

Læsø Kommune

Hypersalint grundvand på Rønnerne, Læsø - forekomst og dannelse

Klaus Hinsby, Lasse Gudmundsson, Naja Mikkelsen
og Jens Morten Hansen



Læsø Kommune

Hypersalint grundvand på Rønnerne, Læsø - forekomst og dannelse

Klaus Hinsby, Lasse Gudmundsson, Naja Mikkelsen
og Jens Morten Hansen

Indhold

Sammenfatning og konklusion	3
Indledning	5
Baggrund	6
Forekomst og lokalisering af hypersalint grundvand på Læsø	6
Dannelsesprocessen for det hypersaline grundvand	7
Undersøgelingsprogram og metoder.....	7
Beskrivelse af GEUS målestationer.	7
Isotop hydrologi	8
Geofysiske målinger	8
Remote sensing (satellitbilleder)	9
Måleresultater	9
Sydehyttens salinitetsmålinger.....	9
Data fra GEUS målestationer.....	10
Dybdevariation i elektrisk ledningsevne ("salinitet").....	11
Gammalog	11
Hydraulisk ledningsevne	11
Klimaparametre	12
Årstidsvariationer i saliniteten.....	14
Vandspejlsmålinger.....	14
Grundvandskemi.....	14
Isotop hydrologi	14
Klimadata fra DMI.....	15
Nedbør og fordampning i perioden 1990-2000.....	15
Geofysiske målinger	16
Multi Elektrode Profilerings (MEP).....	16
Ellogboringer	16
Satellitbilled tolkning.	16
Konklusion	18
Referencer	19
BILAG 1. Måledata fra GEUS stationerne L1-L3	20
BILAG 2. Geofysiske målinger	26
BILAG 3. Satellit billeder	34
 G E U S	 2

Sammenfatning og konklusion

På foranledning af Læsø Kommune har GEUS foretaget en vurdering af mulighederne for at øge indvindingen af hypersalint grundvand på den sydlige del af Læsø. Kommunen ønsker at øge saltvandsindvindingen til det dobbelte, dels for at øge saltproduktionen, dels for at etablere et kurbad til lindring af hudlidelser.

Nærværende rapport præsenterer udvalgte resultater fra en række undersøgelser på Rønnerne primært foretaget af, eller på foranledning af GEUS gennem det sidste årti. Resultaterne danner baggrund for vurderingen af, om ressourcen af hypersalint grundvand er tilstrækkelig stor, til at en øget indvinding er bæredygtig. Ved bæredygtig forstås i denne sammenhæng at ressourcen ikke overudnyttes ("mines"), og at indvindingen ikke skaber problemer for den særegne natur på den sydlige del af Læsø.

Aktuelt indvindes 300 m³ hypersalint grundvand årligt, hvoraf der produceres 30-35 ton salt (tallene er anslået for 2002; pers. kom. Poul Christensen). Denne mængde hypersalint grundvand svarer til indvindingen fra ca. 1000 m³ (10m x 10m x 10m) mættet sand på Rønnerne, hvilket svarer til 100 afhentninger fra indvindingsbrøndene, der p.t. er lokaliseret øst for Hornfiskrøn. Hver gang der oppumpes 3 m³ hypersalint vand fra en brønd ved en afhentning, indvindes der således porevand, fra hvad der svarer til et ca. 10 m³ omkringliggende sandmagasin.

Hvor meget større det bæredygtige indvindingspotentiale for saltvand er på Rønnerne, er vanskeligt at afgøre, da en egentlig kortlægning af forekomsten af hypersalint grundvand hidtil ikke har været økonomisk mulig. Ressourcen vurderes dog på baggrund af historiske oplysninger at være betydelig, idet den årlige indvinding i dag kun skønnes at udgøre ca. 1 % af den årlige indvinding i middelalderen, hvor ca. 100 brønde og syderier anslås at have været i drift samtidigt. Naturforholdene har siden ændret sig pga. øens fortsatte hævnning og landskabsudvikling, men de grundlæggende geologiske og klimatologiske betingelser vurderes ikke at have ændret sig afgørende. Dannelsesprocesserne vurderes således at foregå i dag, som dengang, men antallet af lokaliteter med de nødvendige betingelser for akkumulering af saltvandet kan muligvis være mindre.

For at udarbejde et groft estimat over produktionen af hypersalint grundvand på Læsø, kan følgende regnestykke opstilles:

Anslås den sydlige del af Læsø at modtage samlet i alt 800 mm nedbør og havvand til indampning årligt kræves en inddampning på 680 – 797 mm for at opnå den typiske koncentration for det hypersaline produktionsvand (12.5 % = fem gange saltholdigheden af havvandet omkring Læsø). Herved dannes mellem 3 og 120 mm hypersalint grundvand på "Fjærene" afhængigt af forholdet mellem havvand og nedbør (3 mm saltvand ved 100 mm havvand og 700 mm nedbør / 120 mm saltvand ved 500 mm havvand og 300 mm nedbør). Ubevoksede sandarealer på og omkring Rønnerne er ved normal vandstand opmålt til at udgøre godt og vel 1 km² (100 ha). På dette grundlag vurderes, at der minimum dannes mellem 3.000 og 120.000 m³ hypersalint grundvand på Fjærene årligt, hvilket svarer til mellem 10 og 400 gange den nuværende indvinding på 300 m³ årligt. Det skal dog bemærkes, at dette er et konservativt skøn, idet langt større områder tørlægges i sommerperio-

den, hvor den høje fordampning forekommer. I sommerperioden vil arealet med tørlagte eller næsten tørlagte sandflader typisk være 10 gange større - i ekstreme tilfælde endda helt op mod 90 gange. Fjærene vurderes derfor at danne tilstrækkelige mængder hypersalint grundvand til at en fordobling af den nuværende saltindvinding kan foregå bæredygtigt.

En ubekendt faktor, og dermed et kritisk punkt, er dog, hvor stor en del af produktionen af hypersalint grundvand der fanges i de overfladenære sandlag af underliggende lavpermeable lerenheder. Det forhold kontrolleres alene af geologiske og strømningsmæssige faktorer. Det vurderes imidlertid at lerlag vil bremse nedsivningen af saltvand overalt under Rønnerne, blot vil dette måske foregå i større dybde lokalt (jfr. data præsenteret i rapporten). Den tilgængelige saltvandsressource må samtidigt formodes at være betydeligt større end den årlige produktion af hypersalint grundvand, idet en del af flere hundrede års produktion af hypersalint grundvand er akkumuleret ovenpå underliggende lerlag i det overfladenære, hypersaline grundvandsmagasin.

På basis af resultaterne fra de geologiske, geofysiske og geokemiske undersøgelser, præsenteret i den foreliggende rapport, samt de tilgængelige historiske data, er den samlede vurdering, at det er overvejende sandsynligt, at det er bæredygtigt at øge saltindvindingen til det ønskede niveau. Indvindingen vil dog nå et niveau, hvor overvågning af udviklingen i saliniteten omkring indvindingsbrøndene, samt yderligere kortlægning af forekomsterne af hypersalint grundvand, må anbefales. Rapporten anviser en metode til kortlægning af saltvandet, som vurderes at kunne gennemføres af Læsø Kommune / Produktionsskolen selv.

Ligeledes anbefales det, at indvindingen af hypersalint grundvand spredes på flere indvindingsbrønde, og at saltkoncentrationen, eller den elektriske ledningsevne, måles i de enkelte brønde ved hver afhentning. En overvågning af udviklingen i det oppumpede vands ledningsevne vil kunne advare om, hvilke brønde der evt. overudnyttes, og åbne mulighed for at justere indvindingen på de enkelte brønde. Overvågning af salinitetsudviklingen vil samtidig give mulighed for at vurdere om den årlige produktion af hypersalint grundvand er mindre end den årlige indvinding.

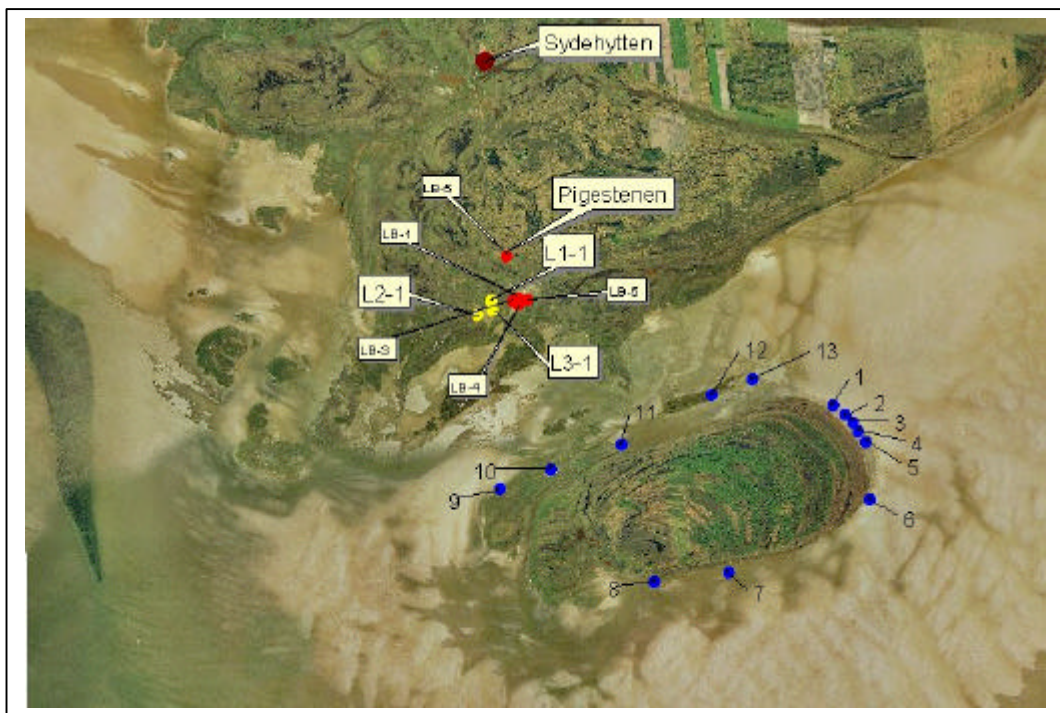
I samme forbindelse anbefales det at følge vandbalancen på Rønnerne ved at måle både nedbør og fordampning i området, samt frekvensen af oversvømmelser og tørlægning, idet dannelsen af hypersalint grundvand kontrolleres af disse faktorer. Fordampningen foreslås målt ved hjælp af en lille klimastation og/eller ved opsætning af en fordampningspande. Sidstnævnte vil udover at give værdifulde fordampningsdata til at vurdere udviklingen i dannelsen af hypersalint grundvand også kunne anvendes til, på simpel vis, at illustrere den betydningsfulde fordampningsproces overfor turister og gæster til saltsydehytten.

Indledning

På foranledning af Læsø Kommune har GEUS foretaget en vurdering af mulighederne for at øge saltvandsindvindingen på Rønnerne på den sydlige del af Læsø. Kommunen ønsker at øge indvindingen af hypersalint grundvand for at etablere et kurbad på øen.

Nærværende rapport beskriver kort de geologiske og klimatologiske processer, der styrer dannelsen af hypersalint grundvand på Rønnerne – et unikt naturområde i Europa. Herudover præsenteres udvalgte relevante data til belysning af forekomsternes størrelse samt dannelsesprocesserne. De præsenterede data er primært indsamlet af, eller på foranledning af, GEUS i den seneste dekade. Sluttelig beskriver rapporten eksisterende og potentielle nye metoder til kortlægning af saltvandet, samt foreslår et kortlægningsprogram af saltholdigheden i det øvre grundvand i et udvalgt område. Programmet er tilrettelagt, så det kan udføres egenhændigt af Læsø Kommune evt. med bistand fra GEUS til data-præsentation og kalibrering af måleudstyr.

Nedenstående kort og luftfoto viser undersøgelsesområdet på Rønnerne, samt placeringen af saltsydehytten, hvor saltvandet aktuelt inddampes til køkkensalt. Herudover er lokaliseringen af de aktuelle indvindingsbrønde og tre GEUS målestationer (L1-L3), der har indsamlet data fra 1993 til 2000, markeret.



Figur 1. Lokalisering af undersøgte borer og brønde på Rønnerne, Læsø. Gule punkter angiver GEUS målestationer, røde punkter ellogboringer udført af ÅU, og blå punkter er lokaliteter for "Sydehyttens" salinitets målinger.

Baggrund

Læsø-boernes økonomi har gennem 5 århundreder (ca. 1150-1650) været stærkt afhængig af saltproduktion fra det hypersaline grundvand på den sydlige del af øen. I midten af 1600-tallet var stort set hele øens træbevoksning imidlertid skovet og anvendt til opvarmning og inddampning af saltvandet, og produktionen måtte stoppes. Læsø-boerne har produceret salt også efter 1650, men i et langt mindre omfang. Aktuelt er saltproduktionen ikke længe en væsentlig del af øens økonomi, men den er en betydelig turistattraktion, med potentiale for at skabe yderligere arbejdspladser gennem en øget indvinding og produktion eksempelvis af diverse produkter til lindring af hudlidelser (kurbad mm). Kommunen har derfor en naturlig interesse i at undersøge og dokumentere dette potentiale.

I 1991 opførtes en model af de gamle salt sydehytter. Sydehytten demonstrerer i dag de gamle produktionsprocesser for turister og andre besøgende på øen, samtidigt med at der produceres en anselig mængde salt (30-35 ton i 2002), der udvindes fra hypersalint grundvand (ca. 300 m³ i 2002, pers. kom. Poul Christensen). Denne mængde hypersalint grundvand svarer til indvindingen fra ca. 1000 m³ (10m x 10m x 10m) mættet sand på Rønnerne, eller som aktuelt ca. 100 afhentninger fra indvindingsbrøndene (p.t. øst for Hornfiskrøn), der indvinder porevand fra ca. 10 m³ omkringliggende sandmagasin ved hver afhentning. Hvor meget større det bæredygtige indvindingspotentiale for saltvand er på Rønnerne, er vanskeligt at afgøre, men den årlige indvinding i dag skønnes kun at udgøre ca. 1 % af den årlige indvinding i middelalderen, hvor mindst 100 sådanne brønde og syderier menes at have været i drift samtidigt (Velle, 1993). Naturforholdene har siden ændret sig betydeligt p.gr.a øens fortsatte hævnning og landskabsudvikling (Hansen 1995), men de grundlæggende geologiske og klimatologiske betingelser vurderes principielt ikke at have ændret sig. Dannelsesprocesserne vurderes således at foregå i dag som dengang, men antallet af lokaliteter med de nødvendige betingelser for saltvandsdannelse kan dog i dag være mindre. Formålet med nærværende rapport er at belyse disse forhold nærmere og anvise fremtidige undersøgelses muligheder.

Forekomst og lokalisering af hypersalint grundvand på Læsø

Det hypersaline grundvand forekommer på den sydlige del af Læsø ved og omkring Rønnerne. De højeste saltkoncentrationer observeres indenfor de øverste få meter under de vegetationsfrie sandflader "Fjærerne", der generelt er dækket af havvand i vinterperioden, men tørlagte i det meste af sommerperioden (Hansen 1994, 1995). Det hypersaline grundvand forekommer ikke overalt under sandfladerne, men lokalt hvor topografien af det underliggende lerlag favoriserer akkumuleringen af det "densitetsstrømmende" hypersaline grundvand.

Tilstedeværelsen af høje koncentrationer af saltvand kan ikke umiddelbart forudsiges, men må kortlægges ved hjælp af forskellige metoder, hvoraf hovedparten i øjeblikket er relativt omkostningskrævene. De mest anvendelige metoder til formålet, udover at udtage og analysere vandprøver fra borede eller gravede huller, er primært baseret på geofysiske (elektriske eller elektromagnetiske) metoder, som registrerer undergrundens/vandets elektriske

ledningsevne (der stiger med saltindholdet). Metoderne spænder fra at sænke sonder ned i borehuller, til at lægge elektroder på jordoverfladen eller helikopterbåret elektromagnetisk sondering. Sidstnævnte metode er formentlig den mest effektive p.t., men også den mest kostbare (~ kr. 500.000 ?).

Anvendelse af satellitbilleder/-målinger er et andet muligt alternativ, der med tiden kan vise sig meget effektiv og udføres for relativt små omkostninger. Et pilotstudie herom er initieret i samarbejde med Geografisk Institut, KU i forbindelse med nærværende afrapportering, og foreløbige resultater præsenteres senere i rapporten.

Dannelsesprocessen for det hypersaline grundvand

Det hypersaline grundvand på Læsø dannes ved inddampning af havvand i forår og sommermånederne i lavvandede "beskyttede" områder (uden betydelig "tilstrømning" af fersk grundvand eller nedbør). Lavtliggende dele ved og omkring "Rønnerne" oversvømmes som nævnt i vinterhalvåret og efterlader frie vandflader ("saltvandssøer"). I disse "saltvandssøer" inddampes havvandet umiddelbart omkring jordoverfladen til høje saltkoncentrationer, der siver ned til grundvandet ved densitetsstrømning og diffusion. Under jordoverfladen og grundvandsspejlet vil densitetsforskellene ligeledes "drive" det tunge hypersaline grundvand mod lavninger i det underliggende lavpermeable lerlag, hvor saltvandets videre strømning blokeres ultimativt. Når de lavpermeable lerlag har blokeret den advective strømning endeligt vil diffusionsprocesserne være hovedansvarlig for transport af de opløste saltminerale (primært køkkensalt = natriumklorid, NaCl) mellem områder med høj og lav salinitet.

Havvandet inddampes til saltkoncentrationer på maksimalt 10 – 15 % i det hypersaline grundvand, hvilket er 4 – 6 gange så højt som overflade havvandets typiske saltholdighed omkring Læsø (ca. 2.5 % - Hermann og Olsen, 1979). under gunstige geologiske og klimatiske forhold.

Undersøelsesprogram og metoder

Beskrivelse af GEUS målestationer.

I 1993 opsatte GEUS med hjælp fra Læsø kommune tre målestationer L1, L2 og L3 på Rønnerne for at registrere de klimatiske betingelser i området, og variationer i saltholdigheden i det øverste grundvand (se figur 1 for lokalisering). Ved hver station blev sat to filterrør (40 mm pph eller 50 mm pvc) til mellem to og seks meters dybde. Filterrørene er placeret mindre end en halv meter fra hinanden. Ved hver station blev der i et af filterne placeret en ledningsevne og tryktransducer sonde til registrering af årstidsvariationerne i vandets ledningsevne ("saltindhold") og dybden til grundvandsspejlet. Ved L1 stationen blev der yderligere opsat en klimastation til registrering af klimaparametre (temperatur, nedbør, luftfugtighed, vindretning og vindhastighed) – parametrene anvendes til beregning af den potentielle

fordampning på Rønnerne. Der er desuden udtaget enkelte grundvandsprøver fra de tre målestationer til analyse af hovedkomponenter i grundvandet.

Tabel 1. Udbygning af de tre målestationer L1, L2 og L3. Målingerne er foretaget ved opstillingen november, 1993.

Station	Dybde til bund (m)	Vand-Spejl (m.u.t.)	Udbygning	Filter-dybde (m.u.t.)	top af rør (m.o.t.)	EC/D *** son-deniveau (m.u.t.)
L1-1	2.57	0.31	40 mm peh	0-3	0.87	1.43/1.07
L1-2	3.93	0.32	40 mm peh	0-4	0.07	
L2-1	2.33	0	40 mm peh	0-1	1.03	1.07/0.92
L2-2	3.5**	0	50 mm pvc	0-4	0.46	
L3-1	2.0	- 0.1*	40 mm peh	0-2	1.3	0.8/0.66
L3-2	4.18**	- 0.17*	50 mm pvc	0-6	0.46	

*10 og 17 cm over terræn - reel vandstand blev målt til 10 cm over terræn. Ændres fortegnene på værdierne i vandspejlskolonnen svarer de angivne værdier stort set til vandspejlskoten. ** En del silt og sand er løbet ind i filteret. ***Alle sonder blev i maj 94 sænket til dette niveau på baggrund af målte ledningsevneprofiler. Ny placering er ca. 20 cm under oprindelig placering i 1993.

Isotop hydrologi

Analysen af forholdet mellem de stabile ("ikke radioaktive") iltisotoper ^{18}O og ^{16}O samt stabile brintisotoper ^2H (D) og H anvendes udbredt til belysning af kilder og processer i det hydrologiske kredsløb (f. eks. Clark & Fritz, 1997). Et af centrene for introduktion og udvikling af disse metoder er Geofysisk Afdeling på Københavns Universitet (nu Niels Bohr Institutet for Fysik, Astronomi og Geofysik – NBIFAGF), der i 50'erne var stærkt involveret i introduktionen af disse metoder (f.eks. Dansgaard, 1953), og siden har anvendt dem i stor udstrækning i internationalt højt estimeret klimaforskning (især de berømte studier på iskerner i Grønland).

En anvendelsesmulighed for målinger af forholdene mellem stabile ilt og brint isotoper er blandt andet dokumentation af fordampning som en betydelig proces for dannelsen af en given vandtype og blandingen af fersk- og saltvand. Resultaterne fra en sådan mindre undersøgelse af grundvand og overfladevand på Læsø er præsenteret i afsnittet om måleresultater.

Geofysiske målinger

Geologisk Institut på Århus Universitet har udført to Multi Elektrode Profileringer samt 5 ellogboringer til mellem ca. 5 og 15 meters dybde i undersøgelsesområdet på Rønnerne. Begge typer af undersøgelser estimerer sedimenternes resistivitet (elektrisk "modstand" eller ledningsevne) og dermed også grundvandets salinitet, og begge metoder viser forekomsten af hypersalint grundvand i undersøgelsesområdet. MEP profilerne undersøger

forholdene i de 12 øverste meter under terræn (se bilag 2), og indikerer at der findes hypersalint grundvand i det undersøgte område helt ned til minimum 12 meters dybde.

Remote sensing (satellitbilleder)

GRAS (Geographical Resource analysis and Science) på Geografisk Institut på Københavns Universitet har hentet LANDSAT satellit data for målinger over Læsø foretaget d. 3. september 2002, og herudfra blandt andet lavet en foreløbig analyse og præsentation af termale data fra "temperaturkanalen". Disse data anvendes forsøgsvis ved kortlægningen af områder med potentiale for saltvandsdannelse og præsenteres i næste kapitel.

Måleresultater

Sydehyttens salinitetsmålinger

Sydehytten har siden 1994 målt saliniteter på forskellige lokaliteter omkring Hornfiskrøn. Resultaterne, der er vist i tabel 2 herunder, inkluderer også nuværende indvindingsbrønde (2, 3 og 4). Lokaliseringen af de enkelte prøvenumre er angivet på figur 1. Måletidspunktet 94-2002 angiver at der er målt flere gange i denne periode.

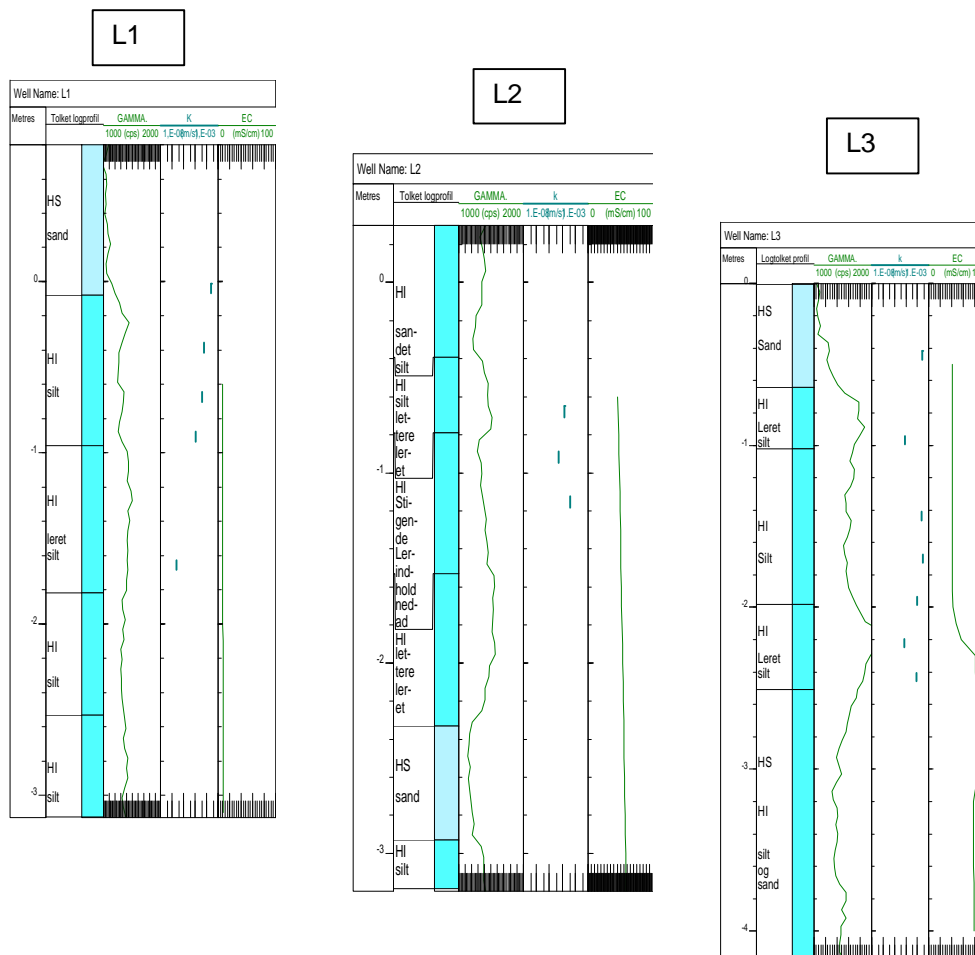
Tabel 2. Saliniteter omkring Hornfiskrøn – S_g/S_o og S_g/S_L angiver forholdet mellem salinitet i grundvand (S_g) og hhv. havvand i oceaner (S_o) og havvand ved Læsø (S_L).

Prøve nr.	salinitet (%)	S_g/S_o	S_g/S_L	Måletidsp.
1	10	2.9	4	(97)
2	12	3.4	4.8	94-2002
3	13	3.7	5.2	94-2002
4	13	3.7	5.2	94-2002
5	14	4.0	5.6	2002
6	4	1.1	1.6	95
7	3,5	1	1.4	95
8	3,5	1	1.4	95
9	11	3.1	4.4	95
10	12	3.4	4.8	95-2002
11	12	3.4	4.8	95-2002
12	12	3.4	4.8	95-2002
13	7	2	2.8	2002

Det fremgår af ovenstående tabel at der på knapt 70 % af de undersøgte lokaliteter er fundet hypersalint grundvand, der kan anvendes til saltproduktion, og at saliniteten i grundvandet er op til 5.6 gange højere end saliniteten i havvandet omkring Læsø eller 4 gange saliniteten i havvandet i oceanerne.

Data fra GEUS målestationer

Lokalisering og udbygning af de tre GEUS målestationer L1-L3 fremgår af henholdsvis figur 1 og Tabel 1. Efter etableringen af målestationerne, hvor salinitets og vandspejlssonder blev der foretaget gamma log, hydraulisk og elektrisk ledningsevne målinger i de tre dybeste filterrør. Resultaterne fra disse målinger er opsummeret i figur 2 og tabel 3 herunder (samt i bilag 1).



Figur 2. Gammalog, Hydraulisk og elektrisk ledningsevne i borerne L1 – L3. Log figurene er placeret så kote 0 ligger i samme niveau. De enkelte log figureer kan ses i fuld størrelse i Bilag 1.

Tabel 3. Hydraulisk ledningsevne ("permeabilitet") for testniveauer ved L1-L3

Boring L1		Boring L2		Boring L3	
Dybde (mut)	K(Dax) E-04 m/s	Dybde (mut)	K(Dax) E-04 m/s	Dybde (mut)	K(Dax) E-04 m/s
0.8-0.9	2.3	0.9-1.0	0.15	0.4-0.5	2.5
1.15-1.25	0.57	1.15-1.25	0.056	0.9-1.0	0.078
1.4-1.5	0.4	1.4-1.5	0.43	1.4-1.5	2.2
1.65-1.75	0.11			1.65-1.75	2.9
2.4-2.5	0.0022			1.9-2.0	1
				2.15-2.25	0.077
				2.4-2.5	0.81
				2.65-2.75	0.2

Dybdevariation i elektrisk ledningsevne ("salinitet")

Der observeres en markant forskel i vandets elektriske ledningsevne (saltholdigheden) i de tre borer, således ses at L1 er mere eller mindre fersk, L2 er brakvand, mens bunden af L3, der er en ubevokset lokalitet, har en saltholdighed på lige knapt det dobbelte af havvandet omkring Læsø. Ledningsevne målingerne viser et markant stigning af saltholdigheden mod bunden af filterrøret i borerne L2 og L3. Saltvandet har en højere massefylde end ferskvandet og søger dermed nedad. Der er konstateret variationer i den hydrauliske ledningsevne med relativt lavpermeable lag i alle tre borer, dog observeres ingen lag der kan formodes at være en effektiv barriere mod videre nedsivning. Ingen af de tre GEUS målestationer har saliniteter, der nærmer sig salinitets-niveauet for det hypersaline grundvand, der anvendes i saltproduktionen, som er 3-4 gange højere.

Gammalog

Informationer om sedimenternes hydrauliske ledningsevne (K) eller "permeabilitet" (sedimenternes evne til at lade vandet strømme igennem) kan fås kvalitativt fra gammaloggen, der angiver det relative lerindhold af sedimentet. Jo højere gamma-værdier jo højere lerindhold, og jo lavere permeabilitet. Gammaloggen indikerer ingen rene lerlag, men viser dog stærkt lerholdige horisonter omkring 1 og især 2 m's dybde i L3. Den lerholdige horisont i L3 i godt 2 m's dybde ses at være knyttet til et spring i saltholdigheden, således at denne stiger til ca. det dobbelte under lerhorisonten. Det bekræfter hypotesen om at fordelingen af lavpermeable lag har afgørende betydning for det hypersaline grundvands forekomst.

Hydraulisk ledningsevne

For at kunne bestemme den hydrauliske ledningsevne kvantitativt (beregne en absolut værdi), er det imidlertid nødvendigt at anvende andre metoder. Slug test er en velkendt metode til at bestemme absolutte værdier for den hydrauliske ledningsevne. Den hydrauliske ledningsevne i forskellige niveauer ved station L1-L3 blev bestemt ved hjælp af en på GEUS (DGU) udviklet mini slug test teknik (Hinsby m.fl. 1992). Ved denne teknik rammes/bankes et lille filter (10 cm langt og 2.5 cm i diameter) successivt ned i jordbunden, og ved udvalgte testniveauer måles udstrømning eller tilstrømning til borerøret efter hhv. injek-

tion eller bortpumpning af vand fra røret. Herudover kan der udtages vandprøver i specifikke niveauer. Metoden giver fremragende resultater i sandede aflejringer (Hinsby m.fl. 1992). Resultater fra mini slug tests udført ved L1-L3 er angivet i figur 2 samt i tabel 3 ovenfor.

Klimaparametre

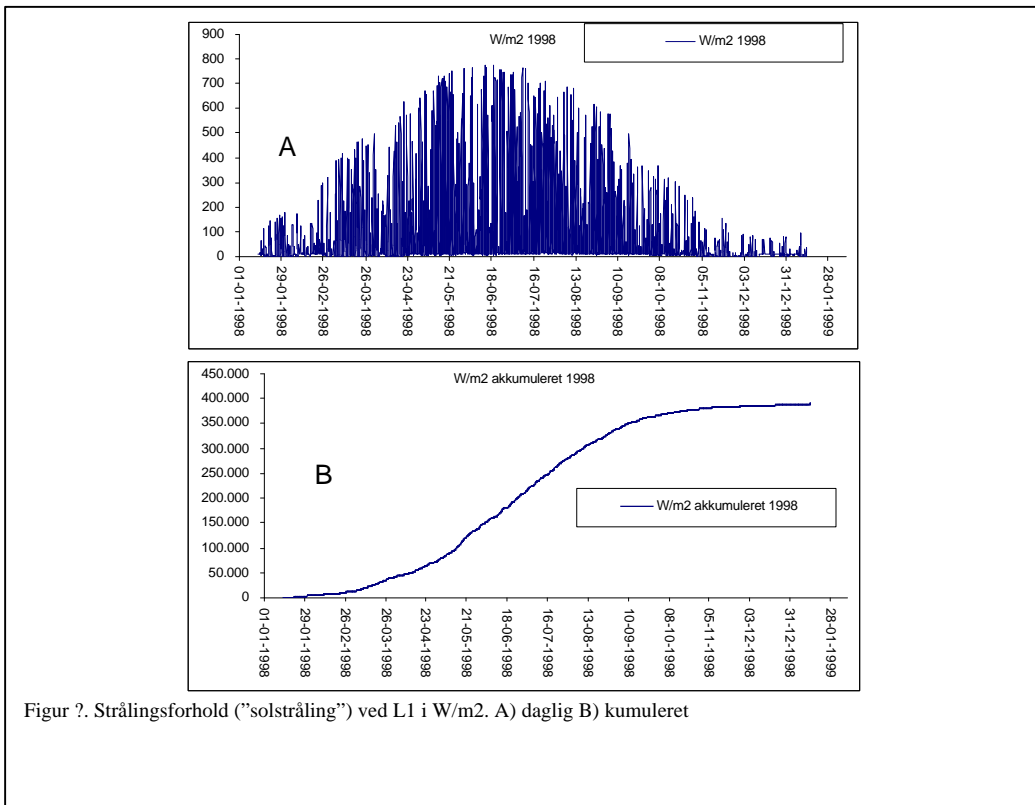
Rønnerne har sammenlignet med andre egne i landet relativ lille nedbør og mange solskinstimer. Relativt høje vindhastigheder (ingen afskærmende beplantninger) over de frie vandoverflader resulterer samtidig i en relativt høj fordampning.

På figurerne på næste side præsenteres udvalgte data fra 1998 fra GEUS' klimastation, der har været opstillet ved L1 fra 1993-2000, hvor den har opsamlet data kontinuert (yderligere data kan findes i bilag 3).

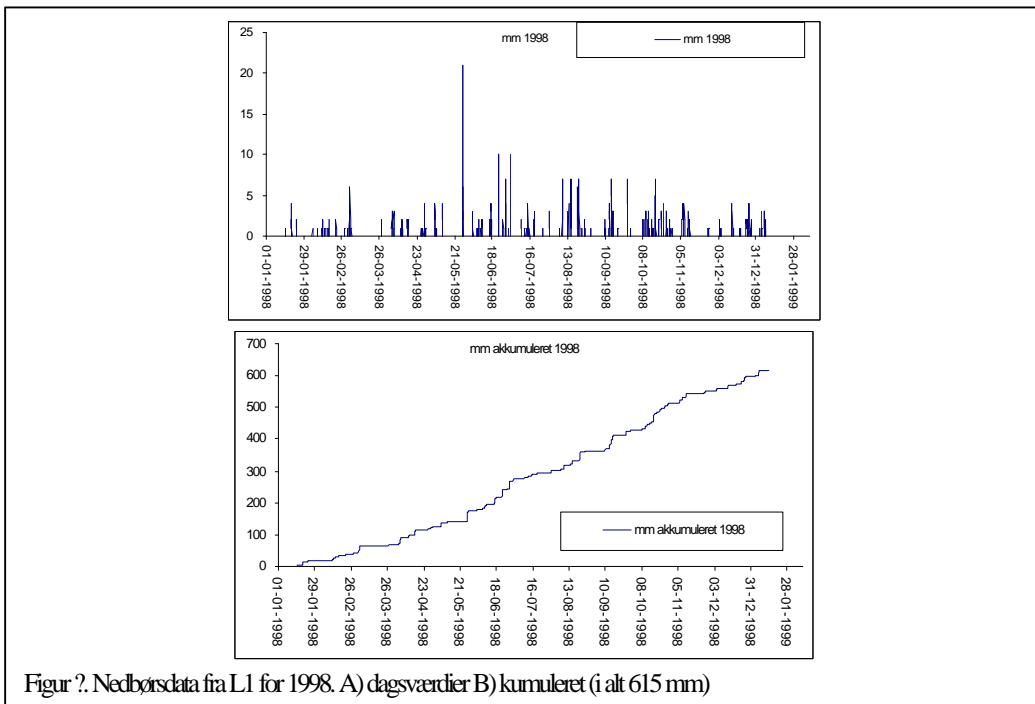
Anslås den sydlige del af Læsø at modtage samlet i alt 800 mm nedbør og havvand til indampning årligt kræves en inddampning på 680 – 797 mm for at opnå en saltholdighed på 12.5 % (typisk koncentration af det saline produktionsvand og 5 x saltholdigheden af havvandet omkring Læsø). Herved dannes mellem 3 og 120 mm hypersalint grundvand på "Fjærene" afhængigt af mængdeforholdet mellem havvand og nedbør. Ubevoksede sandarealer på og omkring Rønnerne er opmålt til at udgøre godt og vel 1 km² (eller 100 ha – Hansen, 1995). Dermed estimeres at der dannes mellem 3.000 og 120.000 m³ hypersalint grundvand på Fjærene årligt. Det svarer således til mellem 10 og 400 gange den nuværende indvinding.

Ovenstående estimat må endda anses for at være et forsigtigt "konservativt" estimat, idet tørrelte eller næsten tørrelte områder i sommerperioden generelt er 10 gange højere end det ovenfor angivne, og i ekstreme tilfælde endda helt op omkring 90 gange (Hansen, 1995).

For at estimatet i øvrigt holder skal der fordampes op til 800 mm vand fra Fjærene årligt. Det forekommer umiddelbart højt, idet DMI estimerer at fordampningen på Læsø var 545 mm i 1998 (Scharling 1999). Flere forhold gør dog at DMI estimatet må forventes at være for lavt. Dels bygger estimatet på anvendelsen af en modificeret Penman formel, der på baggrund af nye undersøgelser baseret delvist på GEUS' DK-model (integreret hydrologisk model opsat for hele landet), synes at underestimere den reelle fordampning (Plauborg m.fl., 2002). Dels skal estimatet korrigeres for det faktum at der for Fjærene er tale om fordampning fra en fri vandoverflade, hvilket øger fordampningen betragteligt (min. 20 % - Plauborg m.fl. 2002). Alt taget i betragtning forekommer ovenstående estimat ikke at være urealistisk højt (se i øvrigt afsnit om DMI data). Nærmere undersøgelser af anbefales dog for at få en bedre forståelse og kvantificering af vandbalancens komponenter på Rønnerne og Fjærene. Størrelsen af vandbalancens komponenter er af afgørende betydning for dannelsen af det hypersaline grundvand.



Figur 7. Strålingsforhold ("solstråling") ved L1 i W/m2. A) daglig B) kumulert



Figur 8. Nedbørsdata fra L1 for 1998. A) dagsverdier B) kumulert (i alt 615 mm)

Årstidsvariationer i saliniteten

Årstidsvariationerne i ledningsevnen blev monitoreret i en fast dybde mellem 0.8 og 1.43 m.u.t. i et filter ved hver station. Eksempler på variationer i ledningsevnen er vist i bilag 1. Herudover blev ledningsevnen målt i et profil ned gennem hele boringen ved hver tapping af dataloggerne - et eksempel for alle tre boringer, er vist i figur 2 (og bilag 1).

Vandspejlsmålinger

Som for ledningsevnen blev svingningerne i grundvandsspejlets beliggenhed monitoreret over året. Eksempel på vandspejlets variation kan findes i bilag 1.

Grundvandskemi

Egentlige undersøgelser af variationen i den generelle grundvandskemi er ikke foretaget på Rønnerne, men nogle enkelte næsten fuldstændige analyser af makro-ioner foreligger. Analyser af grundvandskemi ved de tre GEUS målestationer er angivet i tabellen herunder. Hovedprocessen som vurderes at være ansvarlig for dannelsen af det hypersaline grundvand på Læsø er som nævnt inddampning af havvand. Hvilket også indikeres af grundvandskemi – eksempelvis af Cl/Sr forholdet.

Tabel 4. Geokemiske analyse af grundvand fra L1, L2 og L3.

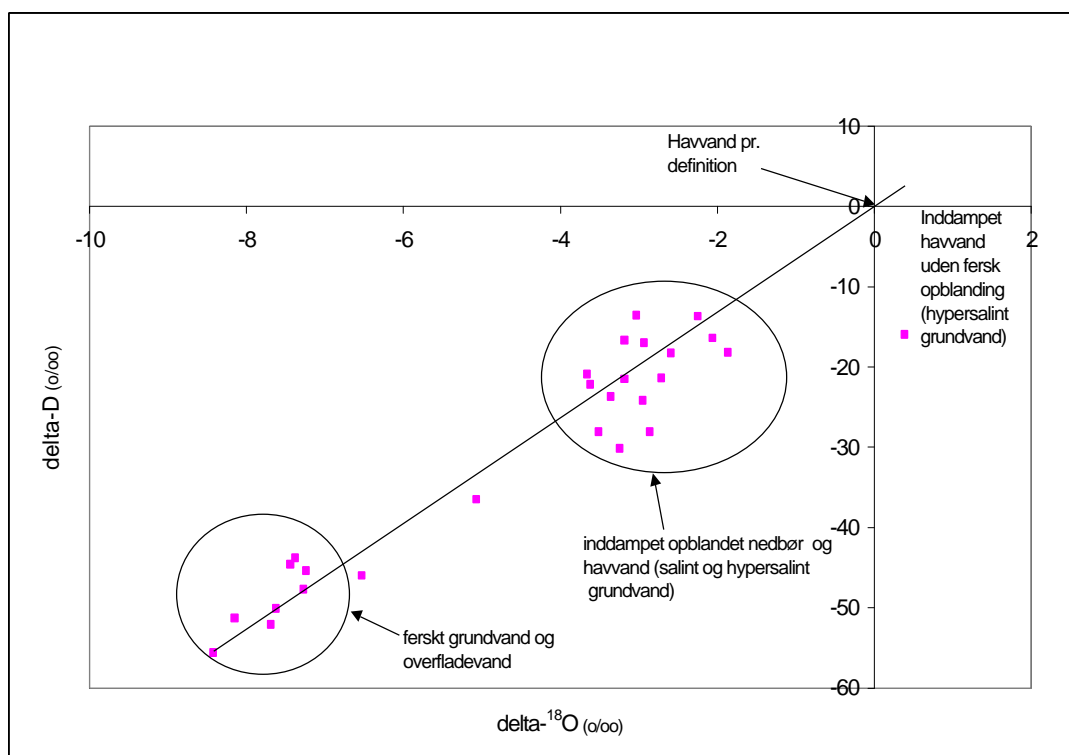
Boring	Cl mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Alk meq/L	Br mg/L	PH	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K Mg/L	Sr mg/L
L1-1	1350	<0,45	265	6,38	32	7,54	20	155	2075	53	1,07
L2-2	14500	<0,45	1450	6,41	174	7,16	560	1790	9400	400	6,7
L3-1	11200	1,01	1650	2,24	139	7,71	400	1210	4600	285	5,1
L3-2	21300	<0,45	4500	3,53	238	7,30	620	2540	16200	640	7,4

Det lavtliggende og næsten reliefløse område på og omkring Rønnerne på den sydlige del af Læsø oversvømmes nogle gange i vinterhalvåret af havvand – i sommerhalvåret inddampes havvandet og en brøkdel af dette efterlades med en betydeligt højere saltholdighed (op til mere end 5 gange havvandets salinitet), der dog samtidig lejlighedsvist bliver fortyndet af nedbøren. Fordelingen af høj og lavpermeable sedimenter under jordoverfladen styrer herefter, hvor de specielt høje saltkoncentrationer forekommer. Det opkoncentrerede hypersaline grundvand med relativ høj massefylde vil søge nedad mod depressioner i leroverfladen, mens det lettere ferske vand vil have en tendens til at afdrænes ovenpå det hypersaline grundvand og dermed mindske opblandingen (Hansen, 1995). At der sker en delvis opblanding mellem inddampet havvand og nedbøren i i hvert fald en del af det saline grundvand dokumenteres dog af indholdet af stabile isotoper (se næste kapitel).

Isotop hydrologi

Analyser af stabile ilt og brint isotoper udføres desværre ikke rutinemæssigt i Danmark på hypersaline vandprøver som på Læsø. Enkelte vandprøver fra Rønnerne blev derfor sendt til analyse hos British Geological Survey. Resultaterne af de udførte analyser er illustreret i figur 3.

Under fordampningsprocessen overgår fortrinsvist de lette isotoper (her ^{16}O , H) til dampfasen mens de tunge isotoper (^{18}O , D) efterlades tilbage i væskefasen. Resultaterne som er plottet herunder viser, at det saline grundvand på Læsø har et relativt højt indhold af de tunge ilt og brintisotoper (højere end ferskvandets indhold), - samtidig er indholdet dog mindre end i havvand, hvilket dokumenterer, at det saline grundvand oprindeligt er en opblanding af ferskvand (nedbør) og havvand, som er inddampet. Enkelte hypersaline prøver har positive isotopværdier, og er "tungere" end havvand, hvilket viser at opblandingen med ferskvand har været ubetydelig eller at en stor fraktion heraf er fordampet (Clark & Fritz, 1997).



Figur 3. Plot af forholdet mellem stabile ilt og brint isotoper i forskellige vandtyper fra Læsø.

Klimadata fra DMI

Nedbør og fordampning i perioden 1990-2000

DMI angiver nedbøren til at have været 803 mm på Læsø i 1998 – samme år beregnes landsgennemsnittet at have været 858 mm (Scharling, 1999). Selvom klimaet på Læsø generelt er mindre "vådt" en gennemsnittet for hele landet, så falder der således stadig en anseelig mængde nedbør, som i et vist omfang vil blande sig med det inddampede havvand (som illustreret i ovenstående afsnit om isotop hydrologi). Landsgennemsnittet for nedbør

og fordampning i perioden 1990-2000 var hhv. 733 og 582 mm (Scharling og Kern-Hansen, 2002). Ihukommende at Læsø har et relativt tørt og solrigt klima (Hansen 1994), og at fordampningen over vådområder er omkring 20 % højere end estimeret fra de anvendte fordampningsformler (Plauborg m.fl. 2002) forekommer det rimeligt at fordampningen på Rønnerne generelt må overstige nedbøren, hvilket er en nødvendighed for at opnå de høje saliniteter, som forekommer i området.

Geofysiske målinger

Multi Elektrode Profilering (MEP)

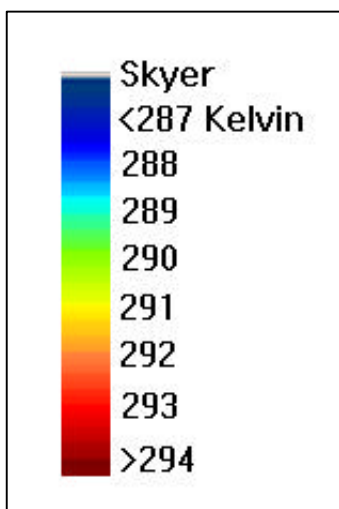
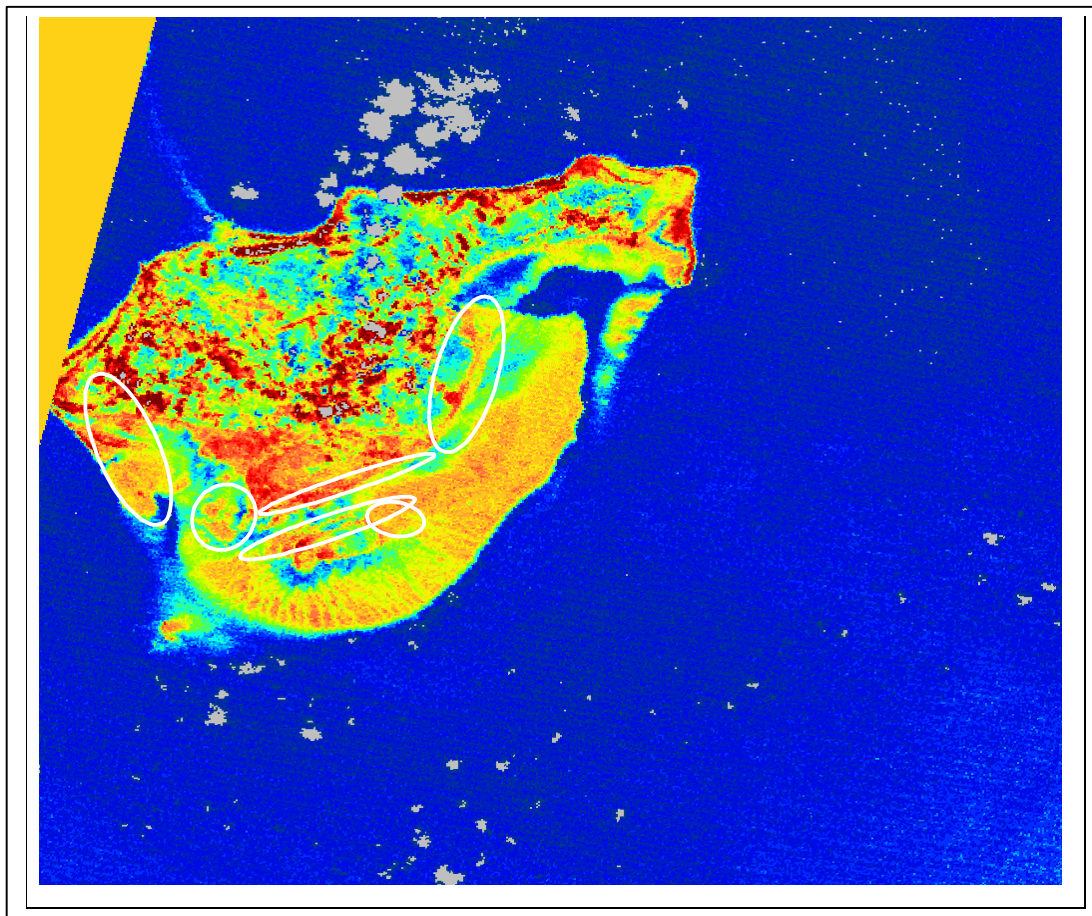
Geologisk Institut på Århus Universitet har udført 2 x 200 m MEP profiler øst for GEUS' målestationer. Det tolkede profil (figur med to tværsnit i bilag 2) er øst-vest gående, mens det utolkede profil (figur med kun et tværsnit i bilag 2) er nord-syd gående, således at højre side af profilet med de høje modstande i toppen af profilet ligger nordligst. Profilerne viser fordelingen af sedimenternes resistivitet (elektrisk "modstand") ned til ca. 12 meters dybde, og indikerer tydeligt tilstedeværelsen af hypersalint grundvand hvor resistiviteterne er under 0.6 ohmm (mørkeblå farver).

Ellogboringer

Ellogboringerne viser som MEP profilerne, at der forekommer hypersalint grundvand især i det overfladenære sandmagasin. En enkelt boring, beliggende nær pigestenen (se figur 1), indikerer dog ferskvand i de øverste 5 meter (se boring no. 5 i bilag 2)

Satellitbilled tolkning.

"GRAS" på Geografisk Institut, KU har analyseret et satellitbillede fra Læsø, som beskrevet her. Et satellitbillede fra Landsat 7 satellitten fra den 3. september 2002 er anvendt i en analyse af den sydlige del af Læsø. Landsat satellitten flyver i ca. 800 km højde over jorden og i løbet af en 16 dages periode dækkes hele jorden med billeder. Billedet har en rumlig opløsning på 30 meter. ETM+ sensoren ombord på Landsat 7 satellitten måler i 8 forskellige spektrale kanaler. Der måles dels på solens reflekterede stråling og dels på varmeudstråling fra jorden. På den måde er det muligt at skaffe sig information om og kortlægge forskellige overfladetyper, og desuden kortlægge variationer i overfladetemperatur både på land og til havs. Landsat billedet er geometrisk oprettet til UTM, og herefter er der lavet forskellige analyser og præsentationer af billedet, således at forskellig information er blevet fremhævet. Kanal 6 som indeholder den termale information er blevet kalibreret til temperatur og derefter er der fremstillet et kort der viser temperaturvariationerne i undersøgelsesområdet (figur 4 herunder). Skydækkede områder er masket fra og vises med en grå farve. Områder der ud fra en foreløbig vurdering af GRAS og GEUS foreslås som områder for videre undersøgelser er indtegnet som hvide elipser. Salinitetsvariationerne i disse områder kan undersøges ved hjælp af små rammeboringer som beskrevet i Hinsby m.fl. (1992) - og i afsnittet om hydraulisk ledningsevne.



Figur 4. Satellitbillede produceret af optagelser fra LANDSAT 7 satellitten af "GRAS" på Geografisk Institut, KU. Farverne indikerer temperaturforskelle omkring Læsø – røde farver er varme, blå er kolde. Temperaturen varierer fra mindre end 14 til mere end 21 grader Celsius. Temperaturskalaen er angivet i Kelvin til venstre herfor. Celsiusgrader fås ved at trække 273 grader fra de angivende værdier.

Konklusion

På basis af resultaterne fra de geologiske, geofysiske og geokemiske undersøgelser, præsenteret i den foreliggende rapport, samt de tilgængelige historiske data, er den samlede vurdering, at det er overvejende sandsynligt, at det er bæredygtigt at øge saltindvindingen på og omkring Rønnerne til det ønskede niveau (2-3 gange aktuel indvinding). Indvindingen vil dog så nå en størrelse, hvor overvågning af udviklingen i saliniteten omkring indvindingsbrønde, samt yderligere kortlægning af forekomsterne af hypersalint grundvand, må anbefales. Rapporten anviser en metode til kortlægning af saltvandet, som vurderes at kunne gennemføres af Læsø Kommune / Produktionsskolen selv. Metoden er udviklet af Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse i samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet til kortlægning af forurening i grundvandsmagasiner, og har været anvendt med godt resultat i en lang række undersøgelser.

Det anbefales ligeledes, at indvindingen af hypersalint grundvand spredes på flere indvindingsbrønde, og at saltkoncentrationen, eller den elektriske ledningsevne, måles i de enkelte brønde ved hver afhentning. En overvågning af udviklingen i det oppumpede vands ledningsevne vil advare om, hvilke brønde der evt. overudnyttes, og åbne mulighed for at justere indvindingen på de enkelte brønde. Overvågning af salinitetsudviklingen vil samtidig give mulighed for at vurdere om den årlige produktion af hypersalint grundvand er mindre end den årlige indvinding. I samme forbindelse anbefales det at følge vandbalancen på Rønnerne ved at måle/beregne både nedbør og fordampning i området, samt frekvensen af oversvømmelser og tørlægning, idet dannelsen af hypersalint grundvand kontrolleres af disse faktorer. Fordampningen foreslås målt ved hjælp af en lille klimastation (som minimum en datalogger med sensor til måling af globalstrålingen) og/eller ved opsætning af en fordampningspande. Sidstnævnte vil udover at give værdifulde fordampningsdata også kunne anvendes til, på simpel vis, at illustrere denne betydningsfulde proces for saltvandsdannelsen overfor turister og gæster til saltsydehytten.

Endelig vurderes det, at satellitbilleder kan være et relevant redskab ved kortlægningen af forekomsterne af hypersalint grundvand.

Referencer

Clark, I. and Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 328 pp.

Dansgaard, W. 1953. The abundance of O¹⁸ in Atmospheric Water and Water Vapour. *Tellus*, 4, 61-69.

Hansen, J.M 1995. En ø's opståen, kystdannelse og vegetationsudvikling: Naturlige og menneskeskabte landskaber på Læsø. *Geologisk Tidsskrift*, 2, 1-74.

Hansen, J.M. 1994. Læsø's tilblivelse og landskaber – om øen der rokker og hopper. *Danmarks Geologiske Undersøgelse, Geografforlaget*, 56 pp.

Hermann, F. og Olsen, O.V.1979. Hydrografi. I: A. Nørrevang og J. Lundø (Red.) *Havet, Danmarks Natur*, 3, 24-47, Politikens Forlag.

Hinsby, K., Bjerg, P.L., Andersen, L.J., Skov, B. og Clausen, E. 1992. A mini slug test method for determination of a local hydraulic conductivity of an unconfined sandy aquifer. *Journal of Hydrology*, 136, 87-106.

Plauborg, F., Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., Blicher-Mathiasen, G. og Kern_Hansen, C. 2002. Vandbalance på mark og oplandsskala. Notat om vurdering af usikkerheder på estimering af nettonedbør udarbejdet af en arbejdsgruppe med deltagere fra Statens Planteavlsvforsøg, GEUS, DMU og DMI.

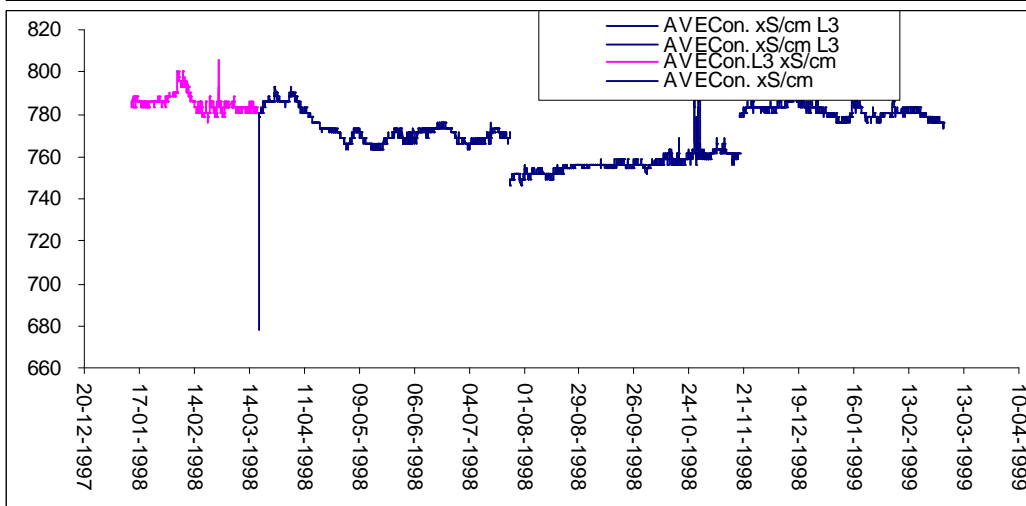
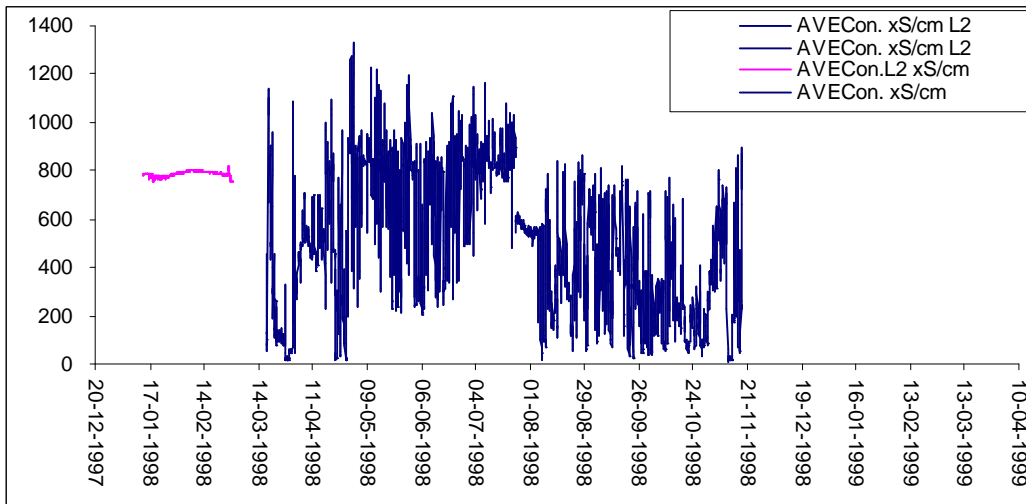
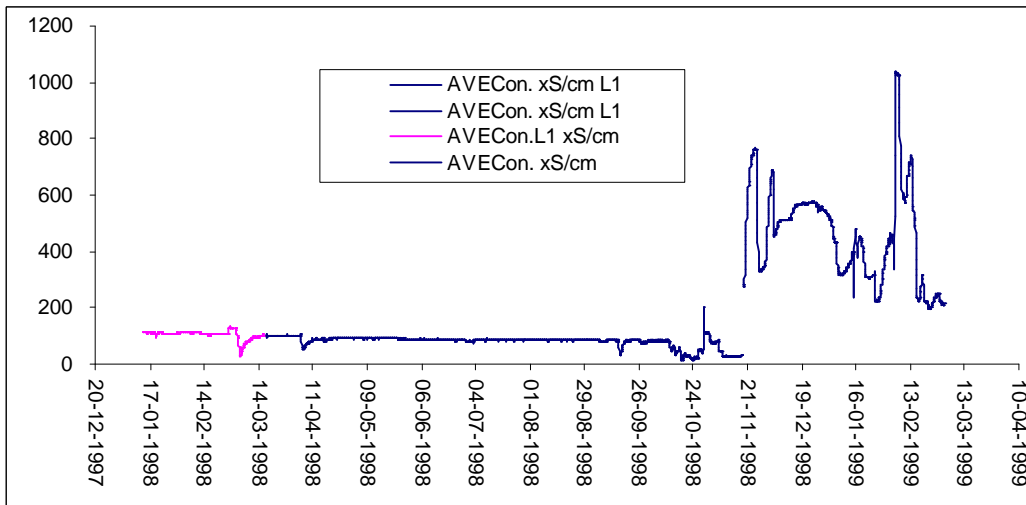
Scharling, M. 1999. KLIMAGRID – DANMARK, nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning – 20x20 og 40x40 km. DMI – Technical Report, 99-12.

Scharling, M. og Kern-Hansen, C. 2002. KLIMAGRID – DANMARK, nedbør og fordampning 1990 – 2000 – Beregningsresultater til belysning af vandbalancen i Danmark. DMI Technical Report 02-03.

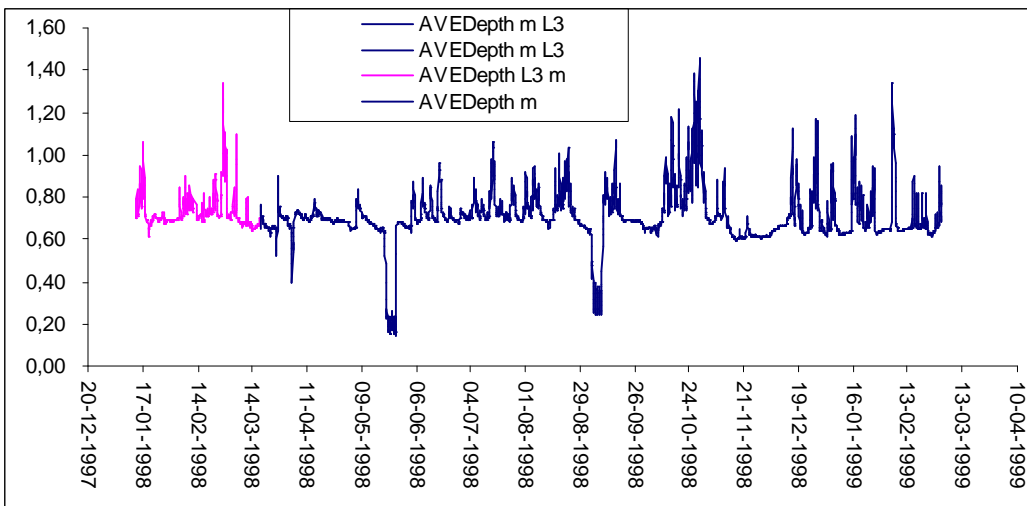
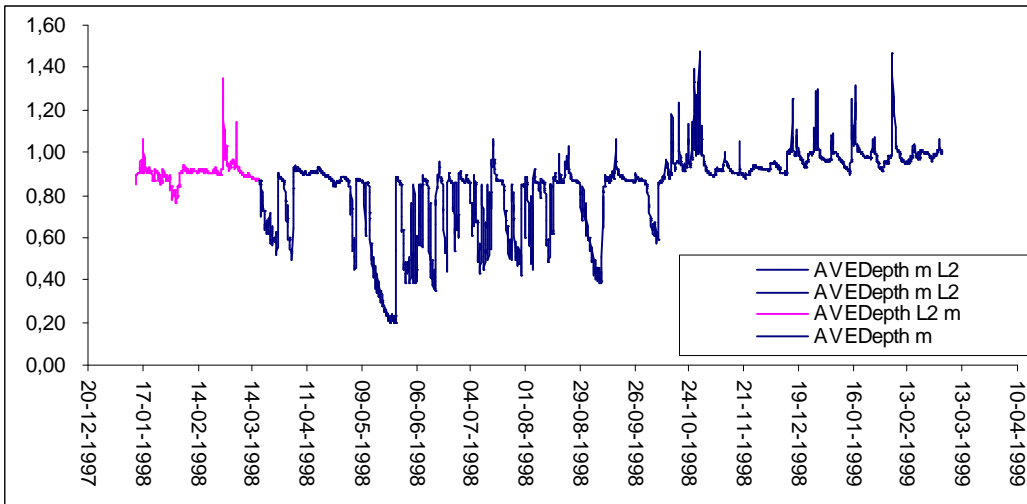
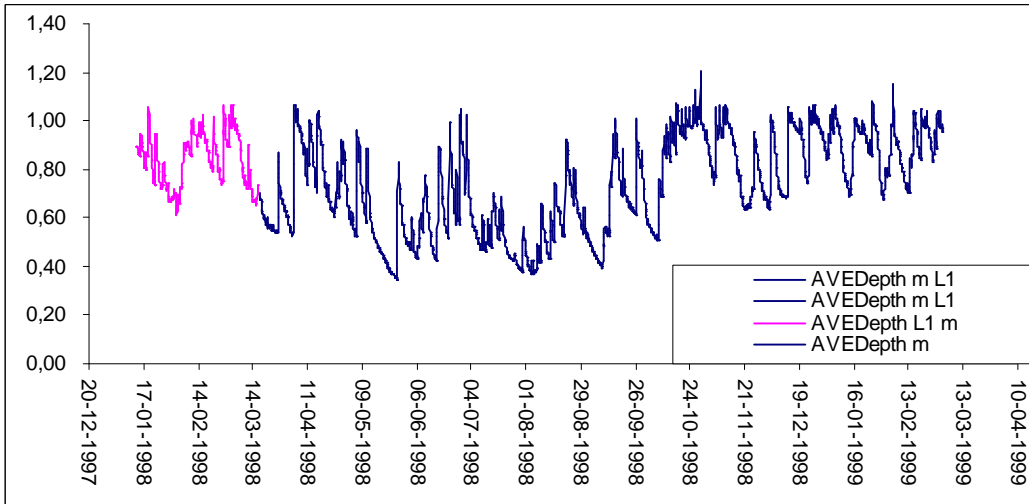
Vellev, J. 1993. Saltproduktion på Læsø, i Danmark og i Europa. Forlaget Hikuin, 108 pp.

BILAG 1. Måledata fra GEUS stationerne L1-L3

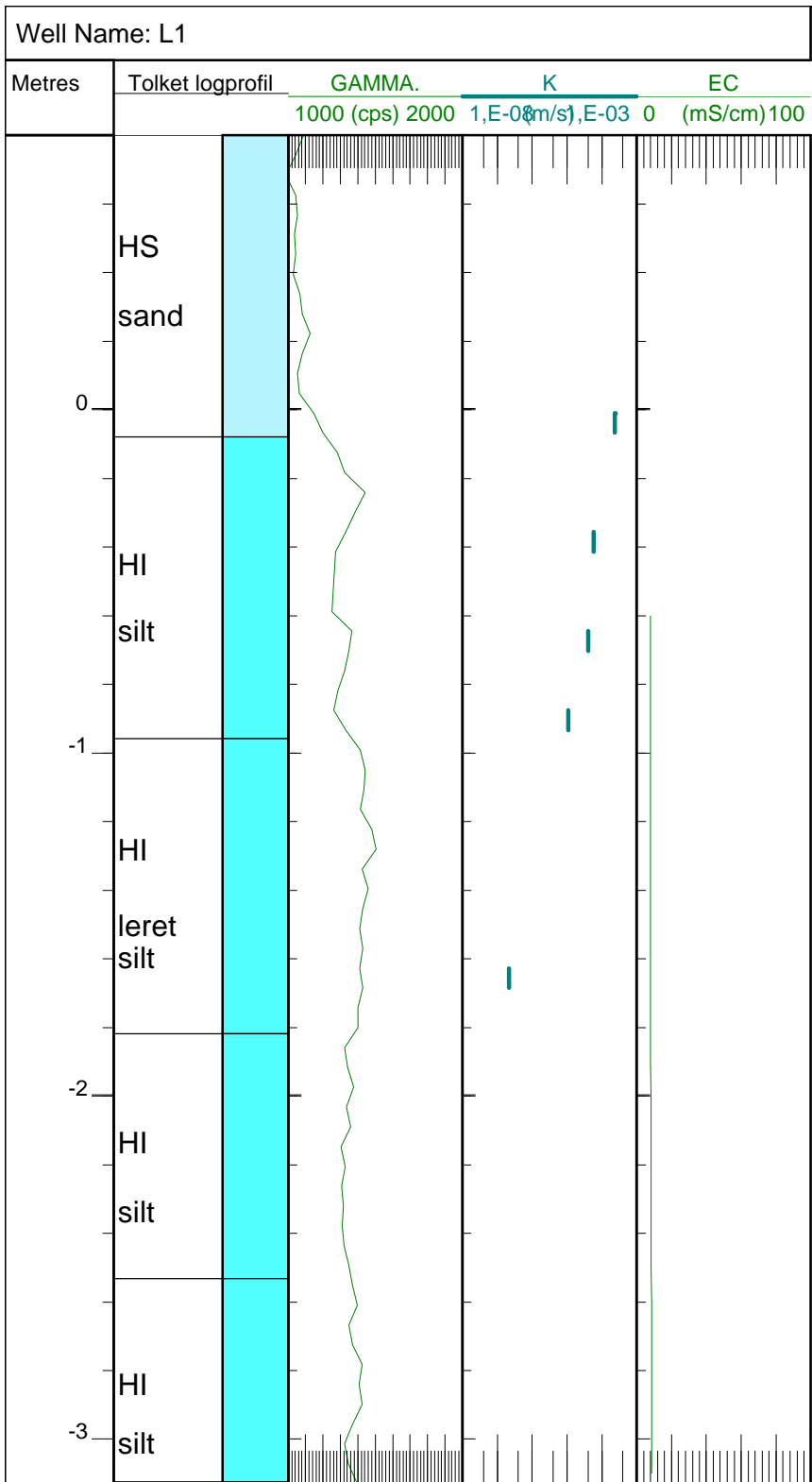
- 1. Eksempler på variation i ledningsevne og vandspejl**
- 2. Geologiske og geofysiske logs**



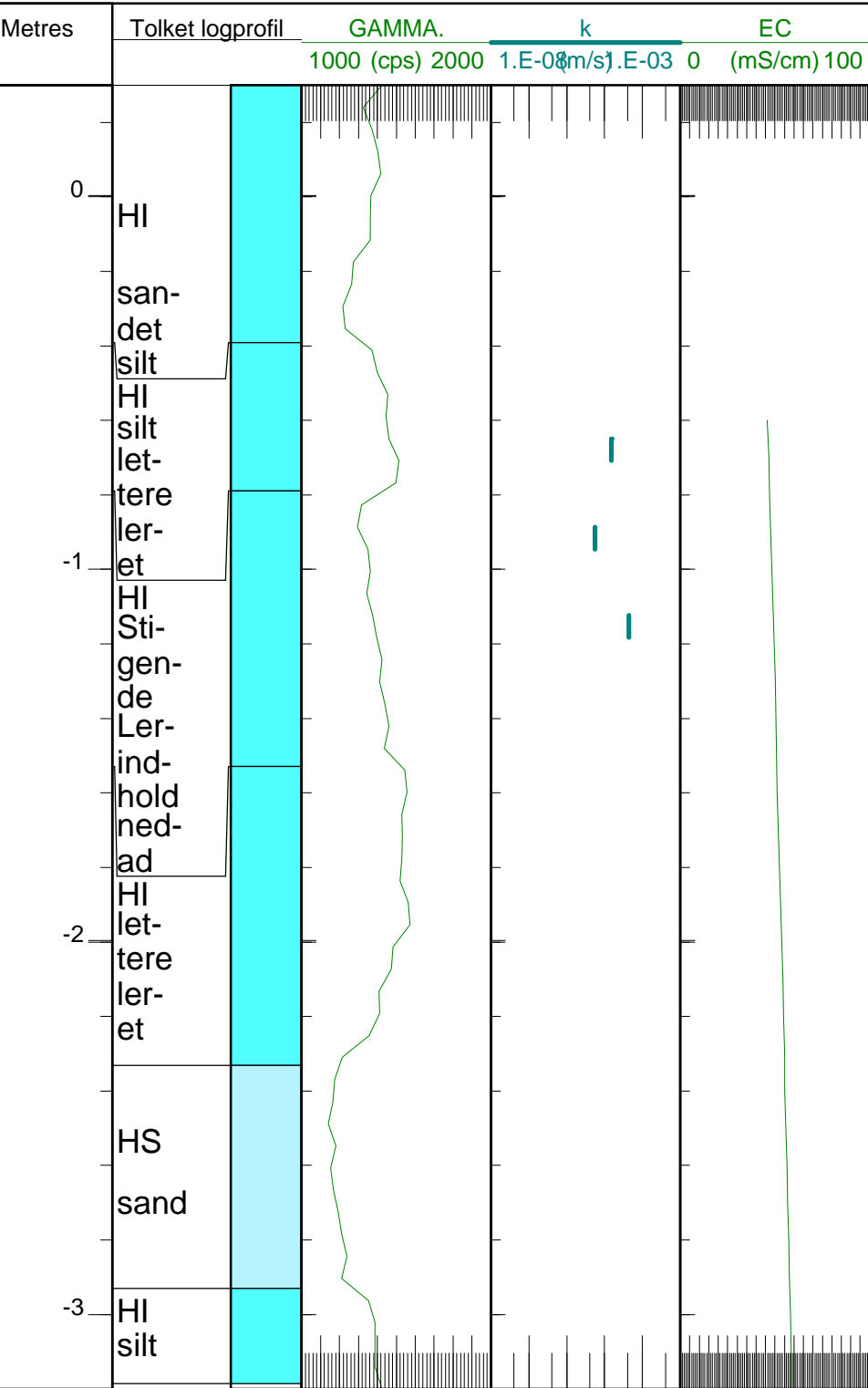
Eksempel på variationer i ledningevnen fra L1, L2 og L3 i 1998-99.

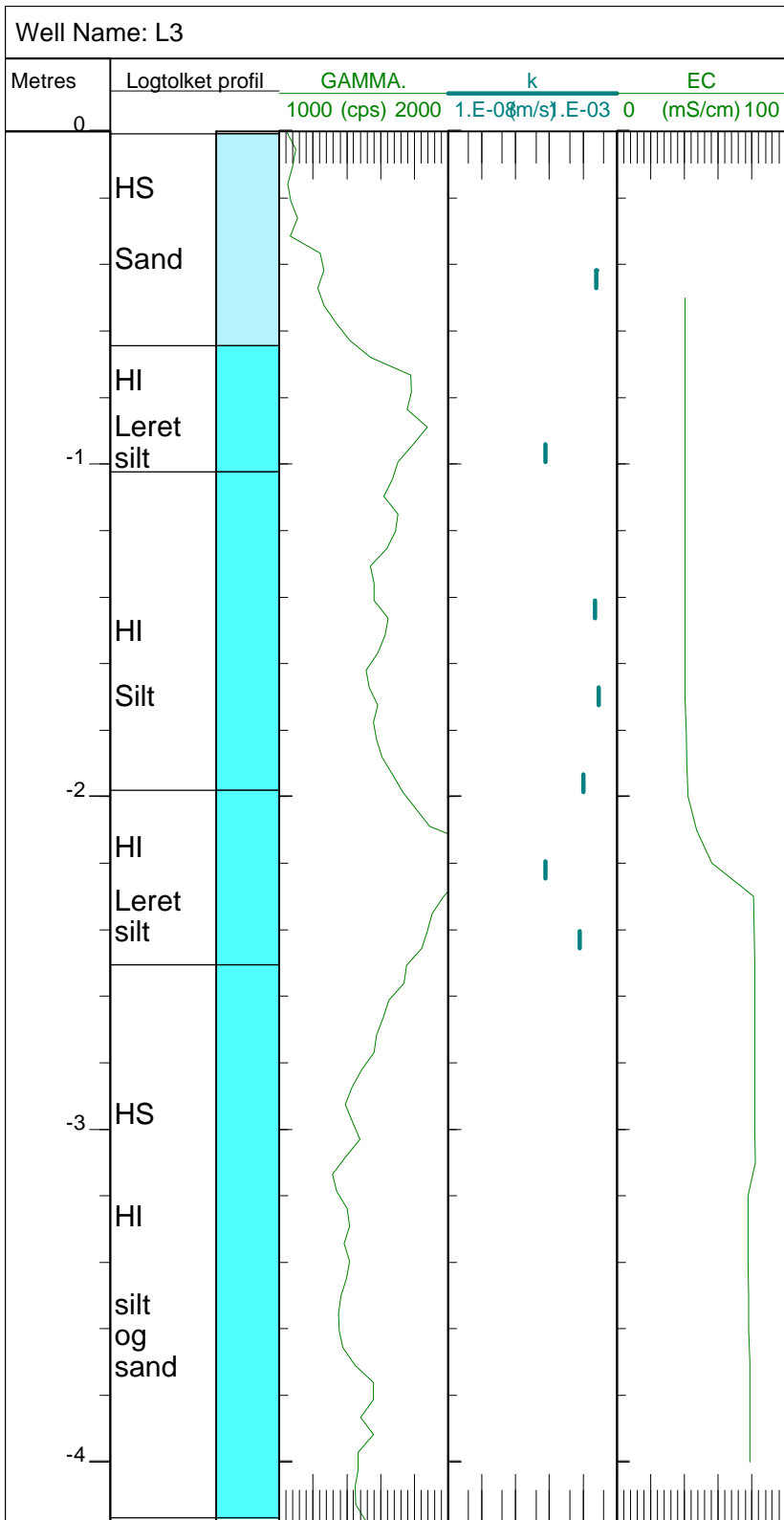


Eksempel på variationer i L1, L2 og L3 i 1998-99.



Well Name: L2

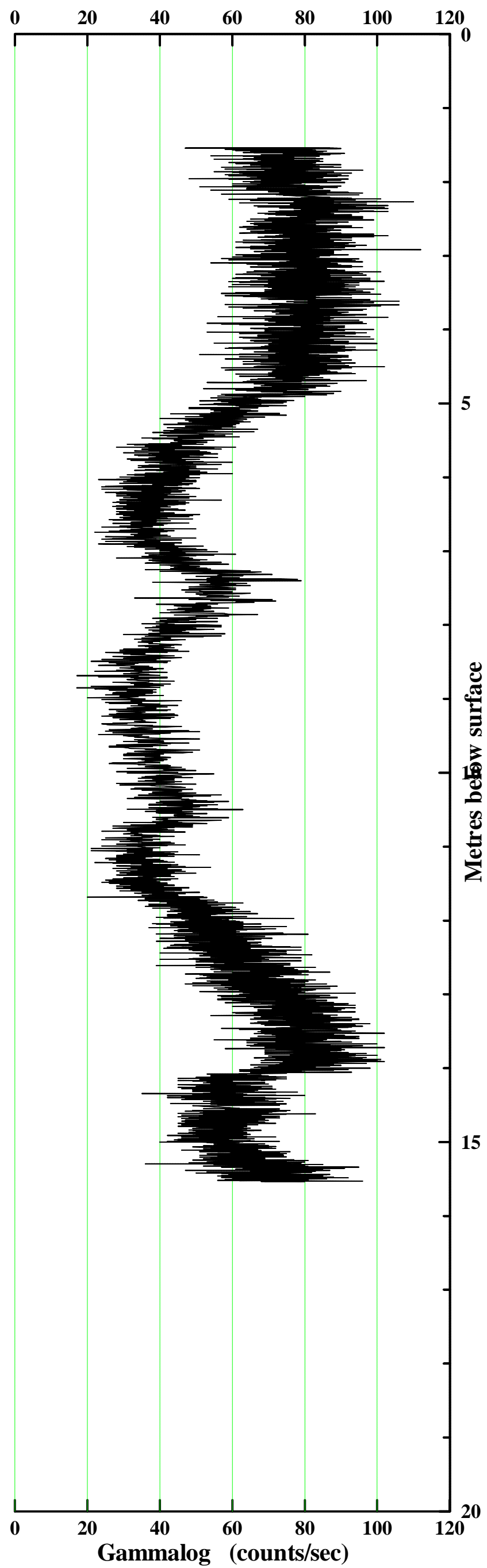
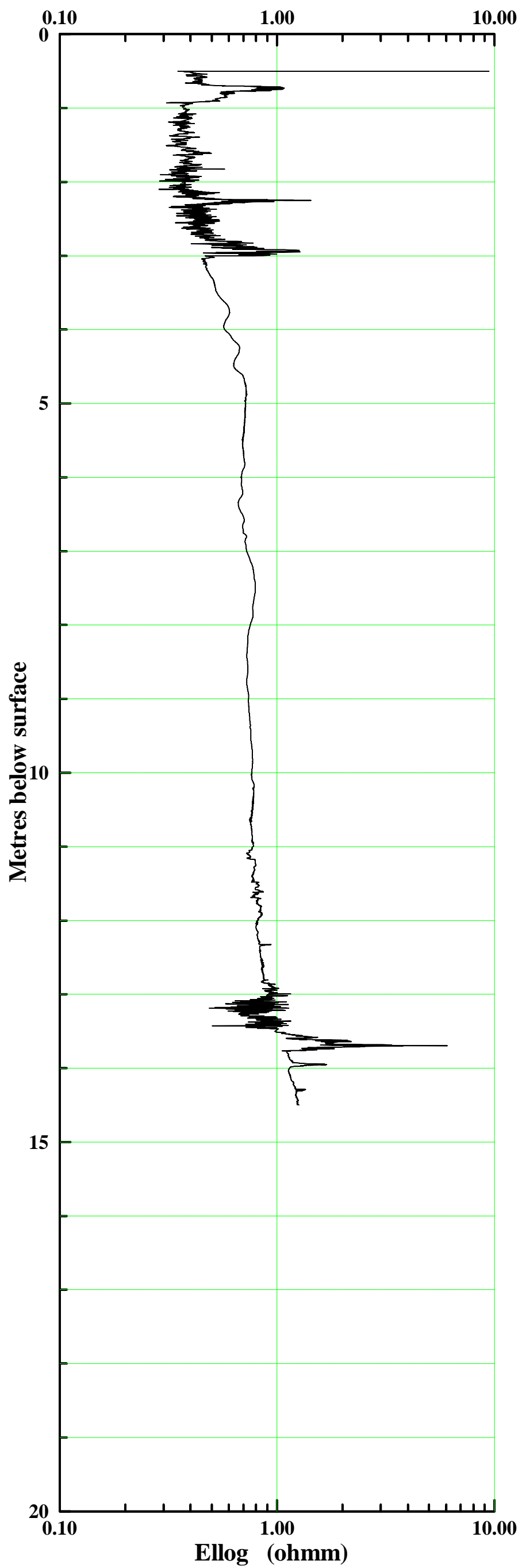




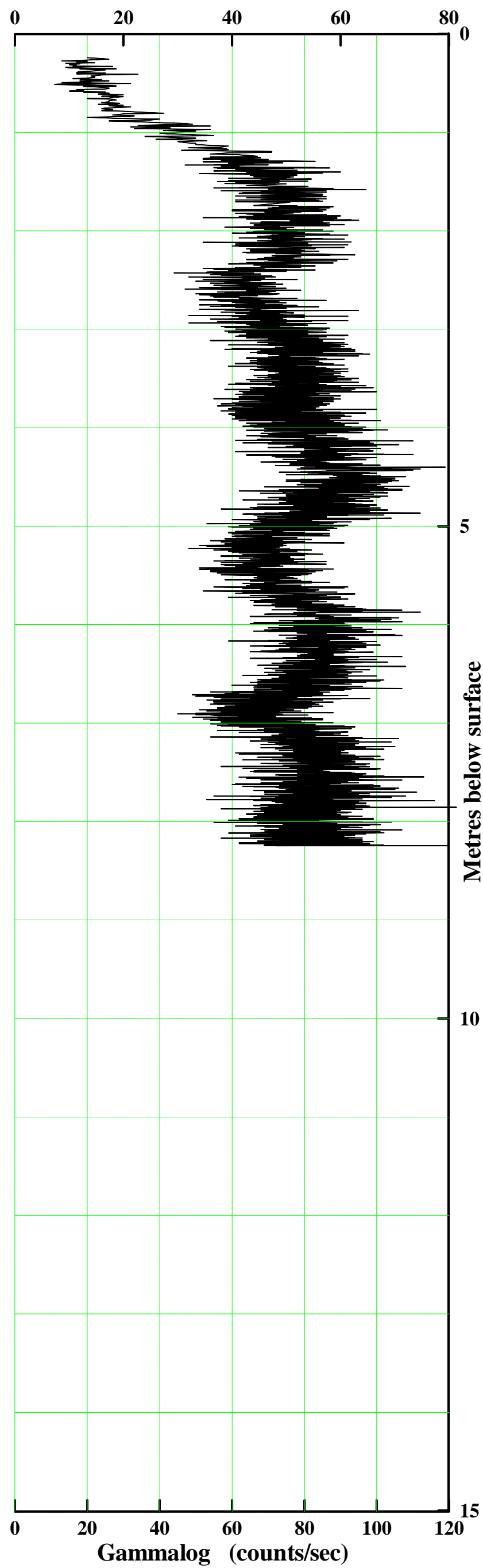
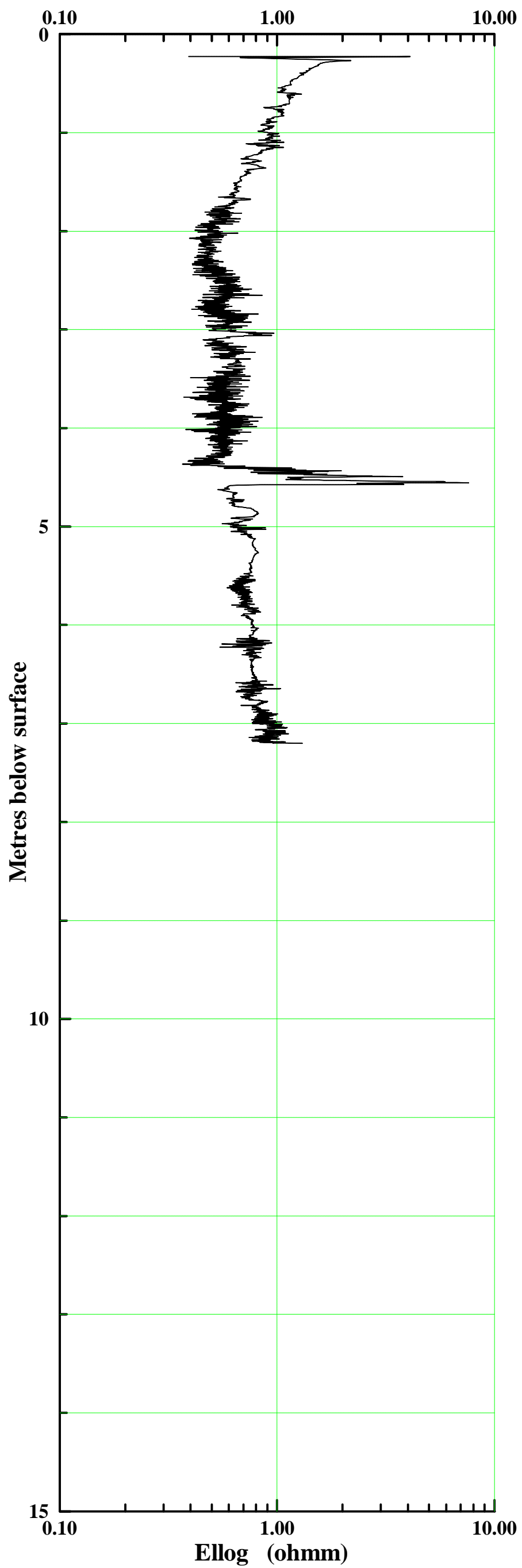
BILAG 2. Geofysiske målinger

2a. Ellogboringer

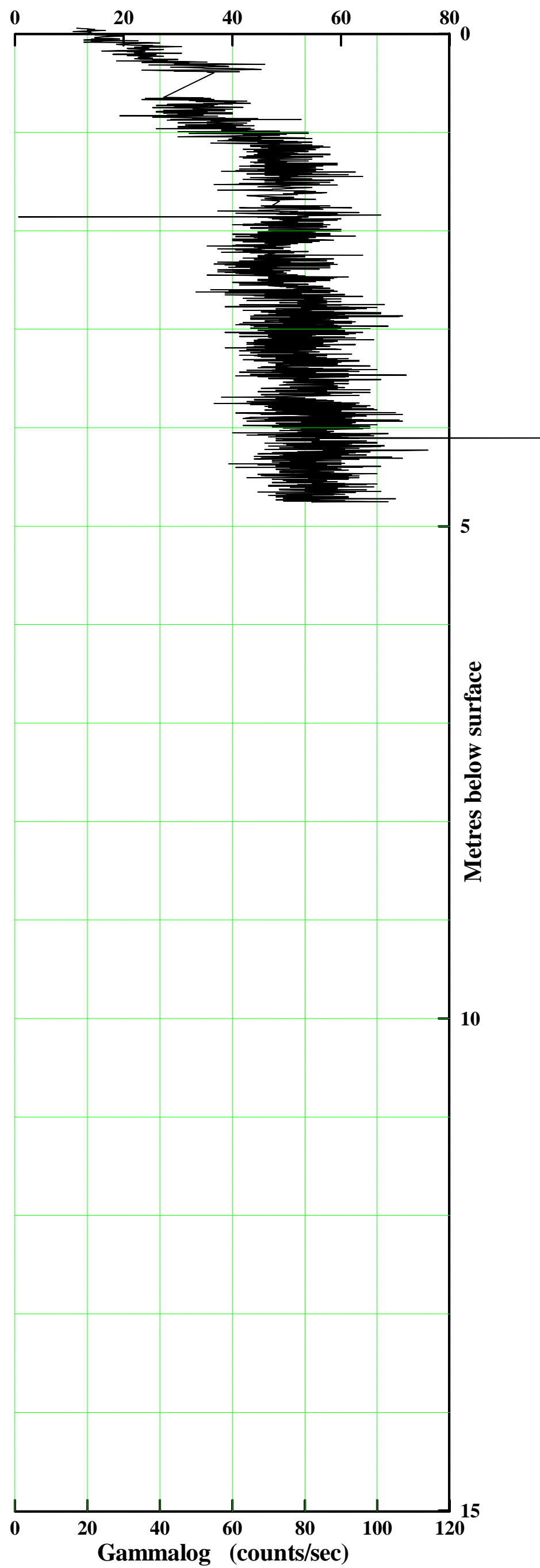
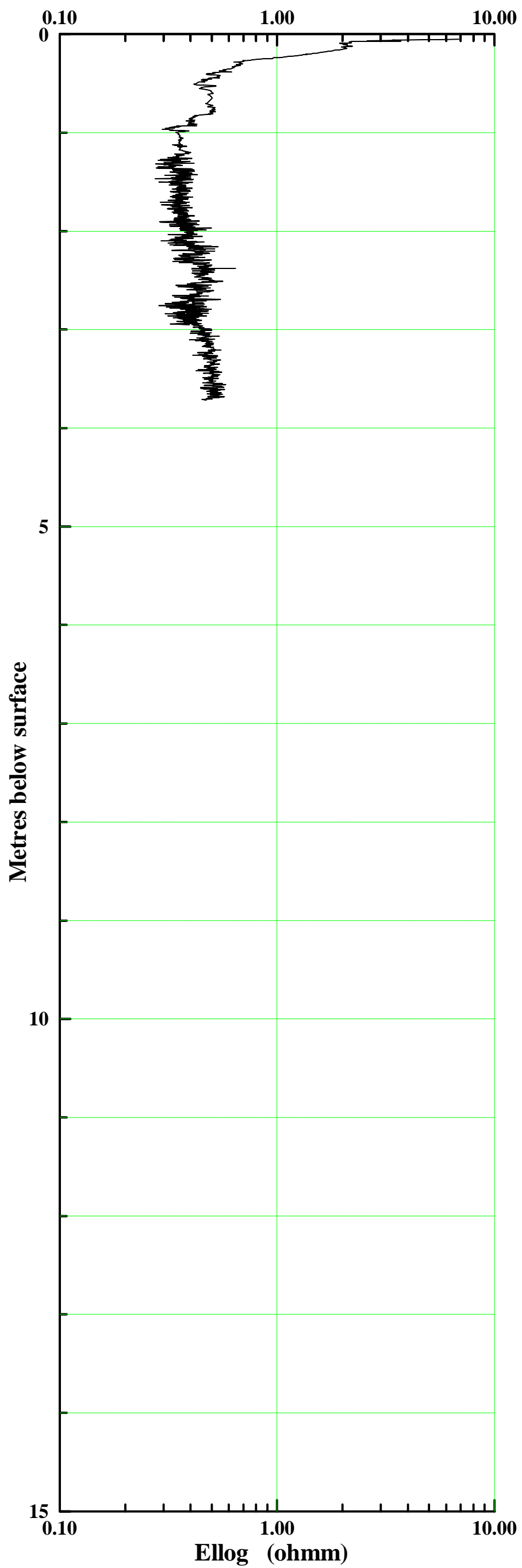
2b. Multi Elektrode Profilering (MEP)



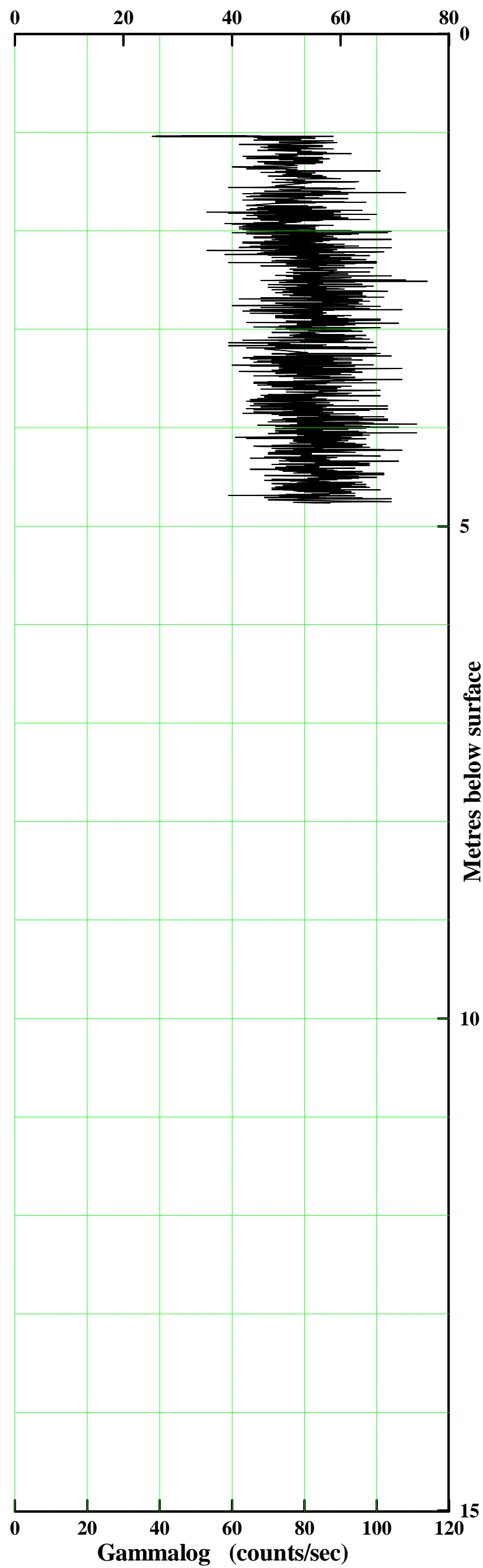
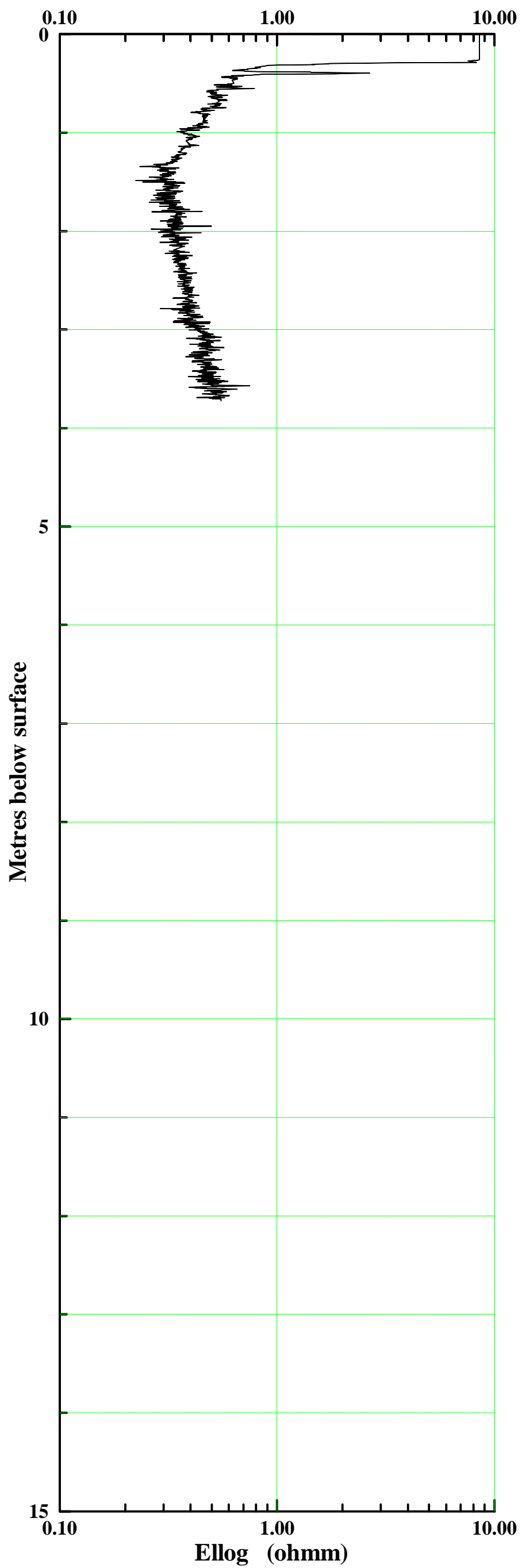
Læsø Boring no. 1



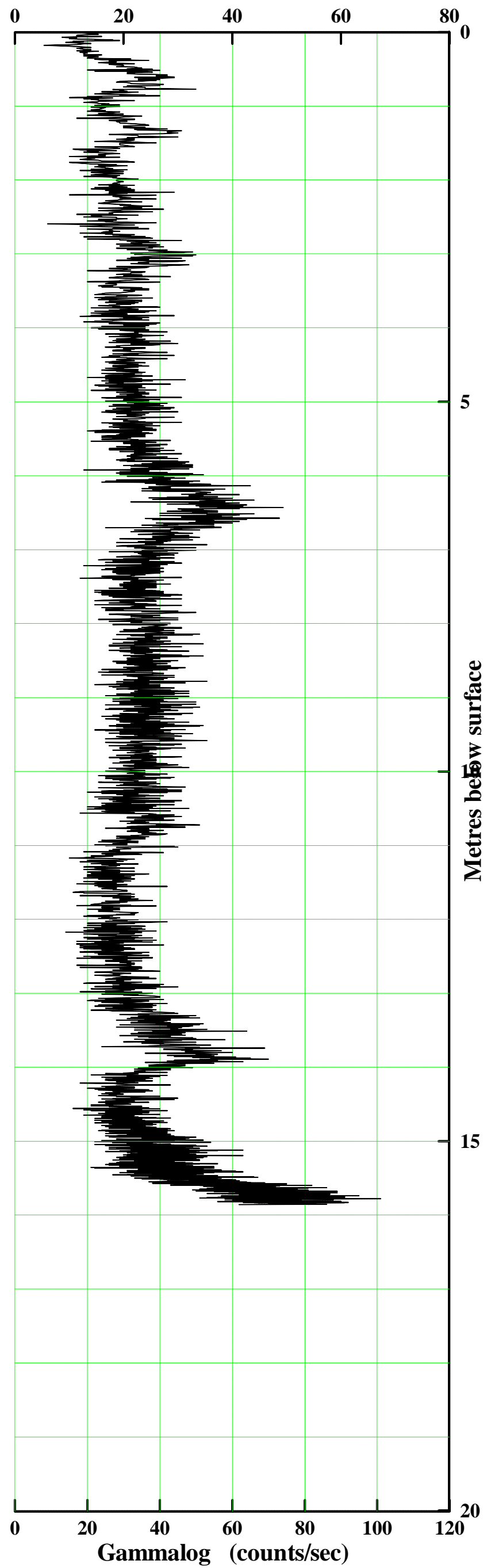
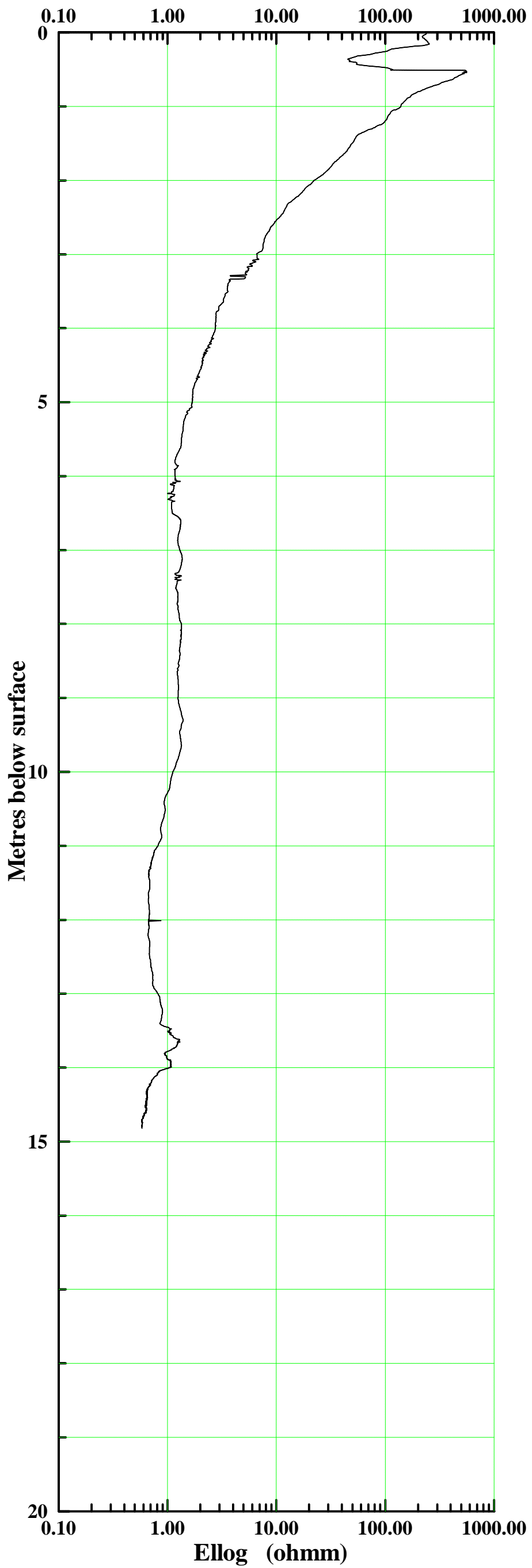
Læsø Boring no. 2



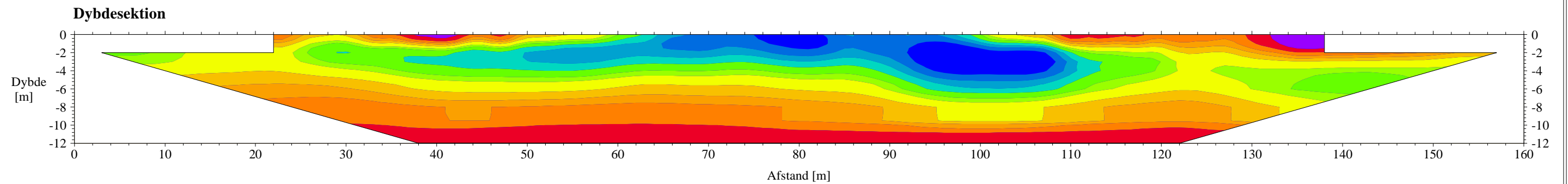
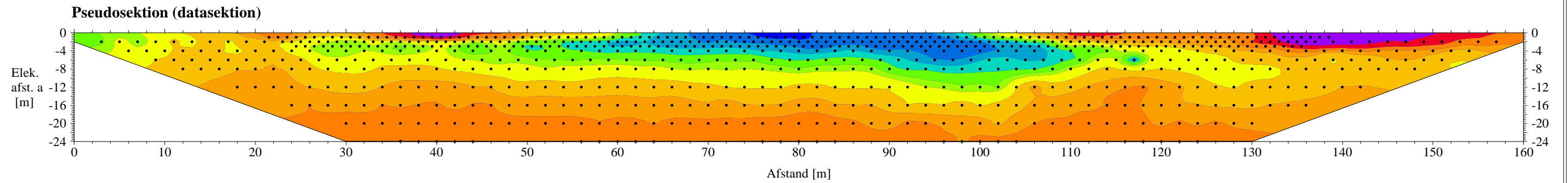
Læsø Boring no. 3



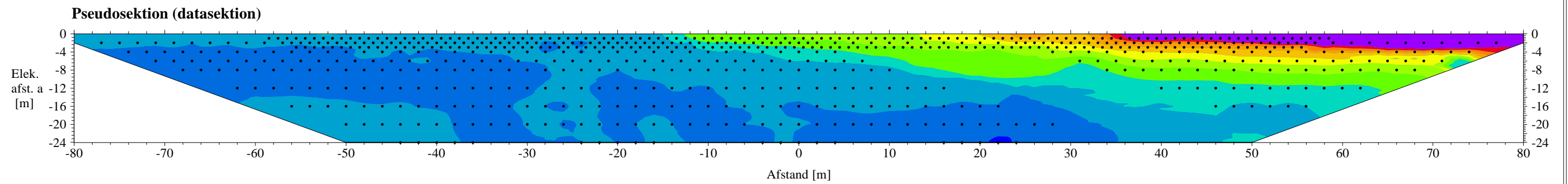
Læsø Boring no. 4




Læsø Boring no. 5



MEP, pseudosektion, dybdesektion, profil I1	Dybdesektion: Vertikal overhøjning x 1	Surfer, Golden Software, ver. 6.02 Kriging med søger. v = 10 m, h = 20 m Afst. imellem gridl. v = .25 m, h = 1 m Simpel søgning, 16 data per sektor	Læsø
	Pseudosektion Vertikal overhøjning x 0.5		
<p>0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.3 1.5 1.7 2.0 2.5 Modstand [ohmm]</p>		Revision: 11/11/1998 (måned/dag/år) Print: 11/26/02 Sti: .\laesoe.98\DCMultiDeconv Filnavn: I1.srf Initialer: EA	



MEP, pseudosektion, profil 12	Dybdesektion: Vertikal overhøjning x 1	Surfer, Golden Software, ver. 6.02 Kriging med søger. v = 10 m, h = 20 m Afst. imellem gridl. v = .25 m, h = 1 m Simpel søgning, 16 data per sektor	Læsø
	Pseudosektion Vertikal overhøjning x 0.5	Revision: 11/11/1998 (måned/dag/år) Print: 11/26/02 Sti: .\laesoe.98\DCMultiDeconv Filnavn: 12.srf Initialer: EA	Geofysisk Afdeling Århus Universitet Finlandsgade 8 8200 Århus N
 <p>0.6 1.0 1.5 2.2 3.2 4.6 6.6 10.0 15.0 22.0 32.0 Modstand [ohmm]</p>			

BILAG 3. Satellit billeder

