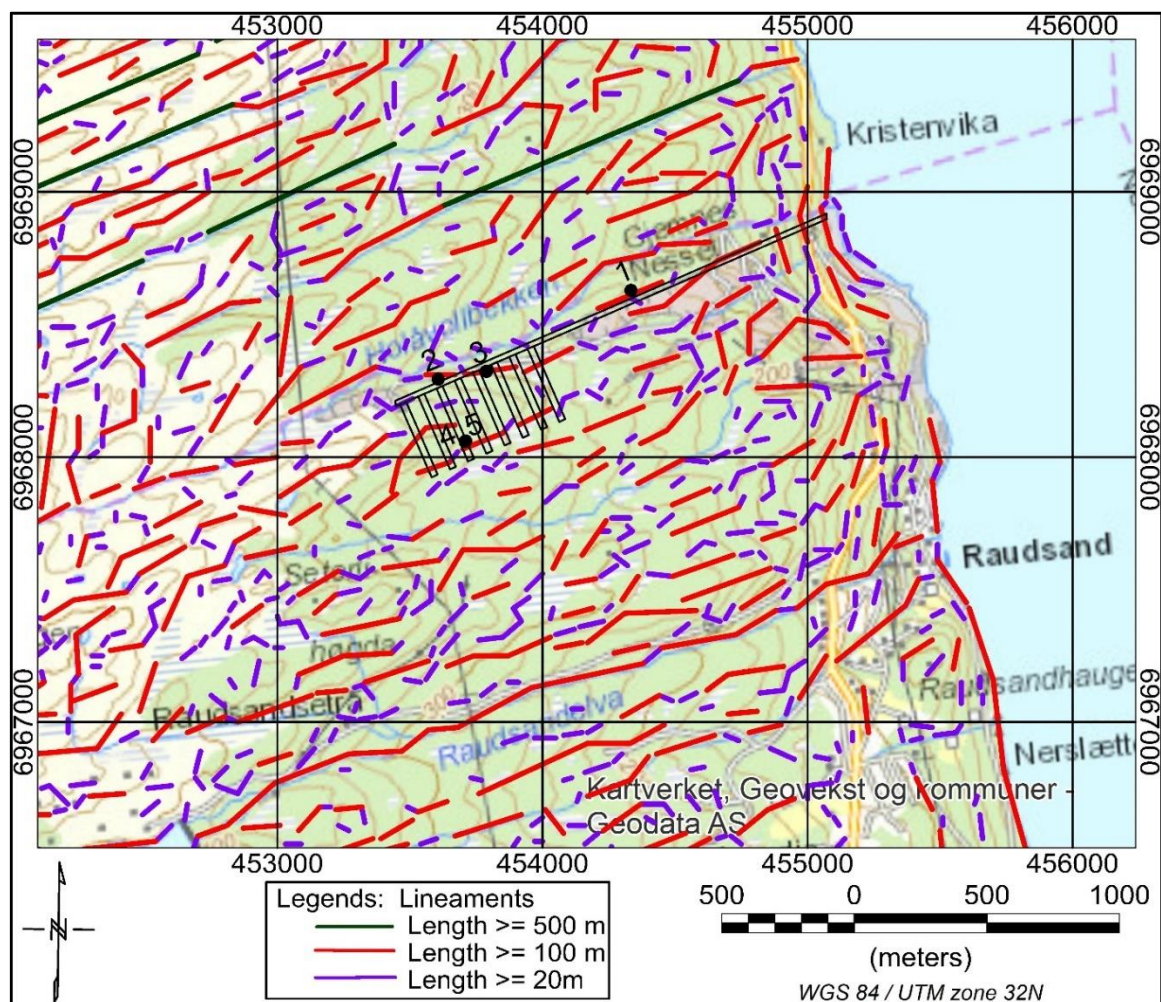
Tabell 4: Statistikk over lengden til de kartlagte lineamentene.

Parameter	Lineament 20 m – 100 m	Lineament 100 m – 500 m	Lineament > 500 m
Antall	2521	1307	18
Min. lengde (m)	20	100	501
Maks. lengde (m)	99,0	498	1205
Middelerdi (m)	56,5	170	665
SDEV lengde (m)	20,4	73,0	187

4.4 Vurdering av lineamenters opptreden

Ved denne lineamentanalysen er det benyttet en metodikk der lineament som avviker i retning over mer enn 2 cellediagonaler (ca. 20 m) blir brutt opp i enkeltstående lineament. Det betyr at lineamentene i praksis kan være betydelig lengre enn angitt i analysen, men at de da består av flere påfølgende individuelle lineamenter. Dersom en ser på den originale terrengmodellen (Figurene 10 og 11), ser en imidlertid at den dominerende retning er ca. 70° – 250° noe som også bekreftes i figur 14. De lengste lineamentene (lengre enn 200 m), går i samme retning. Korte lineament (< 200m) går stort sett i alle retninger, og disse representerer enten korte knekk i lengre lineamenter eller enkeltstående korte lineamenter mellom de lengste lineamentene.

Ved denne analysen ble det valgt å se på lineamenter som fordypninger i terrenget noe som trolig avspeiler sprekkesoner/forvitringssoner. De lengste lineamentene går i hovedsak i samme retning som tidligere påviste forvitringssoner (Rønning m.fl. 2016) og i samme retning som strøket i berggrunnen indikert ved magnetiske målinger fra helikopter (Ofstad 2016, Rønning m. fl. 2016). Den dominerende sprekkeretning er ut fra dette i retning $70^{\circ} - 250^{\circ}$.



Figur 16: Nærbilde av lineamenter rundt det planlagte området for deponihaller ved Raudsand. Borehull 1, 2, 3, 4 og 5 angitt med sort prikk.

Nærbilde av kartlagte lineamenter rundt deponihallene ved Raudsand er vist i Figur 16. Hovedtrenden er som i hele datasettet, de lengste lineamentene (lengde 100 – 500 m og lengre enn 500 m) går i hovedsak i ca. retning $70^{\circ} - 250^{\circ}$. Mellom disse «hovedlineamentene» (sprekke-/ forvitringssonene) opptrer korte (lengde < 100 m) og ofte usammenhengende fiolette lineamenter i de fleste retningene. Disse er imidlertid for korte til å danne kommuniserende sprekker mellom sonene langs hovedretningen. Spesielt ser en at deponihallene ligger i et område med svært få lineamenter, både i hovedretningen og på tvers av denne. Dette bildet bekreftes av i hovedsak lav vanngiverevne ved pumping av borehullene og generelt høy vannstand. Unntaket er Bh1 som står direkte i et lineament hvor det var innlekkasje av vann øverst i borehullet og ut på dyp 190 m (Rønning m.fl. 2017). Lineamentstudiet vil ikke kunne avdekke horisontale sprekker (eksfoliasjonssprekker), men slik avlastningssprekker er oftest meget grunne, og de kartlegges ved borehullslogging.

5. GRUNNVANNSKVALITET OG VEKSELVIRKNING MED BERGGRUNNEN

Sommeren 2017 ble det utført service på NGUs vannkvalitetssonde. For å sikre best mulig kvalitet på måledata ble Bh2, Bh3 og Bh4 målt på nytt i september 2017. Disse data, sammen med analyser på vannprøver, ble benyttet til å vurdere vannets kjemiske vekselvirkning med berggrunnen.

5.1 Ny logging med vannkvalitetssonde

5.1.1 Metode og utførelse

Ny logging av vannkvaliteten i Bh2, Bh3 og Bh5 ble utført 5. og 6. september 2017. I september 2017 ble også oksygenmetning logget. Det var planen å logge Bh1 også, men dette hullet var ifølge oppdragsgiver (Tore Frogner) delvis blokkert og NGU tok ikke sjansen på å miste målesonden. Bh4 ble ikke logget da det står så nært Bh5 (Figur 2). Det ble benyttet loggeutstyr produsert av Robertson Geologging Ltd. <http://www.robertson-geo.com> Metodebeskrivelse for alle NGUs målesonder ligger på NGUs hjemmeside <http://www.ngu.no/emne/borehullslogging>

Loggehastighet var 3 m/min noe som gir en målepunkttetthet på 1 cm for alle målemetodene: Temperatur, vannets elektriske ledningsevne, pH, Eh, og oksygenmetning. Sonden måler også nitrat, men disse data blir ikke benyttet. Måledata presenteres i Figurene 17, 18 og 19 sammen med måledata fra januar 2017 og laboratoriemålinger på vannprøver (elektrisk ledningsevne og pH) tatt på forskjellige dyp i de tre brønnene i mars 2017 (se NGU Rapport 2017.024). Data er tidligere meddelt BMR i notats form.

5.1.2 Resultater

Loggeresultater Bh2

Figur 17 viser vannets temperatur, elektriske ledningsevne, pH, Eh og oksygenmetning i Bh2 målt i januar 2017 (rød kurve) og i september 2017 (blå kurve).

Temperaturen i Bh3 er helt lik på de to kurvene bortsett fra de øverste 10 -12 m hvor temperaturen i september som forventet er høyere enn i januar. Et lite sprang i temperaturen ved dyp 30 m indikerer innstrømning av grunnvann.

Elektrisk ledningsevne i vannet er tydelig høyere i september enn i januar og målingene i september ligger svært nær laboratoriemålingene. Dette kan skyldes oppgraderingen av sensoren, men både vannprøvene og målingene i september er gjort etter pumping som ble foretatt i mars 2017 mens loggingen i januar ble utført før pumping. Under pumping er vann trukket ut av sprekker i fjellet og fylt opp i brønnen. Dette vannet kan ha litt andre egenskaper enn det vannet som var igjen i brønnen etter boring. Variasjonene i vannets ledningsevne i de øverste 60 m kan skyldes innstrømning av overflatevann eventuelt overflatenært grunnvann på fire nivå (ca.14, 28, 40 og 60 meters dyp). Det er tidligere konkludert med at en her finner en forvitringssone med økt oppsprekking (Rønning m. fl. 2017). Strømningsmåling i Bh2 indikerte innstrømning av ca. 380 l/t over pumpa som sto på 40 meters dyp.

pH i Bh2 (Figur 17) er noe høyere i september enn i januar (fra ca. 7 til ca. 8) og faller sammen med laboratiemålingene. Dette skyldes at loggingen i januar ble foretatt før pumping mens prøvetaking og logging i september ble foretatt etter pumping og renovering av målesonden. Måling av høyere pH i september er positivt med henblikk på grunnvannets reduserte mulighet til å løse ut tungmetaller fra deponihallene.

Eh i Bh2 endres drastisk fra januar 2017 til september 2017, fra minus 200 til 400 mV i januar til noe undulerende forløp rundt pluss 100 mV i september. Dette kan nok skyldes en effekt av selve boringen av brønnen. Utblåsing av alt vann og igjenfylling fra grunne partier har oksidert vannet noe, men dette ble fjernet under pumpingen.

Oksygenmetningen er noe høyere i de øvre 80 meterne, men må karakteriseres som lav. Trinnvise endringer ser ut til å falle sammen med tilsvarende endringer i vannets elektriske ledningsevne, og skyldes trolig innstrømning av ferskt grunnvann på tidligere angitte nivå. Oksygenmetningen avtar mot dypet, og må karakteriseres som lav, noe som indikerer stagnert grunnvann, vann som har oppholdt seg lenge i fjellet.

Loggerresultater Bh3

Figur 18 viser loggerresultatene fra Bh3, røde kurver er fra logging i januar 2017 før pumping av brønnen og blå kurver fra september 2017 etter pumping. Laboratorieanalyser på tre vannprøver fra mars 2017 presenteres som blå kryss.

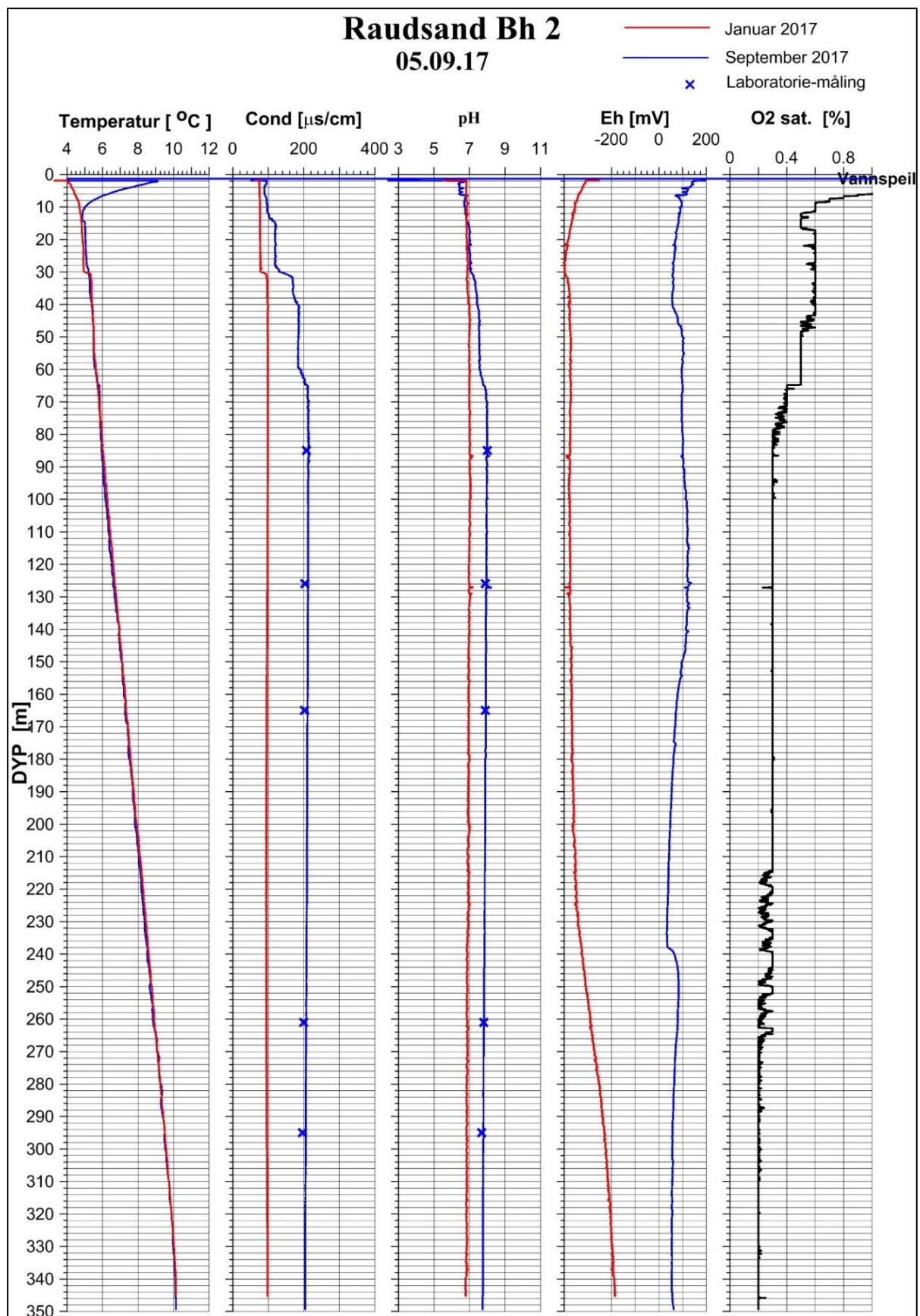
Temperaturen er lik for de to kurvene med unntak av de 10 første meterne. Også her ligger både vannets elektriske ledningsevne og pH for september 2017 noe høyere enn i januar. Laboratiemålingene av pH viser verdier på 7,8 til 8,0 mens loggingen i september ligger jevnt noe høyere på ca. 8,8, noe som virker noe høyt. Grunnen kan være den samme som beskrevet for Bh2. Her ser en imidlertid at laboratiemålingene ligger litt lavere enn i september. Dette kan skyldes at de fysikalske egenskapene i borehulls-vannet er endret fra før pumping i januar, via prøvetaking under pumping i mars, til lenge etter pumping i september 2017.

Eh er jevnt over lavere og negativ i september sammenlignet med loggingen i januar og varierer noe mot dypet, spesielt ved dyp ca. 180 m. Dette har trolig også sammenheng med pumpingen, og fjerning av oksidert vann fra boringen av brønnen. Oksygenmetningen er generelt lav, men noe forhøyet i den øvre delen av borehullet.

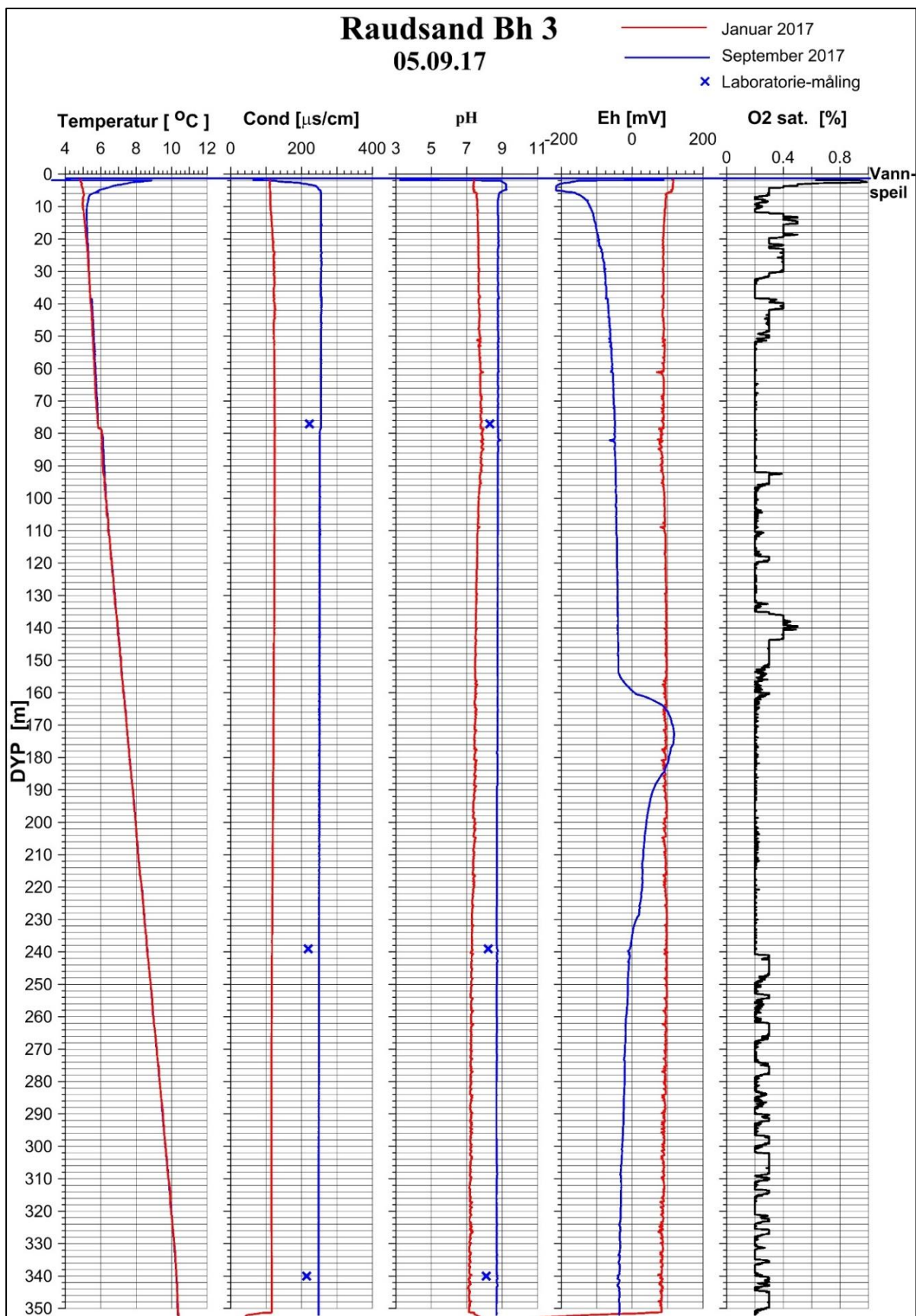
Loggerresultater Bh5

I Bh5, figur 19, ser en at vannspeilet har steget fra dyp ca. 16 m under bakken i januar til ca. 10 m i september 2017. Det kom mye nedbør i løpet av våren og sommeren 2017.

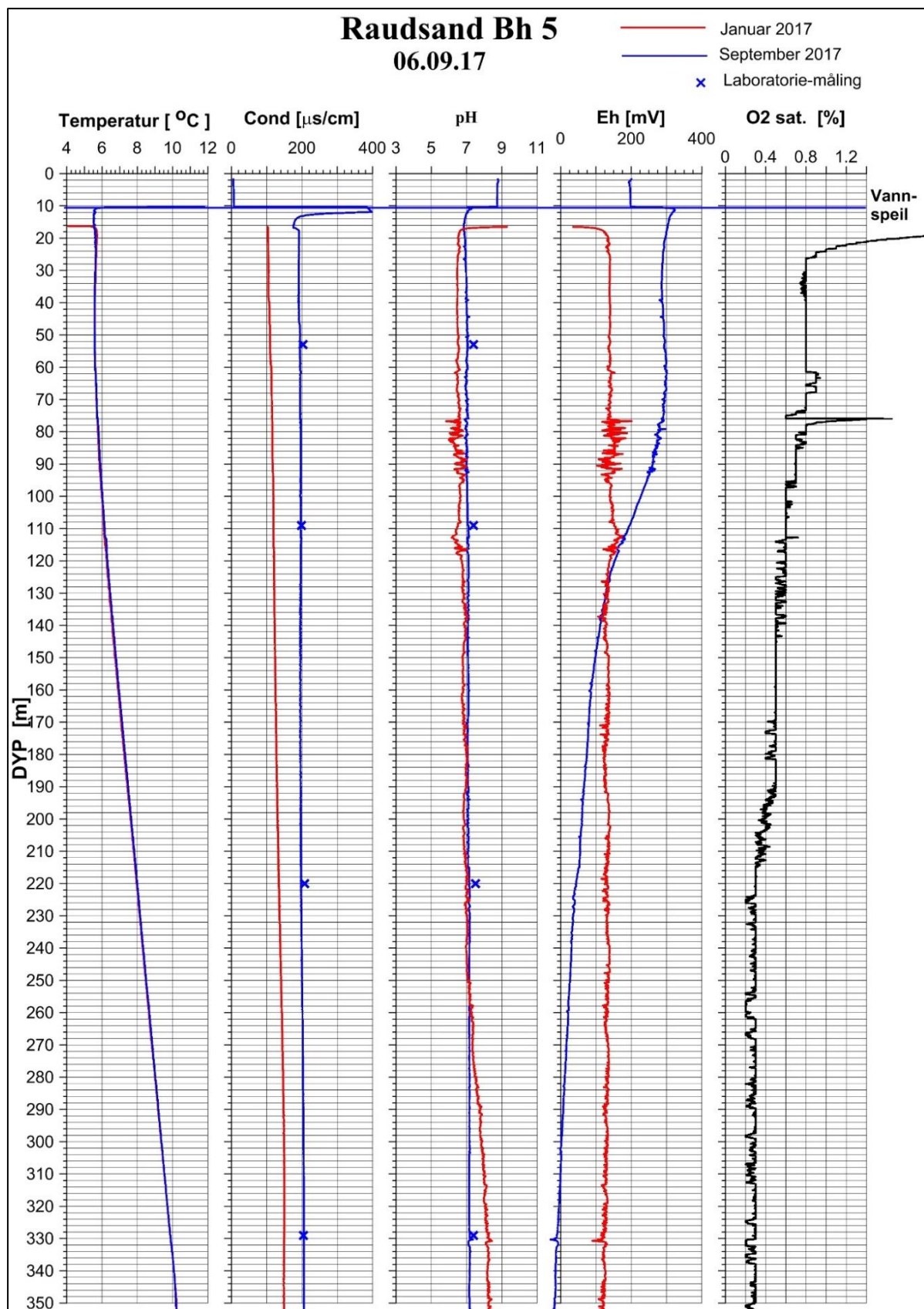
Temperaturen er helt lik for de to kurvene. Den elektriske ledningsevnen i vannet ligger jevnt over noe høyere i september og ligger svært nær laboratiemålingene fra prøvetakingen i mars. pH ligger noenlunde på samme nivå ved de to loggingene, men målingene i januar varierer noe mer, bl.a. øker pH noe mot bunnen av hullet. Både lab-analysene og loggingen i september viser svakt basiske verdier (pH fra 7 til 7,5). Eh varierer mye fra januar til september og september-målingene varierer mot dypet, fra positive ca. 300 mV til 0. Også her er nok dette en effekt av pumpingen som har trukket grunnvann ut av fjellet og inn i borehullet. Oksygenmetning er lav og avtar mot dypet.



Figur 17: Logging av vannkvalitet i Bh 2 i januar 2017 og med renovert sonde i september 2017. Laboratorieanalyse av vann prøvetatt i mars 2017 er vist som blå kryss.



Figur 18: Logging av vannkvalitet i Bh 3 i januar 2017 og med renvert sonde i september 2017. Laboratorieanalyse av vann prøvetatt i mars 2017 er vist som blå kryss.



Figur 19: Logging av vannkvalitet i Bh 5 i januar 2017 og med renovert sonde i september 2017. Laboratorieanalyse av vann prøvetatt i mars 2017 er vist som blå kryss.

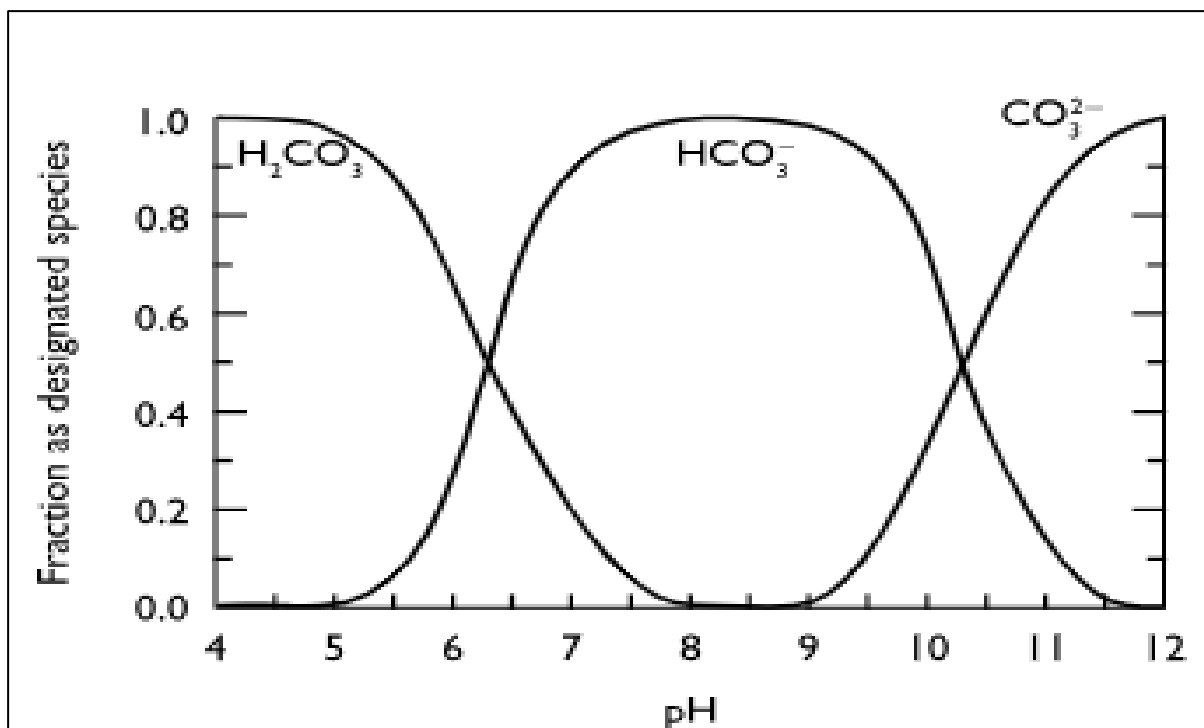
5.2 Bergart-vann vekselvirkning generelt

Avsnittet er utarbeidet av innleid seniorforsker Håkon Rueslåtten.

5.2.1 'Sure og basiske bergarter'

Det geologiske begrepet 'sure bergarter' betegner bergarter som inneholder mye kvarts; f.eks. granitt og gneis. Eksempler på 'basiske bergarter' er gabbro og amfibolitt. Karbonatbergartene, med kalk og dolomitt, er ikke-silikater, og kommer i en egen klasse. Disse geologiske begrepene er egnet til å skape misforståelser i ikke-geologiske fagmiljøer, for en 'sur bergart' kan ofte gi et basisk grunnvann. Det kommer an på hvilke andre mineraler enn kvarts som inngår i bergarten.

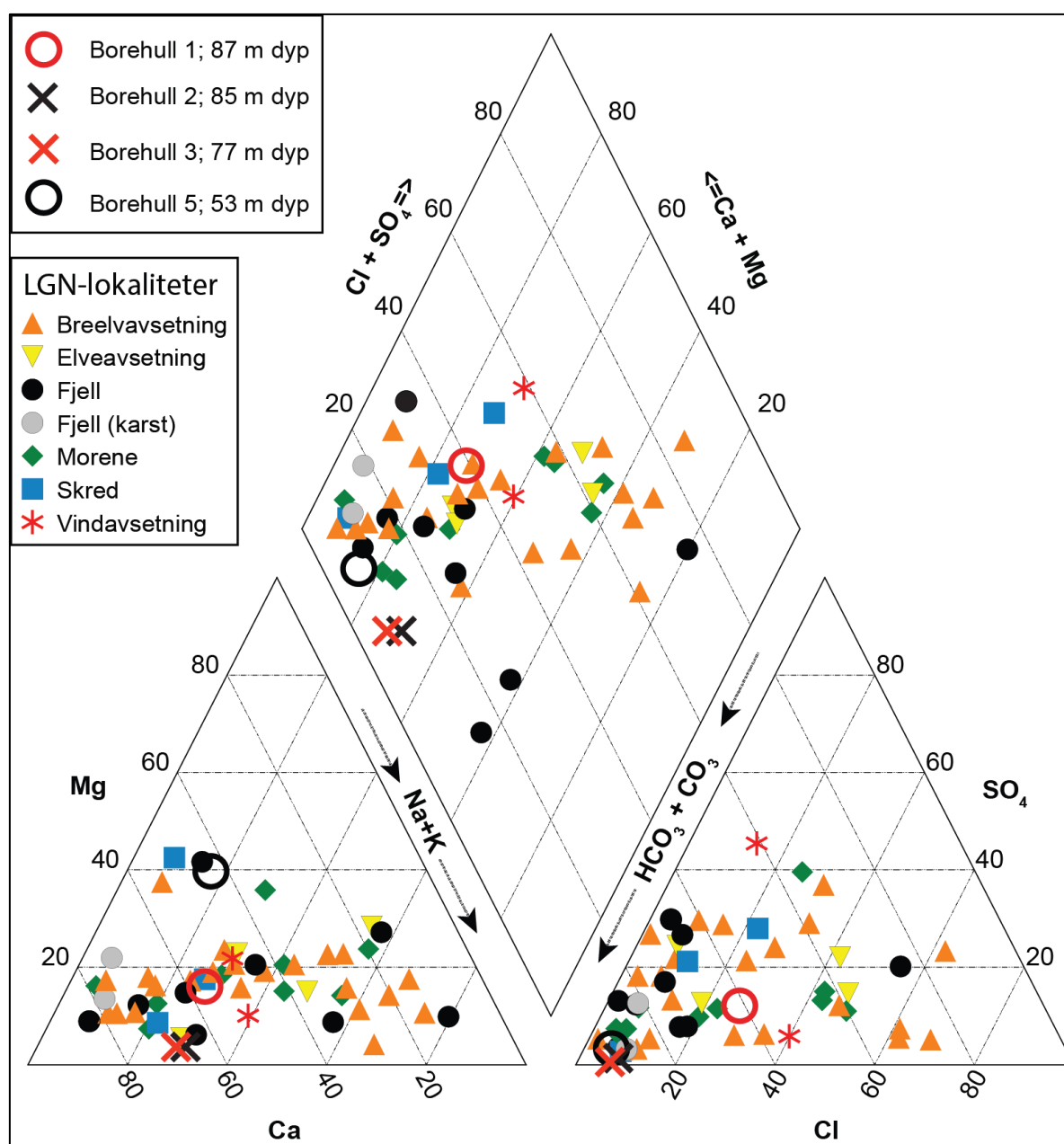
I en granodiorittisk gneis, slik vi har på Raudsand, vil feltspatene (kalifeltspat og plagioklas) være hoved-mineraler, og feltspater i destillert vann vil ha en likevekts-pH på rundt 9, dvs. basisk. Men i et vann der karbonat-systemet dominerer, slik vi har i Raudsand-brønnene, vil forholdet mellom bikarbonat (HCO_3^-) og karbonat (CO_3^{2-}) ved likevekt gi en pH på ca. 8,2 slik det er i sjøvann (se Figur 20). Siden kalsium, som kommer fra plagioklas-feltspat i gneisen, er det viktigste kationet i grunnvannet (se analyser i Rønning m.fl. 2017 og Figur 21), vil det da kunne felles ut kalk på sprekkeene ved denne høye pH. Da vil dette systemet holde en pH på rundt 8,2 så lenge vannet er i likevekt med kalken; dvs. systemet er bufret til pH 8,2.



Figur 20: Karbonatsystemets likevekter som en funksjon av pH. Ved pH over 8,2 er vi inne i det stabile området for kalk. (Figur fra Freeze & Cherry, 1979).

5.2.2 Karbonatsystemet styrer pH

Kilden til karbonatsystemet i grunnvannet er hovedsakelig CO_2 fra biologiske prosesser i jordsmonnet, og noe fra nedbøren. Nedbørsvannet er ione-fattig og også surt på grunn av likevekten med CO_2 og andre gasser i lufta. Typisk pH for nedbør er derfor $5 \pm 0,5$, mens pH i øverste del av jordsmonnet i norsk utmark har typiske pH-verdier på 4 til 5. Det er altså et surt vann med karbonsyre og humussyrer som infiltreres ned til grunnvannet. Dette sure vannet starter forvitningsreaksjoner med bergartene, der base-kationer (kalsium, natrium og kalium) løses ut fra mineralfasene (mest fra feltspater og biotitt) og tilføres grunnvannet. I denne prosessen forbrukes syrene i vannet, og pH stiger opp mot 8,2 (som nevnt ovenfor), der all karbonsyre (H_2CO_3) går over til bikarbonat (HCO_3^-) og videre til karbonat (CO_3^{2-}) ved pH over 8,2 (se Figur 20).



Figur 21: Noen vannanalyser fra Raudsand plottet i piperdiagram sammen med analysedata fra LGN (Landsomfattende mark og grunnvannsnett, fra Rønning m.fl. 2017).

5.2.3 Grunnvannets pH og kjemiske sammensetning i Raudsand området

Analysene av grunnvannet i de fire brønnene (Bh2, Bh3, Bh4, og Bh5) som ble boret i området ved de planlagte fjellhallene på Raudsand, viser pH-verdier fra 7,4 til 8,3 (laboratorie-målinger), dvs. opp til likevekten for bikarbonat/karbonat. Grunnvannets viktigste kation er kalsium (10 til 30 mg/L) og viktigste anioner er bikarbonat og karbonat (se Rønning m. fl. 2016 og figur 21). I pH-området 8,2-8,3 vil det da kunne felles ut kalk i sprekke, og pH er bufret til dette pH-intervallet (likevekt med kalk). Høyeste pH-verdier ble målt i Bh3, med pH 8,1 til 8,3. Selv om dette er en granodiorittisk gneis, er denne bufringen likevel sammenlignbar med det en har i kalkstein.

Bh1 ble boret inn mot adkomsttunnelen (i dagbruddområdet). Grunnvannet i denne viste lavere pH-verdier, med pH fra 6,6 til 6,8. Bh1 skiller seg også ut med noe lavere elektrisk ledningsevne i vannet; dvs. den har lavere innhold av løste stoffer i vannet sammenlignet med de andre brønnene, noe som ses ved en elektrisk ledningsevne på 109 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ved 87 m dyp) til 138 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ved 230 m dyp), mens de andre brønnene viser over 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dette er en indikasjon på større vanngjennomstrømning i Bh1 sammenlignet med de andre borehullene.

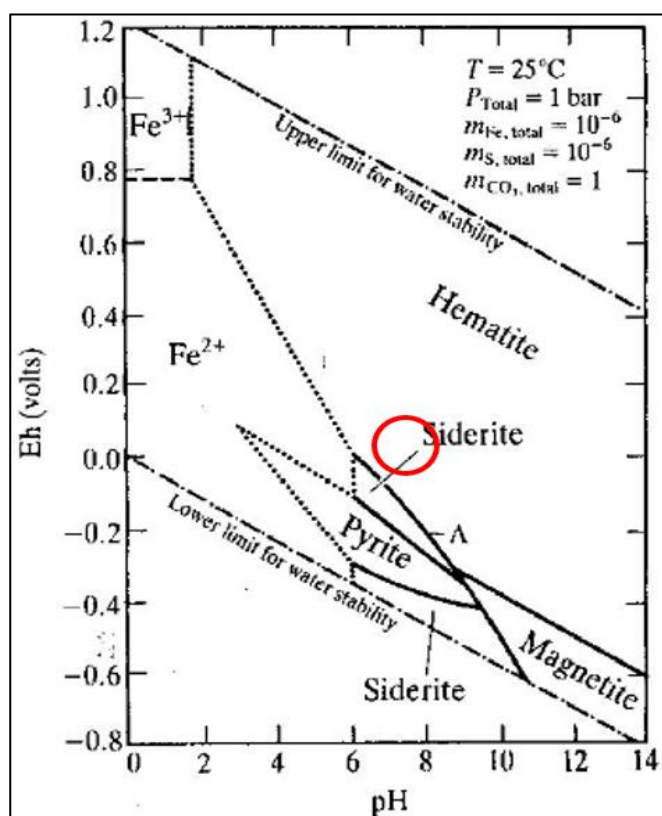
Under loggingen av brønnen ble det observert at grunnvannsspeilet lå på 82 meters dyp, og det var hørbar innstrømming av vann fra sonen over grunnvannsspeilet (Rønning m.fl. 2017). Det ble også påvist avrenning fra brønnen på 190 m dyp; ca. 360 liter/time (Rønning m.fl. 2017). Bh1 har det laveste grunnvannsspeilet av de fem brønnene, noe som virker underlig tatt i betraktning det generelt høye grunnvannsspeilet i området. En mulig forklaring på dette kan være at brønnboringen har 'punktet' en sprekk på ca. 190 meters dyp, der det er påvist avrenning. Dette førte til en økt gjennomstrømning i Bh1 og et lavere grunnvannsspeil. Grunnvannet har blitt tilført ione-fattigere og surere vann fra sonen over grunnvannsspeilet. Dette forklarer både lavere elektrisk ledningsevne og de lavere pH-verdiene (pH 6,6 til 6,8). Likevel ligger pH-verdiene innenfor området der tungmetaller er lite løselige.

5.2.4 Mobilitet av tungmetaller

Statens folkehelseinstitutt (FHI) krever at drikkevann i større vannforsyningsanlegg, skal bufres til en pH på 6,5 til 9,5 (Folkehelseinstituttet – Vannforsynings ABC); dette for ikke å løse ut tungmetaller fra ledningsnettet. De fem brønnene ved Raudsand viser alle pH-verdier innenfor dette området, noe som tilsier at grunnvannet ikke har nevneverdig løselighet for tungmetaller slik det er i dag. Vi er kjent med at avfallet som planlegges deponert her vil gi en basisk reaksjon i vann. Siden grunnvannet også er på basisk side (i deponihall-området), så vil ikke grunnvannet evne å løse ut tungmetaller fra dette avfallet.

5.2.5 Sulfider i malmen

Det er påvist ca. 1% sulfider i malmen i Raudsand-området (Cramer m.fl. 2015, Sanetra 1985). Det er en kjent sak at sulfider som kommer i kontakt med oksidert vann kan oksidere og gi svovel-surt vann, og at dette kan resultere i utløsning av tungmetaller. Siden grunnvannsmagasinet i Raudsand hovedsakelig er et sprekkereservoar, forutsetter dette at oksidert grunnvann reagerer med sulfider eksponert på sprekkeflatene. Borhullsloggene fra brønnene (september 2017) viser at grunnvannet er svakt oksidert, med Eh fra ca. 0 til +100 mV og med pH i området 7 – 8. Dette viser at grunnvannet ligger i likevektsområdet for jernoksider, men nær likevektsområdet for redusert jern (Fe^{2+} , se Figur 22).



Figur 22: Eh – pH diagram som viser stabilitetsområdet for pyritt (svovelkis), sideritt, hematitt og magnetitt. Eh– pH verdiene i grunnvannet i de loggete brønnene på Raudsand er vist med en rød sirkel, og viser at de ligger innenfor stabilitetsområdet for jernoksider (hematitt), men nær stabilitetsområdet for sideritt, pyritt, og magnetitt (Fra Garrels and Christ, 1965).

De høye pH-verdiene og de lave verdiene for sulfat i vannet (Figur 21) viser at slik oksidasjon av sulfider bare har skjedd i liten grad. Dette skyldes at det er lite sulfider, og at sulfidmineralene sitter spredt og innesluttet i magnetittmalmen, uten kontakt med grunnvannet. Denne observasjon bekreftes av at det ikke er påvist IP-anomalier (Indusert Polarisasjon) som skyldes sulfidmineraler i noen av brønnene unntatt i den nye mulige malmsonen i Bh4 og Bh5 (Rønning m.fl. 2017).

De relativt høye pH-verdiene i grunnvannet vil uansett hindre mobilisering av tungmetaller. Videre må det bemerkes at det ikke er påvist malm ved boring i området (og nivået) for de planlagte deponihallene. Modellering av de magnetiske data indikerer at den nye mulige malmkroppen ved svært ugunstig retning og styrke på remanens, kan gå ned til hallnivået, men dette synes mindre sannsynlig. Alt dette tyder på at muligheten for å få svovelsurt vann inn i de planlagte deponihallene er lite sannsynlig.

5.3 Hydrogeologiske forhold

5.3.1 Hydraulisk kommunikasjon i grunnvannsmagasinet på Raudsand

De fem grunnvannsbrønnene som er boret, logget og prøvetatt ligger innenfor et begrenset område, noe som gir et godt bilde av permeabiliteten og vannkvaliteten i berggrunnen lokalt. Ut fra det en vet om berggrunnen er det lite trolig at dette endrer seg vesentlig i det aktuelle området for deponihaller. Pumpeforsøk ble utført i alle borehullene unntatt Bh4, og det ble utført strømningsmåling samtidig med pumping. Vanngiverevnen varierte nedover i brønnprofilen for alle brønnene (Rønning m.fl. 2017), og må karakteriseres som normal for slike bergarter. I noen intervaller var vanngiverevnen svært lav. Størst vanngiverevne ble målt i øvre del av Bh2 (over pumpa som sto på 40 m dyp), noe som samsvarer med at det i dette intervallet er identifisert en forvitringssone. Med unntak av denne forvitringssonen viser pumpeforsøkene et fjellparti med rimelig ensartet vannledningsevne, som varierer, men avtar noe mot dypet (økt bergtrykk klemmer sammen sprekke). Dette siste betyr dårlig vertikal kommunikasjon i de vannførende sprekke, og de moderate vanngiverevnene registrert i hvert pumpepunkt viser også dårlig lateral kommunikasjon. Disse forholdene er godt dokumentert i NGU rapport 2017.024 (Rønning m.fl. 2017) og i kapittel 4 i foreliggende rapporten.

5.3.2 Utskifting av vannet i grunnvannsmagasinet på Raudsand

Brønnene er boret delvis ned til under havnivå, mens grunnvannsspeilet for de fleste av brønnene ligger helt oppe i dagsonen, opptil 350 m.o.h. Dette tilsier at det er svært høye hydrauliske trykk-gradienter i fjellsprekke, uten at dette har ført til oppsprekking og økt kommunikasjon sprekke imellom. Dersom fjellsprekke kommuniserte ville slike hydrauliske trykk-gradienter føre til en rask drenering av grunnvannsmagasinet, men dette er ikke tilfelle, siden grunnvannsspeilet står helt i overflaten på tre av brønnene. Grunnvannets kjemiske egenskaper (inkludert pH) viser svært lange oppholdstider i grunnvannsmagasinet, med pH i likevekt med kalk. Grunnvannet i brønnene viser også litt forskjellig kjemisk sammensetning, noe som også tyder på dårlig kommunikasjon. Vannkvalitetslogging viser lav oksygenmetning (Figurene 17, 18 og 19). Vannet skiftes derfor ut over svært lange tidsrom, noe som tilsier at nedbørsvannet i stor grad drenerer av på overflaten heller enn å sive ned i grunnvannet.

Brønn Bh1 er et unntak, med et lavt grunnvannsspeil (82 m under terreng), hørbar innstrømming over grunnvannsspeilet, og avrenning (360 l/time) på 190 m dyp (Rønning m.fl. 2017). Dette forholdet skyldes trolig at brønnboringen har skapt kontakt med en sprekke på 190 m dyp som (nå) har økt dreneringen fra brønnen. Denne avrenningen kan enkelt stoppes ved å plugge brønnen med betong, og om slike sprekker kommer i kontakt med fjellhallene kan de lett tettes ved injeksjon av betong slik det er tenkt (Arnesen 2017).

6. KONKLUSJONER

Magnetisk modellering har vist at den nye mulige malmkroppen kan ligge grunt og ha begrenset størrelse. Modellering uten magnetisk remanens viser at dypeste deler av kroppen ligger på ca. 90 m under bakken og den ligger da mer enn 250 m over deponihallene. Maksimalt volum er beregnet til ca. 1,4 mill. m³ og maksimal tonnasje til mindre enn 6 mill. tonn. Modellering med mulig magnetisk remanens viser imidlertid at den nye mulige jernmalmen kan være betydelig større og strekke seg mye dypere enn først modellert. Konklusjonen på dette arbeidet er at uten eksakt kjennskap til den remanente magnetiseringens styrke og retning (inklinasjon og deklinasjon) blir magnetisk modellering en for usikker metode til å bestemme størrelse og beliggenhet til den nye mulige malmkroppen. Dersom dette er avgjørende for å kunne etablere et deponi for farlig uorganisk avfall ved Raudsand, anbefaler NGU tyngdemålinger med påfølgende tyngdemodellering for å bestemme den nye mulige malmkroppens størrelse og beliggenhet.

Som jernmalm er dette trolig ikke drivverdig i dag, men Raudsandmalmen inneholdt ca. 0,2 % vanadium. Dersom den nye mineraliseringen har et tilstrekkelig stort volum og inneholder like mye eller helst mer vanadium, kan den på sikt være drivverdig siden vanadium er vurdert som et kritisk element.

Det kan være en vertikal avstand på ca. 250 m mellom den mulige malmen og deponihallene, men modelleringen med remanens viser at denne malmsonen kan strekke seg ned til havnivå. Også ut fra et estimat av mulig økonomisk verdi av denne nye mulige malmkroppen anbefales tyngdemåling og -modellering.

Lineamentstudie på LIDAR-data med cellestørrelse 10m x 10m viser at de lengste lineamentene går i ca. retning 70° – 250°, men at det finnes kortere lineamenter i flere retninger mellom de lengste. Måten disse lineamentene er prosessert frem favoriserer mulige spreke-/ forvitringssoner. NGU vurderer dette mønsteret som gunstig med hensyn på etablering av lagringshaller for farlig uorganisk avfall; dette fordi det viser dårlig kommunikasjon mellom hovedsprekkesystemene.

Ny logging av vannkvalitet med nyrenovert sonde og etter pumping av brønnene i september 2017, viser verdier mer i samsvar med laboratorie-analyser for vannets elektriske ledningsevne og pH på vannprøver fra brønnene. Relativt høye elektriske ledningsevner, pH over 7 og lav oksygenmetning i grunnvannet indikerer at vannet har oppholdt seg lenge i fjellet og vitner om lav gjennomstrømning. Dette bekreftes av relativt lav vanngiverevne i brønnene og at grunnvannet står høyt i brønnene til tross for en høyde på ca. 350 m over havet ca. 1500 m fra sjøen. Unntaket her er Bh1 som ligger utenfor hallområdet, men nært inntil adkomsttunnelen.

pH-analyser og -logging viser svakt basisk grunnvann som bufres naturlig til pH 8,2 i berggrunnen ved Raudsand. Dette tilsier utfelling av karbonat på de vannførende sprekke- og derved tetting over tid. Denne effekten kan sammenlignes med det en har i kalkstein. Basisk grunnvann, slik det opptrer ved Raudsand, vil ikke løse tungmetaller fra avfallet.

7. REFERANSER

- Arnesen, F.S. 2017: Bergteknisk vurdering av deponi. Multiconsult dokumentkode 617153-1. RIGberg-RAP-001.
- Cramer, J., Baranwal, V.C., Brønner, M., Dagestad, A., Erichsen, E., Keiding, M., Larsen, E., Schiellerup, H., & Solli, A. 2015: Vurdering av geologiske forhold ved potensielle lokaliteter til deponi for uorganisk farlig avfall. NGU Rapport 2015.055 (127 s.). https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2015/2015_055.pdf
- Elvebakk, H. & Lutro, O. 2017: Logging av 5 borehull ved Raudsand, Nesset kommune, Møre og Romsdal. NGU Rapport 2017.020. https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2017/2017_020.pdf
- Freeze, A. and Cherry, J. 1979: Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.
- Garrels, R.M. & Christ, C.L. 1965: *Solutions, Minerals, and Equilibria*. Textbook, Harper & Row, New York.
- Geosoft, 2012: CET grid analysis – Detect linear features, Oasis montaj (versjon 9.5) How-TO Guide, Geosoft, Canada, pp 5. <https://www.geosoft.com>
- Kartverket 2019: Høydedata og terrengmodeller fra Kartverket. <https://www.kartverket.no/data/Hoydedata-og-terrengmodeller/>
- NGU Lab. 2019.0015: Petrofysiske målinger på prøver fra Raudsand. Oppdragsrapport 2019.0015.
- Northwest Geophysical Associates Incorporation 2006: GM-SYS Gravity and Magnetic Modeling software. User's Guide Version 4.9 (101 s.)
- Ofstad, F. 2016: Helicopterborne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey at Raudsand area, Nesset municipality, Møre og Romsdal county. NGU Report 2016.037 (31pp.).
- Rønning, J.S., Baranwal, V.C & Ofstad, F. 2016: Grunnundersøkelser ved Raudsand, Nesset kommune i Møre og Romsdal. Resultater fra helikoptermålinger og forslag til videre undersøkelser. NGU Rapport 2016.043 (19 s.).
- Rønning, J.S., Elvebakk, H., Lutro, O., Dagestad, A. & Jæger, Ø. 2017: Grunnundersøkelser ved Raudsand, Nesset kommune i Møre og Romsdal. Tolkning av borehullslogger og vannanalyser. NGU Rapport 2017.024. (62 s.).
- Sanetra, S. 1985. The Rødsand Fe-Ti-V Deposits, Møre & Romsdal, Western Norway. Norges geologiske undersøkelse Bull. 402, 39-49
- Schön, J.H. 2011: *Physical Properties of Rocks*, Springer, 2011
- Svinndal, E.M. 2018: Svar på oppdrag om vurdering av alternativer for behandlingskapasitet for uorganisk, farlig avfall. NOTAT Miljødirektoratet, saksnummer 2018/10654.
- Tuttle K. 2018: Miljørisikovurdering. Raudsand. Farlig avfallsdeponi. Norconsult Oppdragsnummer 5168063 Versjon 05E.