




GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·



Rapport nr.: 2015.041	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen	
Tittel: Transport av metallforurenset grunnvann i gruveområdet på Løkken, Sør-Trøndelag.			
Forfatter: Gundersen, Pål; Seither, Anna; Forsgård, Maria; Dalsegg, Einar; Viola, Giulio; Fredin, Ola; Gjørva, Marit Bakken; Storrø, Gaute; Sæther, Ola Magne		Oppdragsgiver: NGU	
Fylke: Sør-Trøndelag		Kommune: Meldal	
Kartblad (M=1:250.000) Midt-Norge 2		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 105 Orkanger	
Forekomstens navn og koordinater: Løkken, Euref89-UTM32-6999436N-535350Ø		Sidetall: 52	Pris: 200
		Kartbilag:	
Feltarbeid utført: 2013	Rapportdato: 27.08.2015	Prosjektnr.: 351800	Ansvarlig: 
Sammendrag: Transport av forurenset grunnvann gjennom undergrunnen på Løkken har trolig hatt stor betydning for virkningsgraden av de forurensningsbegrensende tiltak som tidligere har vært gjennomført i Løkkenområdet. Denne rapporten sammenstiller noen tverrfaglige undersøkelser av grunnvannstransportert gruveforurensning som NGU gjennomførte på Løkken i 2013 og inkluderer: <ul style="list-style-type: none">- Data og vurderinger fra prøvetaking og analyser av grunn-/markvann og elvevann i Raubekken.- Vurdering av syv transekter med 2D-resistivitet/IP-målinger gjennom velteområdene på Løkken og langs elvebunnen i Raubekken.- Strukturgeologisk vurdering av de ytre gruvegangene i Gammelgruva for å avdekke eventuelle vannførende, gjennomgående sprekkesystemer.- Vurdering av LIDAR-data med henblikk på å avdekke potensielt vannførende sprekkesystemer og løsmasseforekomster i området. Det meste av det forurensete grunnvannet synes å nå Raubekken i to klart definerte soner. Mens grunnvannsutslagene nedenfor søndre velte virker logisk i forhold til veltenes plassering kommer de kraftige grunnvannsutslagene ved Orkla Industrimuseum overraskende langt nede i dalen ift. veltenene. Dette inntreffer dessuten etter en ca. 300 meter lang elvestrekning med svært lite innslag av forurenset grunnvann. Resistivitetsmålingene (2D) indikerer i hovedsak to mulige forklaringer på dette fenomenet. <ol style="list-style-type: none">Strømming av forurenset grunnvann gjennom dype sprekker i fjell fra Nordre velte/ Magnetittvelte eller vannfylte gruveganger.Forurenset grunnvann, i hovedsak fra området Nordre velte, kanskje også Magnetittvelte/Slamdam, strømmer ikke ut i Raubekken mellom de to utslagssonene grunnet drenerende masser under elva og/eller tette utfellinger i elvebunn og øvre løsmasser. Nedenfor Orkla Industrimuseum presses dette grunnvannet opp av en synlig fjellterskel i elva/ på tvers av dalen. Resultatene ser ut til å underbygge sistnevnte forklaring som den mest sannsynlige/ dominerende mekanisme. Men undersøkelsene gir ikke entydige svar på hvordan grunnvannsstrømmene beveger seg på Løkken. Flere grunnvannsboringer er trolig nødvendig for å avgjøre hva de observerte fenomenene fra 2D-resistivitets- og IP-målingene representerer fysisk. Detaljerte data, filer og kartlag fra undersøkelsene kan utarbeides og frigis hvis det skulle være behov for dette.			
Emneord:	Grunnvann	Gruveforurensning	
Løkken	Gruvedeponier	Raubekken	
Tungmetaller			

1. Forord

NGU har gjennomført kartlegging av hydrogeologiske forhold i Løkkenområdet for å øke kompetanse og forståelse av grunnvannsbevegelse rundt den nedlagte gruva. Rapporten dokumenterer sannsynlige grunnvannsstrømmer i og rundt gruveveltene på Løkken, 23 km Sør/Sør-Vest for Orkanger i Sør-Trøndelag. Feltarbeid ble gjennomført i 2013. Hensikten har vært å dokumentere grunnvannets transport og mekanismer i området, og å utvikle kompetanse på NGU for eventuell framtidig bruk i tilsvarende områder.

Resultatbehandling, kart, figurerbehandling og skriving er utført av Anna Seither, Maria Forsgård og Pål Gundersen. Bidragsyttere under prøveinnsamling, vannkjemiske undersøkelser og vannføringsmålinger har vært Anna Seither, Maria Forsgård, Marit Bakken Gjørva, Gaute Storrø og Pål Gundersen. De geofysiske undersøkelsene ble ledet og prosessert av Einar Dalsegg med bidrag under feltarbeid fra Pål Gundersen og Anna Seither. 3D-visualisering av de geofysiske undersøkelsene er gjort av Anna Seither. Struktureologisk feltarbeid ble utført av Giulio Viola, bearbeiding og vurdering av LIDAR-data er utført av Ola Fredin. Ola Magne Sæther bidro under fotografering og dokumentasjon av gruvegangene. Alle de nevnte jobbet på gjeldende tidspunkt for NGU.

Vi takker også Orkla Industrimuseum ved John Arnt Holmen for svært informativ omvisning i, og åpning av gruva i forbindelse med feltarbeidet.

Vi takker også COWI og Direktoratet for mineralforvaltning for informasjonsutveksling i forbindelse med problemstillingene på Løkken.

Hovedforfatter vil takke alle involverte for stor innsats, velvilje og faglig dyktighet under feltarbeid og rapportering.

Trondheim 27/8 - 2015
Pål Gundersen

Innhold

1. Forord	3
2. Innledning.....	5
2.1 Bakgrunn	5
2.2 Hensikt	6
2.3 Beskrivelse av området	6
3. Metode.....	10
3.1 In-situ målinger	10
3.1.1 Ledningsevne, pH og temperatur	10
3.1.2 Vannføring.....	10
3.2 Prøvetaking.....	11
3.2.1 Prøvetaking elv.....	11
3.2.2 Prøvetaking grunnvann.....	12
3.3 Analyser	12
3.4 Geofysikk og Strukturgeologi	12
3.4.1 2D-Resistivitet.....	12
3.4.2 IP-Målinger	13
3.4.3 LIDAR.....	14
3.4.4 Strukturgeologisk feltundersøkelse	14
4. Resultater og diskusjon.....	15
4.1 Resultater i Raubekken.....	15
4.1.1 Observasjoner og soneinndeling.....	15
4.1.2 Vannføring.....	18
4.1.3 Metallkonsentrasjoner	18
4.1.4 Ledningsevne, pH og temperatur	22
4.2 Resultater grunnvann/markvann.....	24
4.3 Geofysikk, LIDAR og strukturgeologi samstilt med vannkjemien.....	26
4.3.1 Geofysikk og vannkjemi.....	26
4.3.2 Lidar-data	31
4.3.3 Strukturgeologisk kartlegging	32
4.3.4 Oppsummerning	32
5. Konklusjon.....	33
6. Referanser.....	34
Vedlegg 1: Rådata fra grunnvanns- og elvevannsanalyser.....	35
Vedlegg 2: Detaljerte vurderinger angående mulige sprekkesoner.....	41
Vedlegg 3: Ledningsevne i forhold til Fe og Al.....	43
Vedlegg 4: Utfelling av metaller i undergrunn nedstrøms veltene.....	45
Vedlegg 5: Metallsammensetning benyttet for å tolke opprinnelsen til grunnvannsutslagene i Raubekken.	48
Vedlegg 6: Oversikt over prøvetakingsstasjoner.....	52

2. Innledning

2.1 Bakgrunn

Gruvene på Løkken har vært drevet nesten sammenhengende i 333 år fra 1654 til 1987. Uttak og avfallsmengder har naturlig nok økt og endret seg med teknologiutviklingen mens avfallsdeponier og hulrom i gruvegangene har blitt stegvis større. Oksidasjon og forvitring i deponiene har i samme takt økt utlekking av tungmetaller til Raubekken som renner gjennom Løkken og videre ut i den lakseførende elva Orkla (Figur 1 og Figur 2). Flere ulike renseteknologier har vært prøvd ut i de ulike driftsperiodene. I 1992 ble det gjennomført omfattende forurensningsbegrensende tiltak for å redusere forurensningsbelastningen på fisk og bunndyr i Orkla og Orkdalsfjorden. I korthet gikk tiltakene ut på å samle avrenningen fra veltene i dreneringsgrøfter og pumpe dem inn i gammelgruva ved Løkken. Etter hvert som gruvegangene ble fylt ble vannet pumpet ut igjen fra Wallenbergsjakta. På vei gjennom de gamle gruvegangene ble da vannet betydelig rensert som følge av ulike kjemiske reaksjoner (utfelling av jern, medfelling, adsorpsjon på pyrittoverflater med flere).

Effekten av denne "selvrensingen" i gruva har avtatt betydelig siden tiltakene trådte i kraft og samtidig er kravene skjerpet fra Miljødirektoratet (daværende KLIF). For å holde tritt har man derfor siden 2010 kalket det utpumpede vannet fra Wallenberg og latt metallene felle ut i Fagerlivannet like nedenfor. Bjørnlivannet 500 meter nedstrøms har også ved noen anledninger blitt beredskapskalket fra båt, noe som har hatt betydelig effekt på utgående vann fra Bjørnlivannet fram til ca. ½ år etter at kalkingene ble gjennomført.

Det er Nærings- og fiskeridepartementet gjennom Direktoratet for mineralforvaltning (DMF) som i dag har ansvar for at forurensningen fra Løkken er under kontroll. Etter krav fra Miljødirektoratet utga DMF i 2013 en egen rapport som foreslo permanente og langsiktige løsninger for Løkken (DMF 2013). Rapporten var basert på anbefalinger fra Cowi (Olsen *et al.* 2013).

NGU bidro aktivt i denne prosessen i 2013. En viktig erkjennelse ble at man visste for lite om den forurensningstransporten som ikke ble fanget opp av dreneringssystemene mellom gruveveltene og resipienten Raubekken. Dette utgjorde en betydelig større forurensningsbelastning til Raubekken enn den restmengden som ikke ble fjernet fra dreneringsvannet gjennom rensesprosessene i gruvegangene, ved Fagerlivannet og i Bjørnlivannet.

På bakgrunn av dette igangsatte NGU på eget initiativ en del undersøkelser på Løkken sommeren og høsten 2013. Formålet var flerdelt: NGU ønsket på den ene side å samordne og utvikle egen kompetanse på gruveforurensning med tanke på senere samfunnsbidrag og prosjekter. Samtidig var det også en naturlig del av NGUs daværende kartlegginger i og rundt Orkdalsvassføret. Om mulig ønsket man også å bidra til at forurensningsproblemene på Løkken skulle finne varige og samfunnsøkonomisk gunstige løsninger.

Arbeidet ble gjennomført under prosjektene "KARMA-3D" og "Forprosjekt – NGUs framtidige rolle innen deponier og forurensning fra gruvevirksomhet".

Herværende rapport sluttrapporterer resultater fra NGUs undersøkelser på Løkken i 2013. NGU understreker at rapporten er utført av NGU som del av et kartleggingsprogram og for å utvikle kompetanse og tverrfaglig metodebruk ved NGU.

2.2 Hensikt

Gjennom undersøkelsene ønsket vi å forstå hvor eventuelt forurenset grunnvann fra veltene på Løkkensiden beveger seg ned mot Raubekken, i hvilke mengder og med hvilken vannkvalitet. Vi ønsket også å forstå de bakenforliggende geologiske årsakene til disse grunnvannsstrømmene.

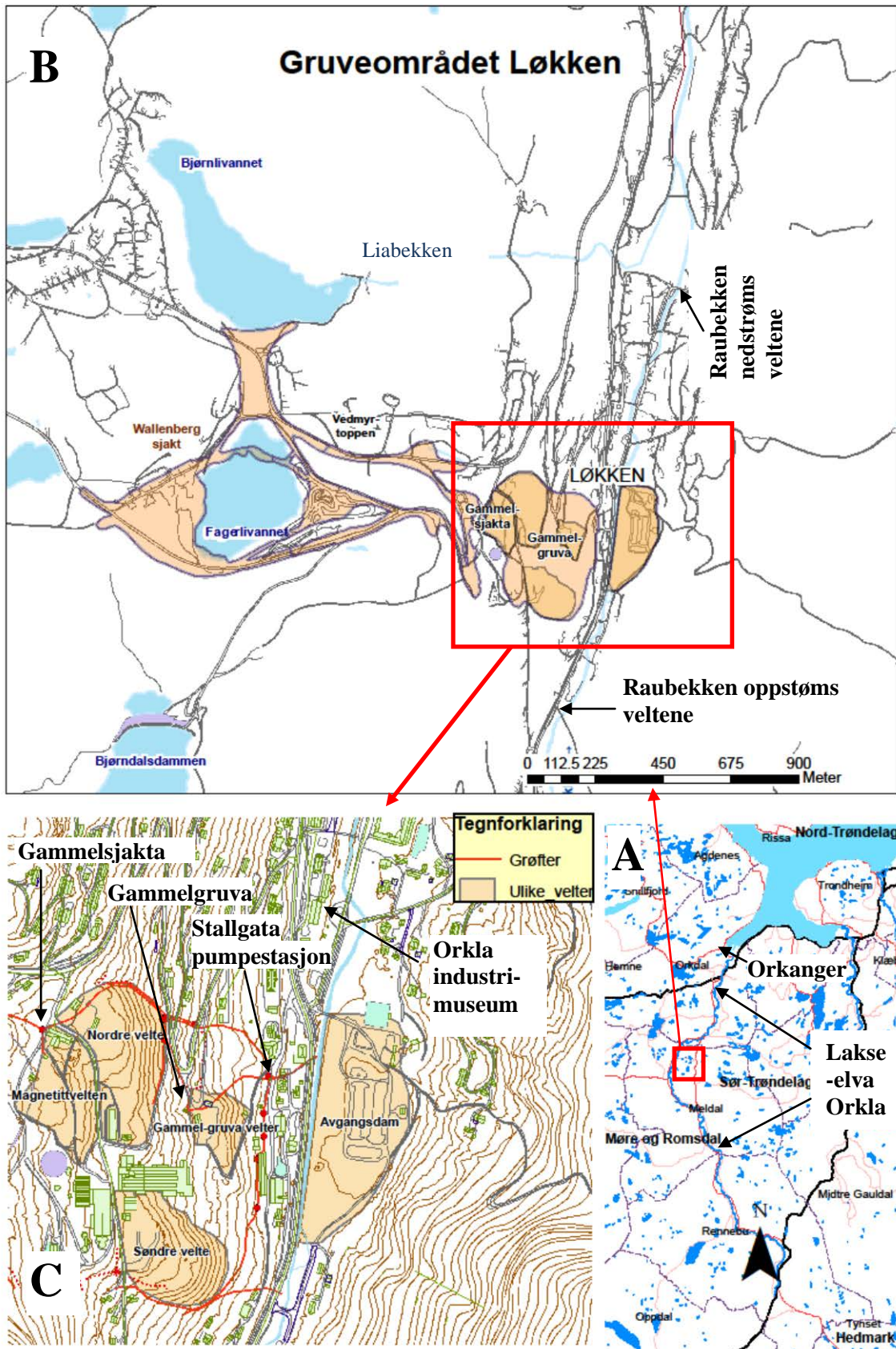
2.3 Beskrivelse av området

Raubekken renner ut i Orkla ca. 5 km nedstrøms Løkken, og Orkla når Orkdalsfjorden ca. 18 km videre mot nord. Selve gruvedområdet (Figur 1 og Figur 2) er lokalisert i Sør-Trøndelag, ca. 6 mil sørvest for Trondheim og 25 km sør for Orkanger.

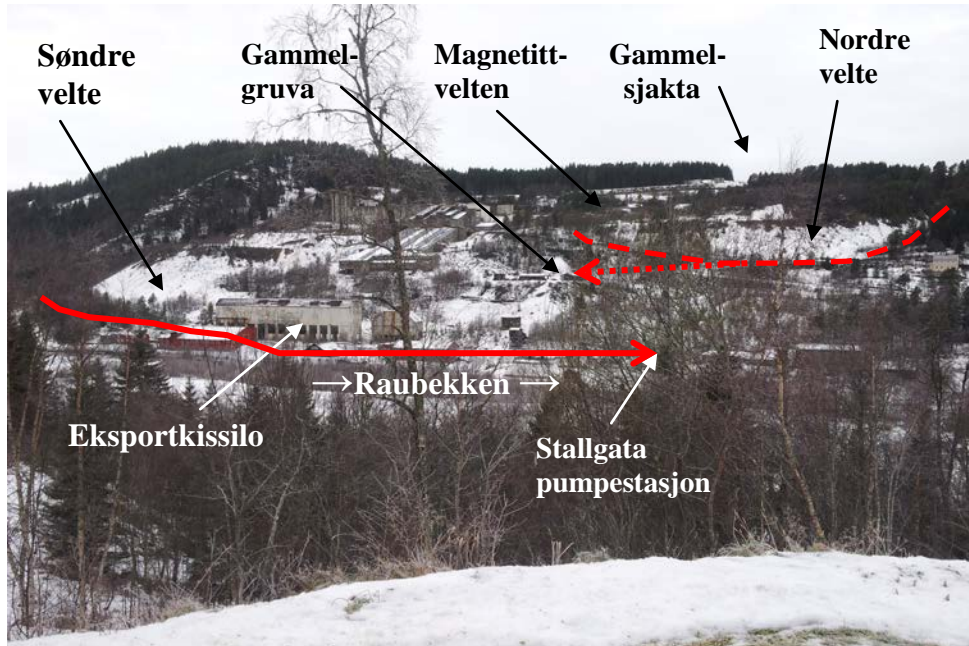
Det finnes store deponiområder som i volum og metallinnhold kan ha større skadepotensiale enn de eldre deponiene på vestsiden av Løkkendalen, særlig Bjørndalsdammen, områdene i og rundt Fagerlivannet og slamdammen øst for Raubekken. Som forurensningsproblem er imidlertid de vestre deponiene på Løkken en større utfordring, først og fremst p.g.a. måten disse deponiene ligger lagret (Iversen 2012, Arnesen *et al.* 1990). Oksygentilgang og vanngjennomstrømming i disse veltene gir pyrittoksidasjon, utlekkingen av asiditet, jern (Fe) og andre metaller. Forurensningen transporteres som grunnvann gjennom undergrunnen til Raubekken. Kobber (Cu) utgjør pr. i dag det største skadepotensialet for Orkla nedstrøms, men også Aluminium (Al) og Sink (Zn) kan etter hvert bli belastende for vannlevende organismer med dagens utvikling.

Vannet fra veltene samles i dag opp i grøfter og dreneringsledninger og pumpes eller renner ved selvføll inn til gammelsjakt der det sendes ned til de vannfylte gruvegangene (Figur 1). Dreneringsvann fra Nordre velte, Magnetittvelte og gruvevann renner inn hit ved selvføll, mens dreneringsvann fra nedsiden av Søndre velte og veltene nedenfor Gammelgruva pumpes opp med rørledning fra Stallgata pumpestasjon, gjennom inngang til gammelgruva og ca. 250 meter innover gruvegangene til disse møter selve sjakta.

Det forurensede vannet i gruvegangene pumpes deretter opp igjen 1 km lenger inn, ved Wallenberg sjakt, kalkes og slippes ut i Fagerlivannet. Derfra renner det ut i Bjørnlivannet (som tidvis beredskapskalkes) før det renner via Liabekken ned til Raubekken ca. 1 km nedstrøms veltene på Løkken.



Figur 1: A: Oversiktskart. B: Hele gruve/ deponiområde Løkken. C: Veltene på vestsiden av Løkkendalen, med dreneringer/grøfter samt slamdammen (avgangsdammen) på østsiden. Oversikt over prøvetakingsstasjonene finnes i vedlegg 6.



Figur 2: Oversiktsbilde over veltene på Løkken. Viktige dreneringer med anslått plassering i terrenget: Heltrukket rød til Stallgata pumpestasjon (pumpes derfra opp til gammelgruva). Stiplet rød renner ved selvføll til gruvegangene. Ledninger og grøfter leder dreneringsvannet via Gammelgruva til Gammelsjakta der det slippes ned til de vannfylte gruvegangene.



Figur 3: Inngangen til Gammelgruva (pil). Under det planerte området foran i bildet ligger deponimassene fra Gammelgruva.

Ved den gamle lossestasjonen der produktene fra oppredningsverket ble mellomlagret før lossing på jernbanevogner ("eksportkissiloen") ligger det i dag betydelige mengder utfellinger fra gjenværende produkter/ forurenset masse (Figur 4). Selv om avskjæringsgrøften går like i framkant av denne, kan den trolig utgjøre en forurensningskilde gjennom avrenning i grunnen ned til Raubekken.



Figur 4: "Eksportkissiloen", lossestasjon for jernbane/ mellomlager for produktene fra Løkken

3. Metode

3.1 In-situ målinger

3.1.1 Ledningsevne, pH og temperatur

Ledningsevne, pH og temperatur ble målt på mange ulike steder langs Raubekken: Midt i bekken der strømmingen er sterkest, ved øst- og vestsiden og i samleprøver som var representative for hele elvetverrsnittet. I tillegg ble det målt i vannpytter og gravde hull i elvebredden. Under en forundersøkelse 10/7 2013 ble hele elva observert (med vadere) og ledningsevne tatt mer eller mindre kontinuerlig nedover elva. Dette gav en første oversikt over hvor størst fokus skulle legges ved senere prøveinnsamling.

Ledningsevne ble målt med to forskjellige måleapparater. Det var en Multimeter fra WTW (Multi 3420) koblet til en TetraCon925 ledningsevnecelle. Det andre apparatet var et WTW Cond 315i/SET . Temperaturmålinger ble også gjort med ledningsevneapparatet. pH ble målt med en målepenn fra IQ Scientific Instruments (modell IQ125).

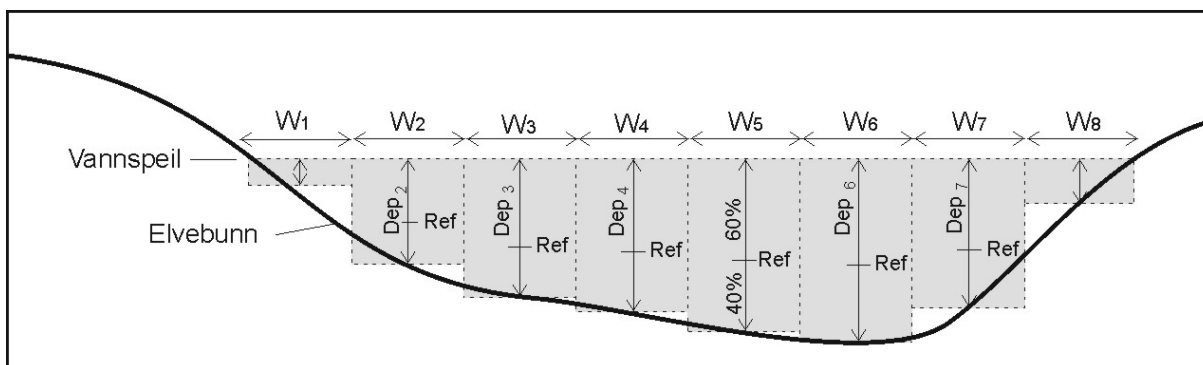
3.1.2 Vannføring

Vannføringen i bekken ble målt med en SonTek FlowTracker (Figur 5). Måleprinsippet er basert på at lydsignaler som sendes ut i vannet blir reflektert av partikler. Fordi partiklene beveger seg med vannstrømmen, oppstår en målbar frekvensforskyvning mellom sendte og reflekterte signaler. Ved hjelp av denne forskyvningen kan dermed vannhastigheten bestemmes. Med kjent vannhastighet og dybde langs elvas tverrsnitt kan deretter vannføringen i elva beregnes.



Figur 5: Vannhastighetsmålinger med FlowTracker.

Vannføringen ble analysert for totalt 8 tversgående transekter på ulike steder nedover Raubekken. For å unngå stor usikkerhet i målingene ble det valgt steder med forholdsvis jevn elvebunn og få strømningsvirvler. Vannhastighet ble målt i referansedybden ved flere punkter langs profilen (20-50 cm avstand). Med utgangspunkt i elvebunnen er referansedybden 40% opp i forhold til totaldybden (Figur 6). Denne dybden gir jf. metodebeskrivelsen en representativ vannhastighet for vannsøylen på aktuelt punkt i elva.



Figur 6: Elve-tverrsnitt med typisk inndeling. Representative vannhastigheter ble målt 40% opp fra bunnen (merket "Ref" i figuren) langs tverrsnittet av elva.

3.2 Prøvetaking

3.2.1 Prøvetaking elv

Vannprøvetaking i elva ble foretatt i to perioder. Den første perioden omfattes av to dager under stabile værforhold, 11-12/7-2013. Ingen signifikant nedbør falt i tiden før eller under prøvetakingen og temperaturen var også nokså stabil. Den andre perioden omfattes av én dag uken etter den første prøvetakingen, 18/7-2013. Det hadde falt mye regn i dagene mellom de to prøvetakingene.

Det er krevende å ta en representativ vannprøve fra tverrsnittet av en bekk som ikke har homogen vannstrømning over elvebredden og som til dels har definerte grunnvannsutslag langs den ene eller begge elvebreddene og på bunnen. Noen vannprøver ble tatt både på den østlige og vestlige siden av bekken for å sjekke effekten av dette. Ved alle prøvetakingspunkter ble det tatt samleprøver, som er en blanding av vann fra hele elveprofilen. Samlede, representative prøver ble enten tatt:

- A. Ved å trekke prøveflasken gjennom hele profilen (de fleste prøver 11. og 12. juli).
- B. Prøver som ble tatt med en 50 ml sprøyte, der vi delte elva i 5-8 deler fra breidd til breidd, og forflyttet sprøyta rundt i vannsøylen innen hver av dem. Uttak i ml fra hver sone ble anslått i forhold til dybde og vannhastighet. Prøvene fra hvert uttak ble samlet i en 1 L plastflaske, ristet og helt videre i 100 ml prøvetakingsflaske. Som kontroll ble det på flere av lokalitetene tatt 1-2 ekstra prøver på samme sted for å sjekke avviket (benyttet hele prøveinnsamlingen 18/7 - etter regnperioden).
- C. På seks lokaliteter (11. og 12. juli) ble det målt nøyaktig vannhastighet med FlowTracker og uttak fra hvert sted med sprøyte (som i punkt B.) ble beregnet i forhold til vannhastighet og dybde på stedet. Denne metoden tillot den mest nøyaktig vektingen av uttatt prøvevolum langs elvetransektet og skulle gi den mest representative samleprøven.

Prøvene til kationanalyser ble samlet i 100 ml HDPE flasker som ble skylt med elvevann tre ganger før prøvetaking. Vannet ble ikke filtrert. Hver prøve ble surgjort med HNO₃. 250 µl ble tilsatt, noe som tilsvarer omtrent en pH på 1,7 og en konsentrasjon på 0,03 M. Inntil analyse ble prøvene lagret i kjøleskap.

3.2.2 Prøvetaking grunnvann



Figur 7: Eksempel på en sandspiss i elvebredden som ble brukt for prøvetaking av grunnvann.

Grunnvann/ markvann ble prøvetatt ved hjelp av PE-plastrør som ble banket ned i elvebredden. De nederste 10-15 cm av rørene var gjennomboret med ~20 hull på cirka 2 mm diameter. Rundt filter-spissene var det festet et plastfiltermateriale med ~0,2 mm åpning for å holde partikler ute. Spissene stod omtrent 0,2-0,4 m ned i elvebredden. På grunn av harde utfellingene i topplaget var det dessverre ikke mulig å prøveta fra mange av de interessante stedene.

Noen grunnvannsprøver ble også tatt i vannpytter som ble gravd ut i elvebredden samt i små hull der grunnvann rant opp under trykk.

Grunnvann/ markvann ble filtrert med Sartorius stedim, Minisart syringe filter, hydrophilic (0.45 µm filteråpning) koblet til BD Plastipak 50 ml sprøyte. Grunnvannsprøvene ble som elveprøvene surgjort med HNO₃ til pH 1.7 og lagret i kjøleskap før kationanalyse.

3.3 Analyser

Kationene ble analysert med ICP-AES ved NGU-lab. Analysene gav data for 32 ulike kationer, men fokus ved tolkningen er lagt på Fe, Cu, Al og Zn.

3.4 Geofysikk og Strukturgeologi

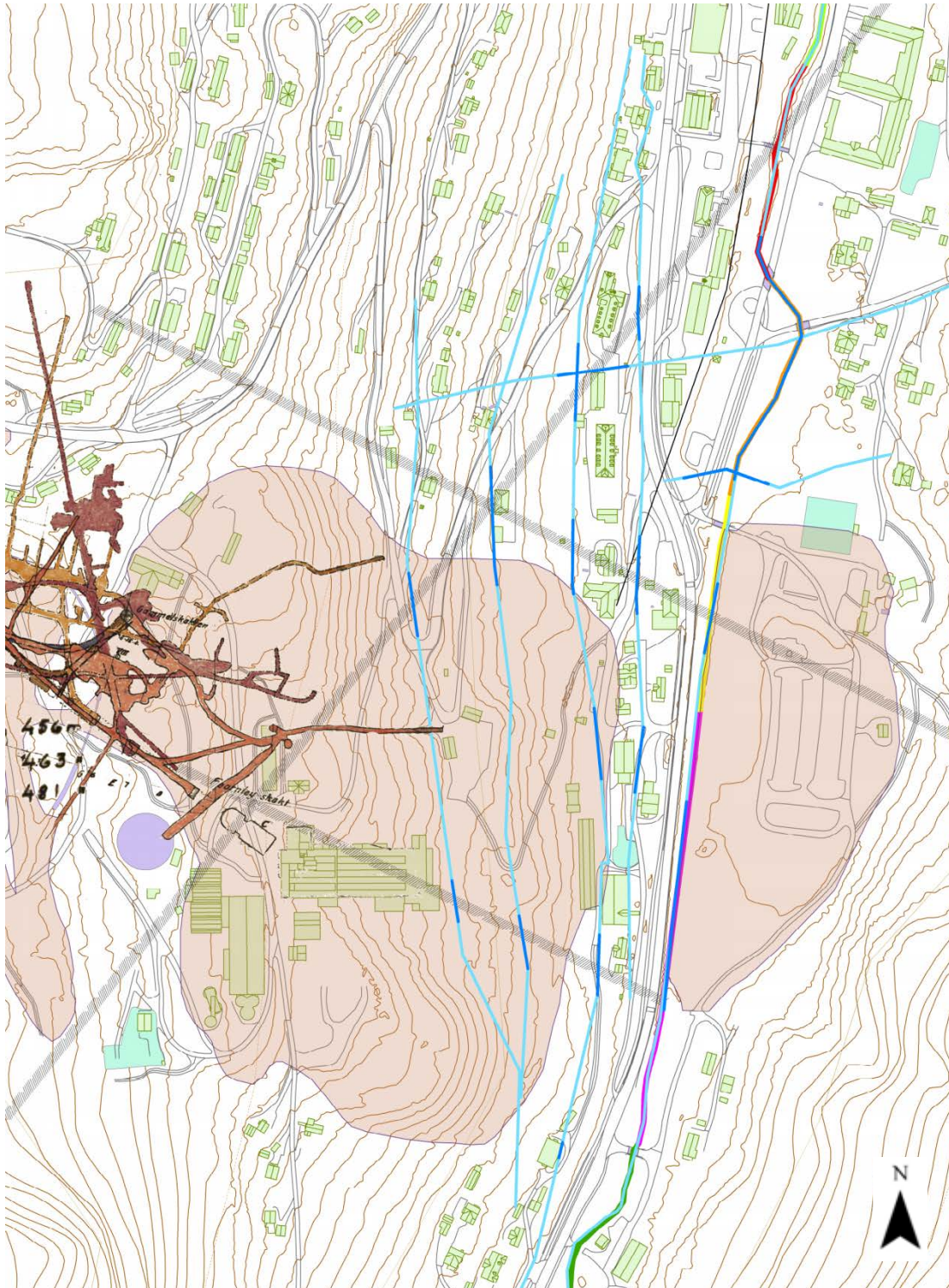
3.4.1 2D-Resistivitet

Hensikten med disse målingene var å lokalisere eventuelle foretrukne soner/lag/ traséer mellom gruveveltene og Raubekken som transporterte det gruveforurensede grunnvannet. Slike soner kan være eskere, grovere og sortert sand/ grus i sedimenter eller sprekkesoner i fjell.

2D-resistivitetmålinger blir utført med et system av kabler og elektroder som legges ut på bakken langs en rettlinjert trasé. En strøm blir injisert ned i bakken gjennom strømelektroder og den resulterende spenningsforskjellen på potensialelektroder blir målt. Ved å flytte målingene mellom de ulike elektrodeseffene oppnås en resistivitetsprofil. En mer utførlig beskrivelse av metodene finnes på

<http://www.ngu.no/no/hm/Norges-geologi/Geofysikk/Bakkegeofysikk/Elektriske-metoder/>.

På den vestlige siden av bekken ble det målt syv 2D-resistivitetsprofiler i perioden juli - november 2013. Profilene ble målt med 5 m elektrodeavstand bortsett fra den ene (på tvers av dalen, ved slamdammen) som hadde 2 m elektrodeavstand. Profilene som ble målt var mellom 160 og 1000 meter lange (Figur 8).



Figur 8: Oversikt over de syv 2D-resistivitets-profilene som ble målt (alle blå streker).

3.4.2 IP-Målinger

Samtidig med resistivitetsmålingene ble det også målt induert polarisasjon (IP) for å avdekke eventuelle mineraliseringer. Disse har på samme måte som sprekkesoner lav resistivitet og er selvsagt ikke usannsynlig å finne i et gruveområde med betydende sulfidmineraliseringer. IP-målingene viser hvor lenge/godt polarisasjonsspenningen i grunnen holder seg etter at strømmen er slått av. Et volum med forsinket signal (høy IP) som sammenfaller med et volum med lav resistivitet indikerer en mineralisering istedet for ionerikt grunnvann, i hovedsak fra

sulfider. Lav resistivitet uten høyt IP-signal kan tyde på ionerikt grunnvann eller andre masser med høy ledningsevne (som marin leire). De målingene som benyttes i denne rapporten er publisert og beskrevet i Dalsegg 2014.

Generelt er forøvrig IP-målinger følsomme for forstyrrelser fra kraftledninger, jernbane osv. i tettbygde strøk. Det er derfor vanskelig å trekke sikre konklusjoner fra disse målingene (Figur 19).

3.4.3 LIDAR

Lidar, laserskanning av terrenget fra fly, ble brukt til å lage en høyoppløselig terrengmodell over undersøkelsesområdet. Ved digital filtrering av disse data kan kun bakkepunkter brukes, slik at vegetasjon og bebyggelse blir fjernet fra terrengmodellen. Denne prosesseringen viser et detaljert bilde av geologien i overflaten. Den kan brukes til å tolke strukturer i berggrunnen og gir også en meget god indikasjon på løsmasstype, til en viss grad også løsmassemektighet. Lidardata fra Kartverket ble tilrettelagt og tolket av Ola Fredin fra NGU.

3.4.4 Strukturgeologisk feltundersøkelse

Feltarbeid ble utført under dagsekspedisjon til Løkken med strukturgeolog Giulio Viola. Hensikten var å finne igjen/ verifisere antatt vannførende sprekkesone fra tolkning av 2D-resistivitetsprofilene.

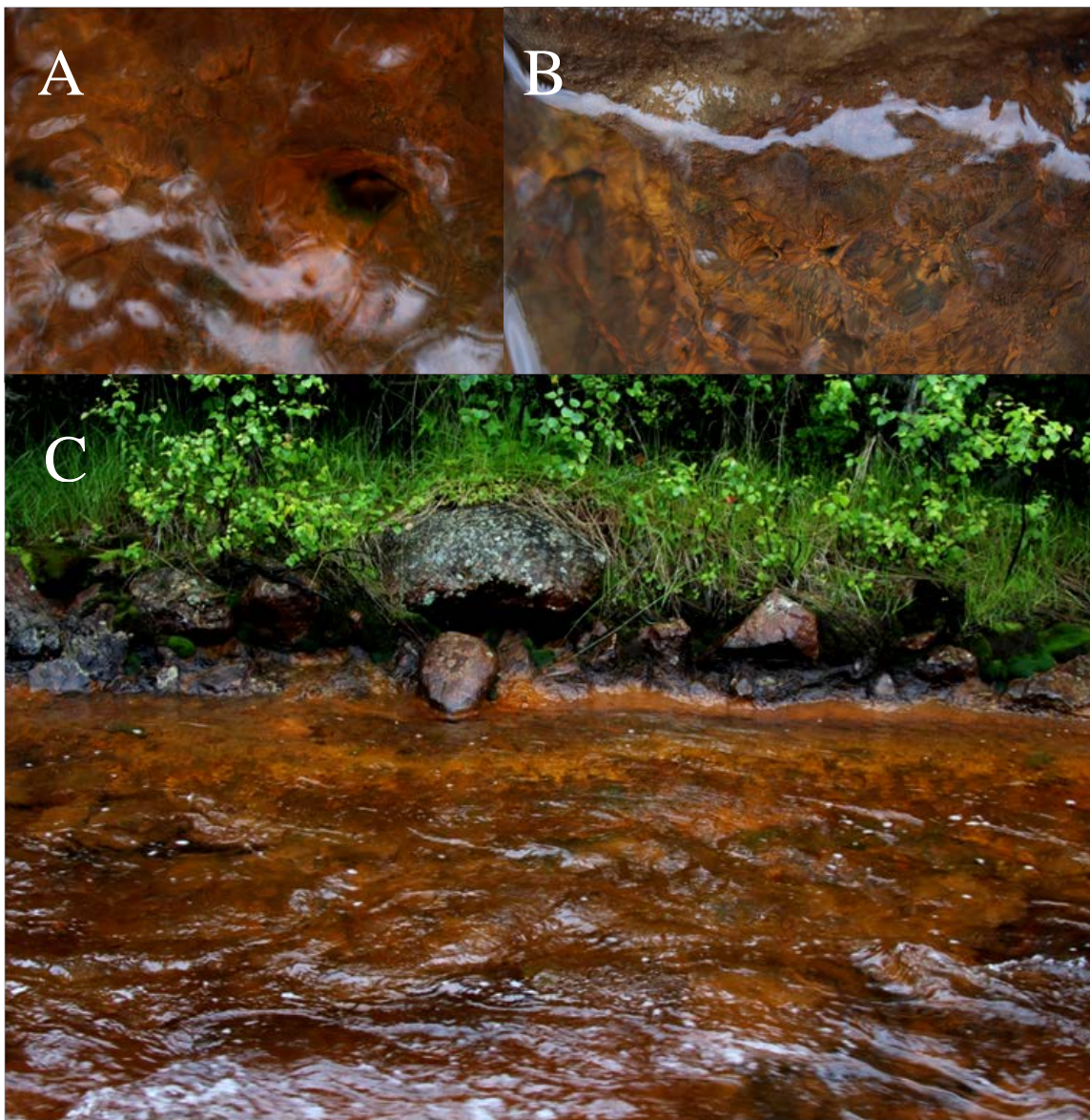
4. Resultater og diskusjon

I kapittel 4.1 og 4.2 diskuteres det hvor grunnvannstransporten fra gruveveltene på Løkken ser ut til å komme ut i Raubekken, og i kapittel 4.3 søkes dette forklart gjennom observasjoner og geofysiske undersøkelser. Det presiseres at vannkjemi kun er hentet under to nærliggende feltperioder og at andre årstider og vær-situasjoner sikkert kunne gi noe annerledes resultater.

4.1 Resultater i Raubekken

4.1.1 Observasjoner og soneinndeling

Under første dags feltarbeid 10/7-2013 ble det gått med vadere i Raubekken fra bensinstasjon oppstrøms gruveområdet og hele veien ned forbi velteområdene på Løkken. Det ble observert tydelige hull like over og like under vannspeilet i elva (Figur 9A og 9B). Forurenset grunnvann kom tydelig ut av disse hullene.



Figur 9: Hullene der grunnvannet strømmer ut hadde vanligvis tykkelse som en blyant eller mindre. Der hullene lå over vannstanden i elva kunne det enkelte steder stå opp en liten fontene fra hullene. Bildene er fra grunnvannsutslag i rød sone (E) i Figur 11 av Raubekken under flomeepisoden.



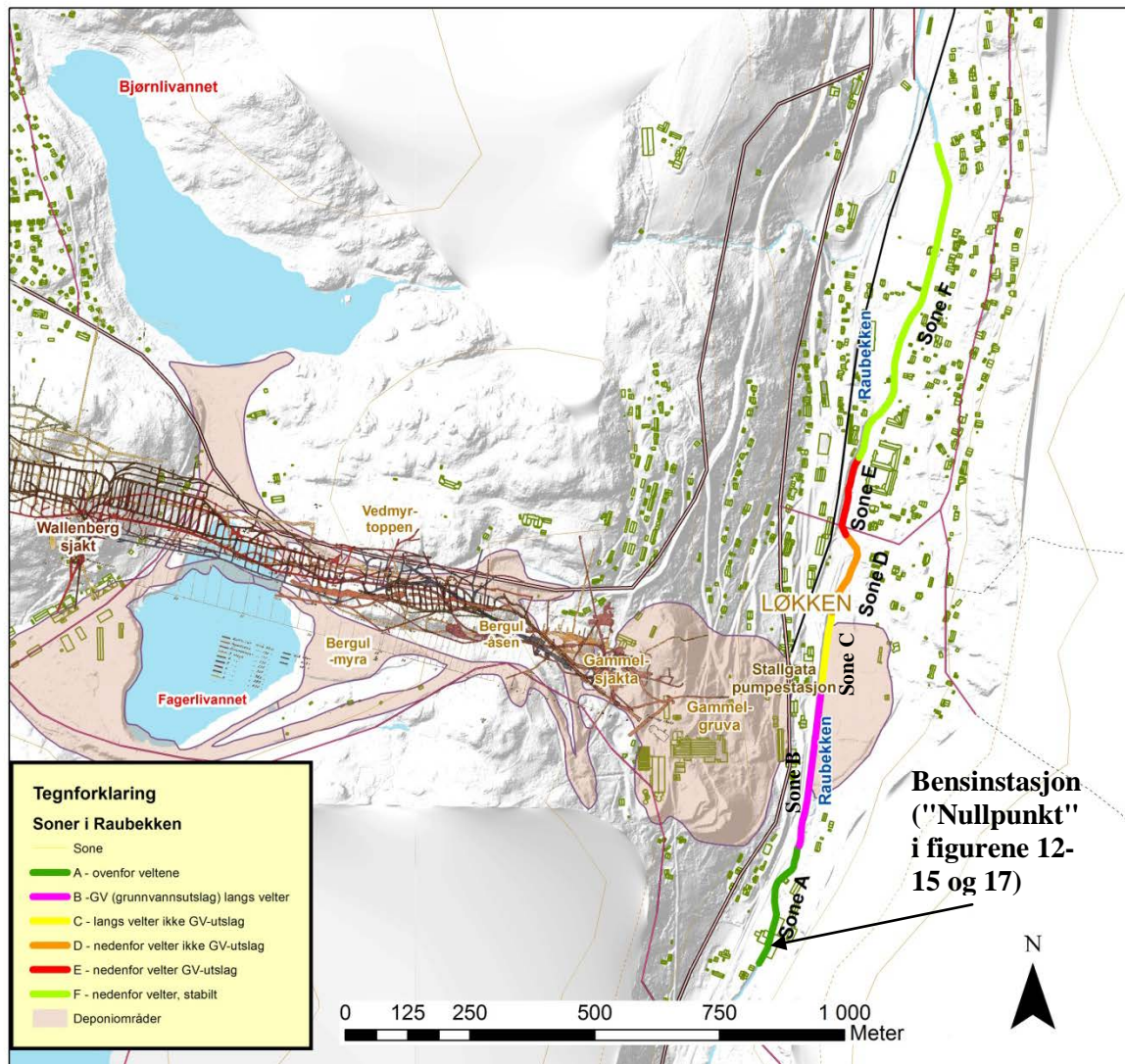
Figur 10: Mange steder lå det en kappe eller små hauger med grønn mose over hullende der det forurensede grunnvannet kom ut. Denne mosetypen ble ikke observert andre steder enn ved grunnvannsutslagene i elva.

Grunnvannsutslagene hadde gjerne skarpt lys gul til lys brune bånd rundt åpningen, som kunne ha en rørtykkelse fra en nåls til en lillefingers tykkelse. Utfellinger utenfor disse sonene med grunnvannsutslag var gjerne mer mørkbrune, men også grunnvannsutslag med helt brunsvarte utfellinger rundt ble funnet i litt dypere dammer med stillestående vann i elvebredden. Ledningsevnen i vannet rundt grunnvannsutslagene var ofte svært høg.

Basert på observert hyppighet av grunnvannsutslag, samt de metallkonsentrasjonene som blir presentert i Figur 12 og Figur 13, ble Raubekken inndelt i 6 soner som vist i Figur 11. De tydeligste grunnvannsutslagene kom i strekninger av fiolett sone (B) og langs hele rød sone (E). Mørk grønn sone (A) er oppstrøms gruveveltene og relativt upåvirket. Sonene gul (C), oransje (D) og lys grønn (F) viser ingen rask økning i metallkonsentrasjoner som kunne indikere betydelige lokale grunnvannutslag (de er ”stabile soner” i forhold til forurensningsstatus).

Mindre grunnvannsutslag ble også observert sporadisk i oransje (D) og lys grønn sone (F). Det tydeligste av disse ble observert i Nordvestre hjørne av slamdammen, langs Raubekkens østside i overgangen mellom gul (C) og oransje (D) sone.

Oversiktskart - Løkkensiden



Figur 11: Soneinndeling langs Raubekken gjennom Løkken. Deponiene og gruvene, som egentlig ligger under bakken, er også inntegnet. Nullpunkt for vannkjemifigurene også inntegnet.

4.1.2 Vannføring

Vannføringsmålingene (totalt 8 målinger) ble utført for å kunne:

- A. Beregne metalltransport pr. tidsenhet (v.h.a. vannføring og metallkonsentrasjoner).
- B. Beregne hvor mye vann en måtte ta fra hver del av elvas tverrsnitt for å få en representativ vannprøve.
- C. Beregne økningen i vannføring nedover elva (innsig av grunnvann og sidebekker).

Noen av målingene viste en liten nedgang i vannføring fra én stasjon til en annen lengre ned i elva (tabell V1 i vedlegg 1). Dette kan teoretisk sett skyldes at elvevann drenerer ned i vannførende lag *under* elva (som trolig finnes, jf. kapittel 4.3.1). Men vi tolket det som mer sannsynlig at det i dette tilfelle var en målefeil som følge av vår da manglende erfaring med å finne gode måletransekter og rense disse for større steiner og lignende før målingene.

De forventet beste transektene øverst og nederst indikerte at vannføringen ikke økte målbart fra øverste målepunkt (0-punktet i Figur 12 og Figur 13, ovenfor veltene på Løkken) ned til og med det nederste påviste grunnvannsutslaget i rød sone. Under tørrværsepisoden den 10.-12. juli 2013 var følgelig vannføringen på ca. 0.22 m³/s både oppstrøms og nedstrøms Løkken, mens den etter en regnværperiode økte til det tredobbelte, ca. 0.6 m³/s den 18. juli.

Som metode for å beregne hvordan man tar en representativ vannprøve fant vi ikke at vannhastighetsmålingene var hensiktsmessige. Metoden tok svært mye tid (minst 40 sekunders målinger på ti punkter for hvert elvetransekt, pluss beregning av proporsjonal vannmengde, selve prøvetakingen, pluss rigging av utstyr). Beregning av hvor mange ml som skulle tas ut med sprøyte fra hver del av elvetransektets bredde og høyde ble langt raskere foretatt ved øyemål og eventuelt flere paralleller. Metoden kan imidlertid brukes for å oppnå svært representative vannprøver nedstrøms grunnvannsutslagene når man trenger å vite helt nøyaktig hvor mye av forurensningen som kommer ut langs de enkelte elvestrekkene.

Detaljert informasjon om målingene finnes i vedlegg 1.

4.1.3 Metallkonsentrasjoner

En av de mest interessante observasjonene i Figur 12 og Figur 13 er at en så stor andel av økningen i metallkonsentrasjoner skjedde i en kort strekning i rød sone, flere hundre meter lenger ned i Løkken-dalen enn selve gruveveltene (Figur 22). En særlig stor andel av jern (Fe) og aluminium (Al) til Raubekken kom ut i denne sonen, men i stor grad også kobber (Cu) og sink (Zn). Fenomenet er tidligere beskrevet og vurdert i Arnesen *et al.* 1990 og Olsen *et al.* 2013.

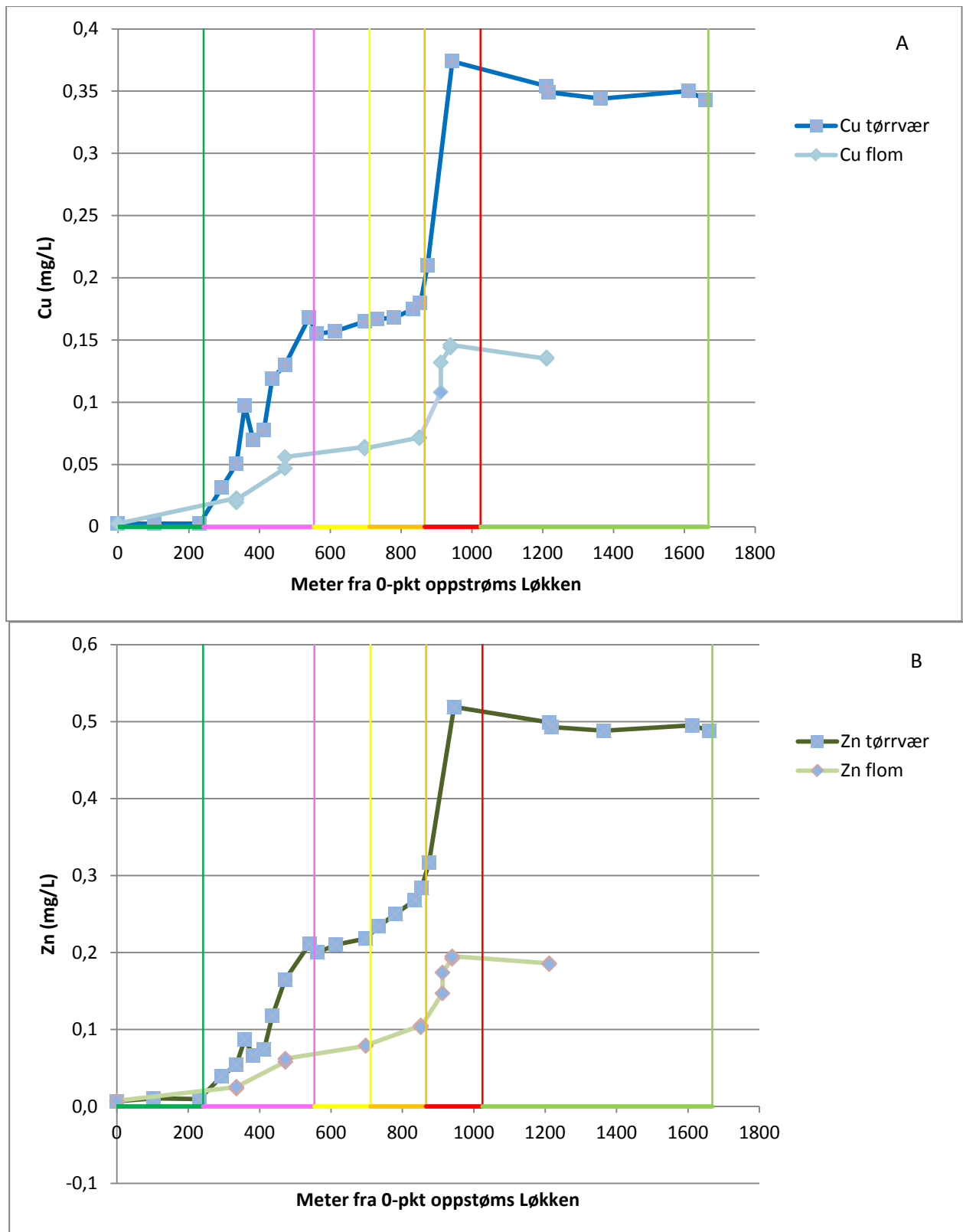
Under den moderate flomepisoden (18/7-2013) var metallkonsentrasjonene betydelig lavere enn uka før i de forurensa delene av Raubekken, trolig pga. fortykning etter regnværet. Under denne flomepisoden ble det tatt noen dublettprøver. De fleste av disse prøvene var tilnærmet identiske, men i ett tilfelle var det et ~25 % avvik mellom de parallelle prøvene både for Cu, Zn, Al og Fe. Dette var midt i elva i røde sone. Avviket mellom parallellene skyldtes trolig at elvas turbulens/ heterogenitet gjorde det vanskelig å ta representative prøver.

Prøver tatt på elvas vestsida viste mange steder forhøyede konsentrasjoner (for både Al, Fe, Cu og Zn). Dette gjelder særlig i fiolett sone der én av prøvene tatt på elvas vestsida hadde ca. 5 ganger høyere konsentrasjon enn i en representativ samleprøve tatt på samme transekt av

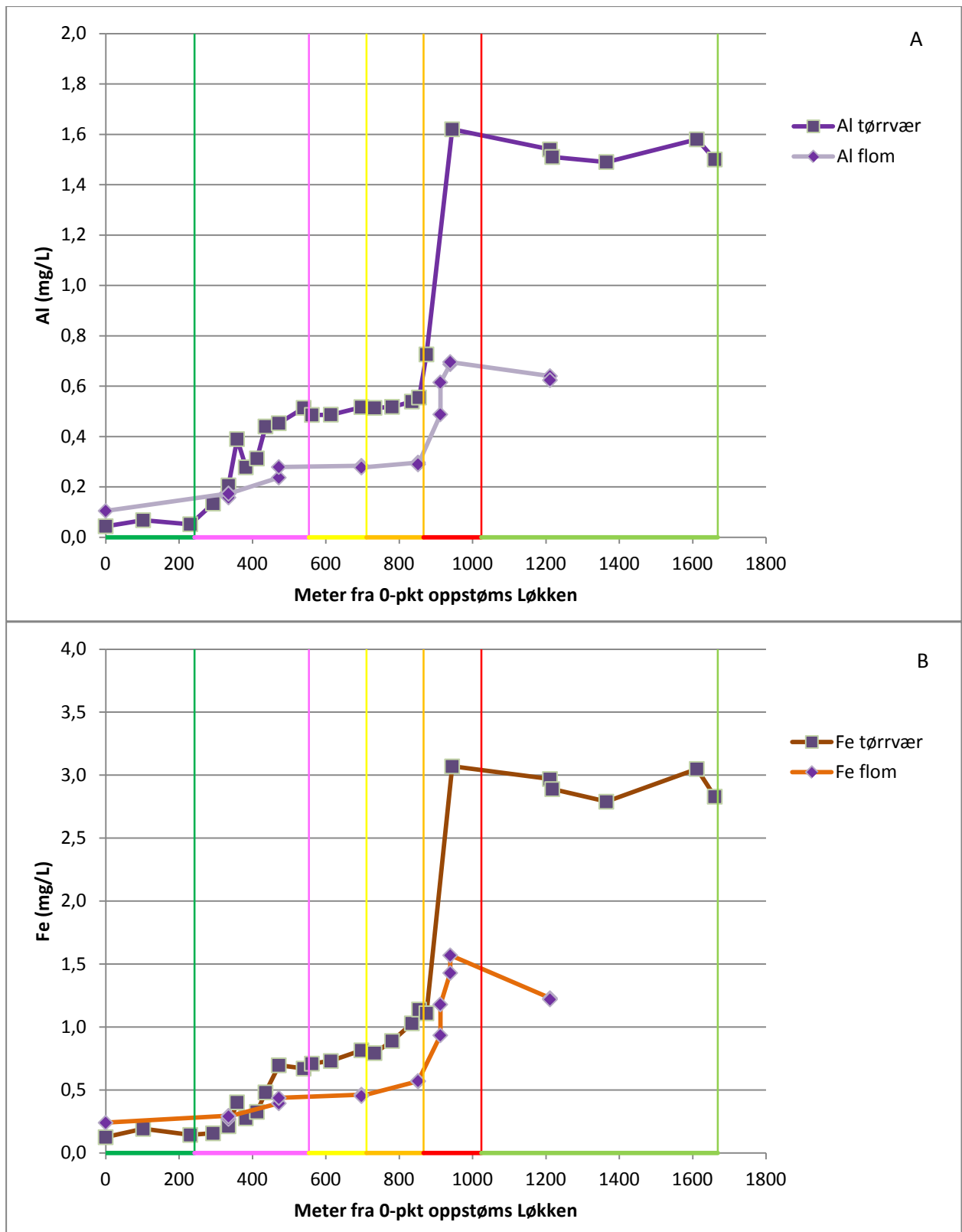
elva. Observasjonen sammenfalt også med tydelige grunnvannsutslag observert like ovenfor og som ikke hadde rukket å bli innblandet i hele elvas bredde.

Relativt høye verdier av Fe og Zn ble for øvrig også funnet helt inntil bredden i stille vann på østsiden i fiolett sone samt i oransje sone litt nedstrøms fra slamdammen. Dette kan trolig i begge tilfeller skyldes utlekking fra slamdammen som ikke hadde rukket å bli innblandet i elvevannet. Det kan være verdt å merke seg at konsentrasjonen av akkurat Zn og Fe, men ikke Al og Cu, øker i noen grad på slutten av oransje sone (Figur 12 og Figur 13). Dette kan tyde på at noe av grunnvannet som kommer opp *i forkant av rød sone* stammer fra slamdammen. Arnesen *et al.* (1990) påpeker i tråd med dette at mye mer Zn enn Cu lekker ut fra slamdammen til Raubekken.

Alle resultatene fra elvevannsprøvetakingen kan ses i vedlegg 1, kart over prøvetakingssteder i vedlegg 6.



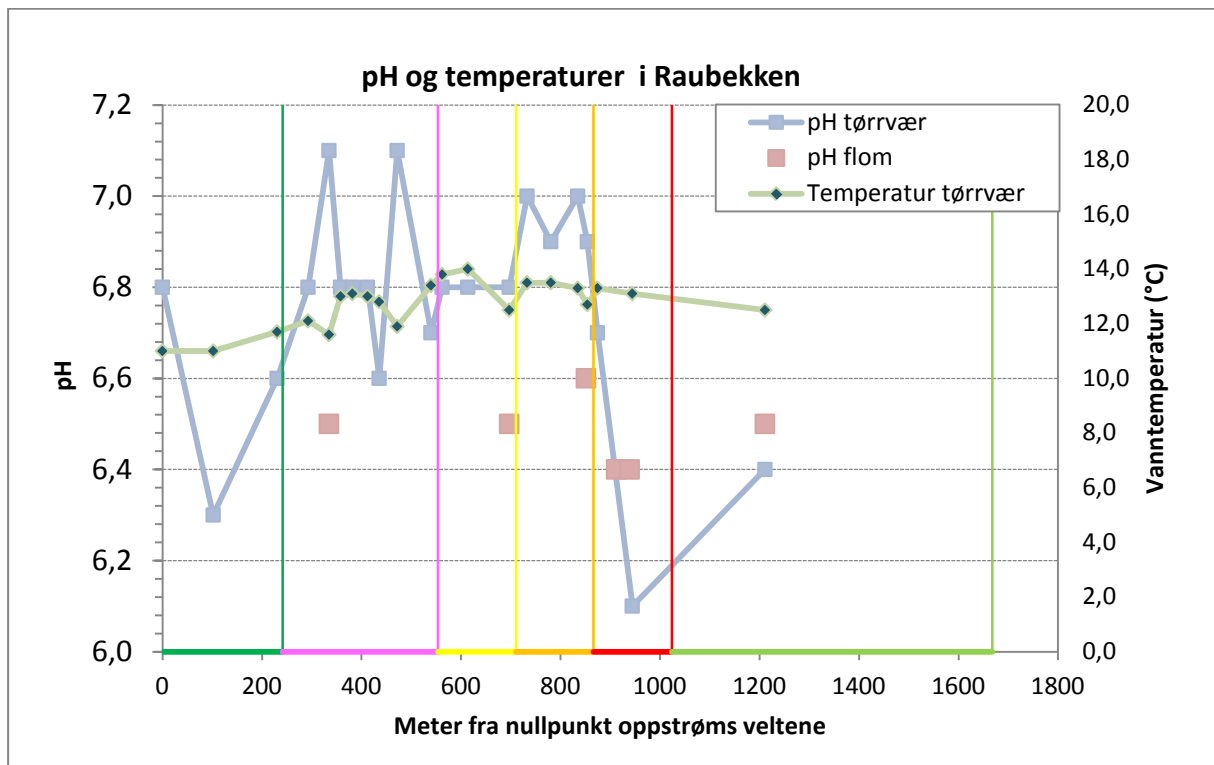
Figur 12: A; kobber (Cu), B: sink (Zn) i elvevann, Raubekken. "Tørrvær" (11.-12 juli 2013; $\sim 0.22 \text{ m}^3/\text{sek}$) og "flom" (18.juli 2013; $\sim 0.6 \text{ m}^3/\text{sek}$). Nullpunkt (se Figur 11) refererer til pkt der Raubekken renner mot øverste hjørne av bensinstasjon-bygning på Løkken (Euref89, UTM32, 6998867N 535446Ø). Alle avstander i luftlinje i forhold til dette punktet.



Figur 13: A: aluminium (Al) og B: jern (Fe) i ellevann, Raubekken. "Tørrvær" (11.-12 juli 2013; ~0.22 m³/sek) og "flom" (18.juli 2013; ~0.6 m³/sek). Nullpunkt (se Figur 11) refererer til pkt der Raubekken renner mot øverste hjørne av bensinstasjon-bygning på Løkken (Euref89, UTM32, 6998867N 535446Ø). Alle avstander i luftlinje i forhold til dette punktet.

4.1.4 Ledningsevne, pH og temperatur

Ved de to episodene som ble målt var det forøvrig svært liten variasjon i pH og temperatur nedover Raubekken (Figur 14), men pH gikk noe ned, til pH 6, ved grunnvannsutslagene i rød sone. Ved pH 6 er imidlertid bufferkapasiteten for karbonatbufret vann i kontakt med atmosfæren kritisk lav, og ved små endringer i forholdene kan pH i elva falle betydelig mer. Temperaturer målt i elva kunne ikke gi noen indikasjon på at elva skulle være ekstra påvirket av grunnvannsutslag på noen steder ettersom variasjonene var så små. Moderat temperaturøkning nedover skyldtes nok trolig at vanntemperaturen økte utover dagen.

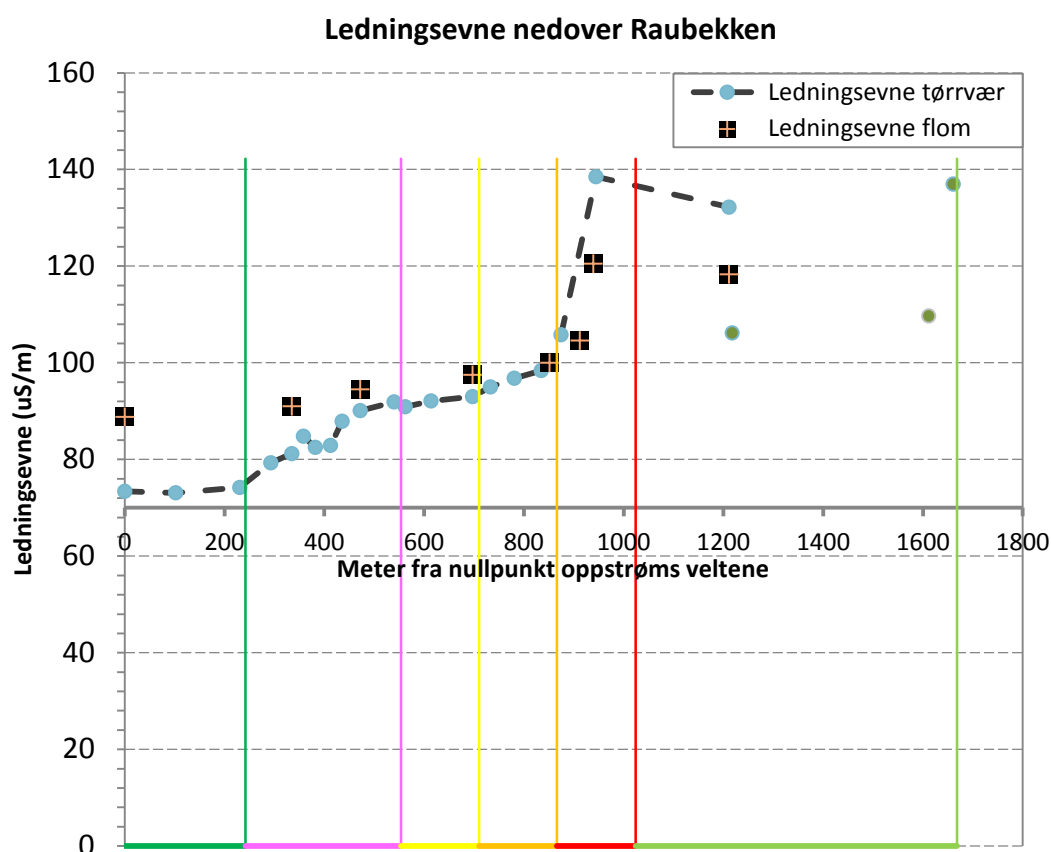


Figur 14: pH og vanntemperatur i Raubekken gjennom Løkken

Ledningsevne målt i midten av bekken øker generelt langsomt nedstrøms (Figur 15). Fra den laveste verdien i mørk grønn sone til den høyeste i rød sone ses en dobling; fra omtrent 75 til 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tilsynelatende gav de svært moderate endringene i ledningsevne lite bidrag til å lokalisere grunnvannsutslagene. Når vi så nærmere på tallene viste det seg imidlertid at ledningsevne målingene faktisk gav like klare utslag som Fe og de andre tungmetallene fordi:

- Ledningsevne målingene er svært nøyaktige
- Ved å trekke ut den del av ledningsevnen som elva hadde også før gruveveltene (trolig hovedsakelig fra Ca, Mg og karbonatsystemet) ble økningen gjennom sonene med grunnvannsutslag svært tydelige. I Figur 15 er dette symbolisert ved at X-aksen er flyttet opp fra origo til 70 $\mu\text{g}/\text{L}$.

Dertil er ledningsevne målingene svært raske og billige å gjennomføre. Like nedstrøms synlige grunnvannsutslag viste det seg dessuten at ledningsevnen var tydelig høyere nær utslagets side av elva. For detaljer, se vedlegg 3.

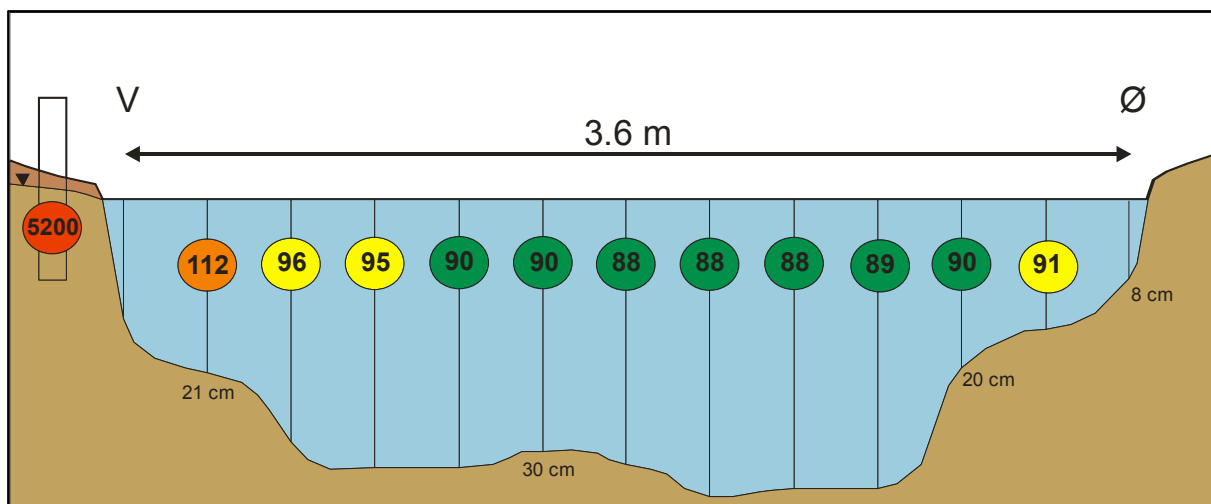


Figur 15: Ledningsevнемålinger i Raubekken gjennom Løkken.

Ledningsevne i Raubekkens vestre side var opptil dobbelt så høg som i midten av elva i rød sone (E). På strekningen fiolett til oransje sone ble det i liten grad observert forskjell i ledningsevne mellom vestre og midtre del av Raubekken. Ledningsevne på den østre siden viste noen få steder forhøyede verdier i fiolett (B), oransje (D) og rød (E) sone. Disse grunnvannsutslagene i elvas østside i fiolett (B) og oransje (D) sone kan sannsynligvis tilskrives sig fra slamdammen mens de i rød sone (E) nok kan tilskrives at grunnvannet her kom ut i hele elvas bredde, mens elvestrømmen var grunnere og langsommere mot kantene av elva og følgelig ble langsommere fortynnet.

Ledningsevne målt i grunnvannsrør i fiolett (B) og rød (E) sone på elvas vestsida gav verdier mellom 3000 og 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tilsvarende i oransje sone (D) var omtrent på 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ledningsevne i grunnvannsutslagene varierte forøvrig svært mye, men hovedsakelig lå de høyeste verdiene i fiolett (B) og rød (E) sone.

Generelt ble de høyeste verdiene for ledningsevne som ventet observert i vann med lav pH. pH i elvevannet lå for det meste mellom 6 og 7. I grunnvann/ markvann ble verdier så lave som 2,3 observert.



Figur 16: Elvetverrsnitt med ledningsevne målinger (tall i fargede ringer) i elvevann og grunnvann på vestlige side. Ledningsevne er gitt i $\mu\text{S/cm}$. Dette profilet var lokalisert ca. midtveis langs slamdammen.

4.2 Resultater grunnvann/markvann

I den første prøvetakingsomgangen ble prøver tatt fra forventede grunnvannsutslag langs bekken. Dette ble gjort i fiolett (B), gul (C), rød (E) og lys grønn (F) sone. Under flomsituasjonen under andre prøvetakingsomgang ble prøver tatt fra nedsatte grunnvannsrør i fiolett (B), oransje (C) og rød (E) sone (mindre enn 1/2 meter ned i bakken).

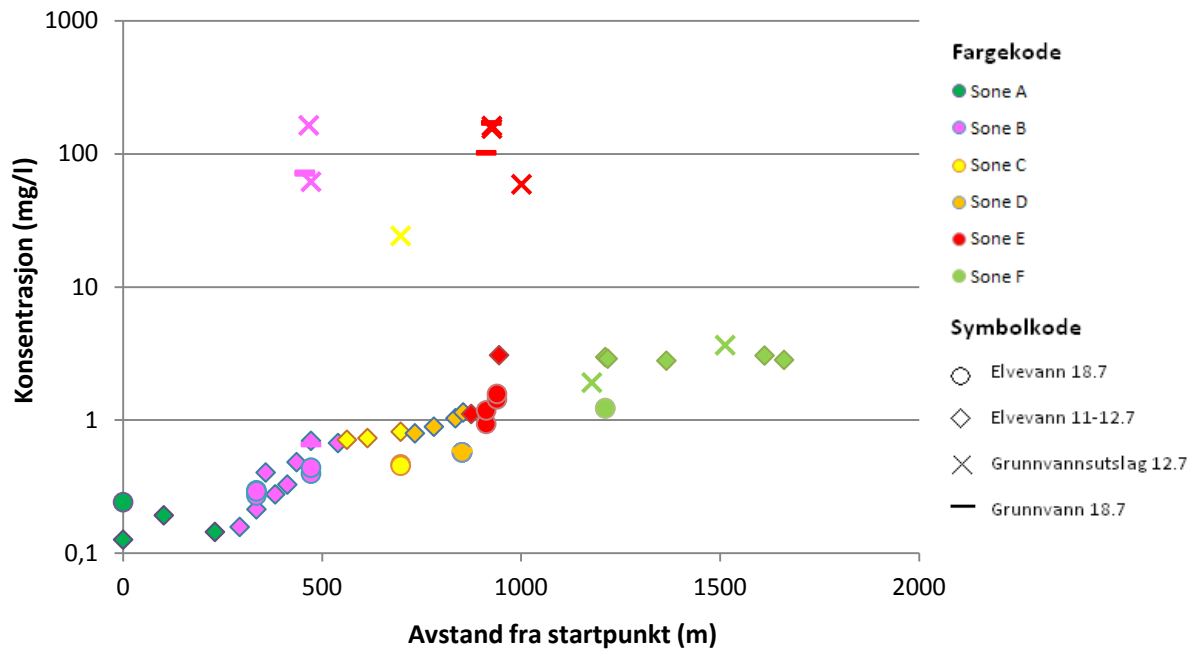
Analyseresultatene viste de høyeste konsentrasjonene i fiolett (B) og rød (E) sone. Resultatene viser også store forskjeller mellom nærliggende punkter innenfor sonene. Hvor mye dette bør tilskrives forskjeller i prøvetakingsmåte (vannpytt, hull i elvebredd, gravde hull i elvegrus) eller reelle forskjeller i grunnvannskonsentrasjon er ikke utredet nærmere. For å få representative og sikre grunnvannsprøver burde de vært hentet fra dypere borer og etter en tids pumping for å hindre effekter av lufttilgang og partikler. Dette var ikke gjennomførlig med de metodene vi brukte. NGU ønsket på dette tidspunktet ikke å bore så dype hull at vi kunne påtreffe forurenset vann under artesiske trykk.

Fe-konsentrasjoner i elvevann og grunnvann (markvann) kan sees i Figur 17.

Resultatene indikerte at grunnvann nær Raubekken i fiolett og rød sone var mer forurenset enn tilsvarende grunnvann i de øvrige sonene.

Alle resultatene fra grunnvannsprøvetakingen kan ses i tabell V5 i vedlegg 1 og kart over prøvetakingsstasjoner i vedlegg 6.

Fe-konsentrasjoner funnet i og rundt Raubekken

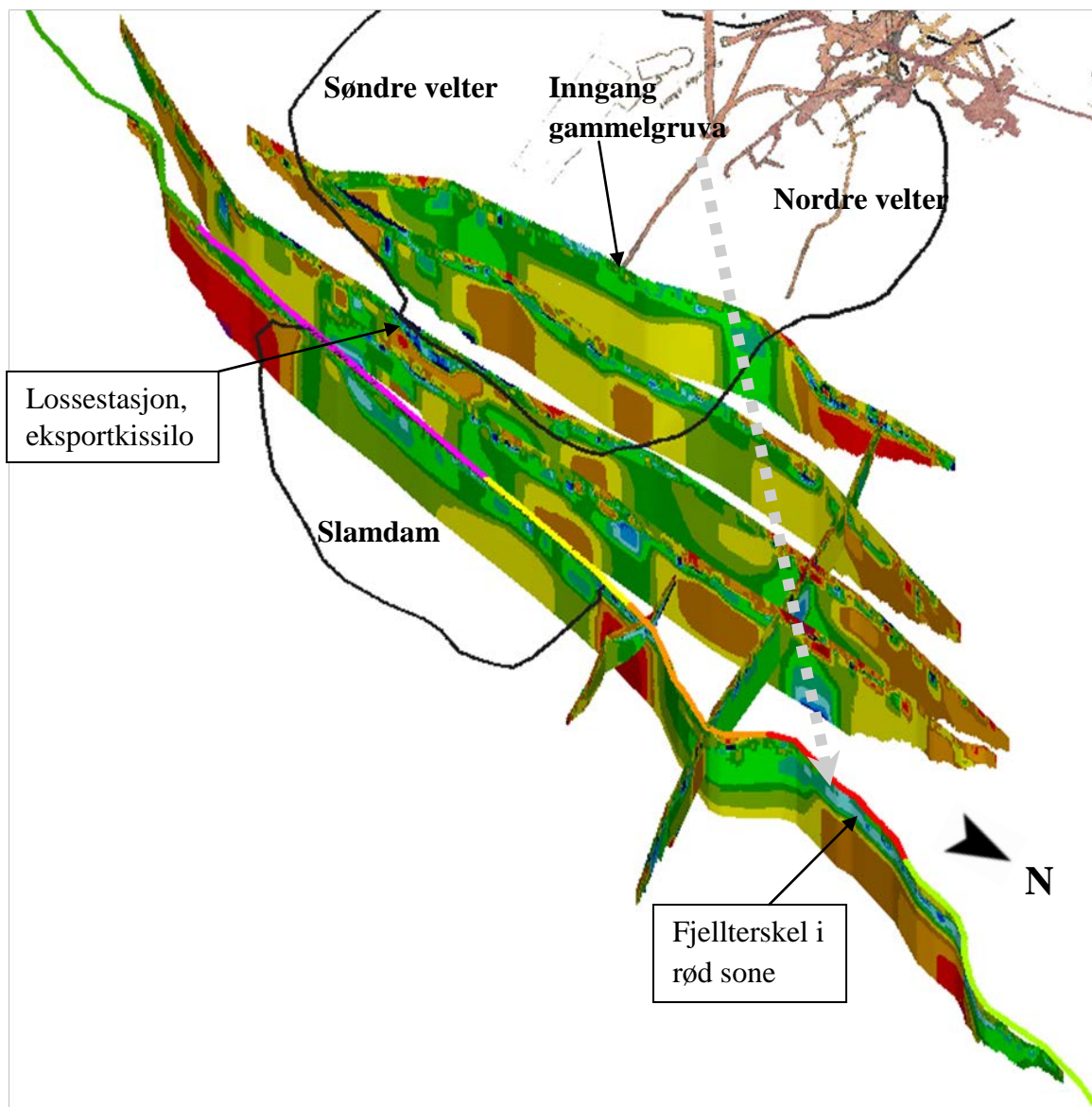


Figur 17: Fe-konsentrasjoner funnet i samleprøver fra elva og i grunnvannsprøver. Merk logaritmisk skala.

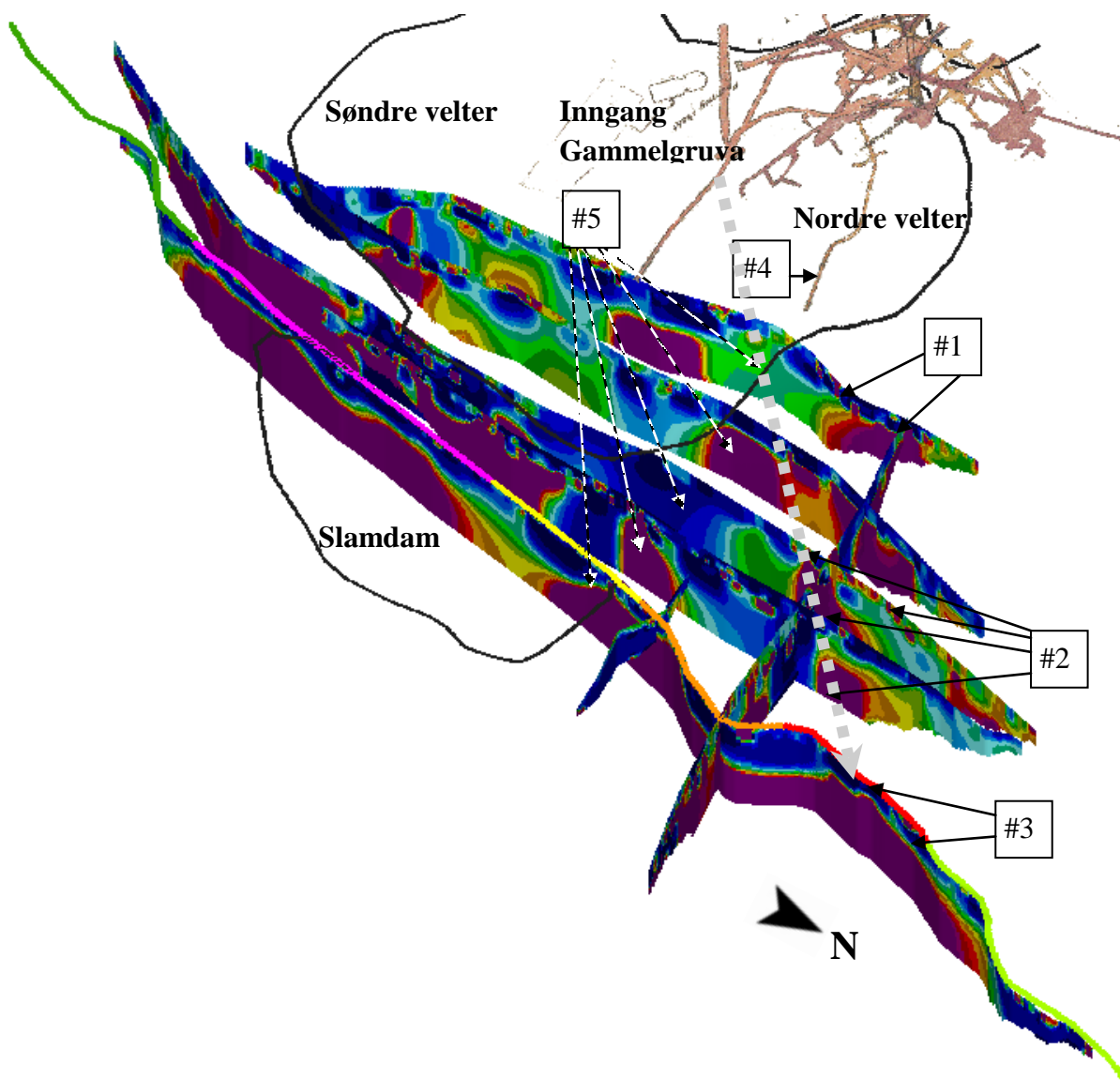
4.3 Geofysikk, LIDAR og strukturgeologi sammenstilt med vannkjemien

4.3.1 Geofysikk og vannkjemie

Figur 18 viser en sammenstilling av resistivitetsprofilene som ble målt på Løkken samt deres posisjon i terrenget. Detaljert framstilling av de enkelte profilene med dybdeangivelser er publisert i Dalsegg, 2014. Brede, vertikale, dype soner med lav resistivitet kan indikere tilstedeværelsen av store vannfylte sprekker i berggrunnen. Samlokalisert høy IP (Figur 19) kan imidlertid tyde på at slike lavresistivitetssoner i stedet skyldes mineraliseringer/ sulfider.



Figur 18: Oversikt over 2D-resistivitetsprofilene på Løkken og forurensningssoner i Raubekken (nederste profil). Grå stiplet strek representerer mulig transportretning for forurenset grunnvann. Svart strek viser ytre avgrensning for gruvevelter og slamdam.



Figur 19: Oversikt over IP-profiler på Løkken. De nummererte stedene/sonene (#) er diskutert i detalj i vedlegg 2. Grå stiplet strek representerer mulig transportretning for forurenset grunnvann. Svart strek viser ytre avgrensning for gruvevelter og slamdam.

Et sentralt spørsmål fra vannanalysene er hvorfor økningen i metalltransport i all hovedsak skjer i fiolett og rød sone av Raubekken og ikke i gul og oransje sone (Figur 12 og Figur 13). Vi har gjort følgende vurderinger basert 2D-resistivitets- og IP-profilene ovenfor:

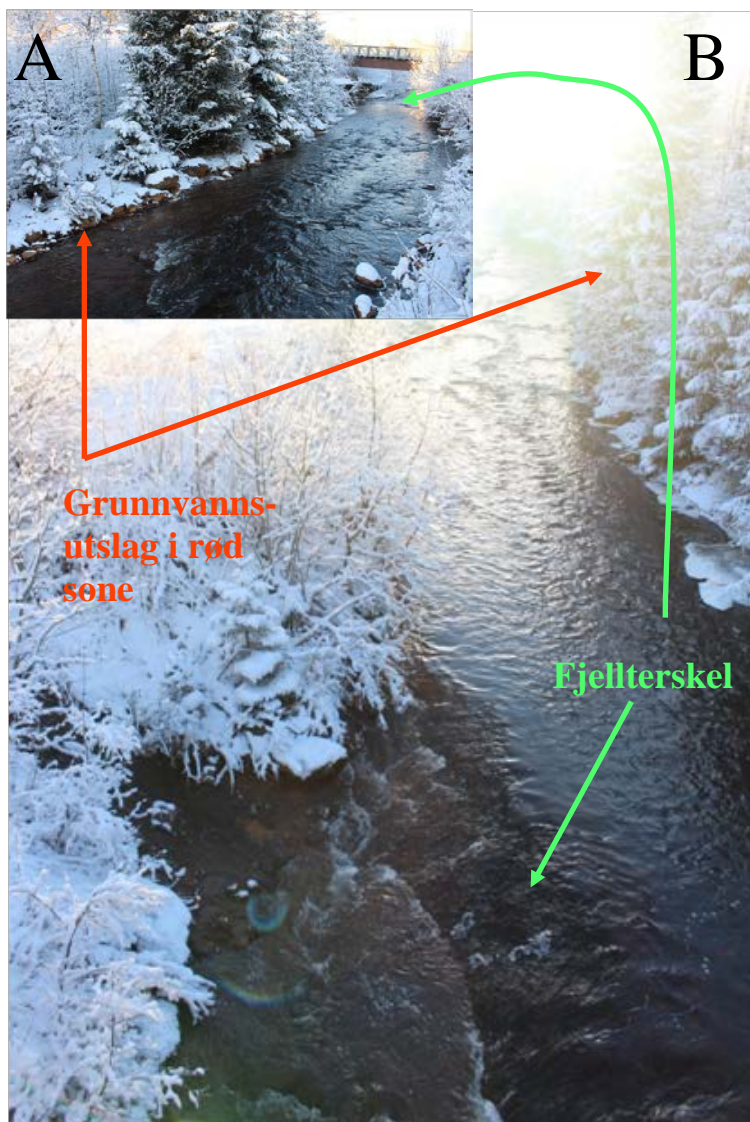
Fiolett sone (sone B): Både søndre velte, andre sørlige masser samt lossestasjon for jernbanen kan drenere til denne sonen av Raubekken. De nederste profilene antyder at det også nedenfor dreneringstiltakene ligger forurenset vann eller annet som gir lav resistivitet. Meget lav resistivitet er målt helt ned til ca. 30 meter under Raubekken (Dalsegg 2014, figur 6). Massene under lossestasjonen og derfra i terrengretning ned mot Raubekken skiller seg spesielt ut med svært lav resistivitet (men 2D-resistivitetsprofilen krysser riktignok en antatt dreneringsledning idet den passerer denne lossestasjonen).

Gul og oransje sone (henholdsvis sone C og D): Resistivitetsprofilene i Raubekken og oppover mot veltene skiller seg ikke vesentlig ut fra fiolett sone, til tross for at svært moderate mengder metaller kommer ut i Raubekken i disse sonene (Figur 12 og Figur 13). Lav resistivitet er målt i varierende dybder langs alle profilene både ovenfor og nedenfor dreneringene. Spesielt lav er resistiviteten i løsmassene over noe som ser ut som en fjellterskel under Raubekken der den går

over fra gul til oransje sone (ved bru ved nedre ende av slamdammen). Det er påfallende at dette ikke gir seg utslag i endret vannkjemi slik tilfellet er i rød sone (E). Dette skyldes trolig at den antatte fjellterskelen her ikke når helt opp til elvebunnen.

Rød sone (sone E): I forhold til å beskrive hvor det forurensede grunnvannet faktisk beveger seg fra velter eller gruveganger og ned til de observerte grunnvannsutslagene i Raubekken, gir ikke Figur 18 entydige svar. Trolig kan en eller flere av følgende mekanismer forklare hvorfor så mye av forurensningstransporten til Raubekken kommer ut langs dette relativt korte strekket av dalbunnen.

Alternativ 1. Relativt godt drenerende løsmasser, eskere eller elveavsetninger leder det forurensede vannet som ikke fanges opp av dreneringstiltak (under Nordre velte og Gammelgruva) langs massene under elva gjennom gul (C) og oransje (D) sone. Vannet presses deretter opp i rød sone som følge av fjellterskel her (Figur 20).



Det kan hende at dette forurensede vannet holdes nede i bakken i gul og oransje sone av utfellinger av ferricrite/aurhelle som har oppstått over tid når det forurensede grunnvannet har kommet i kontakt med luft eller oksygenrikt vann. Slike utfellinger er observert flere steder i området (Figur 21). Skulle dette være tilfelle kan i teorien forurenset grunnvann stå under artesiske trykk. Men det ble også observert grov, sortert rullestein ved tester med spett på ulike steder langs og inne i elvebredden i oransje sone. Muligens renner det forurensede grunnvannet gjennom slike lag nedover og på siden av Raubekken, og holdes adskilt fra elvevannet gjennom tettende utfellingslag i elvebunnen.

Det er også mulig at det forurensede grunnvannet tildels holdes nede i bakken/unna Raubekken av lettere (uforurenset) grunnvann som flyter oppå og er matet inn i dalbunnen fra motstående dalside eller fra elva.

Figur 20: Fjellterskel og mest markante grunnvannsutslag i rød sone

Alternativ 2. Grunnvannsutslaget i rød sone i Raubekken kan skyldes at forurenset grunnvann har blitt ledet gjennom sprekkesone fra Nordre velte og magnetittvelten og ut i elva (grå stiplet strek i Figur 18 (samt Figur 22)). Den observerte fjellterskelen i elva (Figur 20) kan i teorien også være *dannet* som utfellinger fra en slik grunnvannsførende sprekkesone. Observasjon av fjellterskelen kunne tyde på en slik opprinnelse men ble ikke undersøkt nærmere. Enkelte steder har det forøvrig også blitt observert at grunnvann har stått som en liten fontene rett opp fra berget/ den sementerte elvebunnen langs denne sonen. Se ytterligere beskrivelse i Vedlegg 2: Detaljerte vurderinger .

Alternativ 3. Grunnvannsutslaget i rød sone i Raubekken kan ha sin opprinnelse fra oppsprukket fjell/ sprekkesone som leder vann fra de vannfylte gruvegangene direkte til Raubekken. Se ytterligere beskrivelse i Vedlegg 2: Detaljerte vurderinger .

Alternativ 4. Det er heller ikke utenkelig at den markante økningen i metalltransport gjennom rød sone i Raubekken kan skyldes en kombinasjon av de andre fenomenene, f.eks. gjennom at fjellterskelen dannet som beskrevet i alternativ 2 har medført at grunnvann har blitt presset opp fra løsmassene under elva som beskrevet under alternativ 1. Eventuelt kan terskelen i dalbunnen være en terskel fordi den består av en hard bergart. Oppsprukket fjell kan gjerne oppstå i harde bergarter. På den måten kan i teorien grunnvannsutslaget i sonen ha samtidig tilførsel både fra løsmassene (alternativ 1) og fra fjellsprekker (alternativ 2), med en og samme bakenforliggende årsak.

Mulige sprekkesoner tolket på basis av resistivitets- og IP-målingene er forøvrig også beskrevet i Dalsegg 2014.

Ut over dette antyder Figur 18 at gruvetippområdet har sammenhengende svært lav resistivitet i løsmasselagene (grunt). Ser en på de tilsvarende IP-målingene (Figur 19) synes det ikke som om dette skyldes mineraliseringer. Marin grense er definert like *nedfor* fjellterskelen i rød sone (E), men man kan ikke utelukke at marin leire også forekommer i de dypere lag av dalbunnen et stykke ovenfor fjellterskelen og dermed bidrar til den lave resistiviteten her.

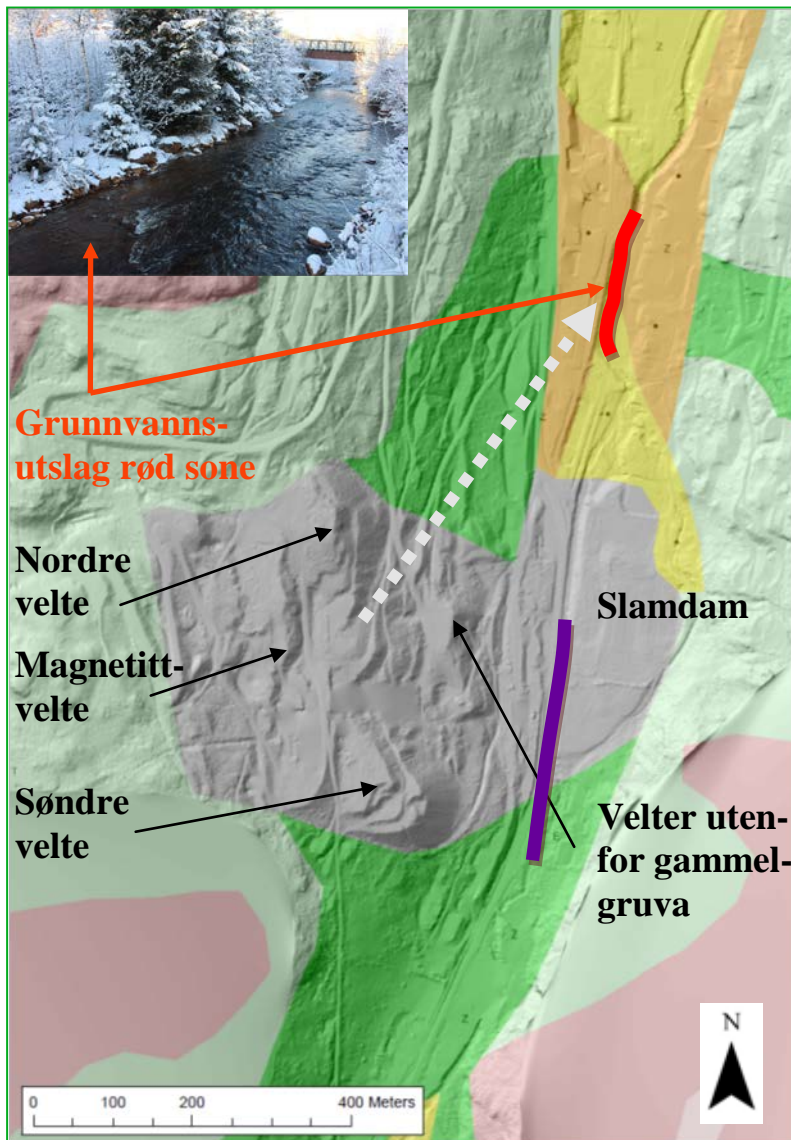
Dypere, i det som må antas å være berggrunn, viser 2D-resistivetsprofilene som går langs dalen flere nokså sammenhengende soner på tvers av delen, både med lav resistivitet og høy resistivitet. De tilsvarende IP-profilene gir varierende og uklare svar på om lav-resistivitetssonene er sprekkesoner med grunnvann eller om det kan dreie seg om mineraliseringer. Problemstillingene er diskutert nærmere i Dalsegg 2014.



Figur 21: Bilder av jernutfellinger i Løkkenområdet: **A:** I størrelsesorden 40 meter innenfor åpningen til gammelgruva avslører innstøpt treverk at "fjellveggen" egentlig har sin opprinnelse i lagret gruveavfall som er forstenet, trolig av (jern-)utfellinger. **B:** Nedenfor synk-flyt-anlegget ser det med første øyekast ut som at berget ligger i dagen. **C:** Som innfellingen av treverk viser er imidlertid "Berget" i B også forsteinede, planerte løsmasser, trolig også sammenstøpt av utfellinger. **D** og **F:** i nedre hjørnet av slamdammen er det også forsteinede masser av elvebunn. **E:** Forsteinet elvebunn i rød sone av Raubekken ~50 meter nedstrøms fjellterskel vist i Figur 20. Den kan være dannet av a) at grunnvann flommer opp fra sprekker i fjellet, opp gjennom elvebunnen og forsteiner denne i møte med oksygenrikt overflatevann, eller b) som trolig er mest sannsynlig; grunnvann som ble presses opp av fjellterskelen 50 meter oppstrøms i elva feller ut jernet inne i/oppå elvegrusen i møte med oksygenrikt elvevann.

4.3.2 Lidar-data

Høyoppløselige terrengmodeller kan brukes til å undersøke landformer, løsmasser og berggrunnsstrukturer i terrenget som ofte er vanskelig å se i felt grunnet vegetasjon og manglende oversikt. Lasermodellen fra Løkken ble undersøkt for sprekkesoner, spesielt med henblikk på eventuelle sprekkesoner som kobler gruveområdet hydraulisk til rød sone i Raubekken. Det fantes imidlertid ikke tydelige avtegninger etter slike sprekker i løsmasser eller berggrunn i forventet retning i henhold til 2D-resistivitetmålingene (grå stiplet linje i Figur 18 og Figur 22). Det betyr likevel ikke at slike ikke *kan* finnes under løsmassene da store dele av terrenget her er preget av graving og utfyllinger.

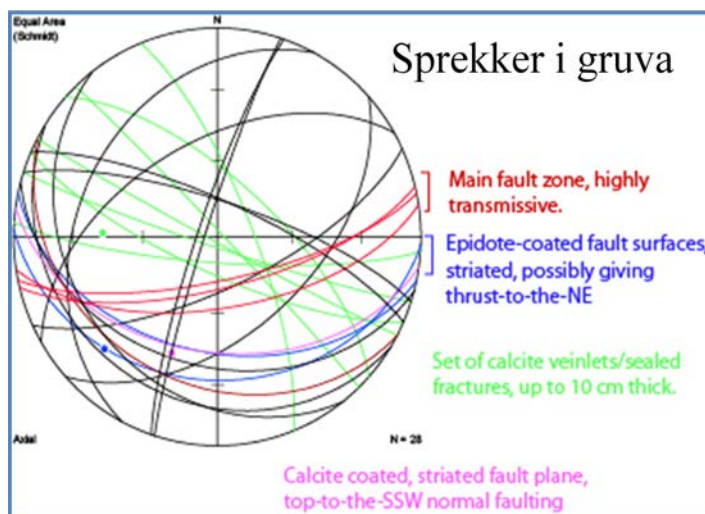


Figur 22: LIDAR-data fra Løkken koblet til løsmassedatabasen ved NGU. Grå område utgjør gruveområdet, rød sone i Raubekken er også merket inn på kartet. Lys grå pil indikerer potensielt viktig transportretning for forurenset grunnvann.

- Breelavsetning
- Elve- og bekkeavsetning, uspesifisert
- Morenemateriale, uspesifisert

4.3.3 Strukturgeologisk kartlegging

Som beskrevet i Olsen *et al.* 2013 er det en mulig teori at det går en sprekkesone fra de vannfylte gruvegangene, og at denne leder forurenset grunnvann til rød sone i Raubekken. Går man nærmere inn i Figur 18 vil man se at flere av 2D-resistivitetsprofilene tyder på eksistensen av en slik sprekkesone (langs grå pil i figuren) ned til rød sone i Raubekken. En eventuell gjennomgående sprekkesone her ble anslått å krysse gammelgruva ca. 70 meter innenfor gruveåpningen. Vi dro derfor i november 2013 på befaring inne i gammelgruva sammen med strukturgeolog (Giulio Viola) for å avdekke eksistensen av en eventuell slik sprekkesone inne i gammelgruva. Han kartla sprekkefrekvens inne i gruva i gjeldende område og lagde på den bakgrunn Figur 23. Hans tolkning var at det ikke finnes noen gjennomgående vannførende sprekkesone i gruvegangene som kunne tyde på transport fra gruvegangene i NØ retning mot rød sone i Raubekken. Han understrekte imidlertid at området har nokså kompliserte strukturer som burde kartlegges i en større og bredere studie for å få bedre oversikt og sikrere konklusjoner.



Figur 23: Kartlegging av sprekker inne i gammelgruva november 2013.

Strukturgeologen fant ingen betydelig sprekkesone i SV-NØ retning slik en del av 2D-resistivitets-målingene kunne tyde på. En tydelig vannførende sprekkeretning (rød forkastningssone i Figur 23) lå derimot i V/SV - Ø/NØ retning. Dette sammenfaller ganske bra med to betydelige lavresistivitetssoner på tvers av dalen i figur 18.

4.3.4 Oppsummering

En samlet vurdering er at det svært forurenset grunnvannsutslaget i Raubekken nedenfor Orkla Industrimuseum (rød sone - E) trolig skyldes at forurenset grunnvann fra veltene ledes under godt drenerende masser i dalsider og dalbunn. Disse lagene leder grunnvannet nedover dalen under markoverflata og Raubekken. En synlig fjellterskel skyver deretter det forurensete grunnvannet til overflaten og ut i Raubekken. Flere av 2D-resistivitetsprofilene tyder riktignok på at det også går en mulig forkastningssone med svært lav resistivitet i retning fra Nordre velte mot grunnvannsutslaget. Forurenset grunnvann i denne transportretningen kan muligens bidra. Men IP-signalene, LIDAR-data, strukturgeologiske vurderinger og vurdering av vannkjemisk fingerprint (vedlegg 5) taler mot at dette er hovedårsaken til grunnvannsutslaget.

Dertil følger det at det omtrent ikke kommer ut forurenset grunnvann langs et flere hundre meter langt elvestrekk av Raubekken *ovenfor* dette grunnvannsutslaget. Det synes unaturlig at det ikke skulle dannes og transporteres forurenset grunnvann til disse sonene av Raubekken. 2D-resistivitetsprofilene indikerer da også at det finnes betydelige mengder (sannsynlig) forurenset grunnvann (lav resistivitet og lavt IP-signal) i løsmassene langs hele dalbunnen og langs vestre dalside. Dette gjelder også i dalsiden mellom drenering/avskjæringsgrøfter og gul/ oransje sone av Raubekken (der altså vannkjemien ikke synes nevneverdig påvirket av forurenset grunnvann).

5. Konklusjon

Forurenset grunnvann når dalbunnen ved Løkken via synlige grunnvannsutslag langs relativt korte, avgrensede elvestrekk av Raubekken. Se sonene fiolett (B) og rød (E) i Figur 11. Hvor dominerende betydning disse grunnvannsutslagene har for metallinnholdet i Raubekken er vist i Figur 12 og Figur 13. 2D-resistivitetsmålinger og IP-målinger viser et svært komplekst bilde av grunnvannsstrømmer og mulige mineraliseringer (sulfider), og indikerer mulige årsaker til hvorfor de forurensete grunnvannsutslagene kommer ut der de kommer (Figur 18). Disse kan bare forstås til fulle gjennom videre boringer i de mest interessante sonene, eventuelt i kombinasjon med en større strukturgeologisk kartlegging av området, tracerforsøk m.fl.

En særlig spesiell sone i Raubekken (rød sone, Figur 12 og Figur 13, ved Orkla Industrimuseum) ser ut til ha tilførsel av metallforurenset grunnvann enten

1. Gjennom løsmasser som samler og leder forurenset grunnvann flere hundre meter langs dalbunnen og under Raubekken. Dette vannet ledes opp til overflaten/elvebunnen som følge av en fjellterskel på tvers av Løkkendalen.
2. Gjennom en dypere sprekkesone som leder forurenset grunnvann direkte fra området rundt Nordre velte og ned til Raubekken.
3. Gjennom en dypere sprekkesone som leder forurenset vann direkte fra vannfylte gruveganger.
4. Eventuelt i en kombinasjon mellom disse.

Etter en total vurdering av indisier anses alternativ 1 som den mest sannsynlig dominerende mekanismen for grunnvannsutslaget i Raubekken ved Orkla industrimuseum.

Undersøkelsene indikerer også at det ligger, og kontinuerlig legges igjen, betydelige mengder metaller, særlig Fe, Cu og Al som ut-/medfelling i bakken mellom veltene og Raubekken (vedlegg 4). Det er også observert betydelige forsteinede utfellinger i elvebunnen i deler av Raubekken. Det kan muligens stå forurenset grunnvann under artesiske trykk under slike utfellinger.

Vi vurderer generelt de valgte metodene som svært velegnet til tilsvarende undersøkelser. Vannprøvetakingen med visuell vurdering av vannstrøm/dyp og deretter vektet prøvetaking med sprøyte vurderes som en god metode i slike områder. Den ivaretar både kravet til hurtig prøvetaking og representativ prøve i elvestrekk der man ønsker å kvantifisere de enkelte grunnvannsutslagenes betydning for forurensningstilførsel til vassdrag. 2D-resistivitet og IP viste svært interessante fenomener i undergrunnen. For videre arbeid i tilsvarende områder trenger man imidlertid å utvikle ytterligere kompetanse og erfaring med å tolke 2D-resistivitet/ IP i gruveområder og fra kjerne-/ løsmasseboringer.

For prøvetaking av grunnvann anses ikke de metodene vi har brukt som egnede eller pålitelige. Dypere boringer der borhull kan renses gjennom prøvepumping og tettes mot lufttilgang anses nødvendig for gode resultater, helst også kombinert med uttak av kjerneprøver. I noen tilfeller vil det også være hensiktsmessig å være forberedt i forhold til å kunne håndtere forurenset grunnvann under artesiske trykk.

Både bruk av LIDAR-data og strukturgeologisk kartlegging er meget nyttige verktøy ved tilsvarende undersøkelse der geologien ligger til rette for det. Kontinuerlige ledningsevne målinger vurderes som en potensielt svært nyttig metode for kontinuerlig overvåking av metallutlekking fra gruveområder, så lenge bakgrunnsnivå for ledningsevnen i elva er stabil eller også blir logget.

6. Referanser

Arnesen, Rolf Tore; Iversen, Eigil Rune; Knudsen, Carl-Erik; Lundgren, Tom; Skjelkvåle, Brit Lisa; Øren, Kjell: LØKKEN GRUVER A/S & Co. 1990. Vurdering av forurensningsstatus og alternative tiltak for å redusere forurensningstilførslene fra gruveområdet. Rapport nr 2400. 163 sider.

Direktoratet for mineralforvaltning (DMF) 2013: Løkken gruveområde – Tiltaksplan. 29 sider.

Dalsegg, Einar. 2014. Geofysiske målinger Løkken sentrum. Meldal, Sør-Trøndelag. NGU-rapport 2014.001. 20 s.

Iversen, Eigil Rune. 2012. Kontroll av massebalanse i Løkken gruveområde, Meldal kommune. Undersøkelser i perioden 1.9.2011 til 31.8.2012. NIVA rapport 6444-2012. 69 sider.

Olsen, Stein Broch; Dahl, Flemming; Østerås, Tore; Horvath, Adorjan; Heyer, Erik; Robba, Simona; Konieczny, Roger M. 2013: *Utredning av renseteknologiske løsninger for Løkken gruveområde, Meldal kommune*. Utført av Cowi på oppdrag av Direktoratet for mineralforvaltning. 191 sider.

Orkla Grube-Aktiebolags jubileumsårbok. 1954: Løkken Verk. En norsk grube gjennom 300 år. 1954 - 505 s.

Vedlegg 1: Rådata fra grunnvanns- og elvevannsanalyser

Kart over prøvetakingsstasjonene finnes i vedlegg 6.

Tabell V1: Resultat fra vannføringsmålinger

Posisjon	Dato	Elvbredde (m)	Måleintervall (m)	Vannføring (m ³ /s)	Usikkerhet (%)	Tverrsnittsarea (m ²)
A10	11.7.2013	3.8	0.3	0.22	5.7	0.85
B30	11.7.2013	3.3	0.3	0.21	9.4	1.01
B80	11.7.2013	3.6	0.3	0.18	9	0.98
C50	11.7.2013	2.75	0.25	0.24	7.6	0.37
D70	11.7.2013	6	0.5	(0.13)	21	1.22
E75	12.7.2013	6.7	0.4	0.22	6.2	1.71
E75	18.7.2013	6.7	0.4	0.6	7.9	2.24
F30	11.7.2013	2.9	0.25	(0.17)	21	0.75

Tabell V2: Resultat fra målinger av in-situ parametere.

Posisjon	Dato	RelElv	Kategori	Subkategori	Ledneve ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
A10	11.7.2013	SE	Elvevann		73.4	6.8	11.0
A10	18.7.2013	SE	Elvevann		88.8	6.1	
A10	10.7.2013	M	Elvevann		75.4		
A20	10.7.2013	M	Elvevann		74.3		
A30	10.7.2013	M	Elvevann		74.9		
A30	11.7.2013	SE	Elvevann		73.1	6.3	11
A40	10.7.2013	M	Elvevann		74.9		
A50	10.7.2013	M	Elvevann		75.8		
A50	11.7.2013	V	Elvevann			6.6	
A50	11.7.2013	SE	Elvevann		74.2	6.6	11.7
A50	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.7	
B10	10.7.2013	M	Elvevann		75.9		
B20	11.7.2013	SE	Elvevann		79.3	6.8	12.1
B30	11.7.2013	SE	Elvevann		81.2	7.1	11.6
B30	18.7.2013	SE	Elvevann		91.0	6.5	
B30	11.7.2013	V	Elvevann		85.5		
B35	10.7.2013	M	Elvevann		83.1		
B40	11.7.2013	SE	Elvevann		84.8	6.8	13
B45	10.7.2013	M	Elvevann		82.1		
B50	11.7.2013	V	Elvevann			6.7	
B50	11.7.2013	SE	Elvevann		82.5	6.8	13.1
B50	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.8	
B55	10.7.2013	M	Elvevann		83.7		
B60	11.7.2013	SE	Elvevann		82.9	6.8	13
B70	11.7.2013	V	Elvevann		106.5	5.8	
B70	11.7.2013	SE	Elvevann		87.9	6.6	12.8
B70	11.7.2013	Ø	Elvevann		101.1	6.0	
B70	11.7.2013	V	Elvevann		106.5	5.8	12.1
B70	11.7.2013	Ø	Elvevann		101.1	6	12.2
B70	11.7.2013	M	Elvevann		87.4		12.1
B70	18.7.2013	V	Grunnvann	Grunnvannsrør	3130.0	2.8	
B73	10.7.2013	M	Elvevann		86.6		
B76	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant	2500	2.7	
B80	11.7.2013	V	Elvevann			6.6	
B80	11.7.2013	SE	Elvevann		90.1	7.1	11.9
B80	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.7	
B80	18.7.2013	V	Grunnvann	Grunnvannsrør	5200.0	2.4	
B80	18.7.2013	SE	Elvevann		94.5	5.9	
B80	11.7.2013	V	Elvevann		112.1	6.6	12.1
B80	11.7.2013	Ø	Elvevann		91.0	6.7	12.1
B80	11.7.2013	M	Elvevann		88.1		12.1
B85	10.7.2013	M	Elvevann		91.4		
B90	11.7.2013	SE	Elvevann		91.9	6.7	13.4
B90	11.7.2013	V	Elvevann		96.1		12.6
B90	11.7.2013	Ø	Elvevann		91.5		12.6
B90	11.7.2013	M	Elvevann		91.8		12.6
C10	11.7.2013	V	Elvevann			6.8	
C10	11.7.2013	SE	Elvevann		90.9	6.8	13.8
C10	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.8	

GVU = grunnvannsutslag. Kolonne "RelElv" beskriver hvor/hvordan vannprøve i elv er tatt: I midten av elva (M), Vestre eller Østre siden (V, Ø). Representativt for hele elvetversnittet (SE)

Tabell V2 (fortsettelse): Resultat fra målinger av in-situ parametre.

Posisjon	Dato	RelElv	Kategori	Subkategori	Ledneve ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
C10	11.7.2013	V	Elvevann		93.1	6.8	12.8
C10	11.7.2013	Ø	Elvevann		91.7	6.8	12.8
C10	11.7.2013	M	Elvevann		92		12.7
C20	10.7.2013	M	Elvevann		92.3		
C30	12.7.2013	V	Grunnvann	Grunnvannsutslag	150		
C30	10.7.2013	M	Elvevann		93.2		
C40	11.7.2013	SE	Elvevann		92.1	6.8	14
C40	11.7.2013	V	Elvevann		93.2		12.9
C40	11.7.2013	Ø	Elvevann		93.1		12.8
C40	11.7.2013	M	Elvevann		92.6		12.8
C50	11.7.2013	V	Elvevann			7.0	
C50	11.7.2013	SE	Elvevann		93.0	6.8	12.5
C50	11.7.2013	Ø	Elvevann			7.0	
C50	12.7.2013	Ø	Grunnvann	GVU, fra hull i elvekant	1700		
C50	18.7.2013	SE	Elvevann		97.5	6.5	
C50	11.7.2013	V	Elvevann		93.4	7.0	12.6
C50	11.7.2013	Ø	Elvevann		95.5	7.0	12.7
C50	11.7.2013	M	Elvevann		93.4		12.6
C60	10.7.2013	M	Elvevann		93.8		
D10	11.7.2013	SE	Elvevann		95.0	7.0	13.5
D10	11.7.2013	V	Elvevann		101.4		12.9
D10	11.7.2013	Ø	Elvevann		104.9		12.9
D10	11.7.2013	M	Elvevann		95.2		12.9
D20	10.7.2013	M	Elvevann		95.7		
D30	11.7.2013	SE	Elvevann		96.8	6.9	13.5
D30	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.3	
D30	11.7.2013	V	Elvevann		104.2	7	13
D30	11.7.2013	Ø	Elvevann		141.4	6.4	12.7
D30	11.7.2013	M	Elvevann		96.2		12.9
D50	10.7.2013	M	Elvevann		97.2		
D60	11.7.2013	SE	Elvevann		98.4	7.0	13.3
D60	11.7.2013	V	Elvevann		130.2		12.9
D60	11.7.2013	Ø	Elvevann		101.4		12.7
D60	11.7.2013	M	Elvevann		98		12.9
D70	18.7.2013	V	Grunnvann	Grunnvannsrør	967.0	3.8	
D70	18.7.2013	SE	Elvevann		100.0	6.6	
D70	11.7.2013	V	Elvevann			6.6	
D70	11.7.2013	SE	Elvevann			6.9	12.7
D70	11.7.2013	Ø	Elvevann			6.8	
D70	11.7.2013	V	Elvevann		107.4	6.6	12.7
D70	11.7.2013	Ø	Elvevann		101.4	6.8	12.8
D70	11.7.2013	M	Elvevann		100		12.8
D70	10.7.2013	M	Elvevann		99.4		
D80	12.7.2013	M	Elvevann		80		
E10	11.7.2013	SE	Elvevann		105.8	6.7	13.3
E10	11.7.2013	V	Elvevann		185.9		12.6
E10	11.7.2013	Ø	Elvevann		100.4		12.8
E10	11.7.2013	M	Elvevann		101.1		12.8
E20	10.7.2013	M	Elvevann		102.9		

GVU = grunnvannsutslag. Kolonne "RelElv" beskriver hvor/hvordan vannprøve i elv er tatt: I midten av elva (M), Vestre eller Østre siden (V, Ø). Representativt for hele elvetverrsnittet (SE)

Tabell V2 (fortsettelse): Resultat fra målinger av in-situ parametere.

Posisjon	Dato	RelElv	Kategori	Subkategori	Ledneve ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
E30	18.7.2013	V	Grunnvann	Grunnvannsrør	3810.0	2.5	
E30	18.7.2013	SE	Elvevann		104.6	6.4	
E30	10.7.2013	M	Elvevann		133.0		
E40	18.7.2013	V	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant	4400.0	2.5	
E40	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, fra hull i elvekant	1964	3.3	8.1
E50	18.7.2013	SE	Elvevann		120.5	6.4	
E50	11.7.2013	SE	Elvevann		138.5	6.1	13.1
E50	11.7.2013	V	Elvevann		313.8		12.4
E50	11.7.2013	Ø	Elvevann		197.2		12.4
E50	11.7.2013	M	Elvevann		150		12.7
E60	10.7.2013	M	Elvevann		121.6		
E70	10.7.2013	M	Elvevann		127.0		
E70	12.7.2013	V	Avløpsrør	Cementrør	180		
E80	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, hull cementrør	180		
E80	12.7.2013	Ø	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant	1300	3.0	
E90	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant	315	4.2	12.2
E90	12.7.2013	Ø	Elvevann		123	4.5	14.6
E90	12.7.2013	Ø	Elvevann		107.2	6.1	14.3
E90	12.7.2013	M	Elvevann		103.1	6.5	14.5
E90	12.7.2013	V	Elvevann		111.2	6.6	14.5
E90	12.7.2013	Ø	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant		3.9	
F15	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	162.2	6.7	
F20	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, vannpytt på elvekant	278	5.5	
F25	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	220	5.8	14.7
F30	11.7.2013	SE	Elvevann		132.2	6.4	12.5
F30	18.7.2013	SE	Elvevann		118.3	6.5	
F30	?	V	Elvevann		135.0		12.6
F30	12.7.2013	SE	Elvevann		106.2	6.7	14.9
F30	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU		5.9	
F40	12.7.2013	V	Avløpsrør		184.1	7.0	
F50	12.7.2013	Ø	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	46.3		17.3
F55	12.7.2013	SE	Elvevann		108		15.3
F55	12.7.2013	V	Avløpsrør			7.6	
F60	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	162.5		14.8
F70	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	500	7.2	
F80	12.7.2013	SE	Elvevann		109.7	6.7	15.5
F80	12.7.2013	V	Grunnvann	GVU, gravde hull på elvekant	444	6.7	12.8
F80	12.7.2013	Ø	Avløpsrør		79.1		6.9
F90	12.7.2013	SE	Elvevann		137	6.7	

GVU = grunnvannsutslag. Kolonne "RelElv" beskriver hvor/hvordan vannprøve i elv er tatt: I midten av elva (M), Vestre eller Østre siden (V, Ø). Representativt for hele elvetversnittet (SE)

Tabell V3: Resultat fra elementanalyser av elvevann. Konsentrasjonene gitt i mg/L.

Posisjon	Dato	RelElv	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Cd	Ca	Mg
A10	11.7.2013	V	0.125	0.0050	0.044	<0.005	0.0074	<0.0005	9.71	0.930
A10	11.7.2013	SE	0.126	0.0058	0.044	<0.005	0.0067	<0.0005	9.69	0.929
A10	11.7.2013	Ø	0.128	0.0069	0.048	<0.005	0.0055	<0.0005	9.66	0.922
A10	18.7.2013	SE	0.241	0.0203	0.105	<0.005	0.0073	<0.0005	7.98	0.847
A30	11.7.2013	SE	0.192	0.0237	0.068	<0.005	0.0103	<0.0005	10.1	0.968
A50	11.7.2013	V	0.144	0.0170	0.152	0.0384	0.0429	<0.0005	10.1	1.09
A50	11.7.2013	SE	0.144	0.0103	0.052	<0.005	0.0096	<0.0005	9.99	0.942
A50	11.7.2013	Ø	0.121	0.0060	0.045	<0.005	0.0080	<0.0005	9.80	0.915
B20	11.7.2013	SE	0.157	0.0153	0.134	0.0314	0.0389	<0.0005	10.3	1.10
B30	11.7.2013	V	0.367	0.0247	0.365	0.0951	0.0861	<0.0005	10.5	1.30
B30	11.7.2013	SE	0.213	0.0180	0.206	0.0505	0.0545	<0.0005	10.3	1.14
B30	11.7.2013	Ø	0.191	0.0286	0.167	0.0366	0.0435	<0.0005	10.5	1.11
B30	18.7.2013	SE	0.296	0.0261	0.174	0.0229	0.025	<0.0005	8.34	0.934
B30	18.7.2013	SE	0.271	0.0217	0.158	0.0195	0.0233	<0.0005	8.29	0.917
B30	18.7.2013	SE	0.291	0.0241	0.173	0.0218	0.0255	<0.0005	8.33	0.939
B40	11.7.2013	SE	0.403	0.0259	0.390	0.0972	0.0871	<0.0005	10.6	1.30
B50	11.7.2013	V	0.543	0.0316	0.528	0.137	0.119	0.00053	11.1	1.44
B50	11.7.2013	SE	0.276	0.0218	0.278	0.0698	0.0664	<0.0005	10.6	1.22
B50	11.7.2013	Ø	0.249	0.0203	0.227	0.0628	0.0623	<0.0005	10.6	1.18
B60	11.7.2013	SE	0.327	0.0228	0.313	0.0776	0.0742	<0.0005	10.8	1.27
B70	11.7.2013	V	2.110	0.141	2.29	0.850	1.00	0.00393	16.0	3.16
B70	11.7.2013	SE	0.482	0.0295	0.440	0.119	0.118	<0.0005	11.2	1.40
B70	11.7.2013	Ø	6.800	0.0661	0.683	0.200	0.649	0.00078	13.9	2.05
B80	11.7.2013	V	5.820	0.0559	0.947	0.368	0.454	0.00171	12.1	1.77
B80	11.7.2013	SE	0.697	0.0317	0.453	0.130	0.165	<0.0005	11.3	1.41
B80	11.7.2013	Ø	1.360	0.0302	0.374	0.106	0.201	0.00051	10.6	1.35
B80	18.7.2013	SE	0.395	0.0255	0.237	0.047	0.058	<0.0005	8.48	0.996
B80	18.7.2013	SE	0.438	0.0272	0.279	0.056	0.062	<0.0005	8.53	1
B90	11.7.2013	SE	0.671	0.0382	0.514	0.168	0.211	0.00071	11.1	1.47
C10	11.7.2013	V	0.657	0.0390	0.533	0.172	0.218	0.00083	10.7	1.46
C10	11.7.2013	SE	0.710	0.0362	0.486	0.155	0.200	0.00067	10.9	1.43
C10	11.7.2013	Ø	0.933	0.0376	0.501	0.160	0.195	0.00061	10.7	1.42
C40	11.7.2013	SE	0.731	0.0368	0.487	0.157	0.210	0.00076	10.9	1.45
C50	11.7.2013	V	0.735	0.0371	0.498	0.160	0.209	0.00070	10.7	1.45
C50	11.7.2013	SE	0.816	0.0399	0.517	0.165	0.218	0.00064	11.2	1.47
C50	11.7.2013	Ø	0.880	0.0408	0.533	0.177	0.236	0.00071	11.2	1.50
C50	18.7.2013	SE	0.464	0.0276	0.284	0.0642	0.0787	<0.0005	8.6	1.03
C50	18.7.2013	SE	0.453	0.0281	0.277	0.0629	0.0793	<0.0005	8.6	1.04
D10	11.7.2013	SE	0.794	0.0409	0.514	0.167	0.234	0.00082	11.3	1.53
D30	11.7.2013	V	2.680	0.0615	0.594	0.199	0.409	0.00104	12.4	1.77
D30	11.7.2013	SE	0.890	0.0430	0.518	0.168	0.250	0.00083	11.3	1.53
D30	11.7.2013	Ø	5.090	0.112	0.735	0.254	0.808	0.00182	16.6	2.49
D60	11.7.2013	SE	1.030	0.0453	0.539	0.175	0.268	0.00081	11.6	1.58
D70	18.7.2013	SE	0.571	0.0302	0.297	0.0716	0.105	<0.0005	8.85	1.08
D70	18.7.2013	SE	0.570	0.0315	0.29	0.0718	0.105	0.00052	8.92	1.08
D70	18.7.2013	SE	0.572	0.0308	0.29	0.0712	0.103	<0.0005	8.84	1.08
D70	11.7.2013	V	1.600	0.0812	0.930	0.254	0.373	0.00109	13.0	1.92
D70	11.7.2013	SE	1.140	0.0484	0.555	0.180	0.284	0.00093	11.6	1.55
D70	11.7.2013	Ø	1.870	0.0616	0.730	0.189	0.362	0.00112	12.5	1.79
E10	11.7.2013	SE	1.110	0.0612	0.726	0.210	0.317	0.00096	12.3	1.75
E30	18.7.2013	SE	0.935	0.0413	0.488	0.108	0.147	<0.0005	9.35	1.31

Tabell V4 (fortsettelse): Resultat fra elementanalyser av elvevann. Konsentrasjonene gitt i mg/L.

Posisjon	Dato	RelElv	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Cd	Ca	Mg
E30	18.7.2013	SE	1.180	0.0483	0.615	0.132	0.174	0.00061	9.66	1.46
E50	18.7.2013	SE	1.430	0.0526	0.687	0.144	0.192	0.00078	9.9	1.54
E50	18.7.2013	SE	1.57	0.0529	0.696	0.146	0.195	0.00068	9.94	1.54
E50	11.7.2013	SE	3.07	0.108	1.62	0.374	0.519	0.00154	14.3	2.85
F30	11.7.2013	SE	2.97	0.105	1.54	0.354	0.499	0.00161	13.7	2.68
F30	18.7.2013	SE	1.23	0.0497	0.64	0.135	0.186	0.00081	9.67	1.48
F30	18.7.2013	SE	1.22	0.0496	0.624	0.136	0.185	0.00065	9.9	1.49
F30	12.7.2013	SE	2.89	0.105	1.51	0.349	0.493	0.00147	13.6	2.72
F55	12.7.2013	SE	2.79	0.104	1.49	0.344	0.488	0.00145	13.7	2.71
F80	12.7.2013	SE	3.05	0.107	1.58	0.350	0.495	0.00147	14.2	2.77
F90	12.7.2013	SE	2.83	0.106	1.50	0.343	0.488	0.00147	14.1	2.75

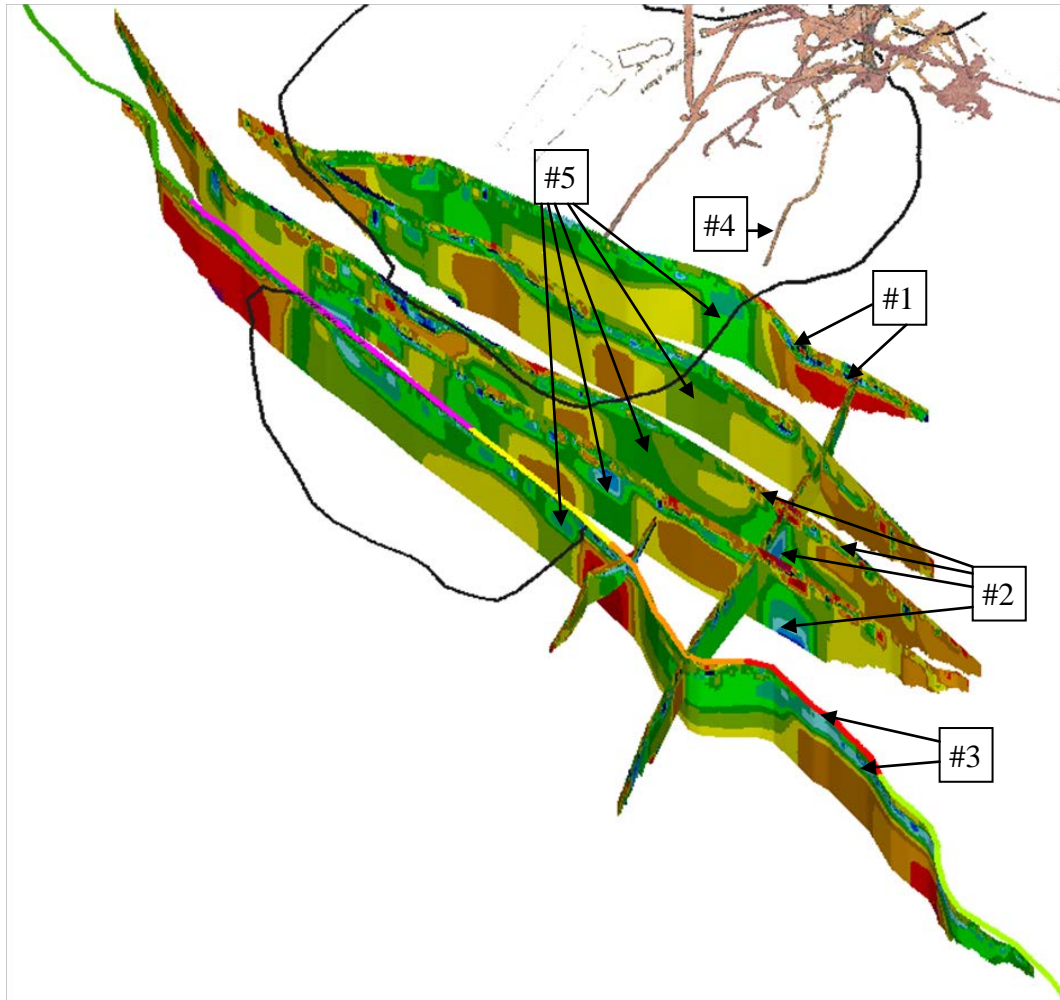
Tabell V5: Resultat fra elementanalyser av grunnvann. Konsentrasjonene gitt i mg/L.

Posisjon	Dato	RelElv	Kategori	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Cd	Ca	Mg
B70	18.7.2013	V	Grunnvannsrør	72.7	4.03	62.5	23.4	34.8	0.133	195	61.2
B70	18.7.2013	V	Grunnvannsrør	70.9	3.75	56	21.6	32.2	0.126	183	55
B76	12.7.2013	V	GVU, vannpytt på elvekant	164	6.04	110	66.7	85.6	0.305	317	86.3
B80	12.7.2013	V	GVU, fra hull i elvekant	61.8	5.23	78.7	37.8	56.8	0.201	227	67.0
B80	18.7.2013	V	Grunnvannsrør	0.654	0.0243	0.376	0.185	0.276	0.00121	1.08	0.352
C50	12.7.2013	Ø	GVU, fra hull i elvekant	24.2	0.634	5.77	3.17	4.30	0.00785	67.1	11.2
D70	18.7.2013	V	Grunnvannsrør	0.594	1.1	14.1	4.12	4.74	0.0209	68.7	13.7
E30	18.7.2013	V	Grunnvannsrør	102	3.24	72	12.2	12.5	0.0425	156	74.9
E40	18.7.2013	V	GVU, vannpytt på elvekant	171	4.37	96.4	18.2	18.1	0.0598	218	107
E40	12.7.2013	V	GVU, fra hull i elvekant	155	3.97	86.0	15.9	17.8	0.0557	199	94.3
E40	12.7.2013	V	GVU, fra hull i elvekant	162	3.93	85.7	15.9	18.1	0.0551	199	92.9
E80	12.7.2013	Ø	GVU, bunnvann i dam	59.1	2.03	41.8	7.22	8.72	0.0295	108	43.6
E80	12.7.2013	V	GVU, hull sementrør	0.0351	0.0561	0.157	0.120	0.480	0.00170	41.9	2.42
F20	12.7.2013	V	GVU, vannpytt på elvekant	1.91	1.11	1.94	1.16	1.78	0.00610	39.7	9.33
F70	12.7.2013	V	GVU, gravd hull i elvegrus	3.65	2.46	1.03	0.208	0.329	0.00175	96.7	11.3

GVU=grunnvannsutslag. "RelElv" beskriver hvor prøve er tatt: Vestre (V) eller Østre (Ø)

Vedlegg 2: Detaljerte vurderinger angående mulige sprekkesoner

Som nevnt under kapittel Geofysikk og vannkjemi 4.3.1 kan grunnvannet i rød sone (E) transporteres dit nedover dalbunnen og/eller på skrå via sprekkesoner i berggrunnen, enten fra vannfylte gruveganger eller fra nordre gruvevelter. I det følgende diskuteres noen detaljer rundt dette. Se nummererte steder i Figur 24, Figur 25 og Figur 19 med tilsvarende nummererte kommentarer.



Figur 24: Modifisert Oversikt over 2D-resistivetsprofilene på Løkken, i forhold til forurensningssonene i Raubekken.

Mulig transport av forurenset grunnvann fra nordre velte til rød sone i Raubekken:

#1 Dette kan være forurenset grunnvann i løsmassene nedenfor dreneringen for nordre gruve.

#2 Har det forurensete grunnvannet fra #1 trukket ned gjennom oppsprukket berg og ned i dypet?

#3 Kan det i så fall være dette vannet som kommer opp som grunnvannsutslag i Raubekken?

Mulig transport av forurenset grunnvann fra vannfylt gruvegang til rød sone i Raubekken:

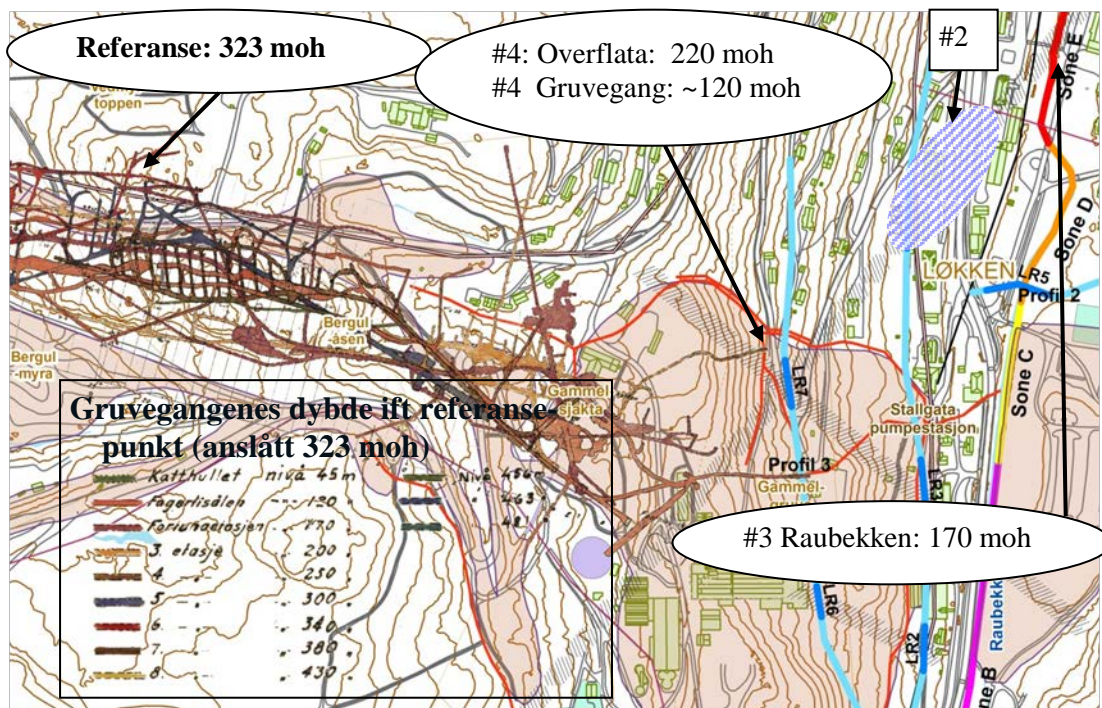
Det kan være en hydrologisk åpen forbindelse fra den vannfylte gruvegangen (#4), til den dype lavresistivitetssonen i #2 og videre til grunnvannsutslagene i #3 (Figur 24).

Som vist i Figur 25 ligger denne i størrelsesorden 50 høydemeter lavere enn grunnvannsutslag ved Raubekken i rød sone (E).

Det er derfor fullt mulig at eventuelt forurenset grunnvann fra denne gruvegangen kan presses opp i område #2 på kartene.

Dette kan i så fall forklare hvorfor denne sonen ikke er synlig i dypet i den nest øverste 2D-resistivetsprofilen (Figur 24).

Som det fremgår av de høge IP-verdiene (Figur 19) kan imidlertid de dype delene av #2 mer sannsynlig representere en mineralisering av sulfider.



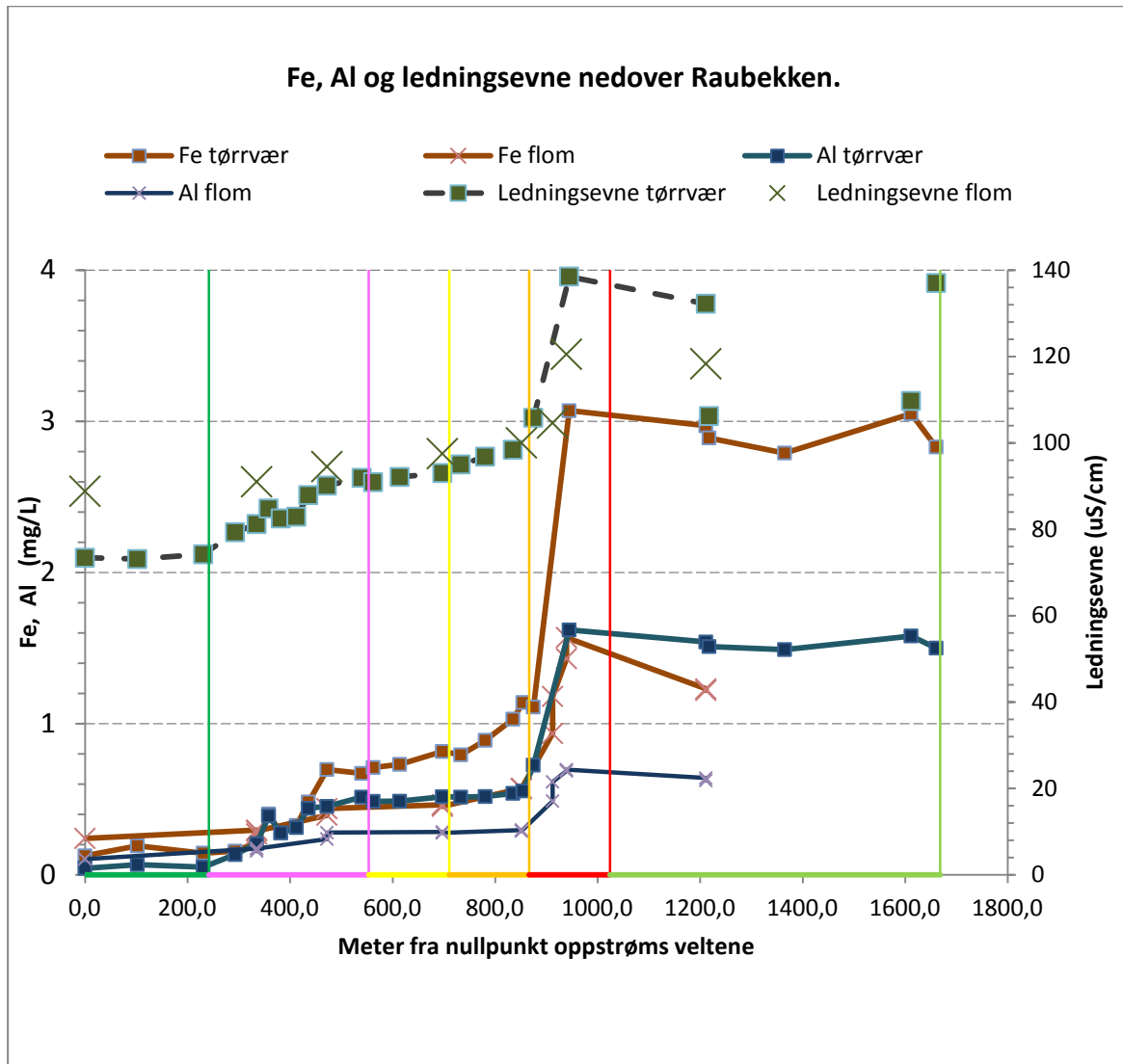
Figur 25: Anslått dybde for viktig vannfylt gruvegang i forhold til Raubekken.

Mulig sprekkesone fra Nordre velte til gul (C) sone?

Figur 24 #5 antyder forøvrig en mulig transport av forurenset grunnvann fra sprekkesone i området Nordre velte til nedre gul sone (C). Men IP-målingene i Figur 19 #5 gir svært tvetydige signal i forhold til å bekrefte eller avkrefte om dette er en sprekkesone eller en mineralisering/sulfider.

Vedlegg 3: Ledningsevne i forhold til Fe og Al

Som det fremgår av Figur 26 er det ikke-lineære men likevel klare sammenhenger mellom ledningsevne og konsentrasjoner av Al og Fe i Raubekken både under flom og tørrværsepisoden.

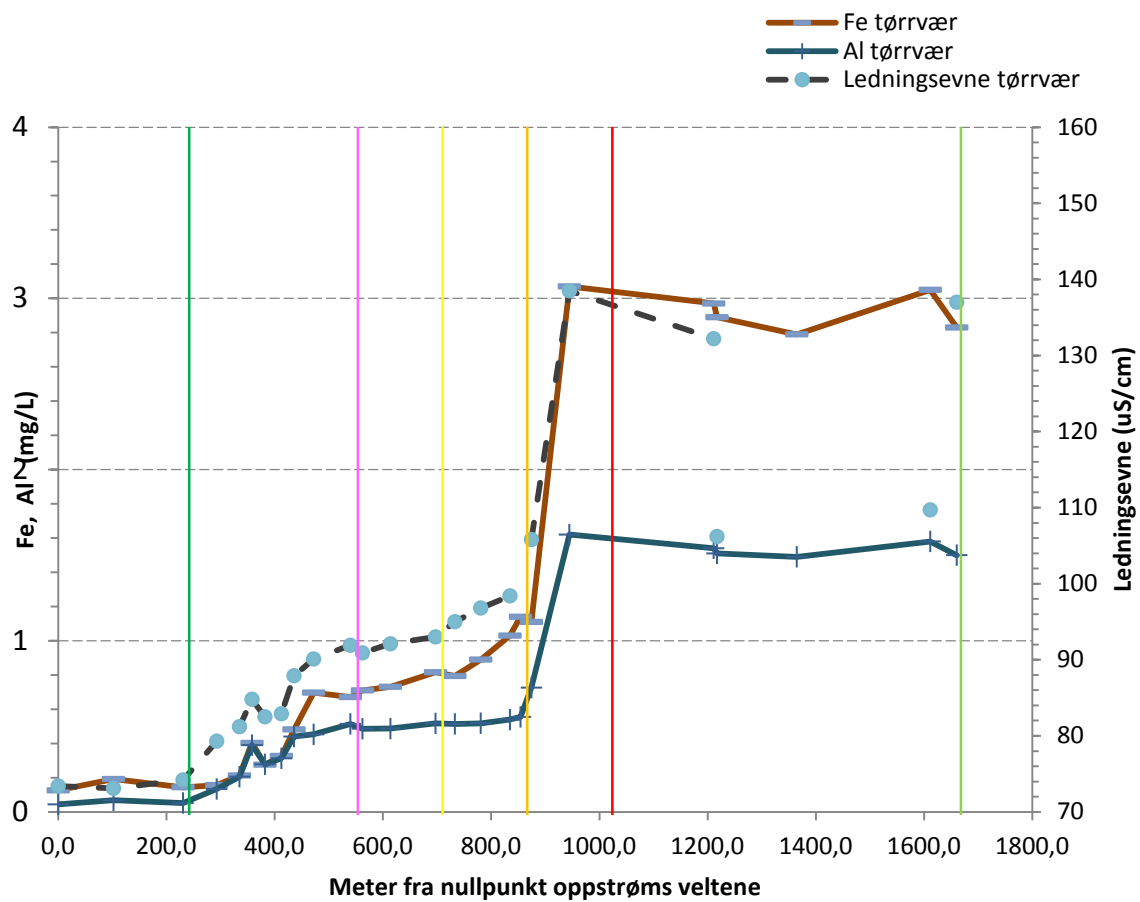


Figur 26: Sammenheng mellom ledningsevne og konsentrasjoner av Al og Fe nedover Raubekken.

I Figur 27 er flomepisodene fjernet og aksene for ledningsevne brutt for å tydeliggjøre dette. Høg ledningsevne (over 70) i mørk grønn sone opptrer sannsynligvis som følge av at hovedkationer som Ca og bikarbonat dominerer elvekjemien ovenfor velteområdet.

Ved å logge ledningsevne i Raubekken oppstrøms veltene (bakgrunnsnivå) og nedenfor veltene tror vi det kunne vært mulig å logge eller overvåke kontinuerlige metallutlekkingen nokså nøyaktig over året. Vi har ikke gjort forsøk for å verifisere om dette lar seg gjøre i området.

Fe, Al og ledningsevne nedover Raubekken.



Figur 27: Sammenheng mellom ledningsevne og konsentrasjoner av Al og Fe i tørrværsepisoden nedover Raubekken (NB: brutt akse for ledningsevne).

Vedlegg 4: Utfelling av metaller i undergrunn nedstrøms veltene

Vedlegget argumenterer for at en del av de utlekkede metallene fra veltene feller ut eller på andre måter blir værende i undergrunnen mellom veltene og Raubekken. Argumentet bygger på at vannkjemien i vannet endrer seg fra utlekking (dreneringsvann) til det renner ut i elvebreddene ved Raubekken.

V4.1 Endring i vannkemi fra velter til grunnvannsutslag

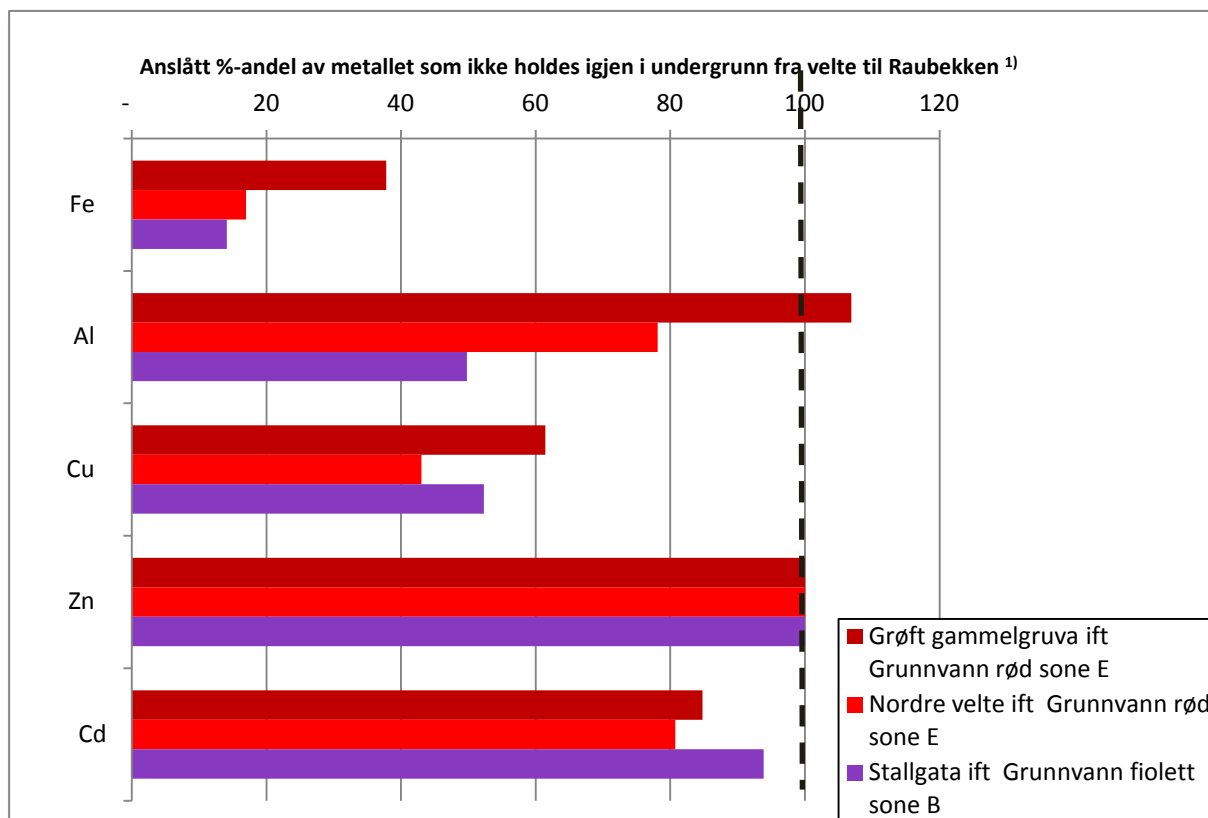
Zn antas å være blant de elementene som blir minst holdt igjen (felt ut/ medfelt/ adsorbent) gjennom undergrunnen. Vi har følgelig matematisk delt metallkonsentrasjon for de andre metallene på Zn og med det fått ut forholdstall mellom metallene og Zn i de ulike vannprøvene. Forholdstallene fra drenerings-/grøftevann har vi deretter sammenliknet med tilsvarende forholdstall for grunnvann i bredden av Raubekken. Større [Fe]/[Zn] -forhold i grunnvann ved veltene enn ved grunnvannsutslagene ved Raubekken indikere da eksempelvis at jern har felt ut på veien gjennom undergrunnen.

En gjennomtrengingsgrad på 38 % for Fe (Figur 28) indikerer da at 38% av utlekket jern fra veltene når fram til grunnvannsutslaget i Raubekken (forutsatt at Zn i vann fra veltene har nådd fram uten andre endringer enn fortykning, samt at de andre forutsetningene i kapittel V4.3 er gyldige). Vannkjemiske data fra drenering ved veltene er hentet fra Iversen 2012.

Våre tolkninger fra Figur 28:

- A. Det ligger og legges igjen svært mye jern i sprekkesoner og/eller løsmasser mellom veltene og Raubekken (minst ~60-85%). Muligens legges mer jern igjen fra Søndre velte (målt ved Stallgata) til fiolett sone B i Raubekken, enn tilsvarende fra Nordre velter til rød sone (E).
- B. Det ligger trolig også igjen mye aluminium i undergrunnen mellom Søndre velte/ veltene utenfor Gammelgruva og fiolett sone (B) i elva (minst ~50%). Tallene tyder imidlertid i liten grad på samme tendens fra Nordre/Magnetittvelte ned til rød sone (E).
- C. Punkt A. og B. er konsistent med observasjoner fra Figur 29: en større andel av det totale Fe og Al som når Raubekken (enn Cu, Zn og Cd) når elva gjennom den røde sonen.
- D. Minst, eller i størrelsesorden, halvparten av Cu i vann fra veltene legges igjen (feller ut e.l) på vei fra veltene ned til sonene fiolett (B) og rød (E).

NB: Vi understreker at disse tolkningene er bygd på usikre forutsetninger som ikke er forsøkt verifisert i undersøkelsen. Metoden og resultatene over må først og fremst anses som indiser og del av en metodeutvikling, ikke som vitenskapelig verifiserte fakta.



Figur 28: Nøkkeltall fra tabell V6. Tallene representerer gjennomtrengningsgrad (i %) for hver av metallene fra velter til grunnvannsutslag i Raubekken, gitt forutsetningene i kapittel V4.3 nedenfor. ¹⁾ Verdiene er regnet ut etter formel 1.

Tabell V6: Me/Zn-forhold i grunnvannsutslagene ved Raubekken i forhold til dreneringsvann fra de veltene de antas å stamme fra ¹⁾

	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Cd	Ca	Mg
Grøft gammelgruva vs. Grunnvann Rød sone (E)	38	157	107	61	100	85	502	115
Nordre velte vs. Grunnvann Rød sone (E)	17	122	78	43	100	81	154	103
Stallgata vs. Grunnvann Fiolett sone (B)	14	69	50	52	100	94	60	53

1) Verdiene er regnet ut etter formelen (1) nedenfor og nøkkeltall presentert i Figur 28.

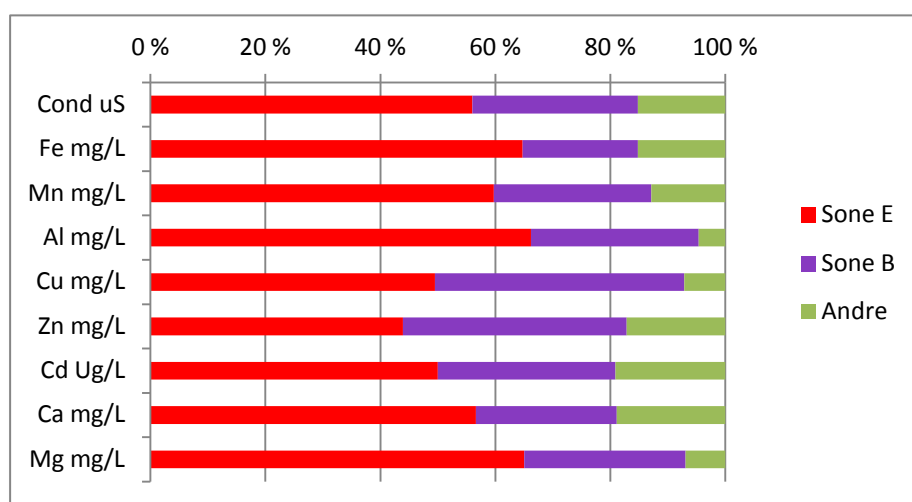
$$\text{Gjennomtrengningsgrad dreneringsvann} = \frac{100 * \left(\frac{[Me]_{\text{grunnvannsutslag}}}{[Zn]_{\text{grunnvannsutslag}}} \right)}{\left(\frac{[Me]_{\text{drenering,velte}}}{[Zn]_{\text{drenering,velte}}} \right)} \quad (1)$$

V4.2 Vannkjemi i Raubekken

Figur 29 viser at en svært høy andel (65-66 %) av konsentrasjonsøkningen av Fe, Mn og Al skjer gjennom rød sone (E). Andelen av Cu, Zn og Cd som kommer inn langs dette elvestrekket er fortsatt høyt, men noe lavere (44-50%).

Tabell V7: Antall % av den totale økning i metallkonsentrasjoner fra de ulike sonene nedover elva 11.07.2013:

Sone	Cond uS	Fe mg/L	Mn mg/L	Al mg/L	Cu mg/L	Zn mg/L	Cd Ug/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Fiolett sone (B)	29	<u>20</u>	<u>27</u>	<u>29</u>	43	39	31	25	28
Rød sone (E)	56	<u>65</u>	<u>60</u>	<u>66</u>	50	44	50	57	65
Gul og oransje sone (C og D)	15	15	13	5	7	17	19	19	7



Figur 29: Antall % av økning langs de ulike sonene i Raubekken (11.07.2013)

V4.3 Forutsetninger for resonnementet

Beregningene under er basert på følgende forutsetninger:

- Zn har langt mindre tendens til å felle ut og/ eller adsorbere i løsmasser/ sprekkesoner enn Fe og Al. Vi legger derfor til grunn for resonnementet i dette kapittelet at Zn ikke feller ut/adsorberer/ løses ut i sedimentene på sin veg fra veltene. Utover fortykning, antas det at Zn transporteres til Raubekken uten interaksjon med massene elementet passerer. Hvis dette stemmer, og Fe/Zn forholdet blir halvert fram til grunnvannsutslaget på Løkken, tilsvarer det m.a.o. at halvparten av jernet er holdt igjen i massene.
- Vannkjemiske data for dreneringsvann fra veltene er hentet fra litteratur og er et gjennomsnitt for det hydrologiske året 2011/2012.
 - Grunnvannsutslag i fiolett sone (B) forutsettes å ha tilsvarende opprinnelse som dreneringsvann som stammer fra Søndre velte og veltene nedenfor Gammelgruva. Dette vannet blir målt i Stallgata pumpestasjon (Figur 11).
 - Grunnvannsutslag i rød sone (E) forutsettes å ha en opprinnelse mellom dreneringsvannet fra grøfta i Gammelgruva og Nordre velte, men med et ukjent blandingsforhold mellom dem.
 - Eventuelt bidrag fra slamdammen til sone E er ikke hensyntatt.

Vedlegg 5: Metallsammensetning benyttet for å tolke opprinnelsen til grunnvannsutslagene i Raubekken.

V5.1 Hensikt, tokninger i vedlegg 5.

Vedlegget presenterer tolkninger av den vannkjemiske sammensetningen i:

- gruveveltene (vannprøver fra avskjærende grøfter og drenering, Iversen 2012)
- grunnvannsutslagene i bredden av Raubekken (egne data)
- vannkjemi i Raubekken (egne data)

Hensikten var å finne ut om den vannkjemiske sammensetningen kan si noe om opprinnelsen til grunnvannsutslagene i Raubekken, i hovedsak:

Stammer grunnvannsutslaget i rød sone (E) av Raubekken fra gruvevann eller fra gruveveltene?

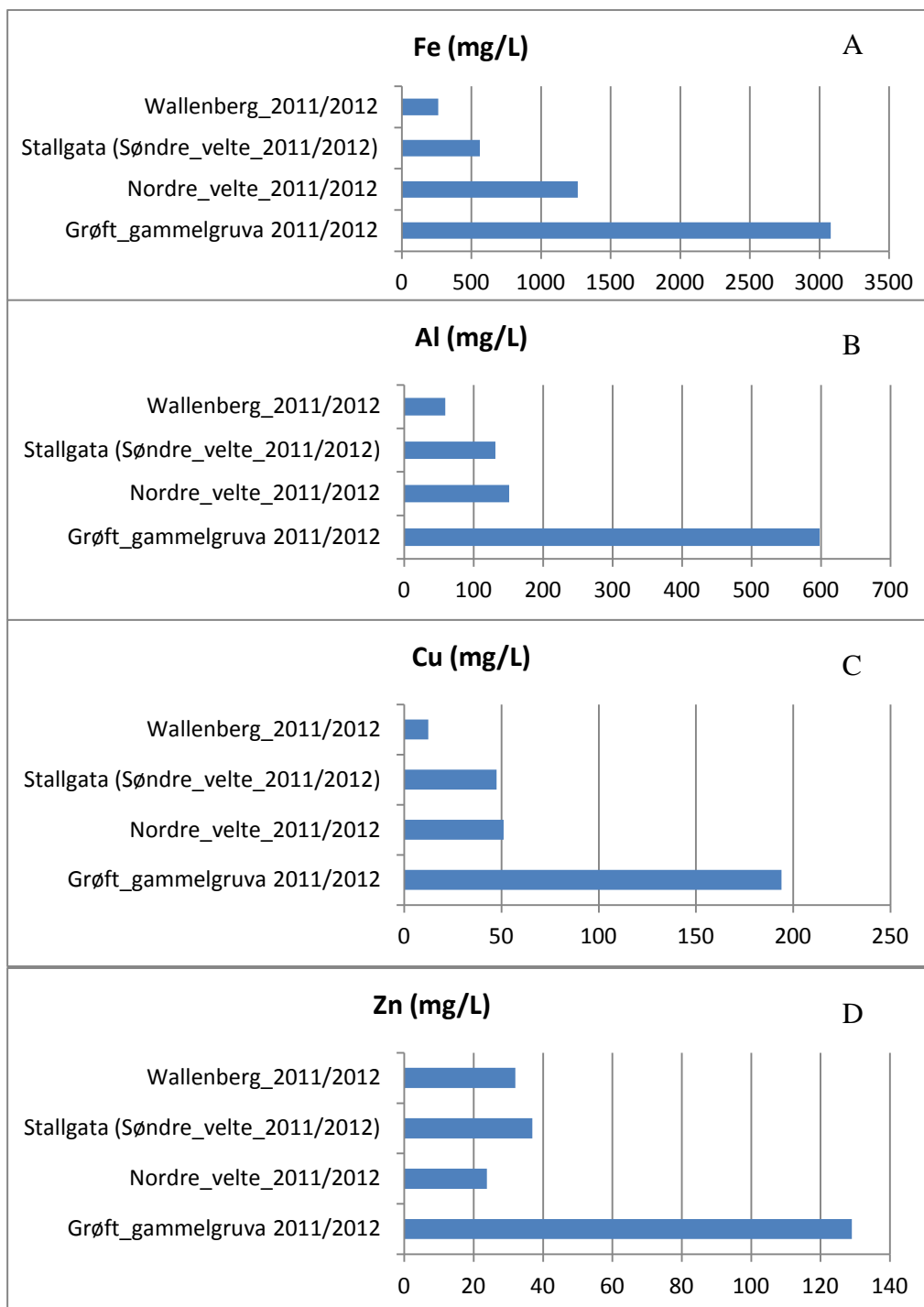
Stammer grunnvannsutslagene i fiolett sone (B) fra Søndre velte/veltene ved Gammelgruva mens grunnvannsutslagene fra rød sone (E) stammer fra området Nordre Velte/ Magnetittvelte?

V5.2 Data og figurer

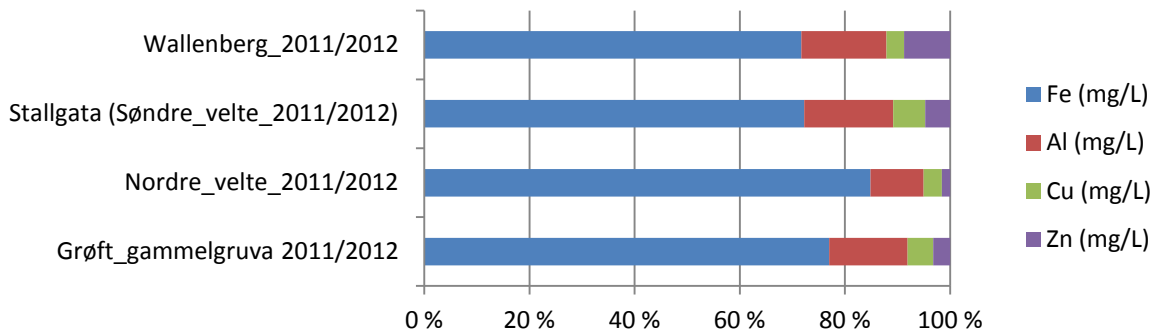
Tabell viser et uttrekk av rådata til figurer i dette kapittelet og er hentet fra Iversen 2012. Nordre velte er dreneringsvann fra området nedenfor nordre velte. Stallgata representerer en blanding av vann fra Søndre bergvelte og fra veltene utenfor inngangen til gammelgruva

Tabell V8: Metallkonsentrasjoner i veltene ved Løkken. Grøft gammelgruva representerer sannsynligvis en blanding av dreneringsvann fra Magnetittvelten og fra Nordre bergvelte.

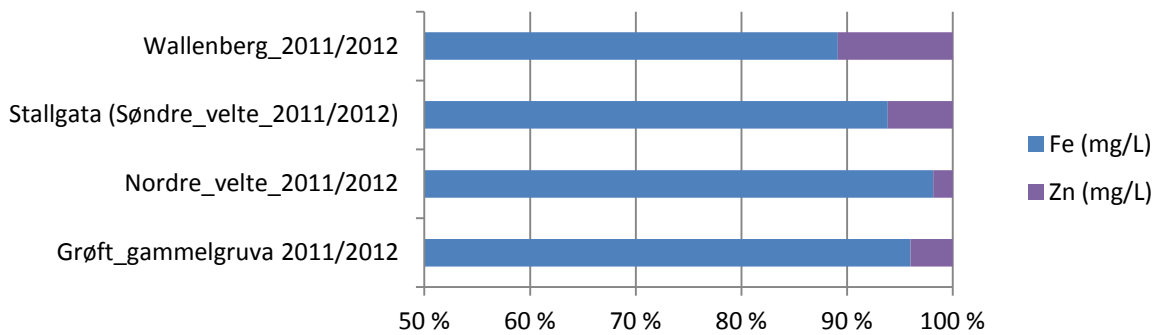
Lokalitet	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)
Grøft_gammelgruva 2011/2012	3081	598	194	129
Nordre_velte_2011/2012	1264	151	51	24
Stallgata (Søndre_velte_2011/2012)	561	131	47	37
Wallenberg_2011/2012	262	59	12	32



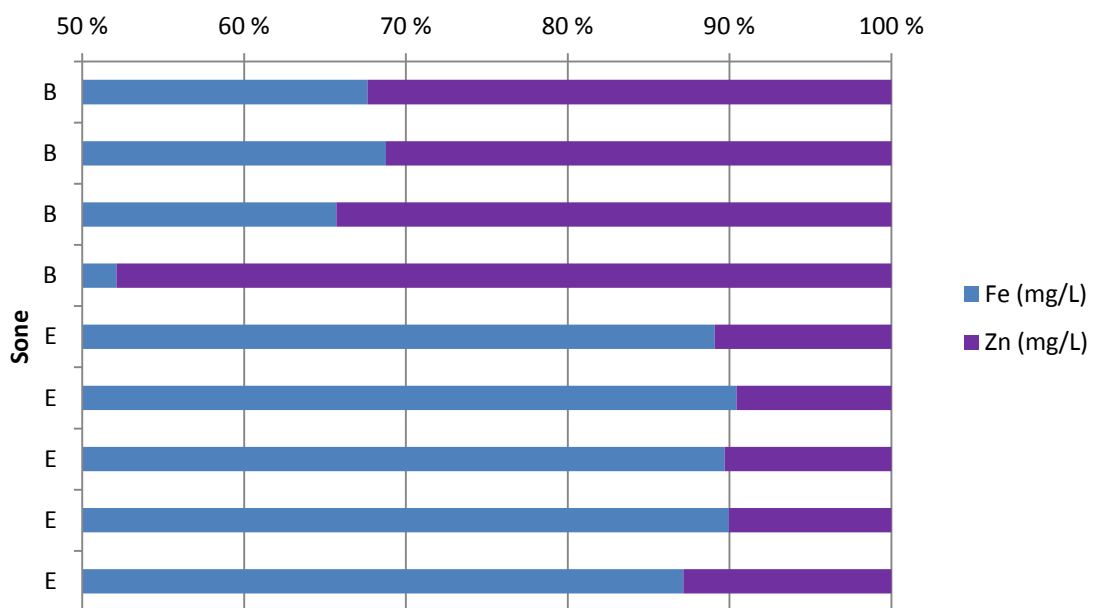
Figur 30:Metallkonsentrasjoner i dreneringsvann/grøfter fra velter samt i gruvegangene på Løkken.



Figur 31: Prosentandel av Fe, Al, Cu og Zn i forhold til summen av dem; for hver av velteområdene samt gruva ved Wallenberg.



Figur 32: Prosentandel av Fe og Zn i forhold til summen av dem, for hver av velteområdene samt gruva ved Wallenberg.



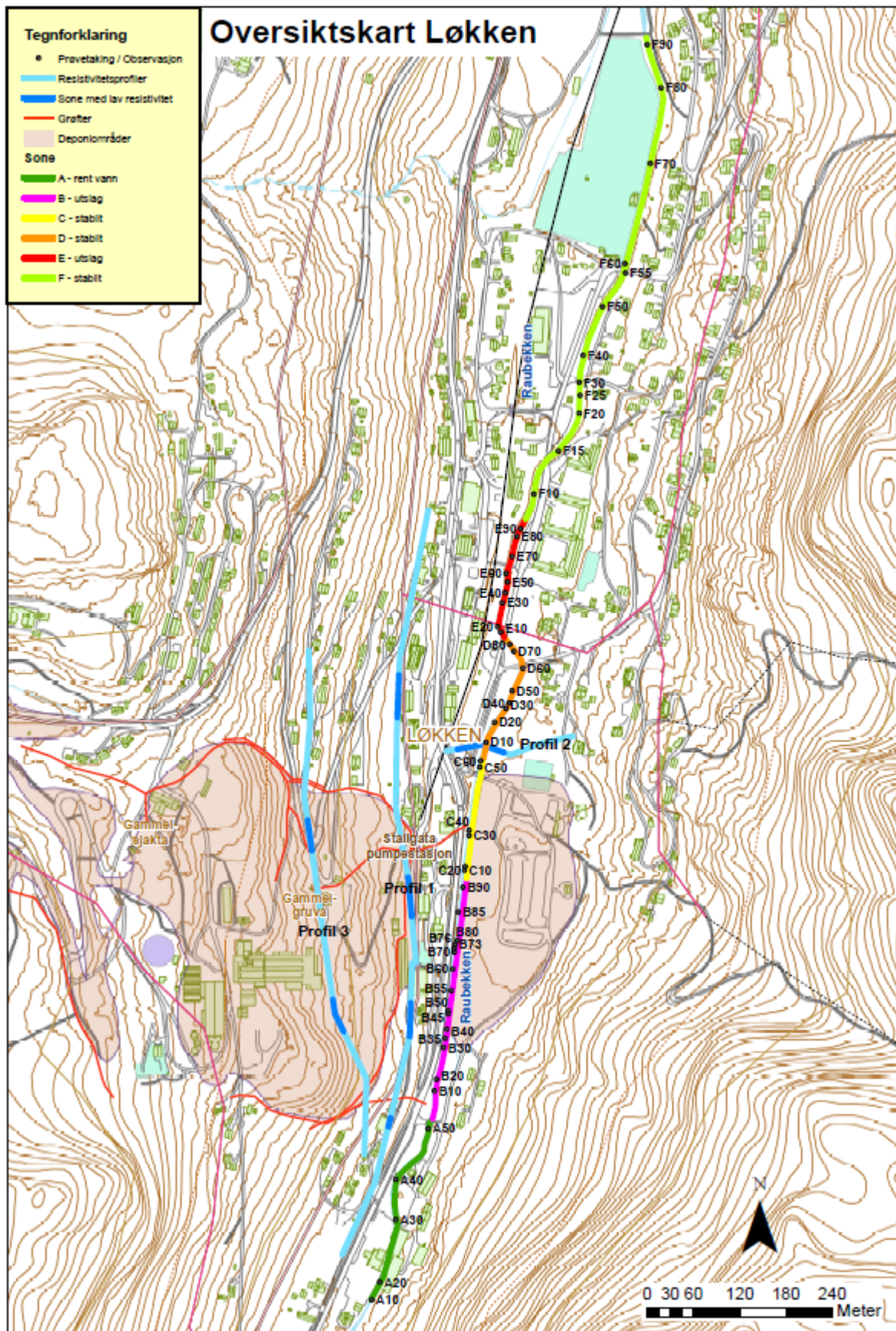
Figur 33: Prosentandel av Fe og Zn i forhold til summen av dem, i de forurensete grunnvannsutslagene langs sone B (4 prøver) og E (5 prøver).

V5.3 Oppsummert fra figurene i vedlegg 5

- A.** Fe/Zn-forholdet er den mest markante markøren i forhold til å vise en tydelig forskjell mellom dreneringsvann fra Søndre velte kontra Nordre velte (og grøft i gammelgruva). Se Figur 31.
- B.** Fe/Zn-forholdet er tydelig lavere i Søndre velte/Stallgata sammenliknet med Nordre velte/Grøft gammelgruva. Se Figur 32.
- C.** I samsvar med dette er også Fe/Zn-forholdet tydelig lavere i grunnvannsutslagene langs Sone B (nedenfor Søndre velte) enn langs sone E (nærmest Nordre velte og grøft inne i gruva (under Magnetittippen). Se Figur 33.
- D.** Dette sammenfaller også med det en ser av vannkjemien i elva; det meste av konsentrasjonsøkningen for Fe skjer langs sone E, mens for Zn kommer en større andel ut i sone B (Figur 29 alternativt Figur 12 og Figur 13).
- E.** Resultatene indikerer at forurensede grunnvannsutslag langs sone B kommer fra Søndre velte og veltene nedenfor gammelgruva, mens forurensning langs sone E har sin opprinnelse fra Nordre velte, eventuelt i kombinasjon med Magnetittvelten.
- F.** Resultatene understøtter ikke at det er vann fra vannfylte gruveganger som lekker ut langs sone E i elva. Vannkjemien i gruvevann fra Wallenberg har et meget lavt Fe/Zn – forhold, mens grunnvannskjemien langs sone E representerer det motsatte.

Det bør selvsagt understrekes at dette ikke representerer en fullverdig og kvalitetssikret analyse av det kjemiske "fingerprintet" i de ulike vannmassene, og at trendene også kan skyldes utfelling, adsorpsjon, ikke sammenfallende prøvetakingstidspunkter og sikkert flere fenomener og usikkerheter.

Vedlegg 6: Oversikt over prøvetakingsstasjoner



Figur 34: Prøvetakingsstasjoner langs Raubekken



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