

NGU Rapport 2008.079

Geofysisk logging av borehull
ved Hamar Flyplass

Rapport nr.: 2008.079		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Geofysisk logging av borehull ved Hamar Flyplass			
Forfatter: Harald Elvebakk & Ole Lutro		Oppdragsgiver: NGU	
Fylke: Hedemark		Kommune: Hamar	
Kartblad (M=1:250.000) Hamar		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1916 IV Hamar	
Forekomstens navn og koordinater: Hamar Flyplass, 6744216N 612597Ø 32V		Sidetall: 17 Kartbilag:	Pris: kr 95.-
Feltarbeid utført: 28.11 – 30.11.2006	Rapportdato: 13.11.2008	Prosjektnr.: 301809	Ansvarlig: <i>Jan S. Rønning</i>
Sammendrag: <p>NGU har gjort borehullslogging i et 817 m dypt kjerneborehull ved Hamar Flyplass. Hensikten var å måle temperaturgradienten i kambrosilurbergartene ned til underliggende grunnfjell. I tillegg ble det foretatt geofysisk logging i hullet for å kartlegge berggrunnens fysiske egenskaper. Det ble målt resistivitet, lydshastighet, naturlig gammastråling, ledningsevne i vann, pH, Eh, O₂ og NO₃.</p> <p>Målingene viser en ca 200 m tykk lagpakke med høy gammastråling som stammer fra svartskifer/alunskifer. Det er god sammenheng mellom de geofysiske loggene og endring i bergartstype. Gjennomsnittlig temperaturgradient er 24.6 °C/km. Dette er over gjennomsnittet i Norge.</p>			
Emneord: Geofysikk	Borehullslogging	Elektrisk måling	
Temperaturmåling	Naturlig radioaktivitet	Lydshastighet	
		Fagrapport	

INNHOOLD

1. INNLEDNING	4
2. LOKALITET	4
3. MÅLEMETODER OG UTFØRELSE	5
4. RESULTATER	5
4.1 Temperatur og vannkvalitet	5
4.2 Temperatur, vannets ledningsevne, naturlig gamma, resistivitet og lyd hastighet	5
4.2.1 Temperatur og vannets ledningsevne	6
4.2.2 Naturlig gammastråling	6
4.2.3 Resistivitet	6
4.2.4 Lyd hastighet	7
4.2.5 Borehullsavvik	8
5. KONLUSJON	14
6. REFERANSER	14

FIGURER

<i>Figur 1. Borehullslogging ved Hamar Flyplass</i>	<i>4</i>
<i>Figur 2. Temperatur og temperaturgradient, Hamar Flyplass</i>	<i>9</i>
<i>Figur 3. Temperatur , ledningsevne, pH, Eh, O2 og NO3, Hamar Flyplass.</i>	<i>10</i>
<i>Figur 4. Hamar Flyplass. Temperatur, ledningsevne, naturlig gamma, resistivitet, porøsitet og P- og S-bølge hastighet.</i>	<i>11</i>
<i>Figur 5. Hamar Flyplass. Naturlig gamma, resistivitet, porøsitet, P- og S-bølge hastighet og geologisk logg.</i>	<i>12</i>
<i>Figur 6. Borehullsavvik Hamar Flyplass. NS og ØV komponent (venstre) og horisontalavvik (høyre)</i>	<i>13</i>

TABELLER

Tabell 1. Borehullsdata for Hamar borehull	4
Tabell 2. Målte gammaverdier i Hamar borehull	6
Tabell 3. Målte resistivitetsverdier i Hamar borehull	7
Tabell 4. Lyd hastigheter (P-bølge) i Hamar borehull	8
Tabell 5. Lyd hastighet, naturlig gamma og resistivitet i Hamar borehull	8

1. INNLEDNING

I forbindelse med et varmestrømsprosjekt i samarbeid mellom NGU og Statoil (Olesen et.al. 2007) har NGU gjort borehullslogging i et 816 m dypt borehull ved Hamar Flyplass. I prosjektets regi var man først og fremst interessert i temperaturen, men NGU logget en rekke parametre i tillegg.

Målingene ble utført i tiden 28.11 – 30.11. 2006 av Harald Elvebakk. Geologisk logging av kjerner er utført av Ole Lutro.

2. LOKALITET

Borehullet er like ved Hamar Flyplass. Data for borehullet er vist i tabell 1. Berggrunnen består av kambrosilurske bergarter (leirskifer, kalkstein, skifer, svartskifer alunskifer) ned til ca 768 m der grunnfjellsbergarter, øyegneis, kommer inn. Figur 1 viser boreplassen ved Hamar Flyplass.

Tabell 1. Borehullsdata for Hamar borehull.

Lokalitet	Nord (wgs 84)	Øst (wgs 84)	Sone	Høyde (m.o.h.)	Dato logging	Fall	Dyp (m)	Boring
Hamar	6744216	612597	32V	221	28.11.06	vertical	816	2005



Figur 1. Borehullslogging ved Hamar Flyplass.

3. MÅLEMETODER OG UTFØRELSE

Det er benyttet loggeutstyr produsert av Robertson Geologging ltd. (<http://www.geologging.com>).

Følgende parametre ble logget:

Temperatur	Resistivitet i fjell, porøsitet
Elektrisk ledningsevne i vann	Lydhastighet, P- og S-bølge
pH og Eh	Naturlig gammastråling
O2 og NO3	Borehullsavvik

Vannprøver er tatt på fire forskjellige dyp, 100 m, 560 m, 640 m og 800 m. Ved disse dyp er det endringer i vannets ledningsevne. Analyseresultatene fra disse prøvene er vis i vedlegg 1.

Brukerbeskrivelser for de ulike målesondene ligger på NGU's hjemmesider på følgende link: <http://www.ngu.no/no/hm/Norges-geologi/Geofysikk/Borehullsgeofysikk/>

4. RESULTATER

4.1 Temperatur og vannkvalitet.

Figur 2 viser temperaturlogg med beregnet temperaturgradient. Temperaturgradienten ligger på 22-24 °C/km ned til ca 500 m. Derfra øker gradienten opp mot 30 °C/km. Fra ca 760 m går gradienten tydelig ned. Dette har sammenheng med overgang til bergart med bedre varmeledningsevne (øyegneis med kvarts) (Olesen et.al. 2007).

Figur 3 viser data fra vannkvalitetssonde. Foruten temperatur og ledningsevne måles pH, Eh, O2 og NO3. Målingene viser en økning i pH og nedgang i Eh mellom 500 og 650 m, (i alunskiferen).

4.2 Temperatur, vannets ledningsevne, naturlig gamma, resistivitet og lydhastighet

Figur 4 viser temperatur, ledningsevne, naturlig gammastråling, resistivitet, porøsitet og lydhastighet. Figur 5 viser naturlig gammastråling, resistivitet, porøsitet og lydhastighet sammen med en forenklet geologisk logg.

4.2.1 Temperatur og vannets ledningsevne

Temperaturen er omtalt foran, bunntemperaturen er 24 °C på 816 m dyp. Ledningsevnen i vann er konstant og forholdsvis lav ned til ca 500 m. Herfra er det en moderat økning ned til 670 m hvor det skjer en kraftig økning av ledningsevnen til ca 6500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vannanalyser viser en sterk økning i innholdet av Na og Cl⁻ hvilket betyr saltvann.

4.2.2 Naturlig gammastråling

Naturlig gamma er konstant og lav (75 – 80 cps) ned til ca 400 m. Fra dette dyp er det flere soner med høy gamma (500 cps). Fra ca 510 m er det generelt høy gamma helt ned til grunnfjellet på 768 m. De høyeste verdiene måles mellom 510 og 710 m dyp med verdier opp mot 1000 cps. Den høye strålingen er ikke konstant, men varierer opp og ned i hele denne lagpakken som er svartskifer/alunskifer. Variasjonen tyder på at skiferen opptrer i flere lag med varierende innhold av radioaktive elementer. Under alunskiferen går gammastrålingen merkbart ned når en kommer in i grunnfjellsgneisen. Tabell 2 viser en oversikt over målte gammaverdier i de forskjellige bergartene.

Tabell 2. Målte gammaverdier i Hamar borehull.

Bergart	Dyp [m]	Gamma [mean cps]	Gamma [min. cps]	Gamma [max. cps]	St.dev.
Leirskifer Kalkstein	0 -220	75	30	109	11.6
Mørk skifer	220-380	82	43	119	10.7
Kalkstein Grå skifer	380-393	42	12	4652	14.1
Grønnlig skifer Kalkstein	485-507	128	53	198	19.3
Svartskifer Alunskifer	562-763	502	86	963	186
Øyegneis	770-816	70	27	107	16.4

4.2.3 Resistivitet

Målt resistivitet er korrigert for vannets ledningsevne, borehullsdiameter og sondens diameter (Thunhead & Olsson 2004). Resistiviteten er generelt lav i kambrosilurbergartene i Oslofeltet og stemmer bra med målingene ned til 375 m. En sone med ekstrem lav resistivitet mellom 25 og 30 m dyp kan være forårsaket av ledende mineraler (sulfider) da den ikke har forhøyet gamma. Den geologiske loggen (Ole Lutro) sier imidlertid ingenting om sulfider i dette området. Alunskifer kan også ha lav resistivitet men har samtidig høy gammastråling. Fra 375 m opptrer flere soner med høy resistivitet, 2000 - 5000 ohmm. Disse sonene er beskrevet som kalkstein/grå skifer. De samme sonene observeres som høyhastighetssoner på lydastighetsloggen. Tabell 3 viser resistivitetsverdier for bergarter i Hamar borehull.

Tabell 3. Målte resistivetsverdier i Hamar borehull.

Bergart	Dyp [m]	Resistivitet [Mean Ohmm]	Resistivitet [Min. Ohmm]	Resistivitet [Max. Ohmm]	St.dev.
Leirskifer Kalkstein	0 -220	282	177	581	70.7
Mørk skifer	220-380	315	194	483	56.4
Kalkstein Grå skifer	380-393	2211	655	4652	1067
Grønnlig skifer Kalkstein	485-507	404	317	528	34.0
Svartskifer Alunskifer	562-763	180	15	313	49.9
Øyegneis	770-816	1548	1302	1770	115

Det er tidligere gjort målinger i alunskifer ved Arnestad skole i Bærum. Denne skiferen viste svært lav resistivitet, 10 ohmm, sammen med høy gammastråling. Dette er ikke tilfelle i Hamarhullet hvor resistiviteten ligger på 200-300 ohmm. To tynne soner ved 615 og 750 m dyp viser lav resistivitet. Svovelkislinsler opptrer i store deler av svartskiferen og kan påvirke resistiviteten ved økende tykkelse av disse. Årsaken til den forholdsvis høye resistiviteten i Hamarhullet kan være at skiferen er mindre homogen, med vekslende lag av alunskifer og annen skifer, enn ved Arnestad.

Den beregnede porøsiteten er ikke en eksakt størrelse. Det er en relativ størrelse beregnet med en modifisert versjon av Archie's lov ut fra målt fjellresistivitet og ledningsevne i porevannet (Archie 1942). Porøsiteten Φ kan finnes ut fra følgende sammenheng:

$$\sigma = a \cdot \sigma_w^k \cdot \Phi^m + \sigma_s$$

der

σ = bergartens ledningsevne

σ_w = ledningsevne i porevannet

σ_s = overflatekonduktivitet

Faktorene a, m og k (kornform, sementeringsfaktor) er avhengig av bergartstype og bestemmes ved laboratoriemålinger. Archie's lov er egentlig tilpasset homogene sedimentære bergarter (sandstein) men ved å tilpasse (måle) faktorene kan en relativ porøsitet også beregnes for andre bergarter. En stor feilkilde ved denne tilpassningen vil være tilstedeværelsen av ledende mineraler (grafitt, sulfider).

4.2.4 Lydhastighet

Lydhastigheten viser P- og S-bølgehastighet. Det er gjort full waveform prosessering ved programvare fra ALT (ALT 2006). Loggen viser at i de kambrosilurske skifrene ned til 375 m er P-bølgehastigheten ca 4500 m/s. I et område som viste høy resistivitet (kalkstein/grå skifer), øker også lydhastigheten noe, 5500 m/s. I alunskiferpakken går hastigheten ned igjen, til 3500 -4000 m/s. Grunnfjellet fra 768 m har høy lydhastighet, opp mot 6000 m/s. Det er

godt samsvar mellom lyd hastighet, gamma og resistivitet. Tabell 4 viser målt lyd hastighet (P-bølge) for bergartene i borehullet.

Tabell 4. Lyd hastigheter (P-bølge) i Hamar borehull.

Bergart	Dyp [m]	Lyd hastighet [mean m/s]	Lyd hastighet [min. m/s]	Lyd hastighet [max.m/s]	St.dev.
Leirskifer Kalkstein	0 -220	4250	3156	5439	257
Mørk skifer	220-380	4783	4137	5801	266
Kalkstein Grå skifer	380-393	5911	5512	6392	201
Grønnlig skifer Kalkstein	485-507	5075	4694	6170	291
Svartskifer Alunskifer	562-763	3907	3143	5315	293
Øyegneis	770-816	5944	5512	6409	198

Tabell 5 viser en sammenstilling av gjennomsnittlige verdier for lyd hastighet, naturlig gamma og resistivitet i de ulike bergartene i Hamar borehull. Typisk ser en at kalkstein/grå skifer har høy lyd hastighet, lav gamma og høy resistivitet, mens svartskifer/alunskifer har lav lyd hastighet, høy gamma og lav resistivitet.

Tabell 5. Lyd hastighet, naturlig gammastråling og resistivitet i Hamar borehull.

Bergart	Dyp [m]	Lyd hastighet [m/s]	Gamma [cps]	Resistivitet [ohmm]
Leirskifer Kalkstein	0 -220	4250	75	282
Mørk skifer	220-380	4783	82	315
Kalkstein Grå skifer	380-393	5911	42	2211
Grønnlig skifer Kalkstein	485-507	5075	128	404
Svartskifer Alunskifer	562-763	3907	502	180
Øyegneis	770-816	5944	70	1548

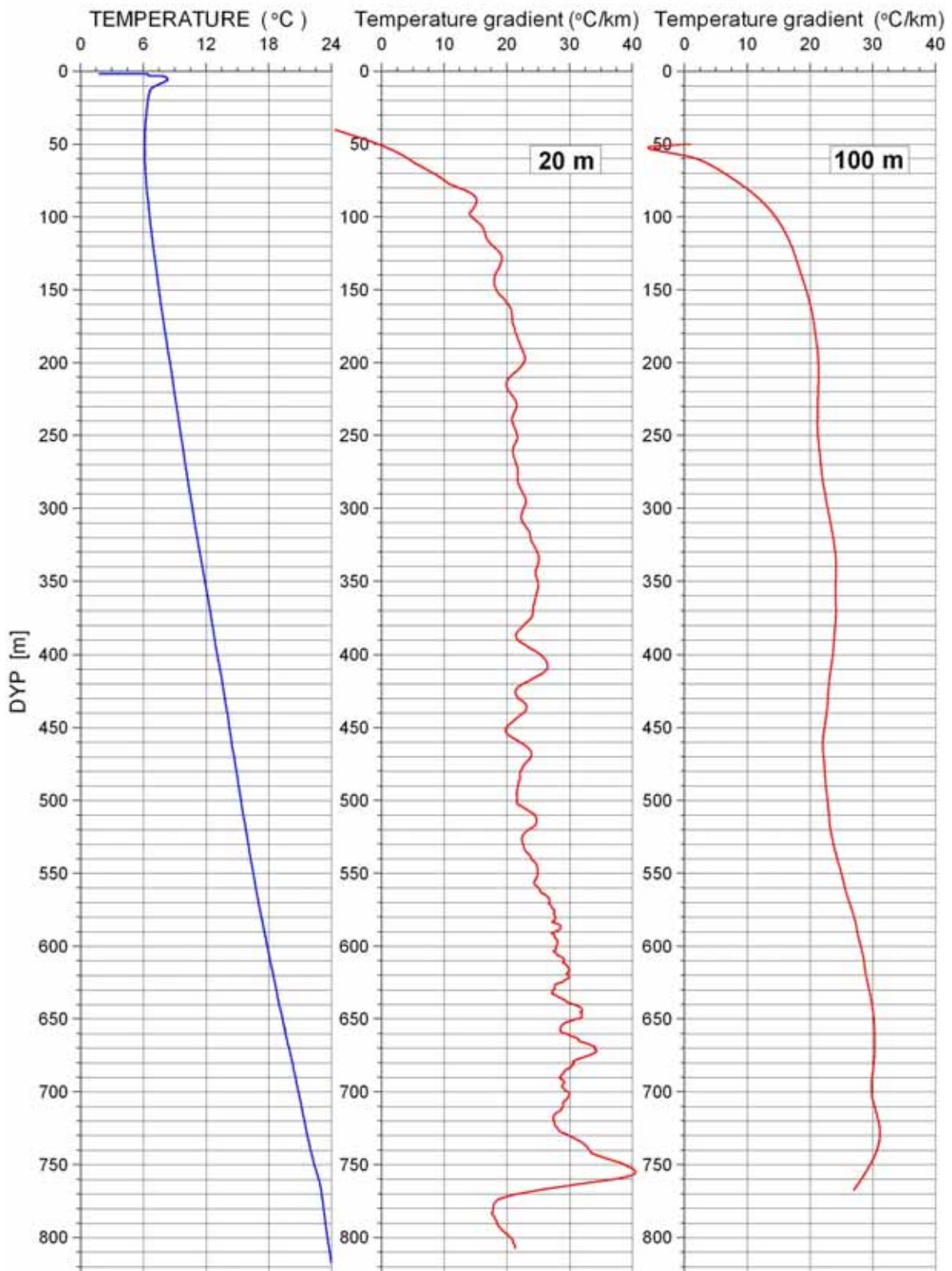
4.2.5 Borehullsavvik

Borehullsavvik er vist i figur 6. Hullet går mot sør og har et avvik fra vertikalen i bunn på 46.5 m mot sør og 13.7 m mot øst.

Temperature, Temperature Gradient

Bh Hamar 28.11.06

UTM 612597 E
32V 6744216 N
221 moh.

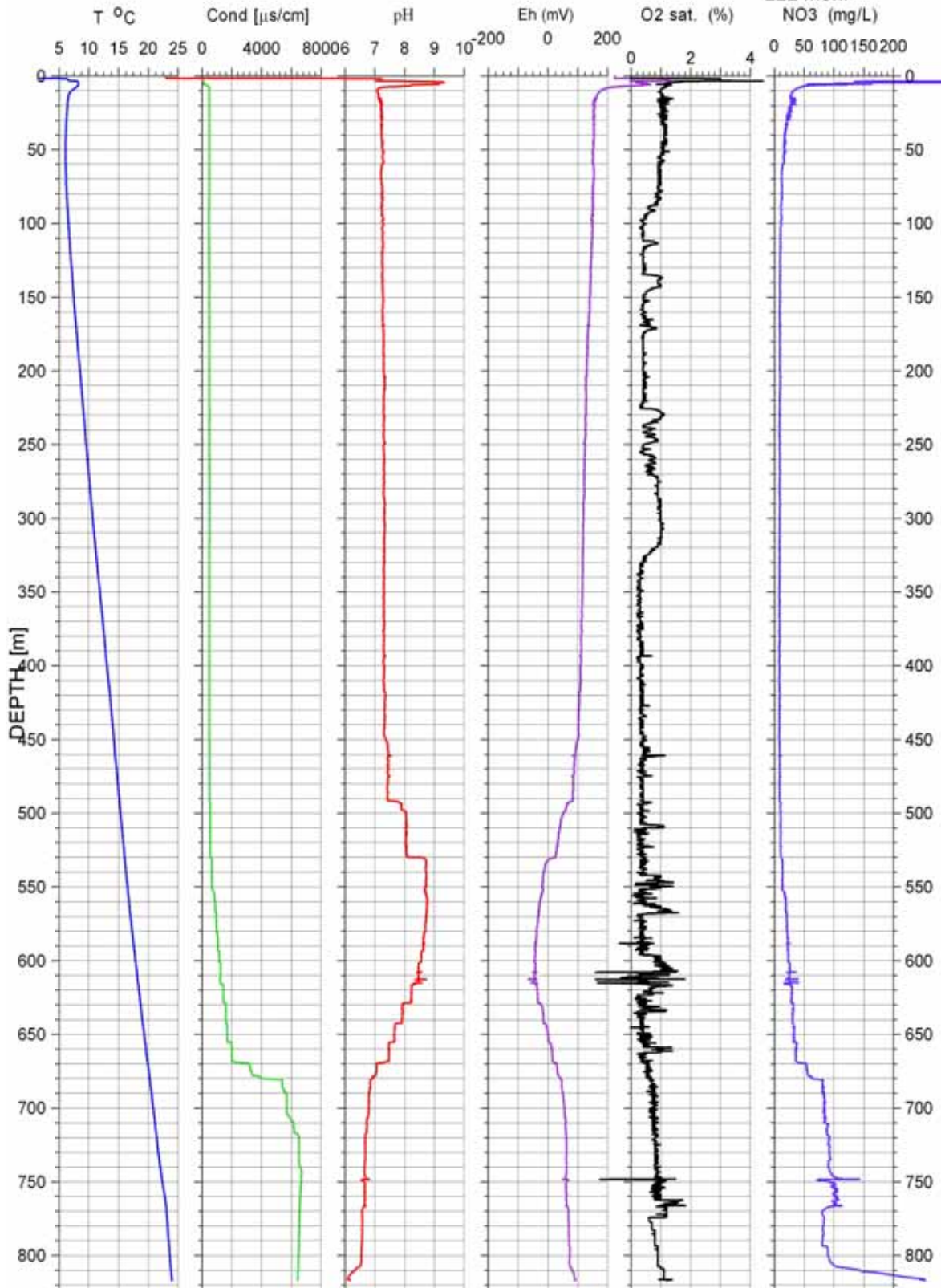


Figur 2. Temperatur og temperaturgradient, Hamar Flyplass.

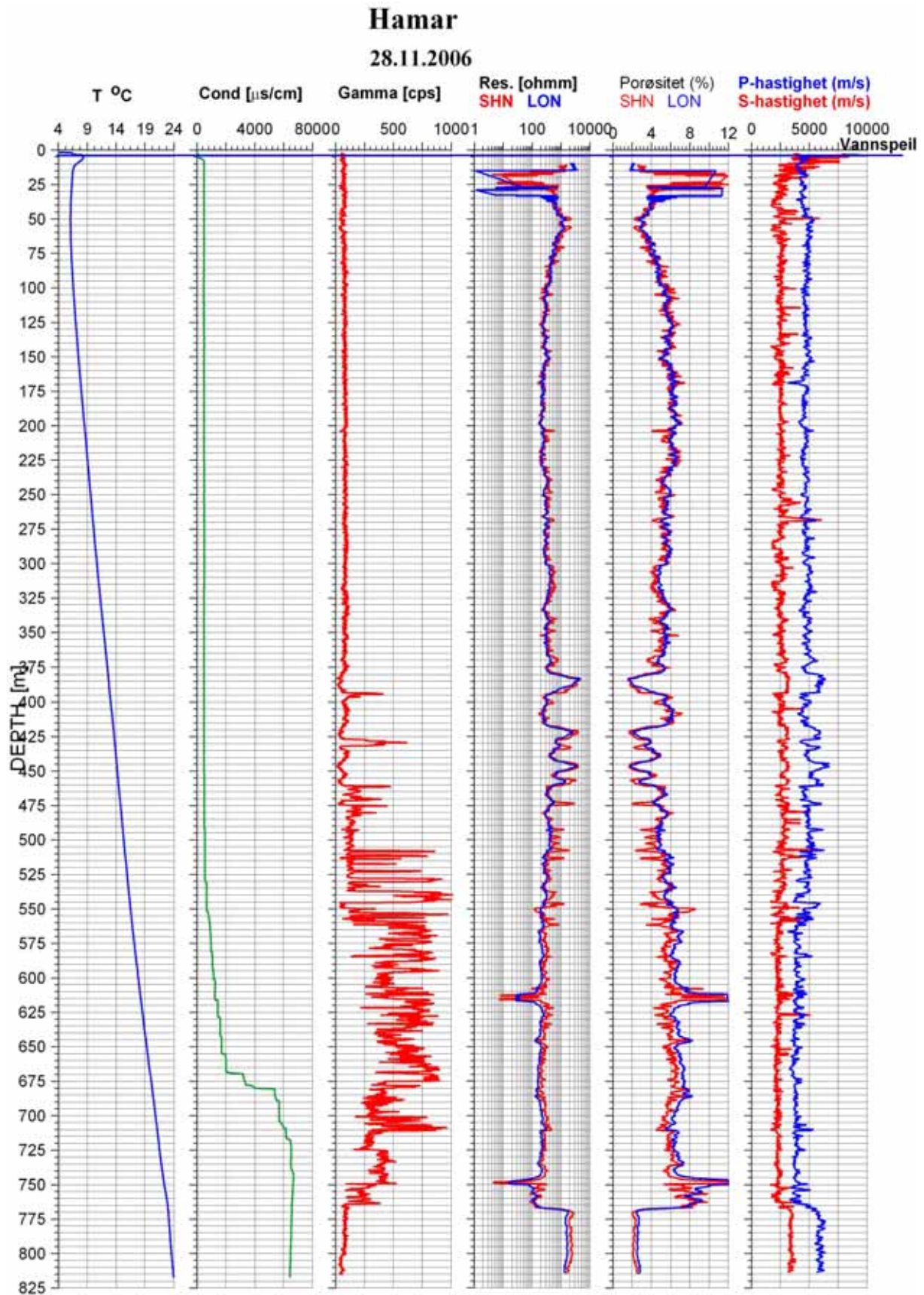
Hamar

28.11.2006

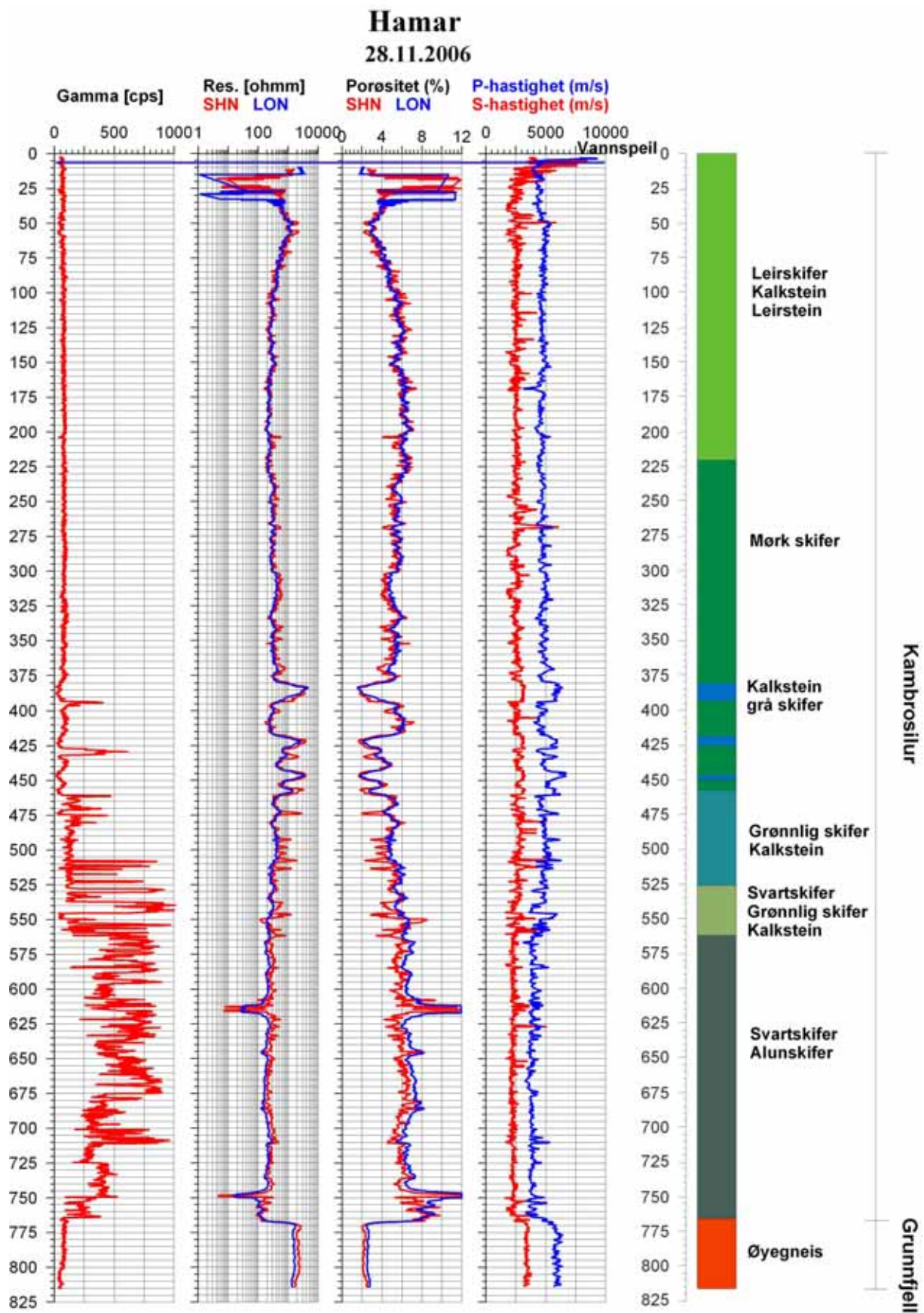
UTM 612597 E
32V 6744216 N
222 moh.



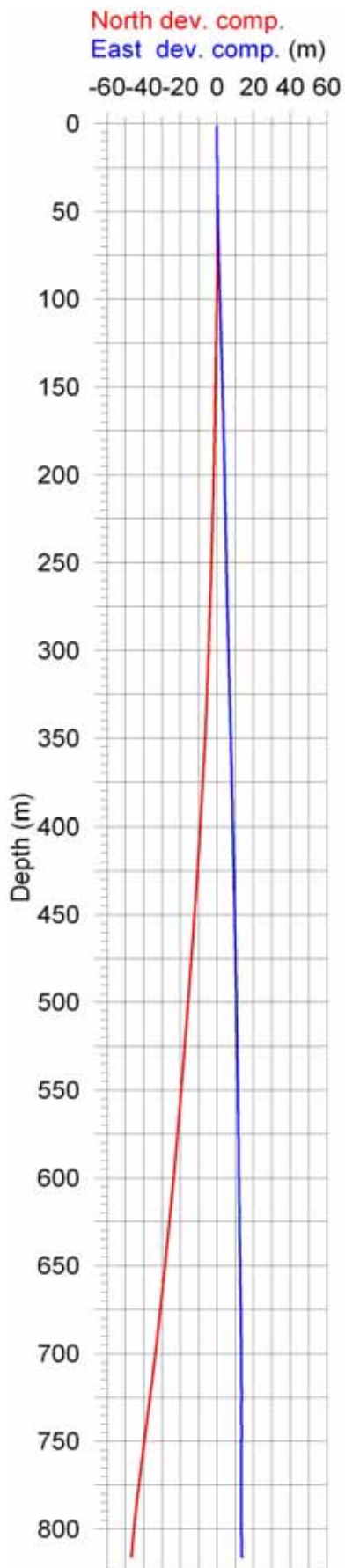
Figur 3. Temperatur , ledningsevne, pH, Eh, O2 og NO3, Hamar Flyplass.



Figur 4. Hamar Flyplass. Temperatur, ledningsevne, naturlig gamma, resistivitet, porøsitet og P- og S-bølgehastighet.



Figur 5. Hamar Flyplass. Naturlig gamma, resistivitet, porøsitet, P- og S-bølge hastighet og geologisk logg.



Hamar

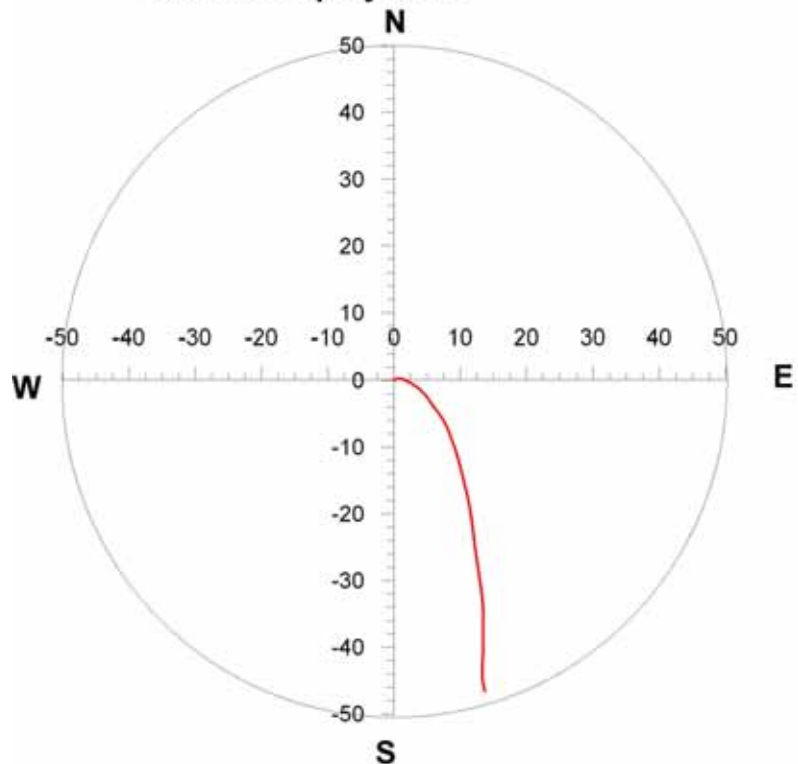
Deviation

UTM 612597 E
32V 6744216 N
221 masl.

Hamar

Deviation
Horizontal projection

UTM 612597 E
32V 6744216 N
221 masl.



Figur 6. Borehullsavvik Hamar Flyplass. NS og ØV komponent (venstre) og horisontalavvik (høyre).

5. KONLUSJON

NGU har gjort borehullslogging i et 817 m dypt kjerneborehull ved Hamar Flyplass. Hensikten var å måle temperaturgradienten i kambrosilurbergartene ned til underliggende grunnfjell. I tillegg ble det geofysisk logging i hullet for å kartlegge berggrunnens fysiske egenskaper. Det ble målt resistivitet, lydshastighet, naturlig gammastråling, ledningsevne i vann, pH, Eh, O₂ og NO₃.

Målingene viser en ca 200 m tykk lagpakke med høy gammastråling som stammer fra svartskifer/alunskifer. Det er god sammenheng mellom de geofysiske loggene og endring i bergartstype. Gjennomsnittlig temperaturgradient er 24.6 °C/km. Dette er over gjennomsnittet i Norge.

6. REFERANSER

Advanced Logic Technology, 2006: WellCAD, FWS processing, version 4.1.

Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology*, 5, 1422 – 1430.

Olesen, O., Balling, N., Barrère, C., Breiner, N., Davidsen, B., Ebbing, J., Elvebakk, H., Gernigon, L., Koziel, J., Lutro, O., Midttømme, K., Nordgulen, Ø., Olsen, L., Osmundsen, P. T., Pascal, C., Ramstad, R. K., Rønning, J. S., Skilbrei, J. R., Slagstad, T., & Wissing, B. 2007: KONTIKI Final Report, Continental Crust and Heat Generation in 3D. *NGU Report 2007.042*.

Thunhead, H. & Olsson, O. 2004: Borehole corrections for a thick resistivity probe. *JEEG*, December 2004, Volume 9, Issue 4, pp. 217 – 224.

Prøve id.	Prøvetatt	Dyp m	pH pH	p-alkalitet mmol/l	t-alkalitet mmol/l	Ledn.-evne mS/m	Fargetall	Turbiditet
							-	FTU
Hamar, dyp 100m	20061130	100	7.78		4.28	45.1	< 1.4	3.2
Hamar, dyp 560m	20061130	560	8.83	0.36	5.53	83.5	3.5	27
Hamar, dyp 640m	20061130	640	8.20		6.28	162	2.8	15
Hamar, dyp 800m	20061130	800	7.57		11.32	865	< 1.4	61

Prøve id.	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Anioner	Prøve id.
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]		
Hamar, dyp 100m	< 0.05	8.29	< 0.05	< 0.1	< 0.05	< 0.2	29.8	#REF!	45064
Hamar, dyp 560m	0.13	86.2	< 0.05	0.90	0.08	< 0.2	32.5	#REF!	45065
Hamar, dyp 640m	0.11	327	< 0.05	3.59	< 0.05	< 0.2	33.2	#REF!	45066
Hamar, dyp 800m	0.79	2888	< 0.05	24.6	< 0.05	< 0.2	8.16	#REF!	45067

Prøve id.	Si	Al	Fe	Ti	Mg	Ca	Na	K	Kationer
	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Hamar, dyp 100m	5.74	<0.02	0.0064	<0.001	11.4	57.9	11.1	5.07	4.44
Hamar, dyp 560m	4.83	0.026	0.0247	0.0018	0.222	1.65	163	2.96	7.27
Hamar, dyp 640m	4.49	<0.02	0.138	0.0019	0.718	6.03	290	6.59	13.14
Hamar, dyp 800m	3.59	<0.02	3.09	<0.001	10.1	60.9	1490	26.8	69.37

Prøve id.	Balanse	Mn	P	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	V
		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
Hamar, dyp 100m	#REF!	0.139	0.099	<0.005	1.91	<0.005	<0.005	<0.001	<0.005
Hamar, dyp 560m	#REF!	0.0084	<0.05	<0.005	0.518	<0.005	<0.005	<0.001	<0.005
Hamar, dyp 640m	#REF!	0.0469	<0.05	<0.005	0.615	<0.005	<0.005	<0.001	<0.005
Hamar, dyp 800m	#REF!	0.363	0.092	<0.005	1.04	<0.005	<0.005	<0.001	<0.005

Prøve id.	Mo	Cd	Cr	Ba	Sr	Zr	Ag	B	Be
	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
Hamar, dyp 100m	<0.005	<0.0005	<0.002	0.163	0.674	<0.002	<0.005	0.045	<0.001
Hamar, dyp 560m	<0.005	<0.0005	<0.002	0.173	0.0653	0.0024	<0.005	0.075	<0.001
Hamar, dyp 640m	<0.005	<0.0005	<0.002	0.419	0.137	0.0027	<0.005	0.113	<0.001
Hamar, dyp 800m	0.0492	<0.0005	<0.002	4.67	1.59	<0.002	<0.005	0.289	<0.001

Prøve id.	Li	Sc	Ce	La	Y	As	Sb	Y	Nb
	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	µg/l	µg/l
Hamar, dyp 100m	0.0197	<0.001	<0.02	<0.005	<0.001	<0.01	<0.005	0.0491	<0.05
Hamar, dyp 560m	0.253	<0.001	<0.02	<0.005	<0.001	<0.01	<0.005	0.110	<0.05
Hamar, dyp 640m	0.436	<0.001	<0.02	<0.005	0.0011	<0.01	<0.005	1.39	<0.05
Hamar, dyp 800m	1.91	<0.001	<0.02	<0.005	<0.001	0.014	<0.005	1.09	<0.05

Prøve id.	Ag	In	Sb	Cs	Nd	Sm	Ho	Yb	Ta
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hamar, dyp 100m	<0.01	<0.01	0.656	0.214	<0.01	<0.002	<0.001	0.0047	<0.01
Hamar, dyp 560m	<0.01	<0.01	1.77	0.602	0.246	0.0062	0.0036	0.0119	<0.01
Hamar, dyp 640m	<0.01	<0.01	1.27	1.53	0.038	0.0192	0.0316	0.0938	<0.01
Hamar, dyp 800m	0.011	0.024	0.281	7.66	0.058	0.0242	0.0171	0.0575	<0.01

Prøve id.	W	Tl	Bi	Th	V	Mn	Cu	Zn	Ga
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hamar, dyp 100m	3.57	<0.05	<0.01	<0.02	0.024	ICP-AES	1.44	ICP-AES	0.027
Hamar, dyp 560m	42.6	<0.05	<0.01	<0.02	0.151	8.59	1.82	ICP-AES	0.024
Hamar, dyp 640m	178	<0.05	<0.01	<0.02	0.049	ICP-AES	0.566	ICP-AES	0.041
Hamar, dyp 800m	32.0	<0.05	<0.01	<0.02	0.025	ICP-AES	0.240	ICP-AES	0.054

Prøve id.	Ge µg/l	Li µg/l	Be µg/l	B µg/l	Rb µg/l	Zr µg/l	Mo µg/l	Cd µg/l	La µg/l
Hamar, dyp 100m	0.151	23.1	<0.01	77.9	5.89	0.069	2.28	0.036	<0.01
Hamar, dyp 560m	0.070	ICP-AES	0.013	108	3.81	3.65	2.96	0.070	0.015
Hamar, dyp 640m	0.114	ICP-AES	0.018	141	9.64	4.02	5.96	0.087	0.015
Hamar, dyp 800m	0.161	ICP-AES	0.091	ICP-AES	48.4	0.094	68.7	0.456	0.104

Prøve id.	Ce µg/l	Pb µg/l	Al µg/l	Cr µg/l	Co µg/l	Ni µg/l	U µg/l	P µg/l	I µg/l
Hamar, dyp 100m	<0.01	<0.05	<2	<0.1	0.182	1.51	1.17	<5	<5
Hamar, dyp 560m	0.022	0.183	26.2	0.45	0.100	0.99	5.05	7.5	8.0
Hamar, dyp 640m	0.023	<0.05	18.3	0.35	0.107	0.91	10.8	12.1	20.5
Hamar, dyp 800m	0.020	<0.05	12.8	<0.1	0.722	4.75	6.04	<5	56.7

Prøve id.	K µg/l	As µg/l	Se µg/l
Hamar, dyp 100m	ICP-AES	0.360	<1
Hamar, dyp 560m	ICP-AES	2.31	<1
Hamar, dyp 640m	ICP-AES	6.06	<1
Hamar, dyp 800m	ICP-AES	3.37	<1