

NGU Rapport 98.117

Georadar borehullstomografi.
Eksempel fra Bleikvassli.

Rapport nr.: 98.117		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen	
Tittel: Georadar borehullstomografi. Eksempel fra Bleikvassli.				
Forfatter: Eirik Mauring og Jan Steinar Rønning		Oppdragsgiver: NGU		
Fylke: Nordland		Kommune: Hemnes		
Kartblad (M=1:250.000) Mosjøen		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1926 I Røsvatnet		
Forekomstens navn og koordinater: Bleikvassli		Sidetall: 56	Pris: 165,-	
Feltarbeid utført: 21/4-22/4-1998		Rapportdato: 19/11-1998	Prosjektnr.: 2779.00	Ansvarlig: <i>Jan S. Rønning</i>
<p>Sammendrag:</p> <p>Rapporten beskriver prosedyrer for innsamling av georadar borehullsdata til bruk i framstilling av tomografiske bilder der Sensors & Software's borehullsutstyr benyttes. En detaljert beskrivelse av prosessering av slike data er også presentert. Prosedyrene er illustrert ved resultater fra testmålinger mellom to borehull ved Bleikvassli gruve.</p> <p>Innsamling av data for borehullstomografi er en relativt tidkrevende prosess, og EM-signaler fra radarantennene har forholdsvis liten rekkevidde. Relativt store datamengder må samles inn for å få en konsistent løsning. Prosessering av data er også omfattende, spesielt registrering av førsteankomsttider og periode. Det er også flere fallgruver tilknyttet registreringen av disse. Fordelene ved borehullstomografi er at det oppnås et detaljert todimensjonalt bilde av hastighet, dempning og dispersjon i mediet mellom borehullene. Kvalitativt vil disse bildene avtegne strukturer og lagdeling i mediet. Kvantitativt kan bildene si noe om mediets beskaffenhet, for eksempel grad av oppsprekking, ioner i løsning, vanninnhold osv.</p> <p>Testmålinger mellom to borehull ved Bleikvassli gruve har avdekket et tilsynelatende subhorisontalt oppsprekkingsmønster som er bekreftet ved boringer. I tillegg indikeres foliasjonsretning i bergarten mellom borehullene. Sprekker som er observert på bakken er vesentlig steiltstående. Dette kan indikere to sprekkesystemer; ett horisontalt og ett vertikalt, der de vertikale sprekke er drenert.</p>				
Emneord: Geofysikk		Georadar		Borhullsmåling
				Fagrapport

INNHOOLD

1	INNLEDNING.....	5
2	DATAINNSAMLING	5
2.1	ZOP ('zero offset profiling').....	5
2.2	MOG ('multiple-offset gather')	7
2.3	VRP ('vertical radar profile').....	8
3	PROSESSERING AV DATA.....	10
3.1	Editering av råopptaksfiler.....	10
3.2	Registrering av ankomsttider	11
3.2.1	Problemer ved registrering av ankomsttider	12
3.3	Tomografisk prosessering	17
3.3.1	Valg av cellestørrelse	18
3.3.2	Valg av type tomografisk bilde.....	19
3.3.3	Valg av startmodell	19
3.3.4	Valg av max antall iterasjoner.....	20
3.3.6	Korreksjon av gangtidsdata.....	23
3.3.7	Avledete data.....	24
3.4	Utskrift av tomogram	26
4	EKSEMPEL PÅ BOREHULLSTOMOGRAFI, BLEIKVASSLI.....	27
4.1	Utstyr.....	28
4.2	Datainnsamling	28
4.3	Prosessering	28
4.4	Resultater	29
4.4.1	ZOP-måling, BH6-7	29
4.4.2	MOG-målinger, BH6-7	29
4.5	Diskusjon	31
5	KONKLUSJON	32
6	REFERANSER	33

Tekstbilag

1. Oppsummeringsfil etter prosessering av hastighetstomogram (.SUM)
2. Residualfil etter prosessering av hastighetstomogram (.RSD)

Databilag

1. Hastigheter fra ZOP-målinger mellom borehull 6 og 7
2. BH6-7, MOG hastighetstomogram, gjennomsnittlig startmodell
3. BH6-7, MOG hastighetstomogram, lagdelt startmodell
4. BH6-7, MOG dempningstomogram, gjennomsnittlig startmodell
5. BH6-7, MOG dempningstomogram, lagdelt startmodell
6. BH6-7, MOG dispersjonstomogram, gjennomsnittlig startmodell
7. BH6-7, MOG dispersjonstomogram, lagdelt startmodell

8. BH6-7, MOG volumetrisk vanninnhold
9. BH6-7, MOG porøsitet
10. BH6-7, MOG ledningsevne
11. BH6-7, MOG salinitet
12. Vanntapsmålinger og sprekkeindikasjoner fra borehull 6
13. Vanntapsmålinger og sprekkeindikasjoner fra borehull 7
14. Ledningsevнемåling (pol-pol konfigurasjon) i vannmettet sone, borehull 6

Kartbilag

98.117-01: Oversiktskart, Bleikvassli

1 INNLEDNING

I forbindelse med kartlegging av sprekker i fjell er det utført tomografiske georadarmålinger i borehull ved Bleikvassli Gruber, Nordland. Dette er første gang tomografi benyttes ved NGU. Ved siden av resultater, beskriver denne rapporten forholdsvis detaljert prosedyrene fra innsamling av data til ferdig prosesserte tomogram.

Tomografimålingene var et ledd i NGUs prosjekt for gjenåpning av Bleikvassli Gruber etter vanninnslagene høsten 1997. Boringer i området påviste kraftig dagnær oppsprekking med åpne sprekker i desimeter-skala. Tomografiske målinger ble utført for å se om denne metoden kunne si noe om sammenhengen mellom påviste sprekker i de aktuelle borehullene. Det er også utført georadarmålinger på bakken for kartlegging av sprekker (Elvebakk & Rønning, 1998).

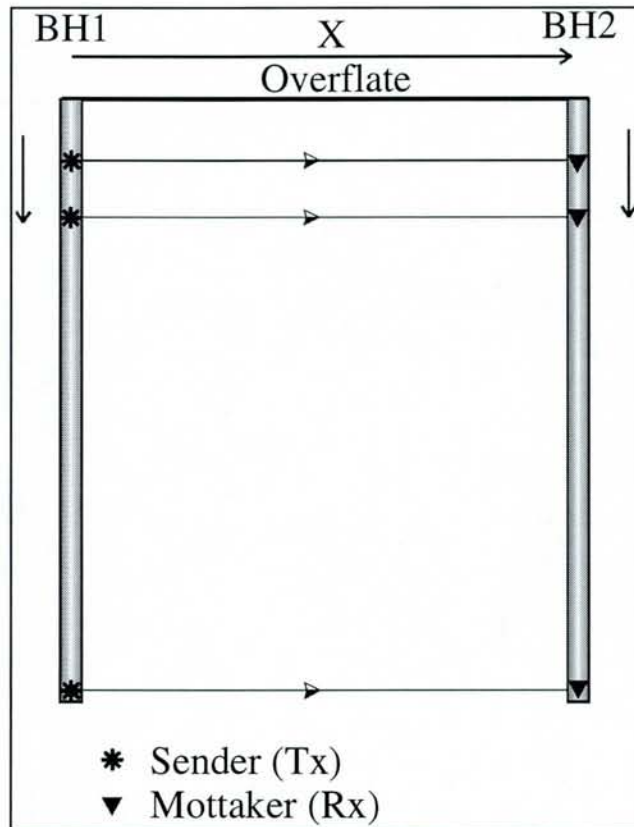
Utstyr og programvare ble utleid fra Sensors & Softwares representant i Europa (Dr. Thrainn Sigurdsson, Sverige). Målingene ble utført av Jan Steinar Rønning i perioden 21/4-22/4-1998.

2 DATAINNSAMLING

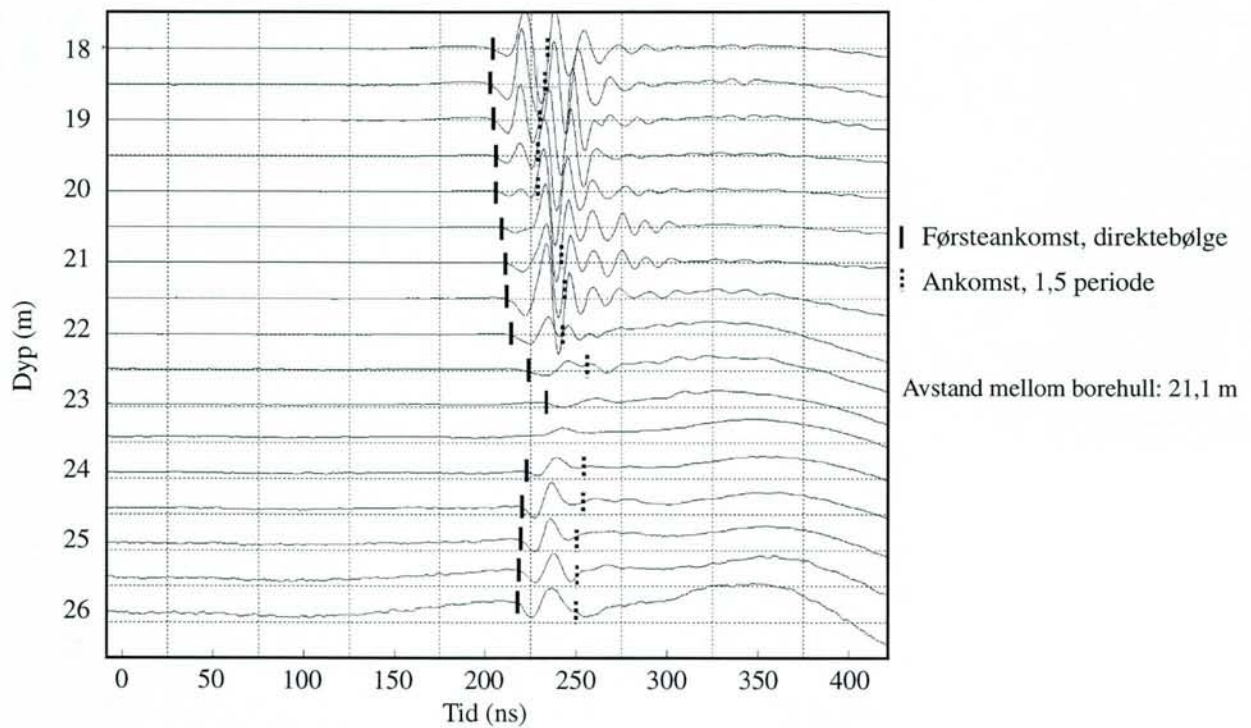
Det er vanlig å samle inn georadar borehullsdata ved tre forskjellige måleteknikker; ZOP ('zero-offset profile'), MOG ('multiple-offset gather') eller VRP ('vertical radar profile'). Ut fra data som samles inn ved disse målingene kan det foretas beregninger for å finne variasjoner i hastighet, dempning og dispersjon i et snitt mellom borehullene.

2.1 ZOP ('zero offset profiling')

Målingene blir utført som vist på skissen i figur 1. Begge antennene flyttes med fast avstand nedover i borehullet, og en måling foretas for hver posisjon. Seinere avleses førsteankomsttid (tid det tar fra signal blir sendt til det blir registrert i mottakerantenne). Dersom en antar rettlinjjet strålegang og at posisjonene til sender og mottaker er kjent, kan gjennomsnittlig hastighet, evt. dempning og dispersjon mellom sender- og mottakerantenne bestemmes for et gitt dyp. På denne måten oppnås en grov 'oversikt' over hvordan gjennomsnittlig hastighet/dempning/dispersjon varierer mot dypet mellom de to borehullene. Området mellom borehullene kan også oppdeles i celler, der hastighet/dempning/dispersjon kan beregnes for hver celle. På grunn av den dårlige datadekningen, blir disse cellene forholdsvis store og har begrenset anvendelse.



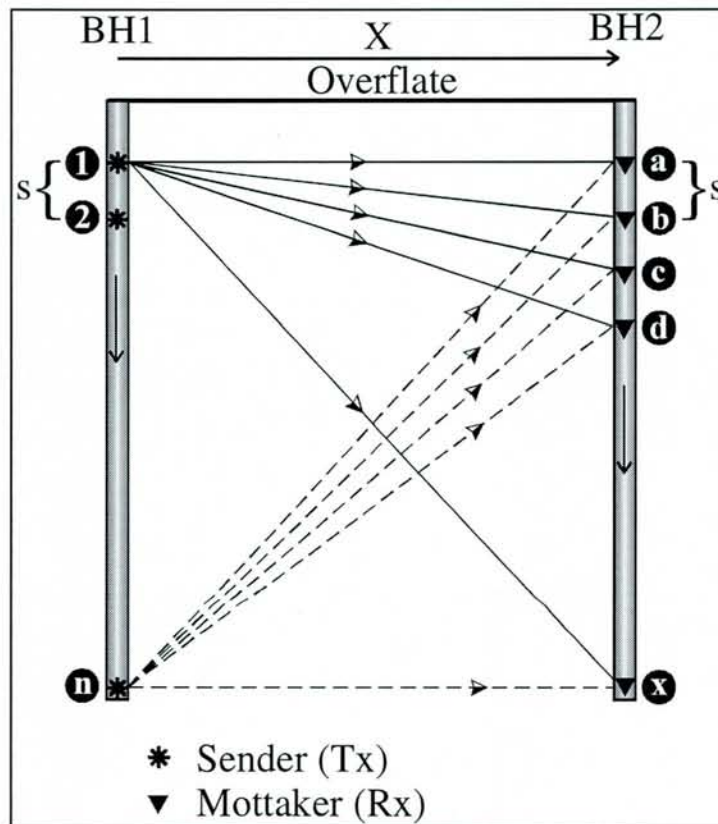
Figur 1: Skisse som viser prosedyre for innsamling av 'zero-offset'-data.



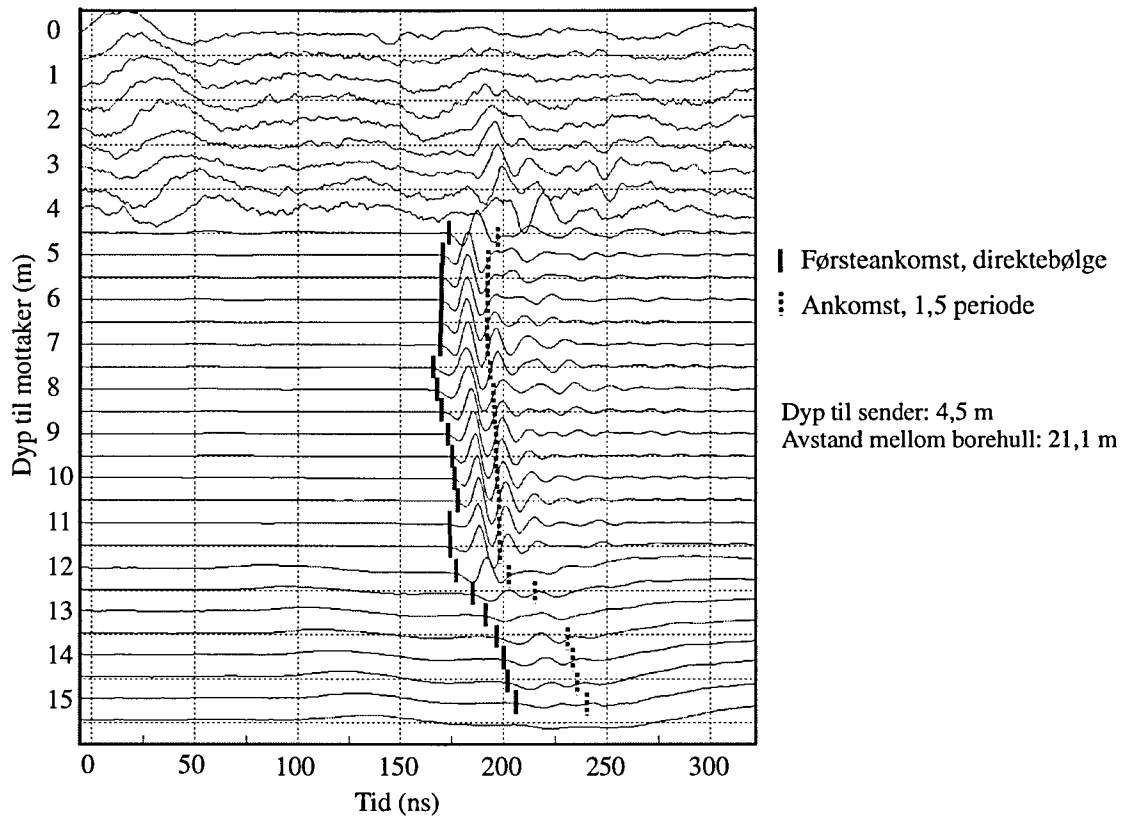
Figur 2: Eksempel på opptak med ZOP.

2.2 MOG ('multiple-offset gather')

Figur 3 illustrerer måleprosedyren for MOG. Målingene starter med sender i posisjon **1** og mottaker i posisjon **a**. Etter måling flyttes mottaker en avstand s nedover i borehullet til posisjon **b** og ny måling foretas. Dette gjentas til mottaker har nådd bunnen av borehullet (posisjon **x** i figur 3). Deretter lagres data, og nytt opptak starter med sender i posisjon **2**. Med sender i denne posisjonen foretas suksessive målinger med mottaker i posisjonene **a-x**. Dekningen som oppnås på denne måten er skissert i figuren. Sett i forhold til ZOP gir dette langt flere strålebaner mellom borehullene, og derved en mye bedre dekning. Området mellom borehullene oppdeles i celler, der hastighet/dempning/dispersjon kan beregnes for hver celle. Figur 4 viser eksempel på MOG-opptak. Dårlig signal/støy-forhold ned til 4 m skyldes demping pga. metall-casing i borehull.



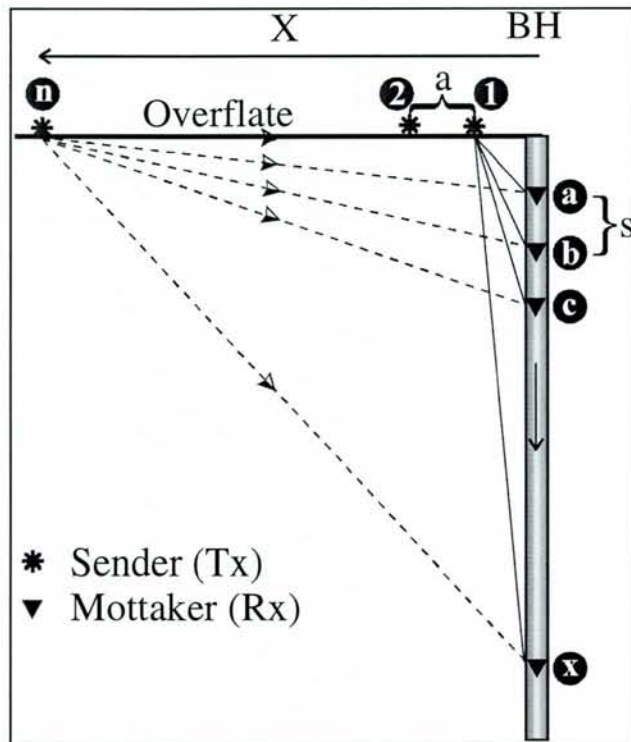
Figur 3: Opplegg for målinger med 'multiple-offset gather'.



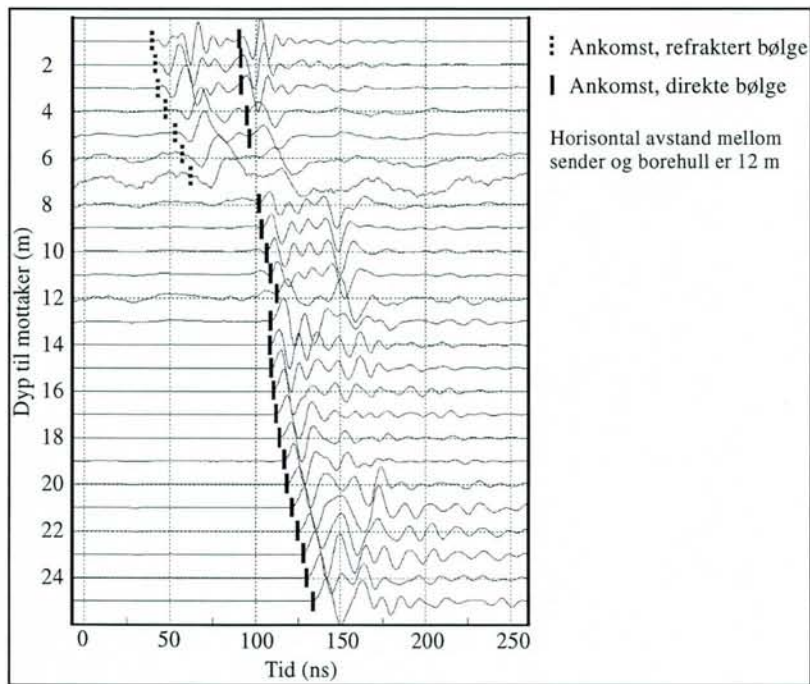
Figur 4: Eksempel på opptak med MOG.

2.3 VRP ('vertical radar profile')

Denne måleteknikken er spesielt aktuell dersom en ikke kan måle mellom to borehull, men kun kan benytte ett. Opplegget er skissert i figur 5. Med sender i posisjon **1** blir det utført målinger med mottaker i posisjon **a**. Deretter flyttes mottaker en fast avstand s nedover i borehullet til posisjon **b** og ny måling foretas. Mottakeren flyttes suksessivt nedover i borehullet til bunnen (posisjon **x** i figur 5). Deretter lagres data, og nytt opptak starter med sender i posisjon **2**. Med sender i denne posisjonen foretas suksessive målinger i posisjonene **a-x**. Dekningen er indikert ved strålebaner i figuren. Merk at dekingen omfatter en trekant med hjørner i **n**, **1** og **x**. Området innenfor trekanten deles opp i celler der hastighet/dempning/dispersjon kan beregnes for hver celle. Sett i forhold til MOG gir dette dårligere deking og et begrenset undersøkelsesområde. Eksempel på målinger med VRP er vist i figur 6.



Figur 5: Opplegg for målinger med 'vertical radar profile' måleteknikk.



Figur 6: Eksempel på opptak med VRP måleteknikk.

3 PROSESSERING AV DATA

Prosessering av tomografi-data er forholdsvis tidkrevende. Den delen av prosesseringen som tar lengst tid er registrering av ankomsttider. Prosessering av data består hovedsakelig av følgende trinn;

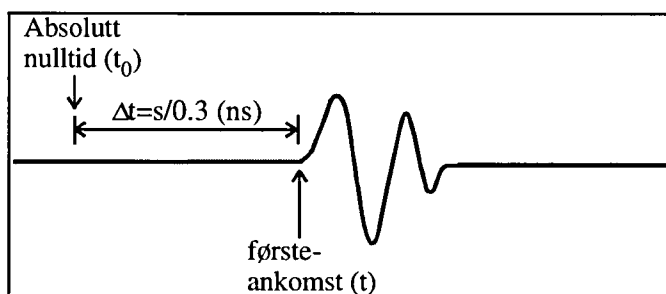
- Editering av råopptaksfiler
- Registrering av ankomsttider
- Tomografisk prosessering
- Presentasjon av prosesserte data.

Disse punktene omtales i detalj nedenfor.

3.1 Editering av råopptaksfiler

Etter innsamling av data er det fornuftig å skrive ut rapporter for målingene. Disse viser sender- og mottakerposisjoner og opptaksparametre, slik at en raskt kan finne ut om enkelte filer har feil sender- og mottakerposisjoner eller inkonsistente opptaksparametre. Rapportene viser også absolutt nulltid (t_0) og hvilken kalibreringsfil som er benyttet for å bestemme t_0 (se nedenfor). Editering av t_0 -kalibreringsfiler kan utføres for å korrigere førsteankomsttid og antenneavstand. Når t_0 -filene antas å være korrekte, anvendes disse på råopptaksfilene for å korrigere tidligere t_0 -verdier i opptakene.

Problemet med radartomografi målt med det aktuelle system er at mottaker ikke 'vet' når senderen aktiveres og puls sendes ut. For å kunne beregne riktige gangtider mellom sender- og mottakerantenne, foretas først nulltids-kalibrering. Det vil si at vi må finne nøyaktig tidspunkt for utsendelse av bølgepuls. Dette gjøres ved å plassere sender- og mottakerantenne i luft over borehullene. Siden vi kjenner både hastighet i luft (0,3 m/ns) og avstand mellom borehullene, kan vi finne tiden det tar for bølgen å gå mellom antennene. Førsteankomsttiden finnes automatisk av programmet eller kan endres av operatør. Figuren under viser hvordan absolutt 'timezero' finnes.



Figur 7: Skisse som viser hvordan absolutt nulltid finnes.

Ut fra figuren kan absolutt nulltid finnes ved;

$$t_0 = t - \Delta t = t - \frac{s}{c}$$

$c = 0,3 \text{ m/ns}$

$s = \text{avstand mellom antennene}$

$t = \text{førsteankomsttid}$

Denne t_0 -verdien blir lagret på fil og benyttes som korreksjon for de etterfølgende borehullsmålinger.

For hver eneste senderposisjon blir det for MOG- og VRP-målinger opprettet en fil. For disse filene må en korrigerer sender- og mottakerposisjoner dersom det er utført avviksmålinger i borehull. Disse filene bør deretter slås sammen til én stor fil før registrering av ankomsttider. En bør ikke slå sammen filer som benytter forskjellige t_0 -kalibreringsfiler. Det er bedre å slå sammen filene som opprettes seinere ved lagring av ankomsttider.

3.2 Registrering av ankomsttider

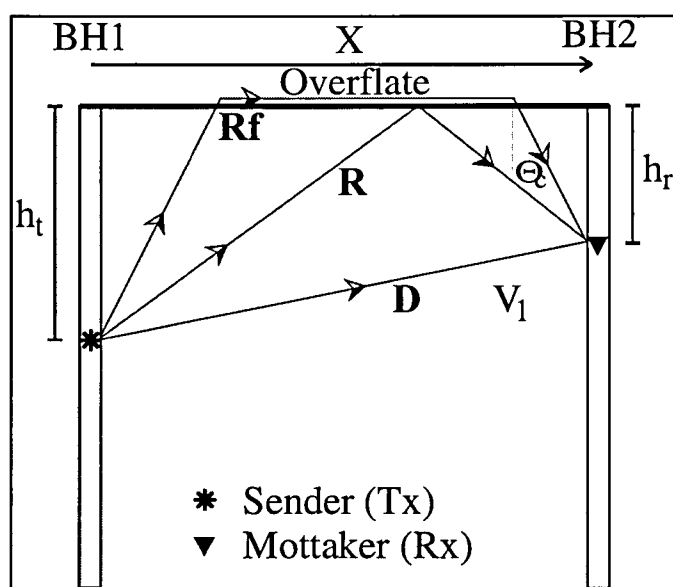
Det Windows-baserte programmet PICKER benyttes ved registrering av ankomsttider. Registreringen kan skje automatisk eller manuelt. En kombinasjon er det mest effektive og gir best resultat. Automatisk registrering vil gi feil i traser med lavt signal/støy-forhold og ved registrering av refrakterte bølger (se kap. 3.2.1). Disse registreringene korrigeres ved manuelt å gå gjennom alle opptakene og slette eller endre ankomsttider. For å kunne bestemme hastigheter i celler må førsteankomsttider registreres. For å bestemme demping og eventuelt dispersjon, må det registreres en ankomsttid i tillegg til førsteankomsttiden. Denne registreres ved enden av direktepuls mellom antennene, vanligvis 1,5 bølgelengder etter førsteankomsttiden (vi kaller dette registrering av periode, selv om det strengt tatt er registrering av $1,5 \times \text{periode}$). I intervallet mellom førsteankomsttid og periode finner programmet automatisk maksimum og minimum amplitude. I tillegg beregnes gjennomsnittsamplitude (basert på absoluttverdier av amplituder) og RMS ('root-mean-square') amplituder.

Etter å ha registrert ankomsttider, lagres disse på en fil (.PIK) som registrerer trasenummer, posisjon, førsteankomsttid, periode og eventuelle kommentarer. Denne filen brukes av PICKER-programmet dersom man seinere vil redigere ankomsttider. Den andre filen som må opprettes benyttes av det tomografiske prosesseringsprogrammet. På denne filen (.TTA) lagres ankomsttider, amplitudeinformasjon (minimum, maksimum, absolutt gjennomsnitt, RMS), vinkler som sender- og mottakerantennene danner med horisontalen samt senderfrekvens og –spenning. I tillegg lagres informasjon om hvor godt bestemt ankomsttidene er (se kap. 3.3.6).

All denne informasjonen benyttes for seinere tomografisk prosessering for å produsere bilder av hastighet, demping og dispersjon.

3.2.1 Problemer ved registrering av ankomsttider

Ved registrering av førsteankomsttider ønsker vi kun å registrere ankomsten til den bølgepulsen som har gått direkte gjennom mediet fra sender- til mottakerantenne. Vi ønsker for eksempel ikke å registrere reflekterte og refrakterte bølger. Under diskuteres forskjellige bølgebaner for de tre vanligste måleteknikker (ZOP, MOG og VRP).



Figur 8: Mulige bølgestråler som går i overgangen jord/luft, samt direkte bølge.

ZOP, MOG

Figur 8 viser aktuelle bølgebaner som går i overgangen jord/luft, samt den direkte bølgen. Det kan lett vises at gangtiden mellom sender og mottaker for de forskjellige hendelsene er (c er EM-bølgehastighet i luft: 0,3 m/ns);

$$\text{Direkte bølge (D): } t_d = \frac{\sqrt{(h_t - h_r)^2 + x^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

$$\text{Reflektert bølge (R): } t_r = \frac{\sqrt{(h_t + h_r)^2 + x^2}}{V_1} \quad (3.2)$$

$$\text{Refraktert bølge (Rf): } t_{Rf} = \frac{x}{c} + \frac{(h_t + h_r)\sqrt{c^2 - V_1^2}}{cV_1} \quad (3.3)$$

Av likningene 3.1-3.3 ser vi direkte at reflektert bølge ankommer seinere enn direkte bølge og forårsaker ikke problemer ved avlesing av førsteankomsttid. Den kan skape problemer fordi den øker pulslengden til direktebølgen ved interferens, slik at det kan være vanskelig å avlese periode. Den vil trolig ikke skape problemer dersom den ankommer 1,5 bølglengder etter førsteankomsten (Sensors & Software, 1997). I tid utgjør dette;

$$\Delta t = \frac{3}{2f_s}, \text{ der } f_s \text{ er antennesystemets senterfrekvens}$$

For å unngå interferens må vi ha;

$$t_r > t_d + \frac{3}{2f_s}$$

Refraktert bølges ankomst i forhold til direkte bølges ankomst avhenger av x , h_t og h_r samt V_1 . Dersom vi setter uttrykkene 3.1 og 3.3 lik hverandre, får vi et minste dyp for h_r som funksjon av h_t . For mindre dyp enn h_r vil refraktert bølge nå fram til mottaker først;

$$h_r = \frac{2h_t(\cos^2 \theta_c + 1) + \frac{1}{2}x \sin 2\theta_c - \sqrt{2h_t^2(1 + \cos 2\theta_c) + 2xh_t \sin 2\theta_c}}{\sin^2 \theta_c}, \quad \sin \theta_c = \frac{V_1}{c} \quad (3.4)$$

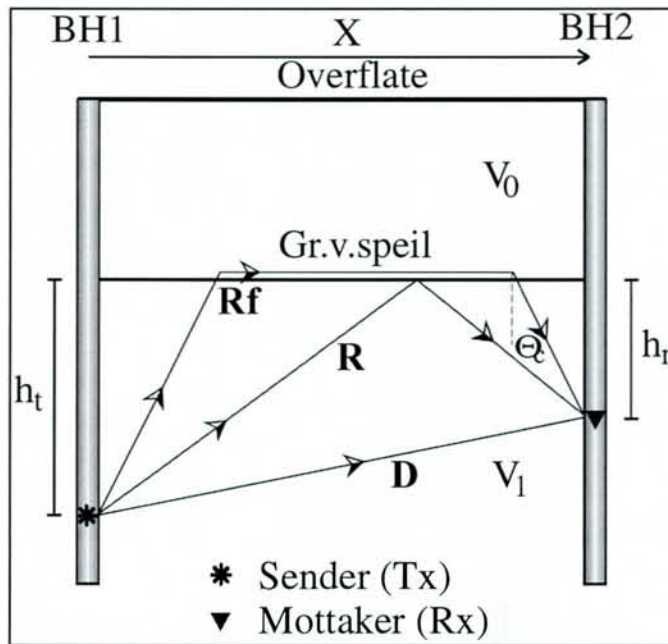
Eks.: $x=20 \text{ m}$, $V_1=0,13 \text{ m/ns}$, $h_t=5 \text{ m} \Rightarrow h_r > 7,8 \text{ m}$

Tilsvarende problem kan en også få dersom det er stor hastighetskontrast mellom tørt og vannmettet medium og antennene ligger lavere enn grunnvannsspeil (se figur 9). Likningene for direkte, reflektert og refraktert bølge blir de samme som 3.1, 3.2 og 3.3 der V_0 erstatter c og V_1 er hastighet i vannmettet sone.

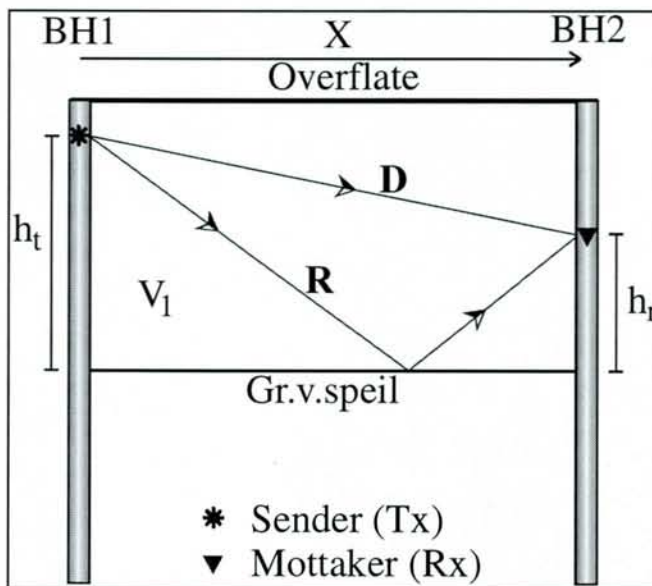
Vi kan også få problemer med interferens mellom direkte bølge og bølge reflektert fra grunnvannsspeil når antennen er over grunnvannsspeil (figur 10). Likningene for direkte og reflektert bølge blir de samme som 3.1 og 3.2, der h_t og h_r nå angir antennenes høyde over grunnvannsspeil.

Diskusjon

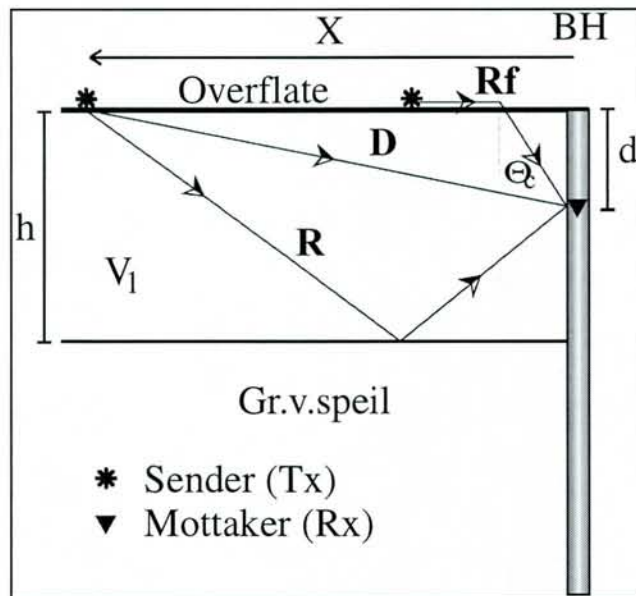
Mange ZOP- og MOG- borehullsmålinger utføres i fjell, der hastighetskontrasten mellom tørr og vannmettet sone kan være neglisjerbar. I disse tilfeller kan det derfor antas at refraksjoner og refleksjoner fra grenseflaten jord/luft er de eneste hendelser som skaper problemer ved korrekt avlesning av ankomsttider for direkte bølge. Dersom en kun vil finne variasjoner i hastighet i mediet, vil ikke reflektert bølge medføre problemer. Refrakterte bølger vil også svekkes mot dypet, bl.a. pga. antennenes retningssensitivitet.



Figur 9: Mulige bølgestråler som går i overgangen vannmettet/tørr sone, samt direkte bølge.



Figur 10: Direkte bølge og reflektert bølge fra grunnvannsspeil.



Figur 11: Mulige bølgestråler som vil kunne registreres i et VRP-opptak.

VRP

Som for ZOP og MOG, er en kun interessert i å registrere ankomsttider for direkte bølge (D i figur 11). Problematiske hendelser vil her være bølge som refrakteres fra luft og går ned mot mottaker samt bølge reflektert fra grunnvannsspeil. Likningene for ankomsttid for disse bølgene er;

$$\text{Direkte bølge (D): } t_d = \frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{V_1} \quad (3.5)$$

$$\text{Reflektert bølge (R): } t_r = \frac{\sqrt{x^2 + (2h - d)^2}}{V_1}, d < h \quad (3.6)$$

$$\text{Refraktert bølge (Rf): } t_{Rf} = \frac{x}{c} + \frac{d\sqrt{c^2 - V_1^2}}{cV_1} \quad (3.7)$$

Det kan vises at en ikke får registrert refrakterte bølger dersom;

$$d > \frac{x\sqrt{c^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (3.8)$$

Eks.: Sender 5 m fra borhull (x) og $V_1 = 0,13 \text{ m/ns} \Rightarrow d > 10,4 \text{ m}$

I praksis ser en ofte at refrakterte bølger svekkes raskt mot dypet, slik at problemet med registrering av disse gjelder bare de øverste få meter. Dette er spesielt tydelig i figur 6 som viser et eksempel på VRP-opptak.

Fra likning 3.5 og 3.6 ser vi at $t_R > t_D$ når $(2h-d)^2 > d^2$. Dette gjelder for alle $d < h$. Den reflekterte bølgen fra grunnvannsspeil vil alltid nå fram til mottaker etter direktebølgen. Refleksjoner skaper derfor kun problemer ved avlesing av ankomsttid for beregning av dempning og dispersjon (periode). Som tidligere nevnt, vil denne kunne avleses uten interferens fra reflektert bølge dersom følgende er oppfylt;

$$t_R > t_D + \frac{3}{2f}$$

Vi setter inn for t_R og t_D og må løse ulikheten;

$$\frac{\sqrt{x^2 + (2h-d)^2}}{V_1} > \frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{V_1} + \frac{3}{2f_s} \quad (3.9)$$

Setter $d=nh$, der h er en proporsjonalitetsfaktor. Ved å løse ovenstående uttrykk ned hensyn på n får vi det tilnærmede uttrykket;

$$n < 1 - \frac{3V_1\sqrt{16f_s^2(x^2 + h^2) - 18V_1^2}}{(4hf_s - 3V_1)(4hf_s + 3V_1)} \quad (3.10)$$

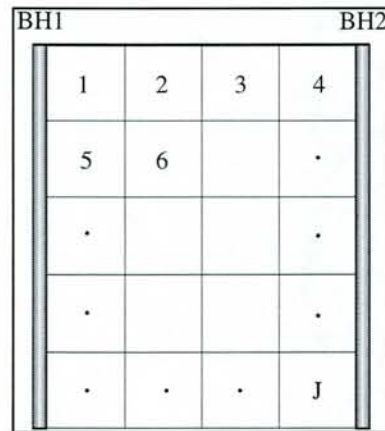
I tillegg vet vi at øvre grense for n opptrer for $h=d$, som medfører at $n_{\max}=1$.

- Eks.:*
- Dyp til grunnvannsspeil (h) = 10 m
 - Hastighet i mediet over grunnvannsspeil (V_1) = 0,1 m/ns
 - Antenne senterfrekvens (f_s) = 100 MHz
 - Horisontal avstand mellom sender og borhull (x) = 10 m

Ved å sette disse parameterene inn i 3.10 får vi $n < 0.86$. Dette betyr at mellom 8,6 og 10 m dyp vil det være interferens mellom direktebølge og bølge reflektert fra grunnvannsspeil.

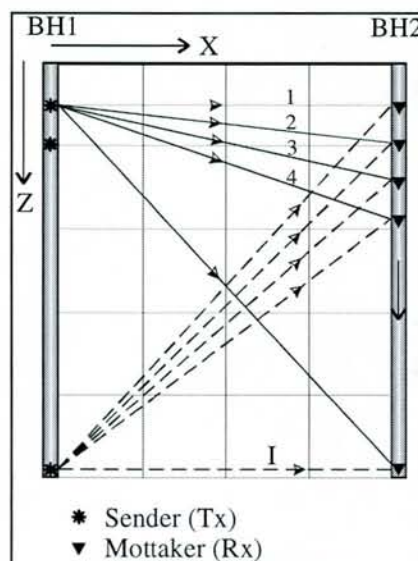
3.3 Tomografisk prosessering

Det MS-DOS-baserte programmet MIGRATOM benyttes ved tomografisk prosessering (Jackson & Tweeton, 1993).



Figur 12: Inndeling av medium mellom borehull i celler.

Tomografisk prosessering går ut på å konvertere gangtids- og amplitudedata til et todimensjonalt bilde som viser variasjonen i hastighet, demping og dispersjon gjennom et medium. I praksis foregår dette ved at mediet mellom sender- og mottakerposisjonene inndeles i celler (figur 12). For hver celle beregnes hastighet/dempning/dispersjon på bakgrunn av data fra strålebaner som går gjennom cellene. Cellene nummereres vanligvis fra øvre venstre hjørne og fortløpende til nedre høyre hjørne (celle 1..J i figuren). Strålebanene mellom sender og mottakerposisjonene nummereres fra 1 til I (se figur 13). Antall stråler som skjærer gjennom en gitt celle, angir dekningsgraden for denne cellen.



Figur 13: Strålebaner gjennom celler. Dekningsgrad for celler.

3.3.1 Valg av cellestørrelse

Programmet MIGRATOM kan automatisk velge antall celler dersom antall celler opprinnelig settes lik 0 (standardverdi). Antall celler beregnes da ut fra følgende likning;

$$J' = \text{Heltall} \left(2N^{\frac{1}{3}} \right), \text{ der } N \text{ er antall registrerte gangtider}$$

Eks.: Dersom en har registrert 1000 gangtider (strålebaner), blir antall celler lik 20.

Cellene fordeles etter x- og z-dimensjonene (se figur 13). Dersom vi setter $n=x/z$, der x er avstanden mellom borehullene og z er max dyp av sender eller mottaker, blir antall celler i x-retning lik $(nJ')^{\frac{1}{2}}$ og antall celler i z-retning blir $(nJ')^{\frac{1}{2}}/n$. Disse tallene må justeres til heltall. Det endelige antall celler blir da;

$$J = \text{Round}(\sqrt{nJ'}) \text{Round} \left(\frac{\sqrt{nJ'}}{n} \right)$$

'Round' er en funksjon som runder av argumentet til nærmeste heltall. J er det nye antall celler.

Eks.: $N=1000$ og $n=0,5 \Rightarrow J=18$ med 3 kolonner (x-retning) og 6 rader (z-retning).

En kan også manuelt velge antall celler. Cellene trenger nødvendigvis ikke å være kvadratiske. Maksimalt antall celler må ikke overstige antall registrerte gangtider, fordi løsningen av den tomografiske beregningen blir underbestemt. I praksis bør antall celler være mye mindre enn antall registrerte gangtider, fordi likningssystemet av gangtider har rang mindre enn n, der n er antall gangtidsregistreringer. Dette vil si at flere likninger ikke er uavhengige av hverandre, og vi må ha et overbestemt likningssystem. Programmet MIGRATOM har en begrensning på totalt 2400 celler (48x48). Cellestørrelsen bør være konsistent med flyttavstand i borehull, og bør ikke være større enn denne. Dersom flyttavstanden er 1 m, bør cellestørrelsen være større eller lik 1 m. Cellestørrelsen bør også relateres til antennesystemets senterfrekvens, slik at en benytter større celler ved lavere frekvenser. Tabellen under viser anbefalte cellestørrelser relatert til antenne senterfrekvens (Sensors & Software, 1997)

Tabell 1: Minimum cellestørrelse relatert til antenne senterfrekvens.

Frekvens (MHz)	Minimum cellestørrelse (m)
50	2,0
100	1,0
200	0,5

3.3.2 Valg av type tomografisk bilde

Etter at en har valgt celledimensjoner, må en velge hvilken type tomografisk bilde som skal genereres. Disse kan være hastighet, dempning eller dispersjon.

Beregning av hastighet er basert på førsteankomsttider og utføres for alle typer målinger. Beregning av dempning og dispersjon forutsetter at en i tillegg har registrert lengden av direktepulsene (vanligvis 1,5 x bølgelengden).

Dempningen bestemmes ut fra RMS-amplituden som leses fra gangtids- og amplitudefila. Amplituden blir automatisk korrigert for geometrisk spredning (korreksjonen øker lineært med avstanden mellom sender og mottaker) og antennesens retningsfølsomhet. Amplitude for hver celle beregnes ved;

$$A = \frac{A_0}{r} \sin \theta_T e^{-\alpha r}$$

θ_T er vinkel mellom senderantennens akse og retningen til celle. For hver celle må likningen løses med hensyn på dempningen α . Denne angis i dB/m.

Dispersjon angir endring i frekvens av mottatt signal i forhold til utsendt signal. Dispersjon beregnes ved å subtrahere T_1 (førsteankomsttid) fra T_2 (periode) og dividere på 1,5 ganger perioden til antennesystemets senterfrekvens. Dispersjon angis i dB/mMHz.

3.3.3 Valg av startmodell

MIGRATOM forutsetter en startmodell for beregningene. Dette innebærer at samtlige celler har blitt tilordnet en startverdi (m/ns, dB/m eller dB/mMHz). Denne startmodellen kan bestemmes av programmet, eller man kan legge inn en startmodell manuelt.

Automatisk startmodell har to valg; gjennomsnittmodell eller horisontal modell. Dersom det antas at en ikke har horisontal lagdeling, velges gjennomsnittmodell. I motsatt fall velges horisontal modell. Ved anvendelse av gjennomsnittmodell beregner programmet gjennomsnittlig hastighet/dempning/dispersjon mellom alle sender- og mottakerkonfigurasjoner som har data for ankomsttider. Denne verdien benyttes som startverdi for alle celler. Dersom en horisontal startmodell er valgt, beregner programmet en startmodell som består av horisontale lag.

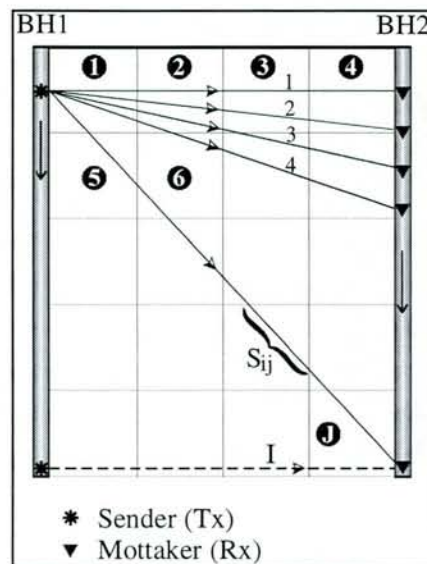
En manuell startmodell kan opprettes i MIGRATOMs celle-editor. Verdier for hver enkelt celle kan her legges inn. Modellen lagres på fil. En test på kvaliteten (konsistensen) av prosesseringen kan være å utføre denne med både gjennomsnittlig og horisontal startmodell. Tomo-

grammene som framkommer bør være forholdsvis like som en indikasjon på at programmet konvergerer mot en felles løsning med forskjellige utgangspunkt (konsistente løsninger).

3.3.4 Valg av max antall iterasjoner

Max antall iterasjoner angir maksimum antall framlengs- og inversjonsberegninger som utføres av programmet (se kap. 3.3.5). Inntil 99 iterasjoner kan utføres, men det er mest vanlig å benytte 5 til 25 iterasjoner. Programmet stopper før det angitt antall iterasjoner dersom løsningen på beregningen ligger under terskelen som er satt for absolutt eller inkrementell toleranse (se kap. 3.3.5). Etter hver iterasjon beregnes avvik mellom målt og modellert gangtid. Dette avviket blir mindre for hver iterasjon. Derfor skulle en tro at modellen kvalitativt blir bedre og bedre etter hver iterasjon. Dette er imidlertid ikke alltid tilfellet, spesielt om det eksisterer dårlig bestemte ankomsttider i datasettet. Avvik mellom målt og modellert gangtid har en tendens til å samle seg opp i enkeltceller ved mange iterasjoner. Dersom en har enkeltstående anomale celler i det prosesserte tomogrammet, er det sannsynlig at disse ikke representerer reelle anomalier, men er en effekt av prosesseringen. Et prosessert bilde med mange iterasjoner bør derfor sammenlignes med et bilde som er prosessert med langt færre iterasjoner. Det er mindre sannsynlig at 'falske' anomalier opptrer på disse. Dersom 'falske' anomalier, oppstår, bør en undersøke om det kan være feil registrerte førsteankomsttider. Dette kan gjøres ved å liste ut rapportfiler etter prosesseringen (se kap. 3.3.6).

3.3.5 Kjøring av MIGRATOM



Figur 14: Figur som viser parametre benyttet i MIGRATOM.

Input til programmet er følgende parametre;

- Antall celler, 1..J.
- Antall strålebaner, 1..I.
- Startmodell. Hver celle har en startverdi M_j (hastighet, dempning eller dispersjon).
- Max antall iterasjoner.
- Absolutt toleranse.
- Inkrementell toleranse.

MIGRATOM utfører beregninger av hastighet for cellene med kurvede bølgebaner mellom sender og mottaker. Strålebanene oppdateres mellom hver iterasjon etter som hastighetene i cellene endrer seg. Ved beregning av dempning benyttes rette bølgestråler mellom sender og mottaker. Vi skal seinere se at dette kan være en grov forenkling dersom det er store hastighetskontraster langs bølgestrålens bane. For hver bølgestråle er lengden av snittet gjennom cellene kjent og kan angis som s_{ij} . Følgende prosedyre er kjent som SIRT ('simultaneous iterative reconstruction technique') og er basert på en algoritme av Kaczmarz (Berryman, 1991 og Lo & Inderwiesen, 1994).

SIRT, implementert i MIGRATOM

Sluttproduktet av tomografisk prosessering er estimerte verdier av hastighet, dempning eller dispersjon for hver celle (M_j^{est}). Endelig løsningsmodell beregnes ut fra følgende algoritme;

1: Sett antall iterasjoner lik 0

2: Sett estimert modell lik startmodell

$$M_j^{est} = M_j^{start}, j = 1..J \quad (3.11)$$

3: Utfør framlengs beregning. Bestem total gangtid ut fra den estimerte modellen og snittlengder gjennom hver celle.

$$t_i^{pre} = \sum_{j=1}^J s_{ij} M_j^{est} \quad (3.12)$$

Utfør for alle I strålebaner.

4: Beregn RMS residual.

$$\Delta t_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (t_i^{obs} - t_i^{pre})^2}{I}} \quad (3.13)$$

Dersom denne verdien er mindre enn absolutt toleranse; stopp prosesseringen. Prosesseringen stopper også dersom differansen mellom denne RMS-verdien og RMS-verdien fra forrige iterasjon er mindre enn inkrementell toleranse.

5: Beregn endringer i celle (ΔM_j) ut fra sammenligning mellom t_i^{pre} og t_i^{obs} .

$$\Delta M_j = \frac{1}{W_j} \sum \Delta^i m_j = \frac{1}{W_j} \sum_{i=1}^I s_{ij} \frac{t_i^{obs} - t_i^{pre}}{\sum_{j=1}^J (s_{ij'})^2} \quad (3.14)$$

W_j er antall strålebaner som kutter cellen.

Utfør for alle J celler. Dette er det mest kritiske steget ved tomografisk prosessering. For detaljer angående denne prosedyren henvises det til Lo & Inderwiesen (1994).

6: Oppdatér estimert modell.

$$M_j^{(ny)est} = M_j^{est} + \Delta M_j \quad (3.15)$$

7: Oppdatér antall iterasjoner (iterasjoner=iterasjoner+1). Dersom antall iterasjoner er større eller lik antall iterasjoner; stopp prosessering. Hvis ikke; gå til trinn 1:

Kjøringen av programmet kan skje grafisk, ved at celler med forskjellige fargekoder kommer opp på skjermen og plottes på nytt for hver iterasjon. Fargekodene angir forskjellige verdier for cellene og fordeles mellom M_{max} og M_{min} . Skjermen viser også statistikk for RMS residual og RMS perturbasjon. Sistnevnte indikerer hvor mye dataverdiene har forandret seg fra de opprinnelige verdier i utgangsmodellen og angis ved;

$$\Delta M_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (M_j^{start} - M_j^{est})^2}{J}} \quad (3.16)$$

3.3.5.1 Svakheter ved beregning med rette bølgestråler

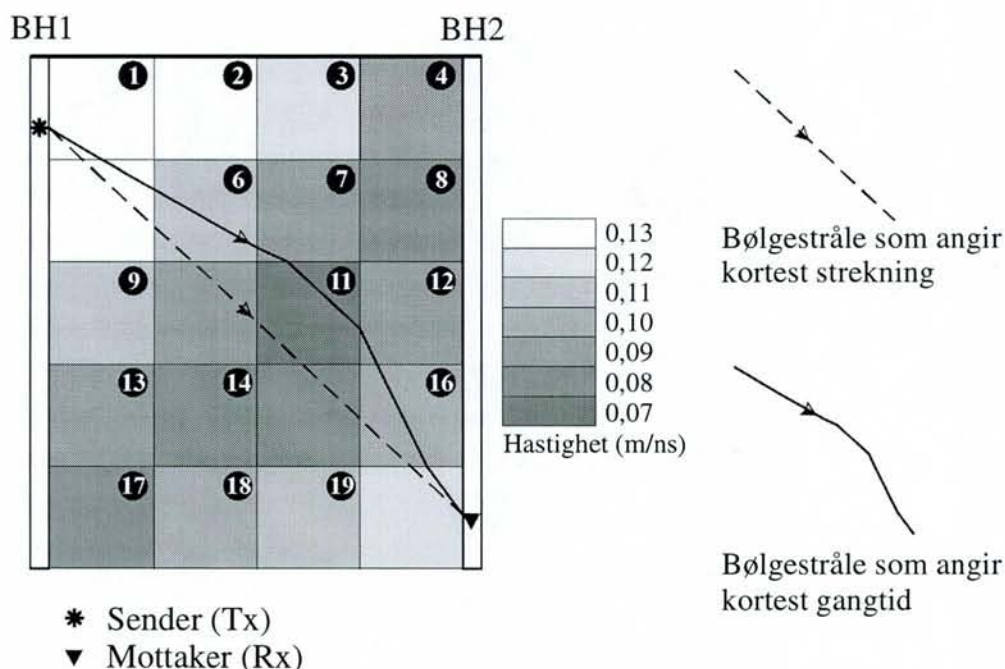
Programmet MIGRATOM benytter rette bølgestråler ved beregning av demping. Dette er korrekt dersom hastigheten i mediet er konstant. Fermats prinsipp sier at den korrekte strålebanen mellom to punkter er den som har kortest gangtid. Dette er ikke nødvendigvis en rett linje. Strålebanen som gir kortest gangtid vil være avhengig av hastighetsvariasjoner i mediet som strålebanen traverserer. Et eksempel på dette er vist i figur 15. Vi antar her at hastigheten i hver celle er konstant. Figuren viser den strålebane (heltrukket) som gir kortest gangtid mellom sender- og mottakerposisjonene A og B, og avbøyning av strålen mellom cellene følger Snells lov;

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (3.17)$$

På grunn av stor hastighetskontrast i modellen i figuren, er det relativt stor forskjell mellom bølgestråle for kortest gangtid og bølgestråle for kortest strekning (stiplet linje). Denne forskjellen blir større jo større vertikal avstand det er mellom A og B. Et betydelig avvik mellom

rett og avbøyd bølgestråle er at to celler (10 og 15) ikke traverseres av bølgestråle for kortest gangtid, men traverseres av bølgestråle for kortest strekning. Ved å benytte rette bølgestråler vil en da kunne beregne demping i celler som bølgestrålen ikke traverserer. Det kan vises at det vesentlig er to effekter som opptrer i ferdig prosessert hastighetstomogram ved bruk av rette bølgestråler (Berryman, 1991);

- En sone med høy demping vil opptre som en mindre sone enn det den er i virkeligheten.
- En sone med lav demping vil opptre som en større sone enn det den er i virkeligheten.



Figur 15: Skisse som viser strålebaner for kortest gangtid og kortest strekning.

Dersom en har god trening i å finne slike effekter, er det vanligvis ikke nødvendig å benytte kurvete bølgestråler. Framlengs beregning ved rette bølgestråler er mye raskere enn beregning med kurvete bølgestråler, siden den bare trenger å vite posisjonene til sender og mottaker og ikke hastighetsfordelingen i mediet mellom sender og mottaker. For å få en mer nøyaktig beregning av tomografiske bilder av demping, må det som for beregning av hastighetstomogram benyttes en 'ray tracing'-algoritme for kurvete bølgebaner (Berryman, 1991).

3.3.6 Korreksjon av gangtidsdata

Ved kjøring av MIGRATOM opprettes to tekstfiler som inneholder detaljer om resultatet av prosesseringen. En oppsummeringsfil (.SUM) lagrer detaljer om den tomografiske prosesseringen. Dette er navn på datafil, prosesseringsparametre, løsningsmodell, antall stråler som traverserer hver celle (dekningsgrad), XYZ-koordinater for hvert cellesenter og XYZ-koordinater for sender- og mottakerposisjonene. En annen tekstfil (.RSD) lagrer RMS residual

og RMS perturbasjon for hver iterasjon. Filen lister også de 50 største residualverdiene ($t_i^{\text{obs}} - t_i^{\text{pre}}$) for hele datasettet. Denne listen bør benyttes ved korreksjon av gangtidsdata.

Det eksisterer også en metode for å ekskludere data med store residualverdier uten å korrigere ankomsttider. Dette er implementert i programmet 'Data turfer'. Dette programmet analyserer gangtids- og amplitudedefilen (TTA-filen) og graderer registreringene av ankomsttid (se kap. 3.2). Opprinnelig er alle ankomsttider gradert som gode ('G____' i TTA-fil). Dersom data ikke passerer en konsistensundersøkelse, legges følgende bokstaver til 'G' i TTA-filen;

L - lengder er feil (dersom lengde er større enn 50 m).

T - inkonsistent ankomsttid (se 'Soft', 'Medium' og 'Hard' under).

D - inkonsistent dispersjonsverdi (indikert hvis $T_2 \leq T_1$ eller hvis T_2 ikke er registrert).

A - inkonsistent amplitudeverdi (indikert hvis $T_2 \leq T_1$ eller hvis T_2 ikke er registrert).

T_1 og T_2 er henholdsvis førsteankomsttid og periode.

Det er tre innstillinger i 'Data turfer'; 'soft', 'medium' og 'hard'.

'Soft': Data som avviker mer enn 3 ganger standardavviket fra gjennomsnittlig verdi (T_1 , dempning og dispersjon) blir gradert og ignorert ved den tomografiske prosesseringen.

'Medium': Data som avviker mer enn 2 ganger standardavviket fra gjennomsnittlig verdi blir gradert og ignorert ved den tomografiske prosesseringen.

'Hard': Data som avviker mer enn 1 ganger standardavviket fra gjennomsnittlig verdi blir gradert og ignorert ved den tomografiske prosesseringen.

Ved å eliminere ekstreme verdier før den tomografiske prosesseringen, oppnås en mer stabil løsningsmodell (Sensors & Software, 1997).

3.3.7 Avledete data

På bakgrunn av de prosesserte tomogrammer av hastighet og dempning, kan det framstilles tomografiske bilder av volumetrisk vanninnhold, porøsitet, ledningsevne og salinitet (Sensors & Software, 1997).

3.3.7.1 Volumetrisk vanninnhold

Volumetrisk vanninnhold (i %) beregnes fra hastighets-tomogrammet. Hastigheten i hver celle i løsningsmodellen konverteres til volumetrisk vanninnhold (θ_v) ved å benytte følgende empiriske formel (Topp et al., 1980);

$$\theta_v = -5.3 + 2.92\left(\frac{c}{v}\right)^2 - 5.5\left(\frac{c}{v}\right)^4 + 4.3 \cdot 10^{-4}\left(\frac{c}{v}\right)^6 \quad (3.18)$$

der c er EM-bølgehastighet i luft/vakuum (0,3 m/ns) og v er hastigheten i celle.

3.3.7.2 Porøsitet

Hastighetstomogrammet benyttes også ved beregning av porøsitet. Dersom en antar at materialet er vannmettet, kan volumetrisk vanninnhold konverteres til porøsitet (ϕ) ved å dividere med 100;

$$\phi = \frac{\theta_v}{100} \quad (3.19)$$

3.3.7.3 Ledningsevne

Både hastighets- og dempningstomogram benyttes ved beregning av ledningsevne. Tomogrammene som benyttes må ha samme celledørrelse. Hastighet (v) og dempning (α) i hver celle konverteres til ledningsevne (σ) ved følgende formel;

$$\sigma = \frac{\alpha}{1.64} \frac{c}{v} \quad (3.20)$$

Ledningsevne angis i mS/m.

3.3.7.4 Salinitet

Også her benyttes hastighets- og dempningstomogrammene. Først benyttes hastighet (v) til å beregne porøsitet (ϕ) for hver celle i løsningsmodellen. Deretter benyttes hastighet (v), dempning (α) og porøsitet (ϕ) til å beregne salinitet etter følgende formel;

$$S = \frac{\sigma}{0.15\phi^2} = \frac{\alpha c}{0.25v\phi^2} \quad (3.21)$$

Salinitet angir totalt antall ioner i løsning (i ppm).

3.4 Utskrift av tomogram

Det Windows-baserte programmet TRANSFORM (Fortner Research LLC) benyttes ved utskrift av prosesserte tomogram

Ved start av programmet, laster man først inn den fila som man vil presentere. Filene har følgende 'etternavn', alt etter hvilken type data de representerer;

VEL – hastighet (velocity)

ATR – dempning (attenuation)

DSP – dispersjon (dispersion)

WTC – volumetrisk vanninnhold (volumetric water content)

POR – porøsitet (porosity)

CND – ledningsevne (conductivity)

SAL – salinitet (salinity)

Etter innlasting av fil, vises data i et regneark med dybdeverdier i første kolonne og horisontal posisjon langs første rad. Data kan skrives ut i celleformat eller som et glattet bilde der celleverdiene er interpolert. Cellene blir fordelt etter en fargeskala som kan endres. Ved utskrift i celleformat plottes hver enkelt celle i datasettet med en farge som representerer verdien i cellen. Fargeskala med verdier vises under tomogrammet. Tomogrammet viser dyp og avstand mellom borehullene langs aksene. Utskrift av glattet bilde er framkommet ved interpolasjon av celleverdier. Interpolasjon resulterer i et glattere tomogram som er lettere å tolke. Celleformat-tomogrammet kan benyttes for å lokalisere eventuelle 'falske' anomale celler (se kap. 3.3.4).

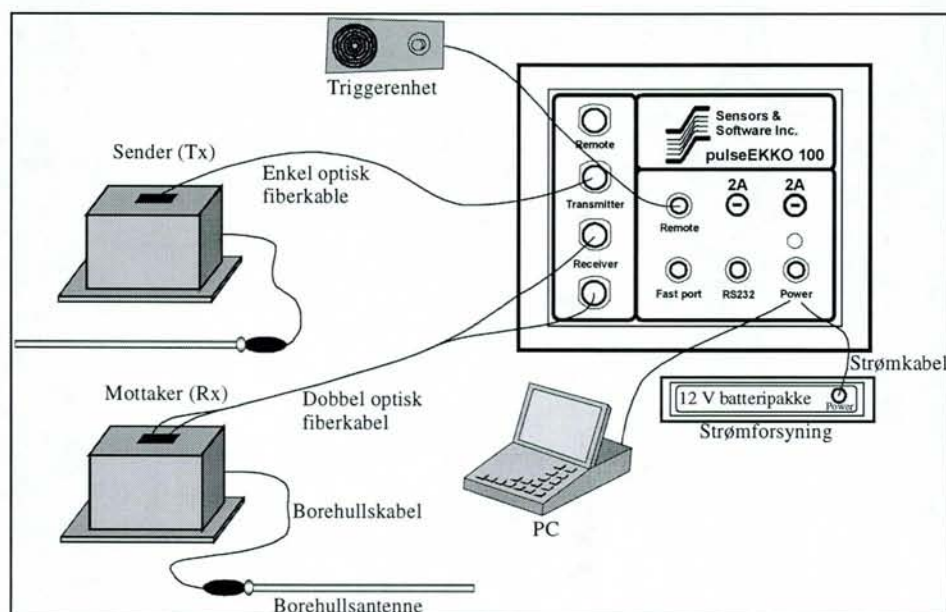
Dersom vi har noen få celler med ekstremt lave eller høye verdier, vil disse oppta en for stor andel av den anvendte fargeskala, og det er vanskelig å skille ut detaljer i store deler av tomogrammet. Dette kan endres ved å utelukke ekstremverdier fra tomogrammet. Vi kan se forde-

lingen av verdier og deres fargekode ved å se på histogrammet for bildet. Øvre og nedre grense for fargeskalainndeling kan da innsnevres, slik at vi utelukker ekstremverdiene. Fargeskalaen blir da fordelt på et mindre intervall i tomogrammet, slik at en lettere ser detaljer.

Ved presentasjon av prosessert tomogram er det hensiktsmessig å presentere en matrise som viser hvor mange strålebaner som går gjennom hver celle (dekningsgrad). Celler med lav dekningsgrad kan da tillegges liten vekt ved tolkningen.

4 EKSEMPEL PÅ BOREHULLSTOMOGRAFI, BLEIKVASSLI

I forbindelse med NGUs arbeider for gjenåpning av Bleikvassli Gruber ble det foretatt kjerneboring for kartlegging av sprekker. I alt fire av borehullene (BH6, 7, 8 og 9) ble boret vertikalt med en innbyrdes avstand på ca. 20 m for at de kunne brukes ved målinger av georadar borehullstomografi (se kartbilag –01). Dessverre var høydeforskjellen mellom borehullene 6 og 8 og 7 og 9 for stor til at det kunne måles mellom disse. Mellom borehullene 8 og 9 var dempingen for stor til at en fikk registrert ankomsttider. Seinere inspeksjon av borekjerner avdekket flere soner med godt elektrisk ledende grafitt, og disse forklarer trolig den kraftige dempingen. Av i alt seks muligheter for tomografisk analyse var det bare målinger mellom borehullene 6 og 7 som ga gode data. Begge disse borehullene var tørre under måling, slik at refleksjoner/refraksjoner fra grunnvannsspeil ikke ble registrert. Kartbilag –01 viser sprekker i dagen i nærheten av borehullene. Disse er for en stor del tolket å være nær vertikale.



Figur 16: Komponenter i målesystem for borehullstomografi.

4.1 Utstyr

Georadaren som ble benyttet er digital og av typen pulseEKKO 100 (Sensors & Software Inc, Canada). Det ble benyttet 1000 V sender og 100 MHz borehullsantenner. For VRP-målingene ble det benyttet en 100 MHz bakkeantenne. Lengden på antennekablene var 30 m, med 28 m anvendbar lengde. Komponentene i målesystemet er vist i figur 16.

4.2 Datainnsamling

For å kunne beregne riktige gangtider mellom sender- og mottakerantenne, ble det først foretatt nulltids-kalibrering (se kap. 3.1). Det vil si at vi må finne nøyaktig tidspunkt for utsendelse av bølgepuls. Dette ble gjort ved å plassere sender- og mottakerantenne i luft over borehullene 6 og 7, og benytte prosedyre som er skissert i kap. 3.1.

Ved alle målingene mellom de to borehullene var opptakstiden 600 ns, og det ble benyttet et samplingsintervall på 0,8 ns. Avstanden mellom borehullene i overflaten er 21,1 m. Det ble foretatt 16 summerte registreringer ('stacks') ved hver måling. Det er ikke utført avviksmålinger i borehullene, slik at vi må anta konstant avstand mellom borehullene mot dypet. For framtidige målinger bør en være oppmerksom på viktigheten av å kjenne eksakte koordinater for hver georadarposisjon, fordi avstanden mellom sender- og mottakerposisjoner inngår i uttrykkene for beregning av hastighet og dempning.

4.3 Prosessering

Det første som ble utført etter innsamling av data var sammenslåing av filer (se kap. 3.1). Deretter ble programmet PICKER kjørt for registrering av førsteankomsttid og periode (se kap. 3.2). Programmet MIGRATOM (kap. 3.3) ble kjørt for tomografisk prosessering. Det ble benyttet en cellestørrelse på ca. 1 x 1 m. Både gjennomsnittlig og lagdelt modell ble anvendt ved prosesseringen. Det ble benyttet maksimalt 20 iterasjoner. Absolutt og inkrementell toleranse ble satt til hhv. 0,1 og 0,01. Etter tomografisk prosessering og foreløpig presentasjon av data (ved programmet TRANSFORM) ble noen 'falske' anomalier identifisert. PICKER ble kjørt på nytt og ankomsttider ble korrigert med støtte fra residualfilen (.RSD) som viste de 50 største residualverdier.

4.4 Resultater

Beregnete hastigheter basert på ZOP-målinger mellom borehullene 6 og 7 er vist i databilag 1. Prosesserte tomogram fra MOG-målinger mellom borehull 6 og 7 er presentert i databilag 2-11. Indikerte sprekker ved boringene og resultater fra vanntapsmålinger for borehullene 6 og 7 er vist i databilag 12 og 13. Listing av tekstfiler fra prosesseringen av hastighetstomogrammet basert på gjennomsnittlig startmodell er vist i tekstbilag 1 og 2. For hastighet, dempning og dispersjon er det presentert resultater som både er basert på en gjennomsnittlig og horisontalt lagdelt startmodell. Dette er gjort for å undersøke om prosesseringen har konverget mot en konsistent løsning. Retningen på nær vertikale sprekker som er observert i dagen går nesten vinkelrett på det vertikale planet (tomogramsnittet) mellom borehullene 6 og 7 (se kartbilag -01).

4.4.1 ZOP-måling, BH6-7

Resultatet fra ZOP-målingene (databilag 1) viser gjennomsnittlige hastigheter mot dypet mellom borehullene. Hastighetene er beregnet på bakgrunn av førsteankomsttider og avstand mellom borehullene (21,1 m). Det er i tillegg antatt rett strålebane mellom sender og mottaker. Mellom 10,5 og 13 m dyp er det ikke mulig å avlese førsteankomsttid på grunn av for lavt signal/støy-forhold. Det er heller ikke registrert førsteankomsttider mellom 0 og 3 m dyp fordi en metall-casing i borehullene ga kraftig dempning av signalene. Grafen i databilag 1 viser en relativt lav hastighet mellom 8 og 16 m dyp og mellom 21 og 24 m dyp, noe som sannsynligvis indikerer oppsprekking. På grafen er det også vist sprekkefrekvensen i de to borehullene som påvist under boringen. Lav hastighet ser ut til å ha relativt god korrelasjon med høy sprekketetthet, spesielt nær borehull 7. Lav hastighet skyldes trolig at det fortsatt er vann bundet til sprekkeene.

4.4.2 MOG-målinger, BH6-7

Tomogrammer som er produsert på bakgrunn av målingene er vist i databilag 2-11. I hvert bilag vises tre tomogrammer; celleformat, glattet og dekningsgrad. Celleformat-tomogrammet viser sluttmodellen produsert av MIGRATOM. Dette tomogrammet viser cellestørrelsen som er benyttet ved prosesseringen. Cellene er representert ved verdier som angir størrelsen på den parameteren som er beregnet. Disse er fordelt etter en fargeskala. For å lette tolkningen er det i tillegg presentert et glattet tomogram som er produsert på bakgrunn av celleformat-tomogrammet. Det tredje tomogrammet (nederst) viser dekningsgrad.

Databilag 2 og 3 viser hastighetstomogram basert på henholdsvis gjennomsnittlig og lagdelt startmodell. Tomogrammene er svært like, noe som indikerer at tomografi-prosesseringen har konvertert mot en konsistent løsning. Tomogrammene viser fire subhorisontale soner med lav hastighet ($<0,11$ m/ns) som muligens indikerer sprekkesoner. Sonene ved borehull 7 på 7,5-10 m og 20-22,5 m kan korreleres med plasseringen av sprekker påvist ved boring (se databilag 13). Disse to sonene ser ut til å ha en lateral utstrekning på ca. 10 m mot borehull 6. De to andre lavhastighetssonene (13-15 m og 23-25 m) går ut fra borehull 6. For disse sonene er det også lokalisert sprekker langs borehull 6 (databilag 12). En mindre lavhastighetszone sees på 15-17 m dyp nær borehull 7. Også her er det lokalisert sprekker i borehullet. Sprekkene som er observert i overflaten er nær vertikale. Dette indikerer at vi kan ha både et horisontalt og vertikalt sprekkesystem. De vertikale sprekkesystemer kan ikke sees på tomogrammet, trolig fordi de er drenert.

Lavhastighetssoner i øvre høyre og nedre venstre hjørne av tomogrammene er ignorert på grunn av dårlig dekning og store usikkerheter tilknyttet prosesseringen. I tillegg til de subhorisontale lavhastighetssonene sees en svakt skrånende forbindelse mellom lavhastighetssoner mellom 15 m dyp i borehull 7 og 24 m dyp i borehull 6. Helningen er ca. 25° . Denne antas å representere en komponent av retningen på foliasjonen i området. Hastighetsvariasjon langs foliasjonsretningen indikerer anisotropi.

Databilag 4 og 5 viser dempningstomogram for henholdsvis gjennomsnittlig og horisontal startmodell. Også disse tomogrammene er relativt like og indikerer en konsistent løsning. Generelt sees soner med stor dempning ut til å være sammenfallende med lavhastighetssoner i hastighetstomogrammene. Tilsvarende er høyhastighetssoner delvis sammenfallende med soner med liten dempning. Svakt skrånende soner kan representere foliasjon i bergarten.

Dispersjonstomogram er vist i databilag 6 og 7 for henholdsvis gjennomsnittlig og lagdelt startmodell. De skrå soner som er indikert i hastighets- og dempningstomogrammene er langt mer framtrædende for dispersjonstomogrammene. Sonene går trolig parallelt med foliasjonen.

Tomogrammene i databilag 8-11 er avledet av hastighets- og dempningstomogrammene basert på gjennomsnittlig startmodell. Databilag 8 viser volumetrisk vanninnhold ved vannmettet bergart. Databilag 9 viser tilsvarende porøsitet (andel porevolum). Begge parametre er avledet av hastighetstomogrammet og viser høyt volumetrisk vanninnhold og høy porøsitet i lavhastighetssoner. For databilag 9 og 10 er det benyttet informasjon både fra hastighets- og dempningstomogram. Databilagene viser henholdsvis ledningsevne (i mS/m) og salinitet (totalt antall oppløste ioner i ppm). Det er avledet høye verdier for ledningsevne og salinitet for tre av de subhorisontale lavhastighetssonene.

Det er også utført elektriske ledningsevne målinger med pol-pol-konfigurasjon i borehull 6. Disse ble utført på et tidspunkt da fjellet var vannmettet fra ca. 14 m dyp, mens tomografimålingene ble målt etter nedtapping og tørre forhold. Resultater fra ledningsevne målingene er vist i databilag 14 (kun ledningsevne verdier i vannmettet sone er vist). Disse resultatene kan

bare kvalitativt sammenlignes med ledningsevnetomogrammet (databilag 10), på grunn av at sistnevnte ikke er målt direkte, men kun avledet av hastighet og dempning, og at målingene er utført på forskjellige tidspunkt (vannmettet/tørt). Sone med relativt høy ledningsevne opptrer på 14-15 m dyp og kan sees både på tomogram og elektriske målinger og skyldes trolig sprekk i fjell. Mellom 22 og 32 m dyp sees en sone med høy ledningsevne på de elektriske målingene. Denne sonen er ikke så markant på tomogrammet, men en økning i ledningsevne kan dog sees fra 22-23 m dyp. Sonen representerer trolig grafitt. Georadarmålingene er trolig ikke målt dypt nok til å fange opp denne sonen godt nok.

4.5 Diskusjon

Borehullstomogrammene viser ikke de nær vertikale sprekkene som er påvist dagnært. Flere tilsynelatende horisontale soner med lav hastighet og høy dempning kan sees på tomogrammene og kan indikere et horisontalt sprekkesystem. På grunn av at en kun har ett snitt gjennom sonene, behøver de nødvendigvis ikke å være horisontale. En mulig forklaring på at de vertikale sprekkene ikke kan sees på tomogrammene er at de er helt drenerte, mens det langs de tilsynelatende horisontale sprekker fortsatt kan være noe vann etter nedtapping. Det er ikke mulig å fastslå om de tilsynelatende horisontale sprekker som er indikert representerer nydannede sprekker i forbindelse med vanninnslag.

Verdier fra elektrisk ledningsevne måling og ledningsevne avledet fra hastighet- og dempningstomogrammene viser generelt store kvantitative avvik (det er kun sett på området mellom 14 og 22 m dyp). Tomogramverdiene (5-17 mS/m) ligger generelt høyere enn de som er beregnet fra elektriske målinger (0,2-1 mS/m), til tross for at sistnevnte målinger ble utført under vannmettede forhold. Det antas at ledningsevneverdier fra de elektriske målingene er mest representative. Kvalitativt er det imidlertid god sammenheng mellom soner med økt ledningsevne. Ledningsevneverdier avledet fra hastighet- og dempningstomogrammene har derfor liten verdi for kvantitativ tolkning.

Dekningsgraden (antall stråler gjennom tomografi-celler) ligger gjennomgående på 25-75. Løsningen på tomogram beregningene ser ut til å gi ekstreme verdier (mulig falske anomalier) i områder (som regel hjørner) der dekningsgraden er mindre enn 10. Denne dekningsgraden anses som et minimum for å oppnå en stabil løsningsmodell.

5 KONKLUSJON

Rapporten beskriver prosedyrer for innsamling av georadar borehullsdata til bruk i framstilling av tomografiske bilder. En detaljert beskrivelse av prosessering av slike data er også presentert. Prosedyrene er illustrert ved resultater fra testmålinger mellom to borehull ved Bleikvassli gruve.

Innsamling av data for borehullstomografi er en relativt tidkrevende prosess, og EM-signaler fra radarantennene har forholdsvis liten rekkevidde. Relativt store datamengder må samles inn for å få en konsistent løsning. Prosessering av data er også omfattende, spesielt registrering av førsteankomsttider og periode. Det er også flere fallgruver tilknyttet registreringen av disse. Fordelene ved borehullstomografi er at det oppnås et detaljert todimensjonalt bilde av hastighet, dempning og dispersjon i mediet mellom borehullene. Kvalitativt vil disse bildene avtegne strukturer og lagdeling i mediet. Kvantitativt kan bildene si noe om mediets beskaffenhet, for eksempel grad av oppsprekking, ioner i løsning, vanninnhold osv.

Testmålinger mellom to borehull ved Bleikvassli gruve har avdekket et tilsynelatende subhorisontalt oppsprekkingsmønster som er bekreftet ved boringer. I tillegg indikeres foliasjonsretning i bergarten mellom borehullene. Sprekker som er observert på bakken er vesentlig steiltstående. Dette kan indikere to sprekkesystemer; ett vertikalt og ett horisontalt, der de vertikale sprekkenes er drenert.

6 REFERANSER

- Berryman, J. G. 1991: Lecture notes on nonlinear inversion and tomography: I. Borehole seismic tomography. *University of California. Lawrence Livermore National Laboratory.*
- Elvebakk, H. & Rønning, J.S. 1998: Sprekkekartlegging med georadar ved Bleikvassli Gruber. *NGU Rapport 98.038.*
- Jackson, M.J. & Tweeton, D.R. 1993: MIGRATOM – Geophysical tomography using wavefront migration and fuzzy constraints: Report of Investigations 9492. *United States Department of the Interior, Bureau of Mines.*
- Lo, T.-W. & Inderwiesen, P. 1994: Fundamentals of seismic tomography. *SEG geophysical monograph series number 6.*
- Sensors & Software 1997: pulseEKKO crosshole data acquisition & EKKO_IMAGE processing. *User's guide version 1.0.*
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. 1980: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research, Vol. 16, No. 3, p. 574-582.*

OPPSUMMERINGSFIL ETTER PROSESSERING AV HASTIGHETSTOMOGRAM (*.SUM)

```
// MIGRATOM 8/19/1998
// start: 11:53:13
// finish: 11:53:48
//
// Input Files:
// travel times: c:\georadar\hormod\P6_7.TTA
// velocity model:
// Output Files:
// velocity model: c:\georadar\hormod\P6_7.VM
// travel times:
// residuals: c:\georadar\hormod\P6_7.RSD
//
// Options:
// # straight-ray iterations: 20
// total # iterations: 20
// time step: 2.99
// anisotropy: 1.000
// wavefront point density : 3.00
// constructive interference parameter: 10
// starting model: Horizontal average
//
// Global Constraints:
// Vmin: 0.01
// Vmax: 0.30
//
@
```

```
0.00 21.10
-26.50 -2.00
```

Distance

Depth

0 0

26 22

0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14
0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
0.10	0.10	0.10	0.09					
0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14
0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10
0.10	0.10	0.10	0.10					
0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13
0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10
0.10	0.10	0.10	0.10					
0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
0.11	0.10	0.10	0.10					
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11
0.11	0.10	0.10	0.10					
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.11					
0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11
0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10
0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12					
0.12	0.12	0.12	0.12					
0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12

0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13
0.13	0.12	0.12	0.12					
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14
0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14
0.15	0.15	0.14	0.13					
0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0.12	0.13	0.13	0.14					
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
0.10	0.10	0.10	0.11					
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10
0.10	0.10	0.10	0.10					
0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12					
0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13
0.13	0.13	0.13	0.13					
0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.13	0.13					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12					
0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13
0.13	0.14	0.14	0.14					
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13
0.13	0.14	0.15	0.16					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.12
0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11
0.11	0.12	0.12	0.12					
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
0.10	0.10	0.11	0.11					
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
0.10	0.10	0.10	0.10					
0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10
0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11
0.11	0.10	0.10	0.09					
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10
0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12
0.12	0.11	0.10	0.09					

Pixel Sampling Density

52	46	30	19	15	12	9	8	8	7	7	7	7
7	6	6	6	7	8	8	8					
66	72	68	55	42	35	30	23	23	21	20	18	17
18	16	17	16	14	13	13	14					
60	72	74	74	67	58	51	41	36	32	30	25	24
22	19	19	19	18	18	18	19					
63	69	74	77	76	72	66	58	51	45	42	41	38
38	35	34	32	33	30	30	32					
54	66	71	73	78	83	79	78	72	64	58	54	49
46	45	40	38	36	33	31	34					
53	56	61	68	74	81	82	84	78	75	67	60	56
49	48	44	40	37	36	32	35					
58	57	53	50	52	57	66	76	76	76	72	67	63
54	52	49	44	41	41	37	39					
41	43	41	40	36	31	28	38	46	54	58	58	59
54	53	46	44	40	38	36	38					
44	46	44	42	44	45	37	32	34	37	42	45	45
42	45	44	42	41	38	36	39					
48	50	50	50	47	48	51	46	43	42	41	46	52
51	43	43	38	35	33	31	35					
49	49	51	51	49	49	50	50	52	53	50	48	51
60	58	59	56	51	42	35	33					
57	55	57	58	57	56	54	52	53	55	58	59	57
60	63	68	70	74	73	69	65					
62	61	61	62	66	67	66	61	58	55	54	55	59
59	62	66	70	72	74	71	72					
64	64	64	65	64	64	69	72	70	66	63	55	56
51	55	55	57	67	75	78	79					
60	60	61	62	63	61	60	67	68	71	71	71	68
65	67	66	60	60	63	72	80					
53	55	63	65	68	70	67	72	70	73	76	80	78
75	81	75	74	74	69	66	63					
49	48	54	58	64	68	70	70	73	75	76	78	82
78	76	78	76	72	71	69	66					
44	42	46	50	54	61	71	71	75	74	74	72	73
80	74	76	74	73	73	72	66					
42	42	44	46	47	52	54	57	66	69	73	73	71
74	72	74	78	75	71	71	63					
30	33	32	33	34	36	41	41	45	50	55	63	64
65	61	61	62	66	65	62	56					
23	19	17	15	12	9	9	10	12	15	19	27	38
47	53	54	53	54	58	59	54					
20	18	17	19	19	18	18	17	16	15	15	14	17
23	32	43	53	54	56	58	56					
19	18	18	20	21	21	22	24	24	23	24	24	23
22	23	23	31	41	47	55	49					
14	14	14	14	15	16	15	17	17	18	19	19	21
20	22	21	21	24	27	32	32					
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4
4	6	8	9	10	13	15	16					

16.210	16.210	16.210	16.210	16.210	16.210	16.210	16.210	16.210
16.210	16.210	16.210						
17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190
17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190	17.190
17.190	17.190	17.190						
18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170
18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170	18.170
18.170	18.170	18.170						
19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150
19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150	19.150
19.150	19.150	19.150						
20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130
20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130	20.130
20.130	20.130	20.130						
21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110
21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110	21.110
21.110	21.110	21.110						
22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090
22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090	22.090
22.090	22.090	22.090						
23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070
23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070	23.070
23.070	23.070	23.070						
24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050
24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050	24.050
24.050	24.050	24.050						
25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030
25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030	25.030
25.030	25.030	25.030						
26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010
26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010	26.010
26.010	26.010	26.010						

Transmitter Coordinates

1	0.000	0.000	2.000
2	0.000	0.000	2.500
3	0.000	0.000	3.000
4	0.000	0.000	3.500
5	0.000	0.000	4.000
6	0.000	0.000	4.500
7	0.000	0.000	5.000
8	0.000	0.000	5.500
9	0.000	0.000	6.000
10	0.000	0.000	6.500
11	0.000	0.000	7.000
12	0.000	0.000	7.500
13	0.000	0.000	8.000
14	0.000	0.000	8.500
15	0.000	0.000	9.000
16	0.000	0.000	9.500
17	0.000	0.000	10.000
18	0.000	0.000	10.500
19	0.000	0.000	11.000
20	0.000	0.000	11.500
21	0.000	0.000	12.000
22	0.000	0.000	12.500
23	0.000	0.000	13.000
24	0.000	0.000	13.500
25	0.000	0.000	14.000
26	0.000	0.000	14.500
27	0.000	0.000	15.000

28	0.000	0.000	15.500
29	0.000	0.000	16.000
30	0.000	0.000	16.500
31	0.000	0.000	17.000
32	0.000	0.000	17.500
33	0.000	0.000	18.000
34	0.000	0.000	18.500
35	0.000	0.000	19.000
36	0.000	0.000	19.500
37	0.000	0.000	20.000
38	0.000	0.000	20.500
39	0.000	0.000	21.000
40	0.000	0.000	21.500
41	0.000	0.000	22.000
42	0.000	0.000	22.500
43	0.000	0.000	23.000
44	0.000	0.000	23.500
45	0.000	0.000	24.000
46	0.000	0.000	24.500
47	0.000	0.000	25.000
48	0.000	0.000	25.500

Receiver Coordinates

1	21.100	0.000	2.500
2	21.100	0.000	3.000
3	21.100	0.000	3.500
4	21.100	0.000	4.500
5	21.100	0.000	5.000
6	21.100	0.000	5.500
7	21.100	0.000	6.000
8	21.100	0.000	6.500
9	21.100	0.000	7.000
10	21.100	0.000	7.500
11	21.100	0.000	8.000
12	21.100	0.000	8.500
13	21.100	0.000	9.000
14	21.100	0.000	9.500
15	21.100	0.000	10.000
16	21.100	0.000	10.500
17	21.100	0.000	11.000
18	21.100	0.000	11.500
19	21.100	0.000	12.000
20	21.100	0.000	12.500
21	21.100	0.000	13.000
22	21.100	0.000	13.500
23	21.100	0.000	14.000
24	21.100	0.000	14.500
25	21.100	0.000	15.000
26	21.100	0.000	4.000
27	21.100	0.000	15.500
28	21.100	0.000	16.000
29	21.100	0.000	16.500
30	21.100	0.000	2.000
31	21.100	0.000	17.000
32	21.100	0.000	17.500
33	21.100	0.000	18.000
34	21.100	0.000	18.500
35	21.100	0.000	19.000
36	21.100	0.000	19.500
37	21.100	0.000	20.000

38	21.100	0.000	20.500
39	21.100	0.000	21.000
40	21.100	0.000	22.000
41	21.100	0.000	21.500
42	21.100	0.000	22.500
43	21.100	0.000	23.000
44	21.100	0.000	23.500
45	21.100	0.000	24.000
46	21.100	0.000	24.500
47	21.100	0.000	25.000
48	21.100	0.000	25.500
49	21.100	0.000	26.000
50	21.100	0.000	26.500

RESIDUALFIL ETTER PROSESSERING AV HASTIGHETSTOMOGRAM (.RSD)

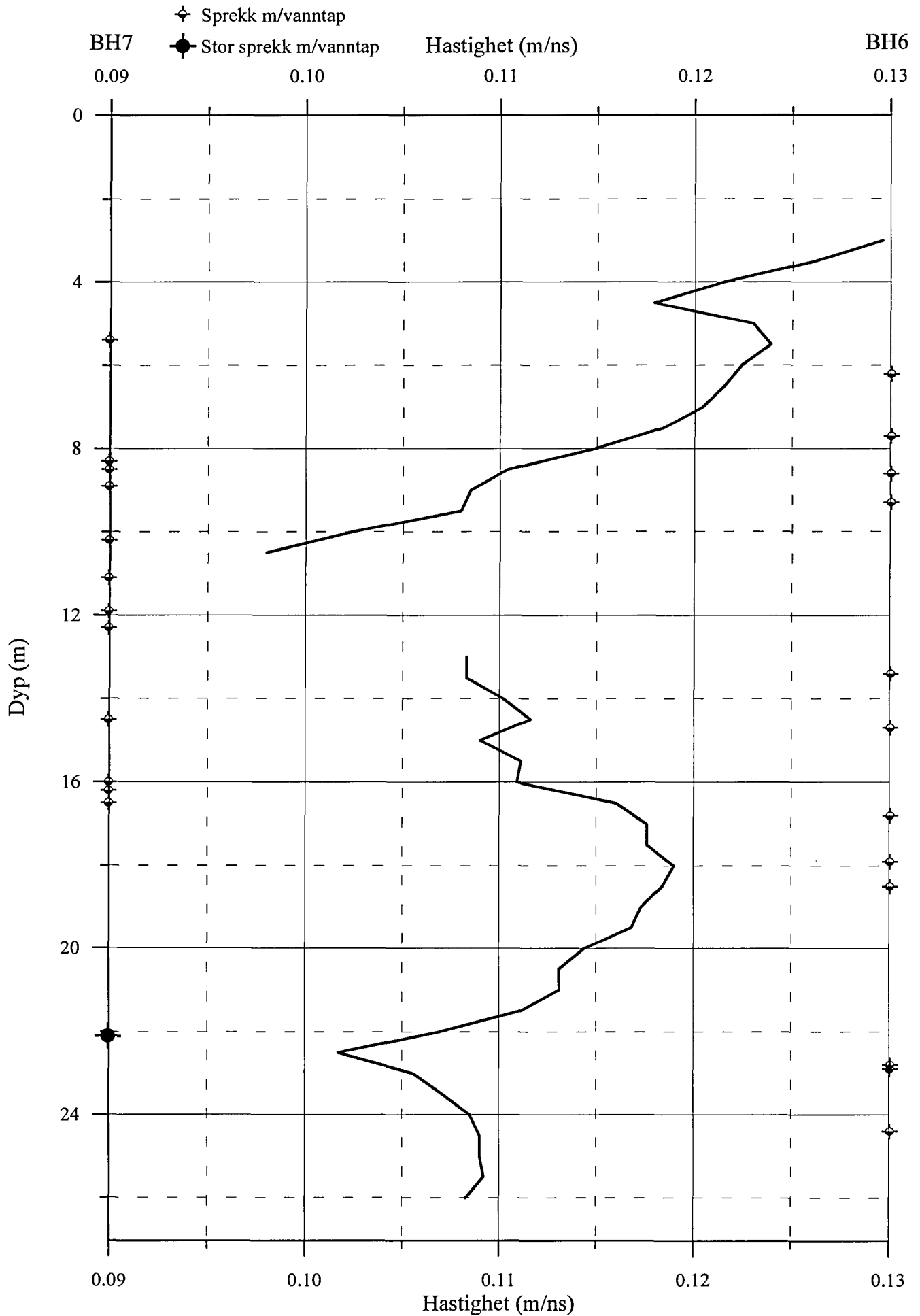
Iteration	RMS residual	RMS perturbation
1	9.20074	0.00000
2	6.75618	0.00213
3	6.02021	0.00306
4	5.59213	0.00371
5	5.29781	0.00423
6	5.07833	0.00467
7	4.90603	0.00506
8	4.76568	0.00541
9	4.64807	0.00572
10	4.54728	0.00602
11	4.45937	0.00628
12	4.38161	0.00653
13	4.31205	0.00677
14	4.24926	0.00699
15	4.19216	0.00719
16	4.13993	0.00739
17	4.09190	0.00758
18	4.04755	0.00775
19	4.00643	0.00792
20	3.96820	0.00809

50 Largest Residuals (may indicate poor pick or typo in .TTA File)

{--Transmitter X,Y,Z--}				{---Receiver X,Y,Z---			measured	calc	residual
0.00	0.00	8.50	21.10	0.00	10.50	197.81	181.00	16.81	
0.00	0.00	18.00	21.10	0.00	15.00	199.89	184.38	15.51	
0.00	0.00	8.00	21.10	0.00	11.00	199.06	184.23	14.83	
0.00	0.00	9.00	21.10	0.00	8.50	199.48	185.22	14.26	
0.00	0.00	9.00	21.10	0.00	12.50	191.55	177.95	13.59	
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	4.50	196.55	183.92	12.64	
0.00	0.00	12.50	21.10	0.00	24.00	216.17	203.87	12.30	
0.00	0.00	16.00	21.10	0.00	14.00	201.15	188.88	12.27	
0.00	0.00	9.00	21.10	0.00	8.00	198.64	186.74	11.90	
0.00	0.00	16.00	21.10	0.00	14.50	197.81	186.05	11.75	
0.00	0.00	17.00	21.10	0.00	15.00	195.30	184.01	11.30	
0.00	0.00	8.50	21.10	0.00	10.00	195.72	184.67	11.05	
0.00	0.00	8.00	21.10	0.00	10.50	197.81	186.77	11.04	
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	15.00	191.96	202.89	-10.93	
0.00	0.00	10.00	21.10	0.00	13.00	193.63	182.88	10.75	
0.00	0.00	12.50	21.10	0.00	23.50	209.91	199.16	10.75	
0.00	0.00	16.50	21.10	0.00	26.50	227.85	217.26	10.59	
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	15.50	191.55	201.79	-10.24	
0.00	0.00	11.50	21.10	0.00	12.50	195.72	185.57	10.15	
0.00	0.00	9.50	21.10	0.00	13.00	191.96	181.83	10.14	
0.00	0.00	20.00	21.10	0.00	15.50	198.22	188.12	10.11	
0.00	0.00	18.50	21.10	0.00	15.00	194.88	185.02	9.86	
0.00	0.00	11.50	21.10	0.00	22.50	204.48	194.79	9.69	
0.00	0.00	18.00	21.10	0.00	15.50	192.80	183.12	9.68	
0.00	0.00	15.50	21.10	0.00	13.50	200.73	191.15	9.57	
0.00	0.00	16.50	21.10	0.00	15.50	192.38	183.04	9.34	
0.00	0.00	13.50	21.10	0.00	21.50	174.85	184.18	-9.33	
0.00	0.00	9.00	21.10	0.00	15.00	179.44	188.72	-9.28	
0.00	0.00	15.00	21.10	0.00	14.50	195.72	186.45	9.27	
0.00	0.00	15.00	21.10	0.00	13.50	199.89	190.63	9.26	
0.00	0.00	17.50	21.10	0.00	15.00	193.21	184.08	9.14	
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	11.50	196.97	187.86	9.11	
0.00	0.00	8.50	21.10	0.00	9.50	195.30	186.50	8.80	

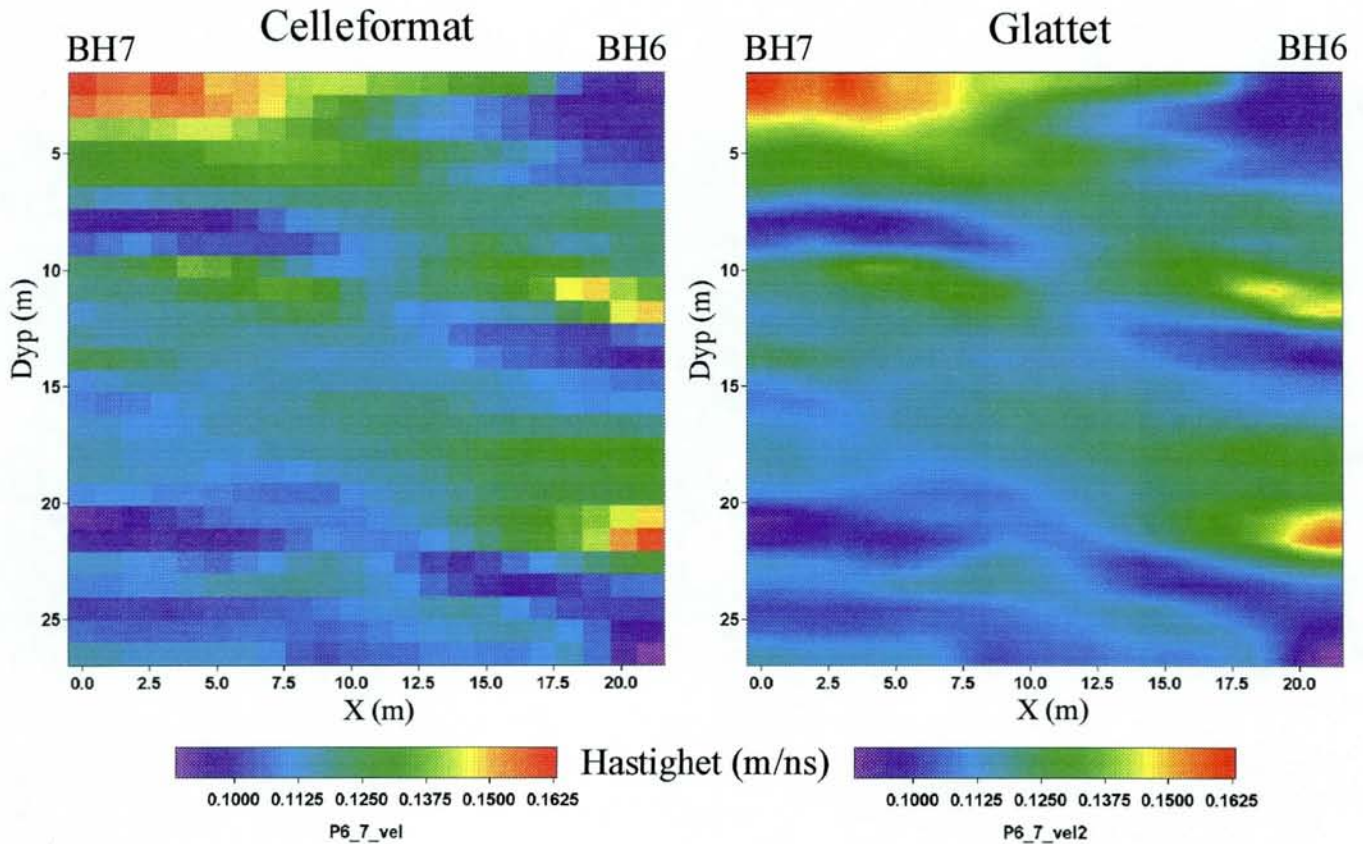
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	11.00	196.55	187.92	8.63
0.00	0.00	15.00	21.10	0.00	14.00	197.39	188.82	8.57
0.00	0.00	12.00	21.10	0.00	23.00	205.32	196.75	8.57
0.00	0.00	19.50	21.10	0.00	15.50	194.47	185.91	8.56
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	14.50	195.30	203.85	-8.55
0.00	0.00	7.50	21.10	0.00	14.00	195.30	203.84	-8.54
0.00	0.00	15.50	21.10	0.00	14.00	197.39	189.02	8.37
0.00	0.00	5.50	21.10	0.00	12.50	177.77	186.08	-8.31
0.00	0.00	3.00	21.10	0.00	16.50	223.26	215.20	8.07
0.00	0.00	17.00	21.10	0.00	15.50	191.13	183.07	8.05
0.00	0.00	10.50	21.10	0.00	13.00	192.80	184.77	8.02
0.00	0.00	21.50	21.10	0.00	20.50	195.30	187.33	7.97
0.00	0.00	21.00	21.10	0.00	23.00	192.38	200.32	-7.94
0.00	0.00	22.00	21.10	0.00	25.00	187.79	195.63	-7.84
0.00	0.00	15.50	21.10	0.00	26.50	230.36	222.54	7.82
0.00	0.00	21.00	21.10	0.00	16.00	201.15	193.34	7.81
0.00	0.00	13.50	21.10	0.00	21.00	175.69	183.48	-7.80

BLEIKVASSLI, hastigheter fra ZOP-målinger mellom borehull 6 og 7

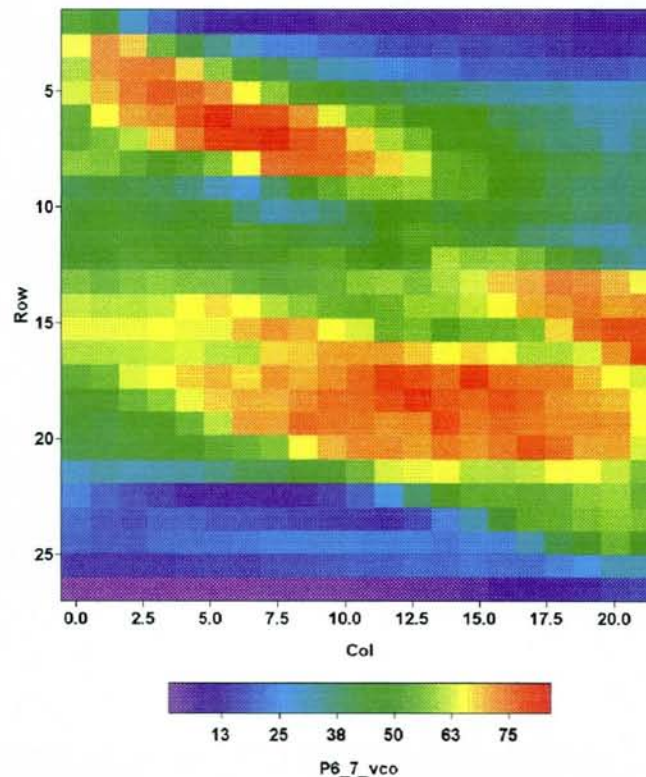


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, hastighetstomogram

Startmodell basert på gjennomsnittsmoell

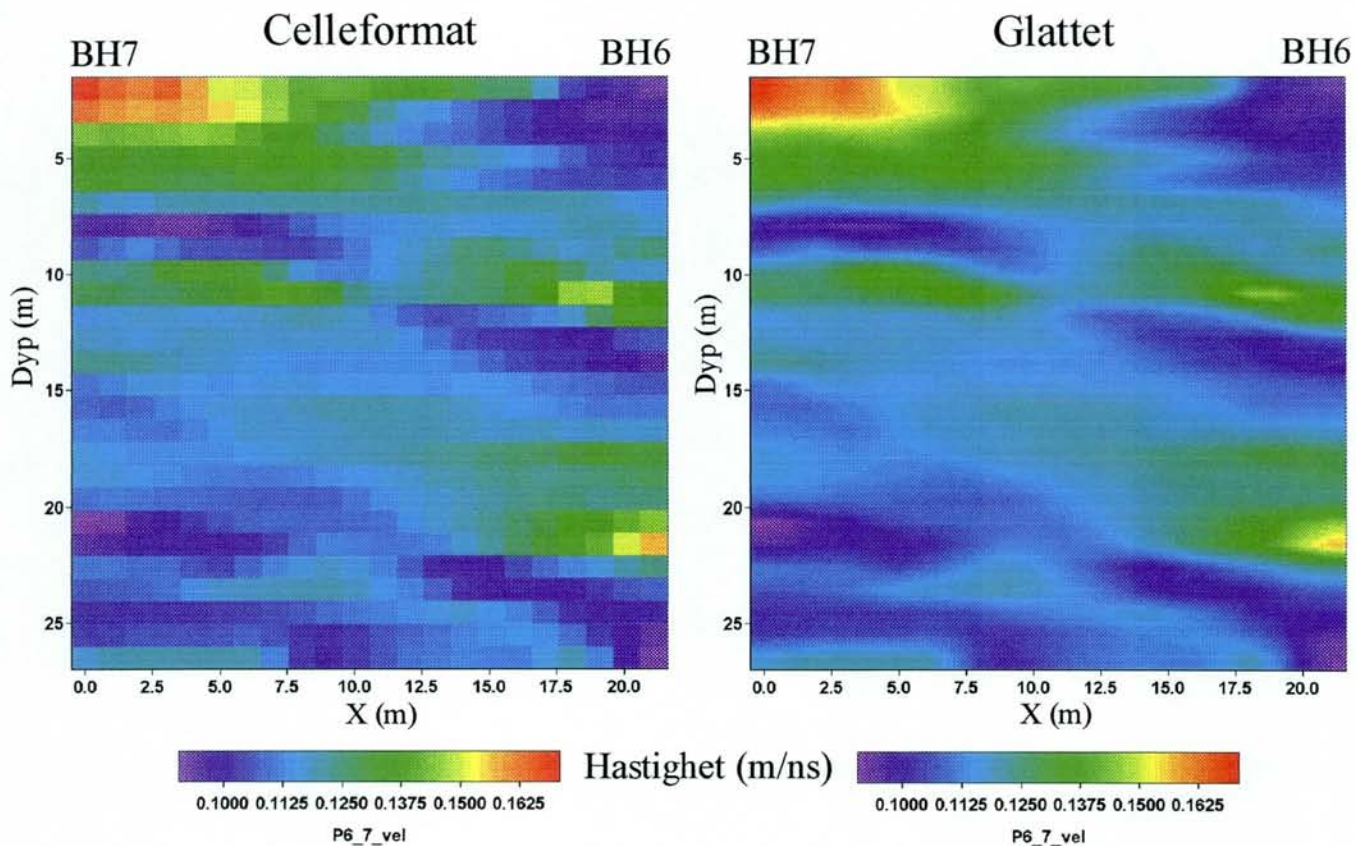


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

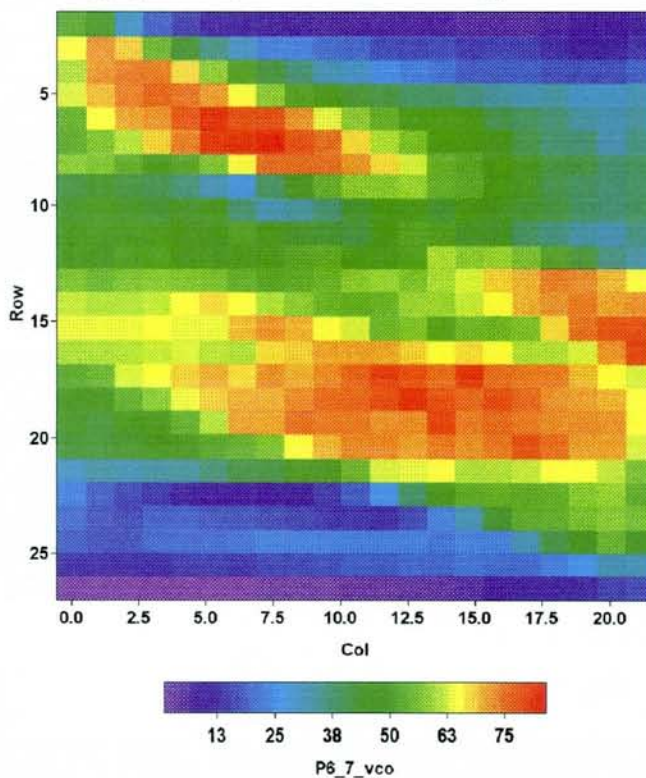


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, hastighetstomogram

Startmodell basert på lagdelt modell

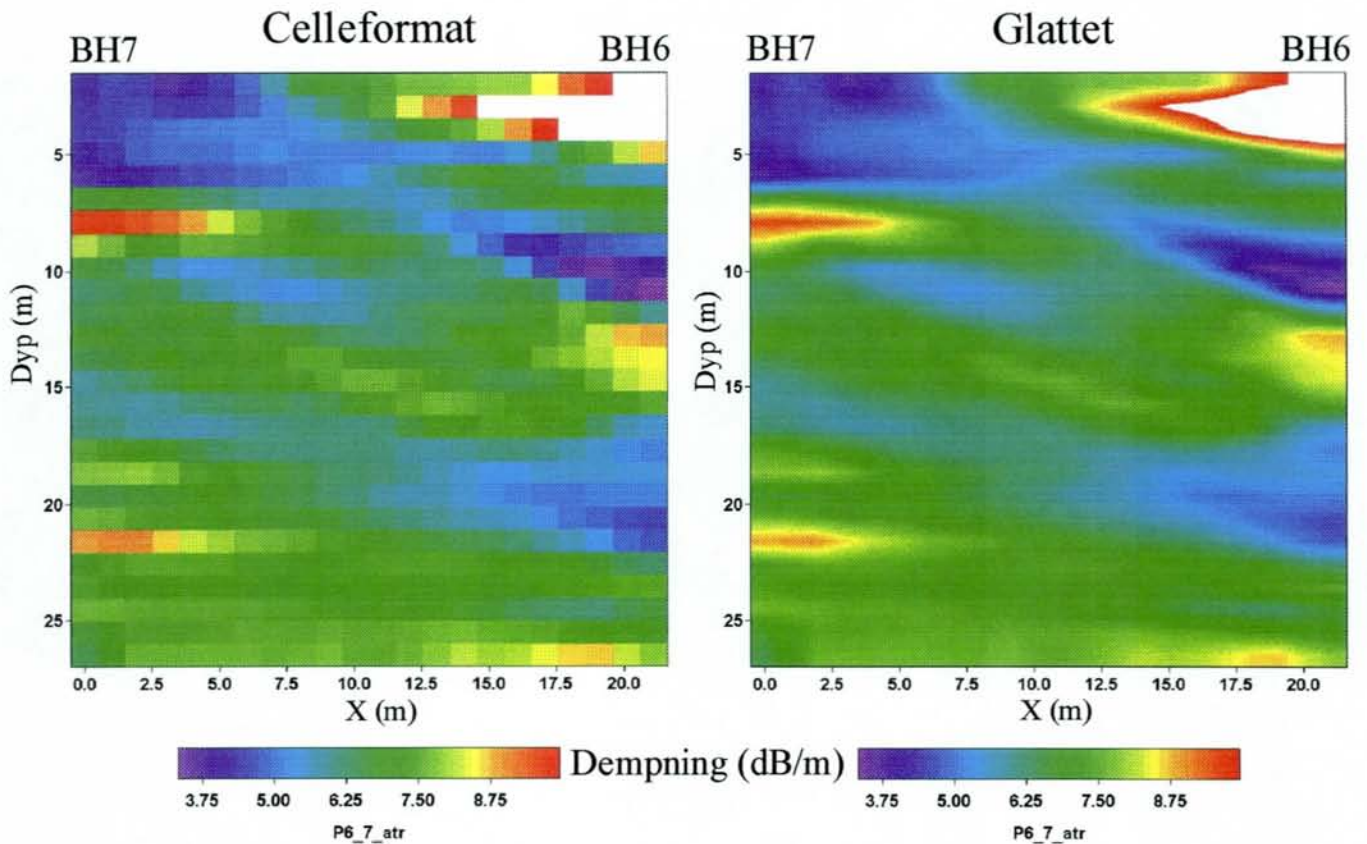


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

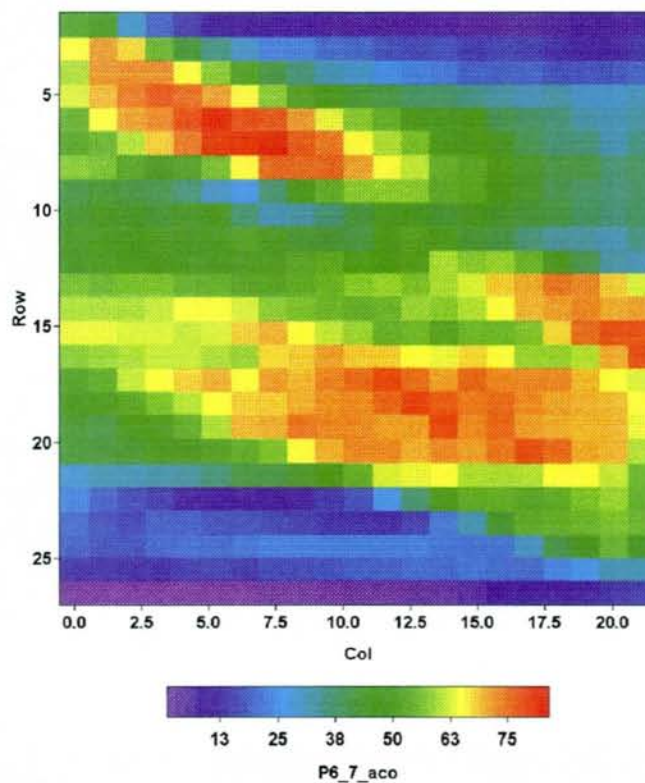


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, dempningstomogram

Startmodell basert på gjennomsnittsmoell

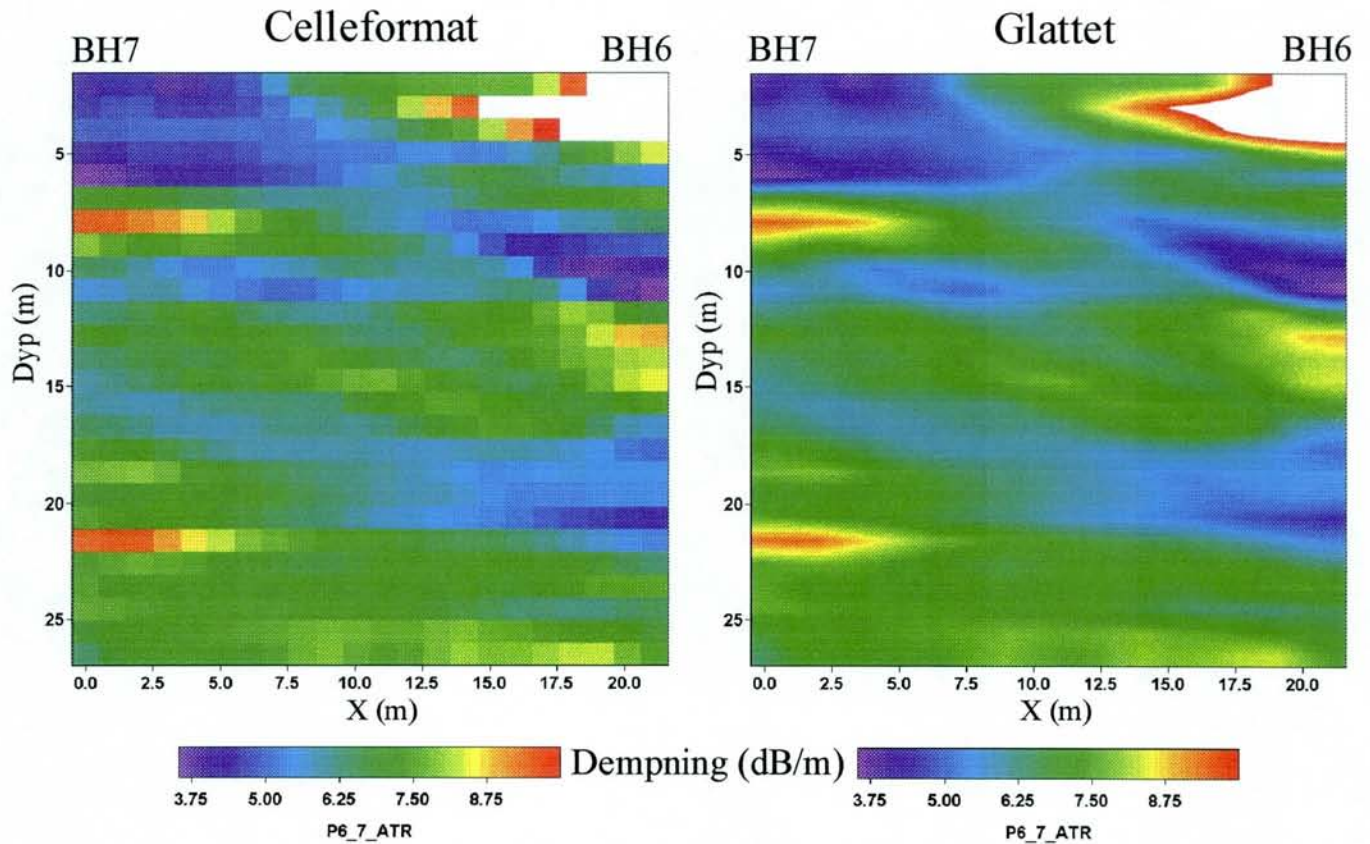


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

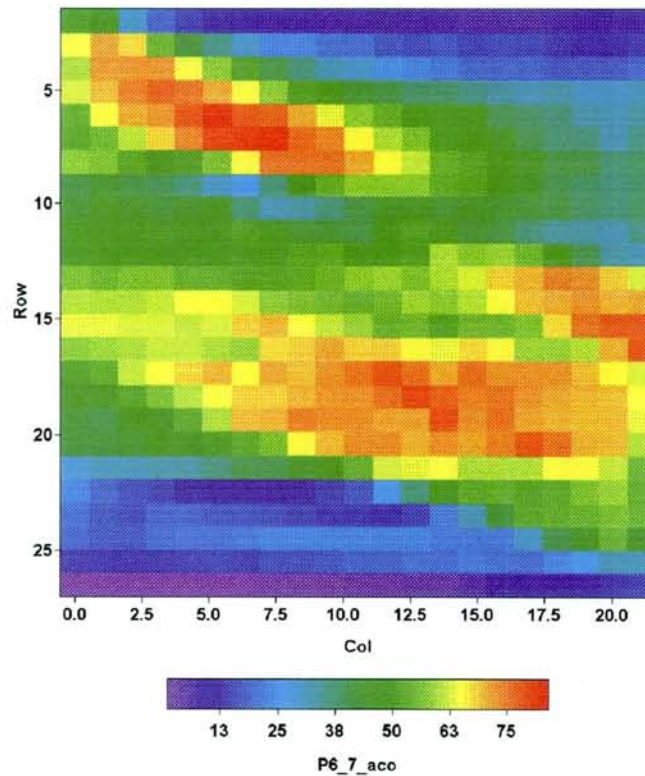


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, dempningstomogram

Startmodell basert på lagdelt modell

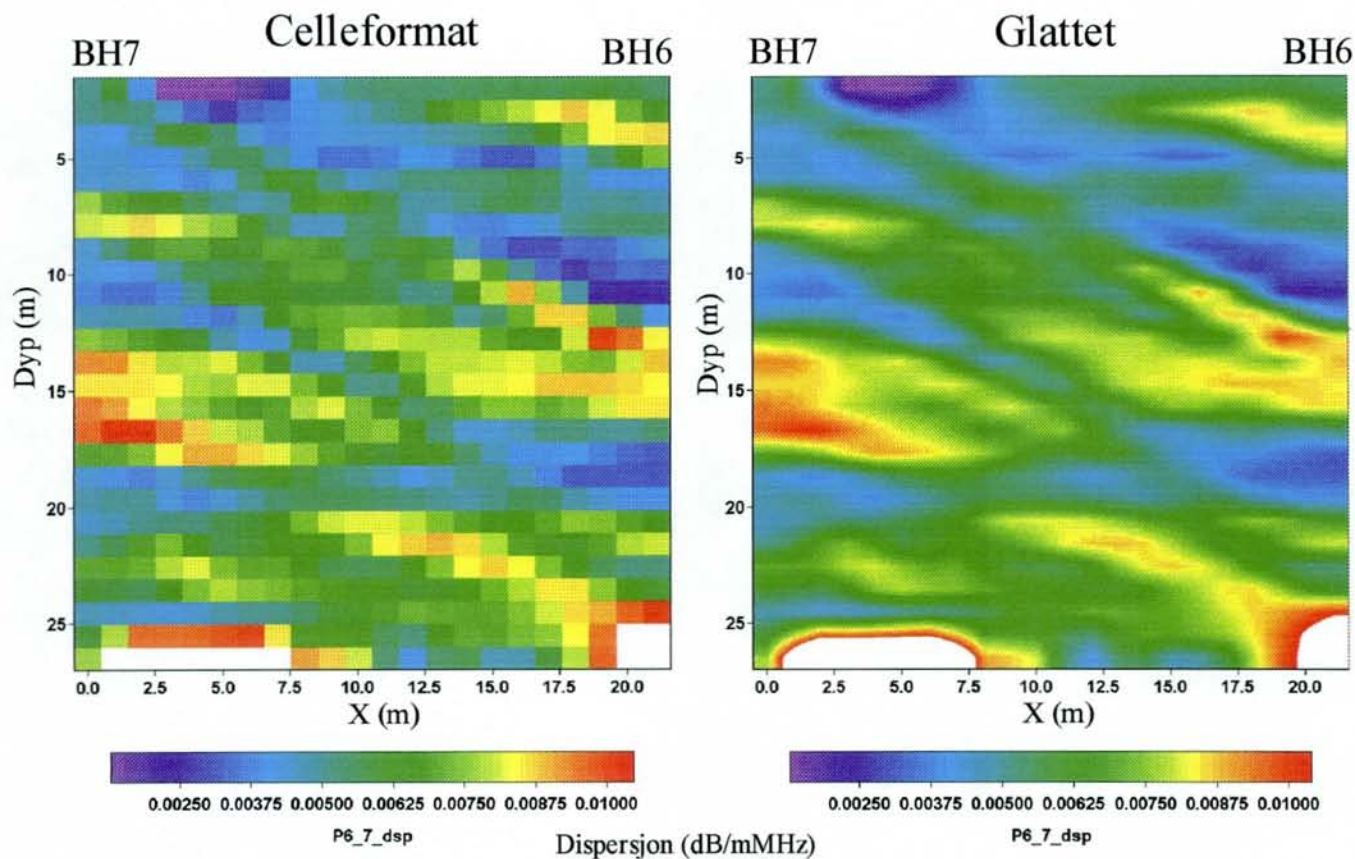


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

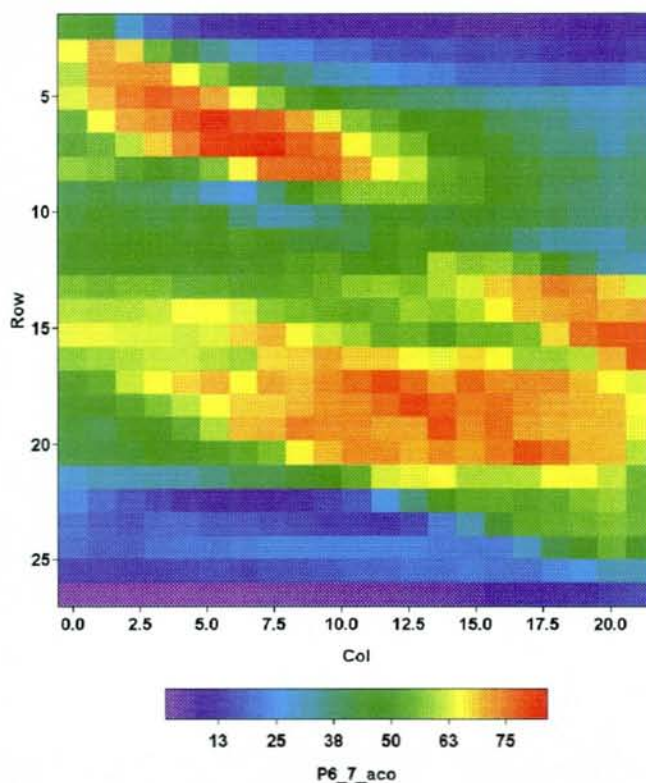


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, dispersjonstomogram

Startmodell basert på gjennomsnittsmoell

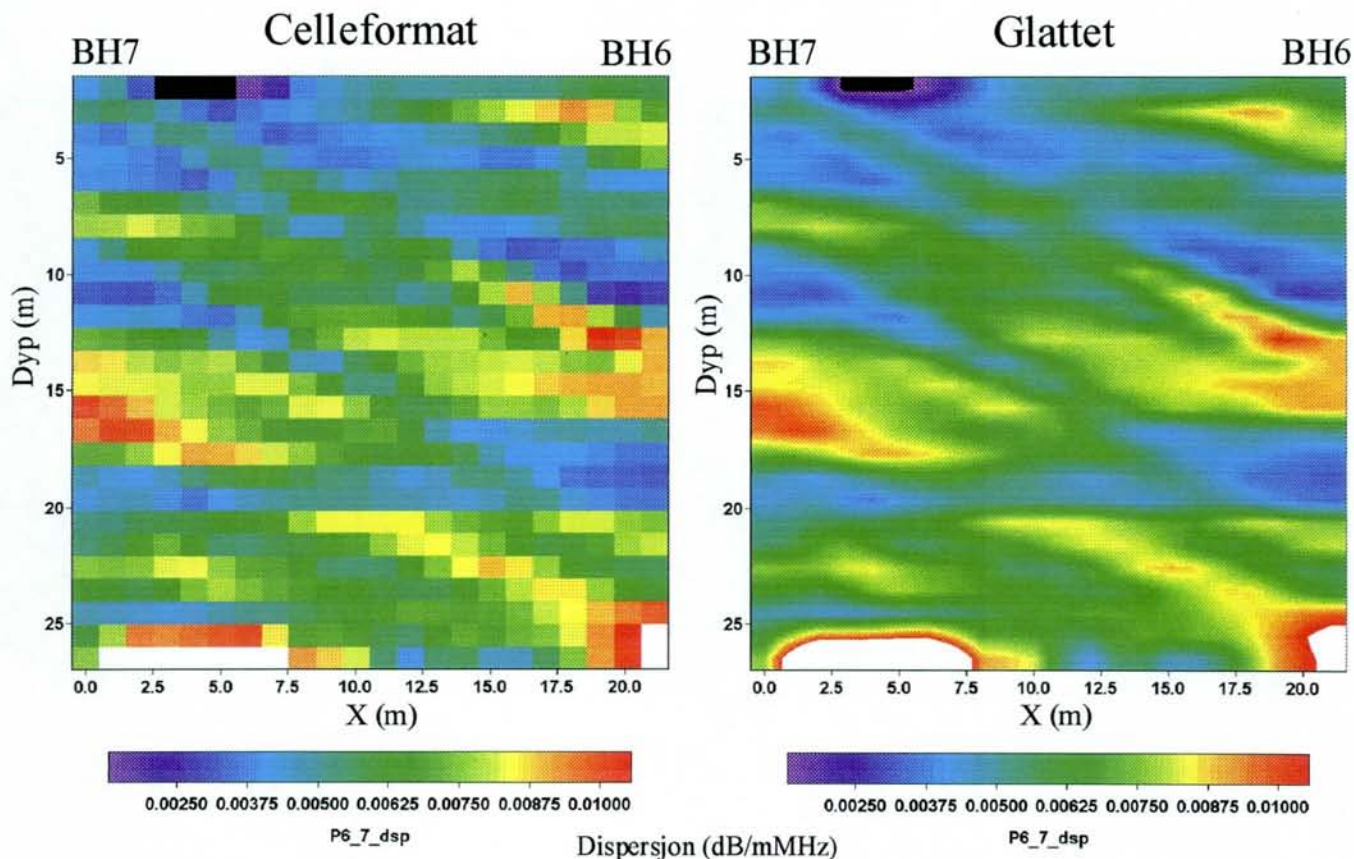


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

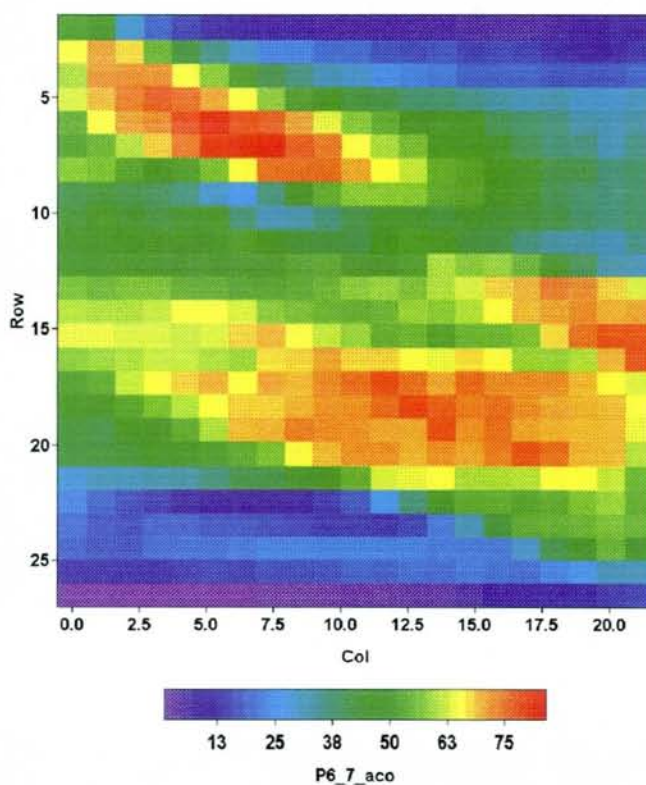


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, dispersjonstomogram

Startmodell basert på lagdelt modell

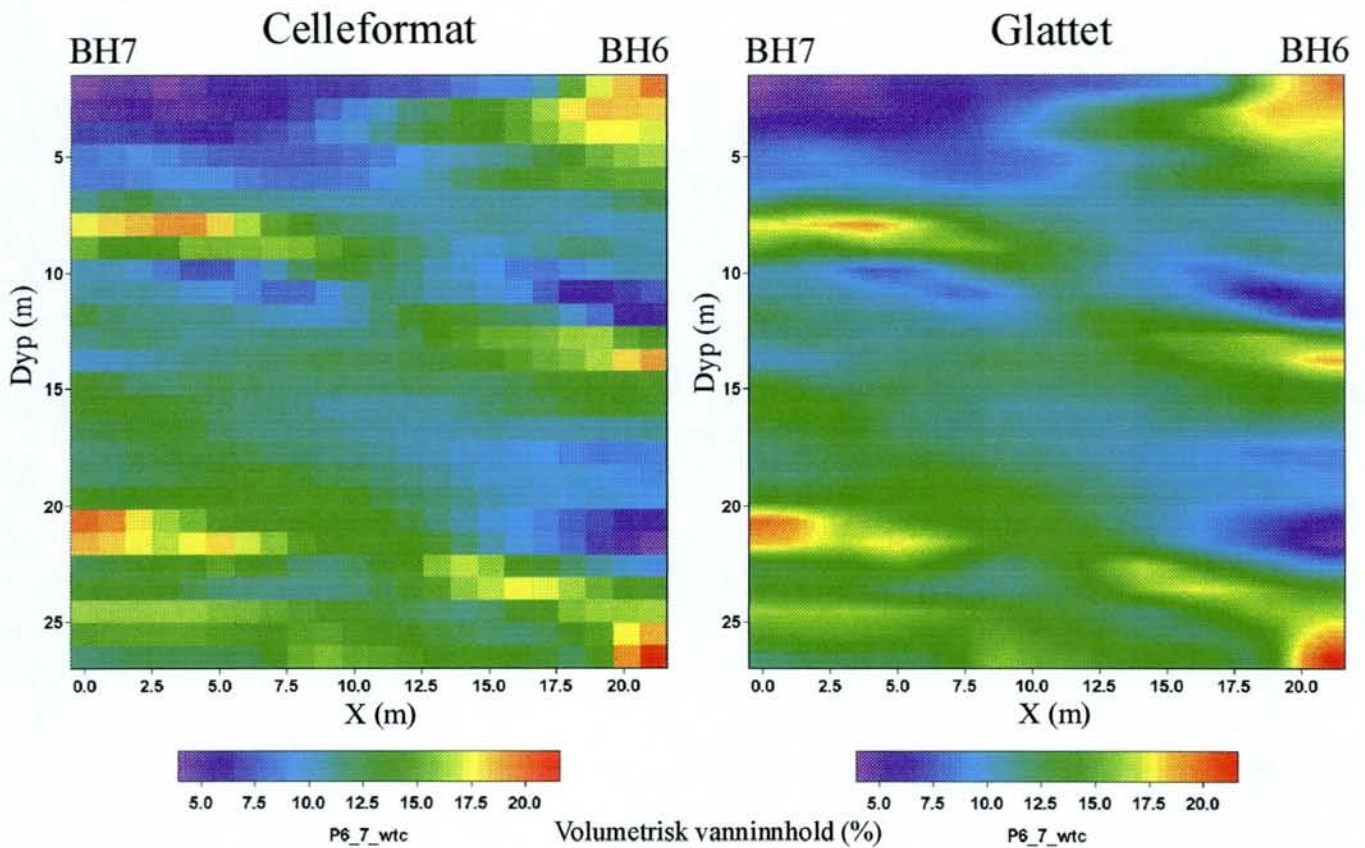


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

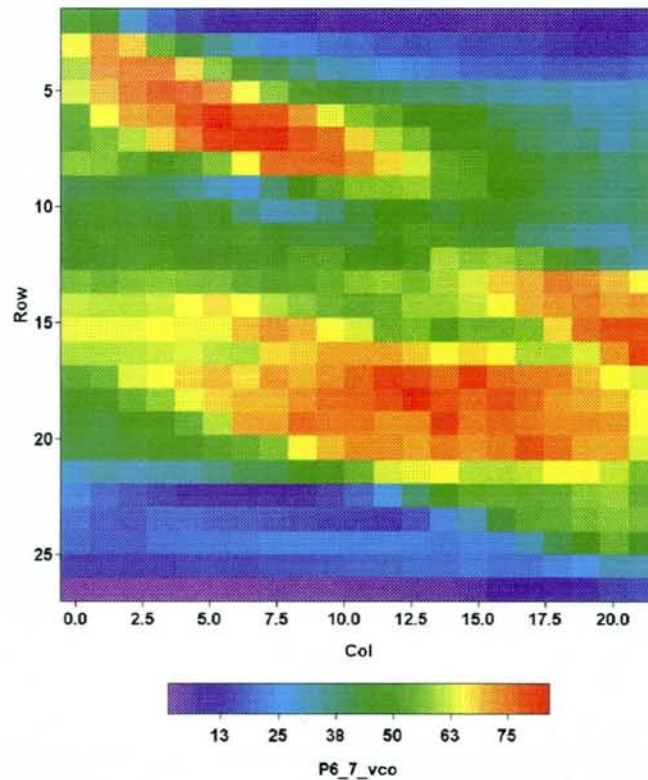


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, volumetrisk vanninnhold

Basert på hastighetstomogram, gjennomsnittlig startmodell

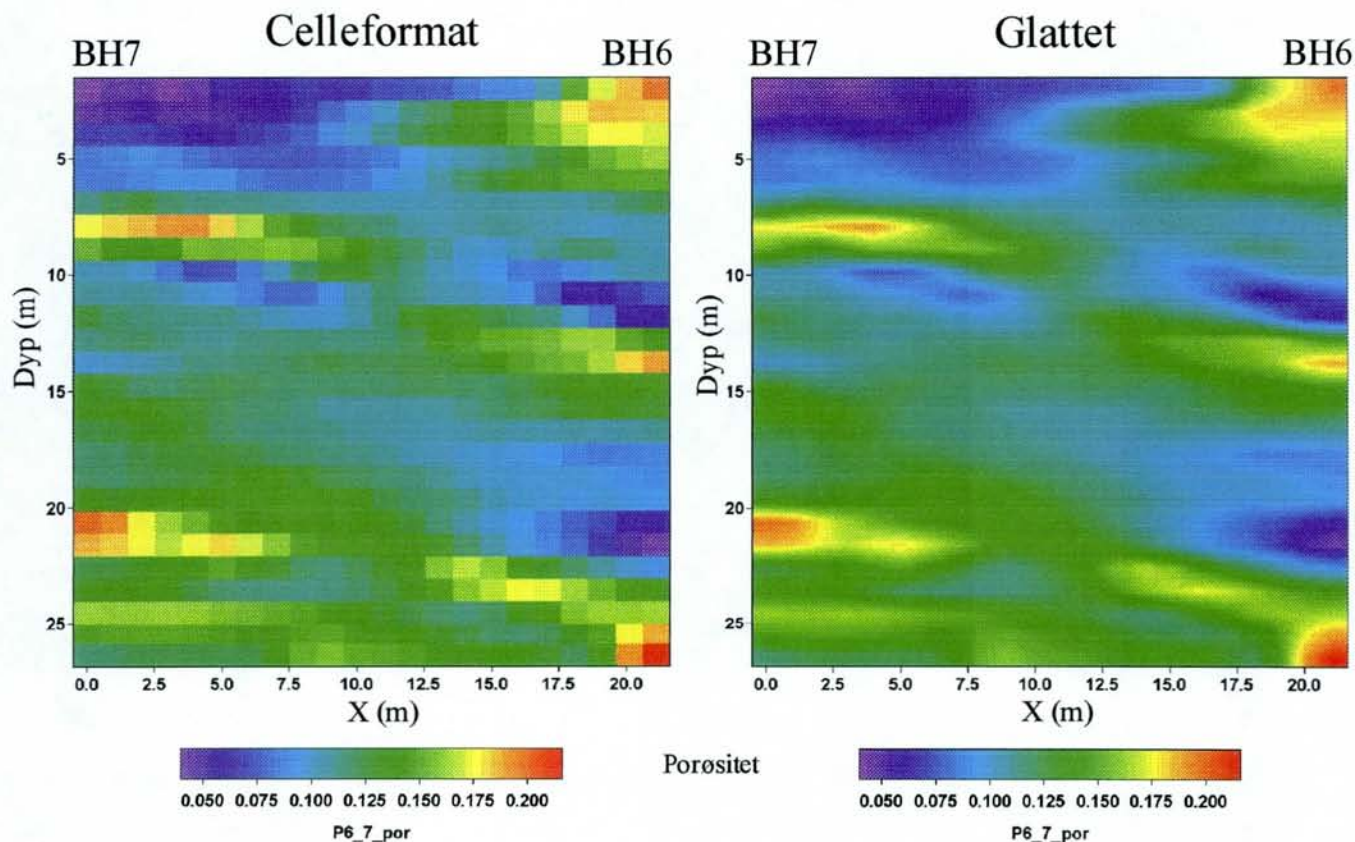


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

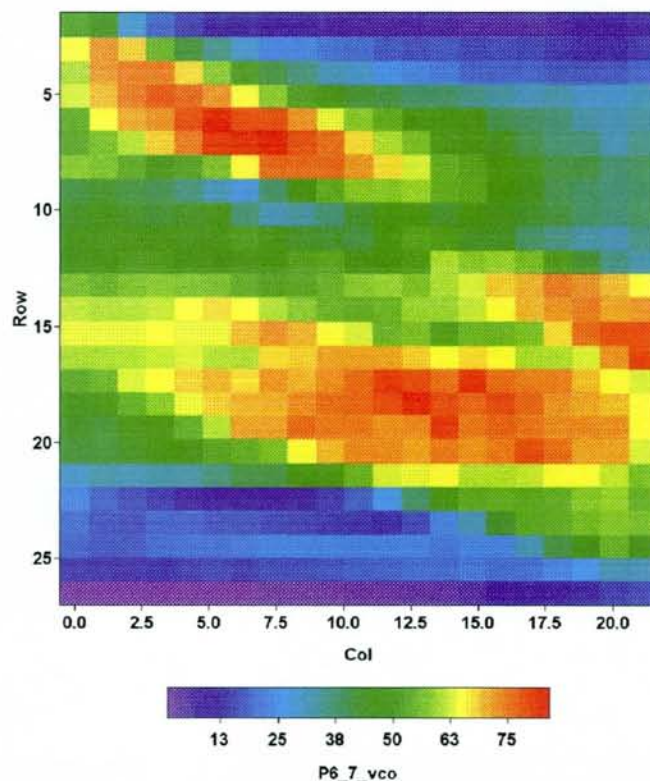


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, porøsitet

Basert på hastighetstomogram, gjennomsnittlig startmodell

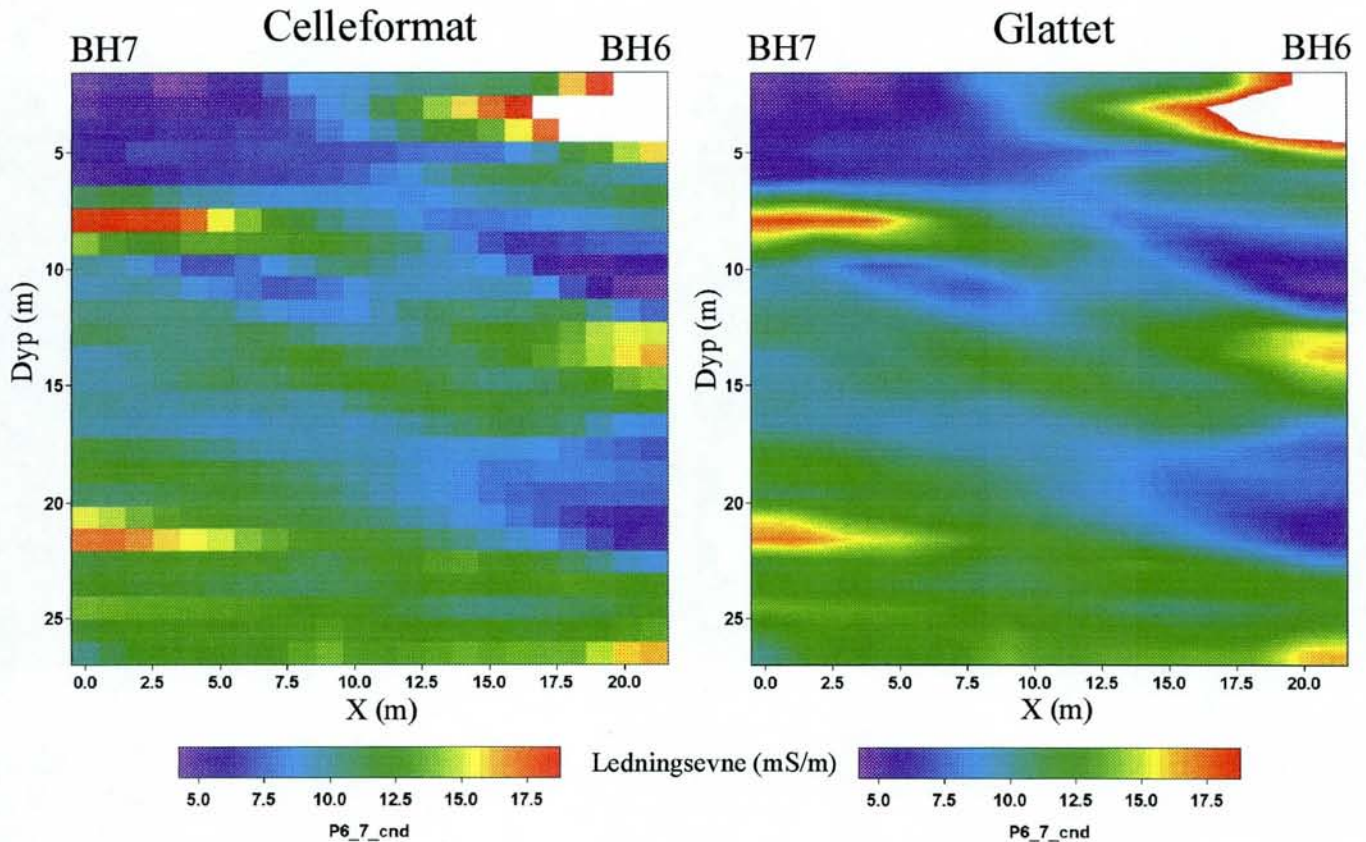


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

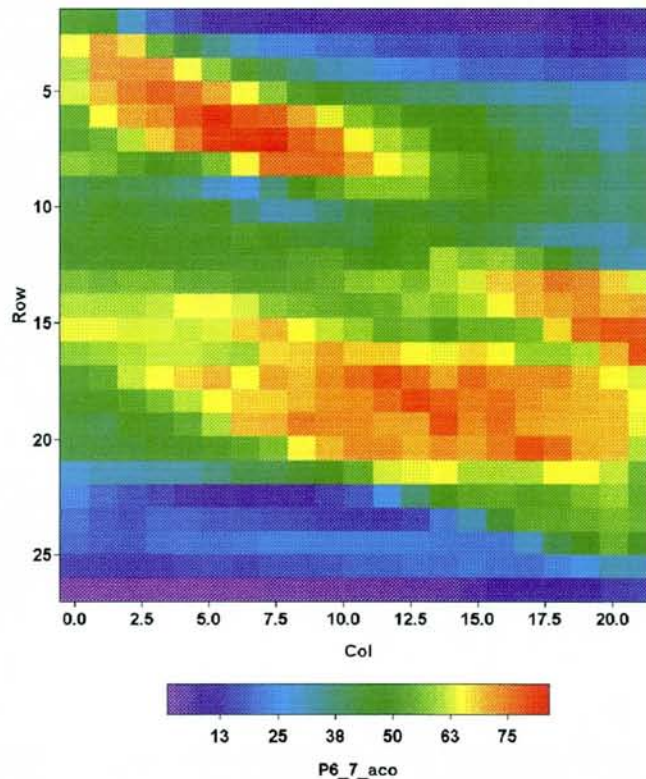


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, ledningsevne

Basert på hastighets- og dempningstomogram, gjennomsnittlig startmodell

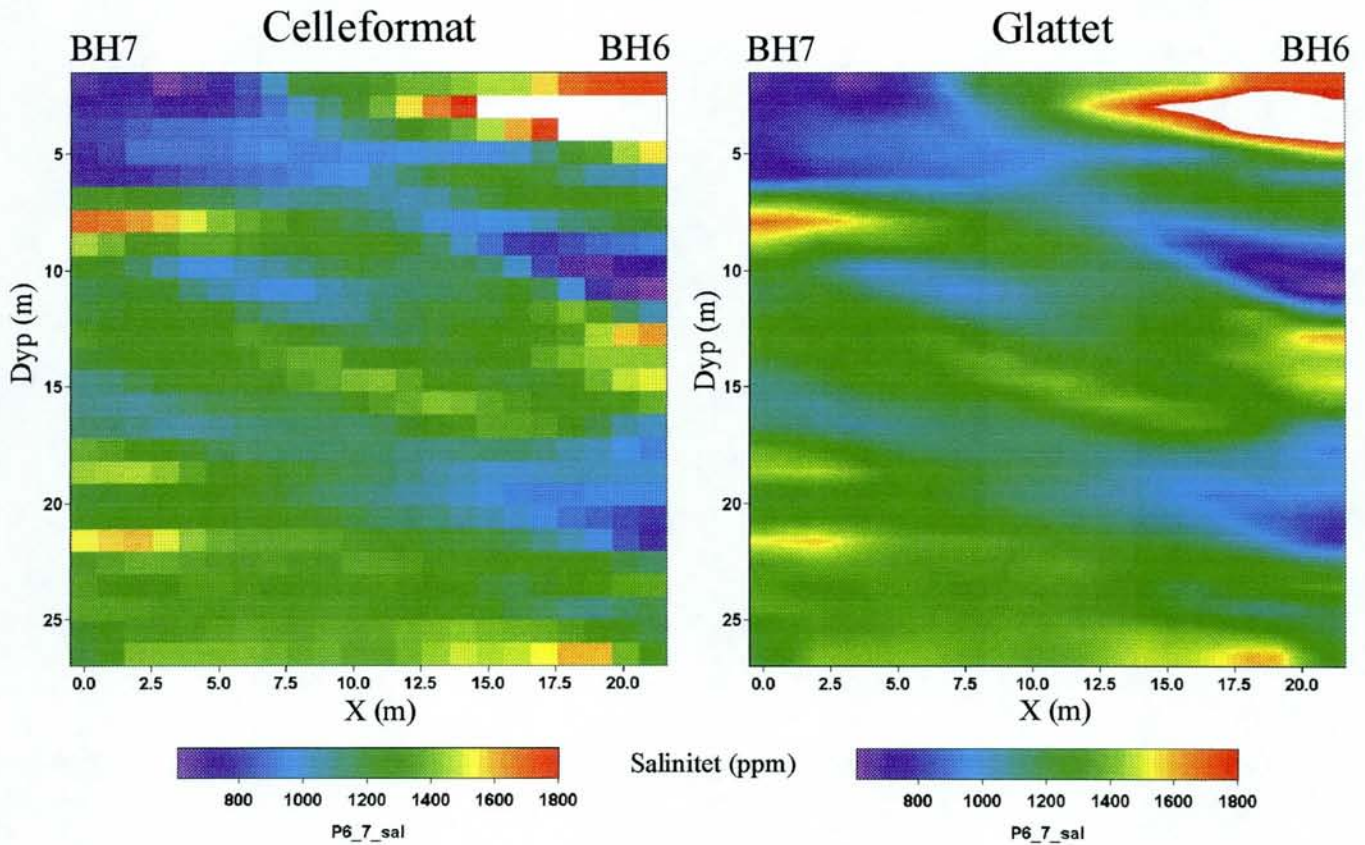


Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)

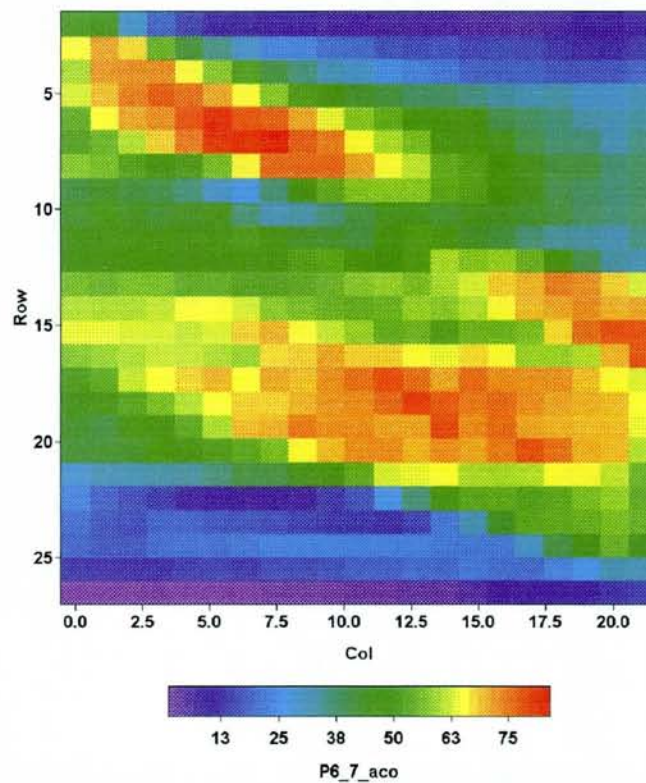


BLEIKVASSLI BH6-7, MOG, salinitet

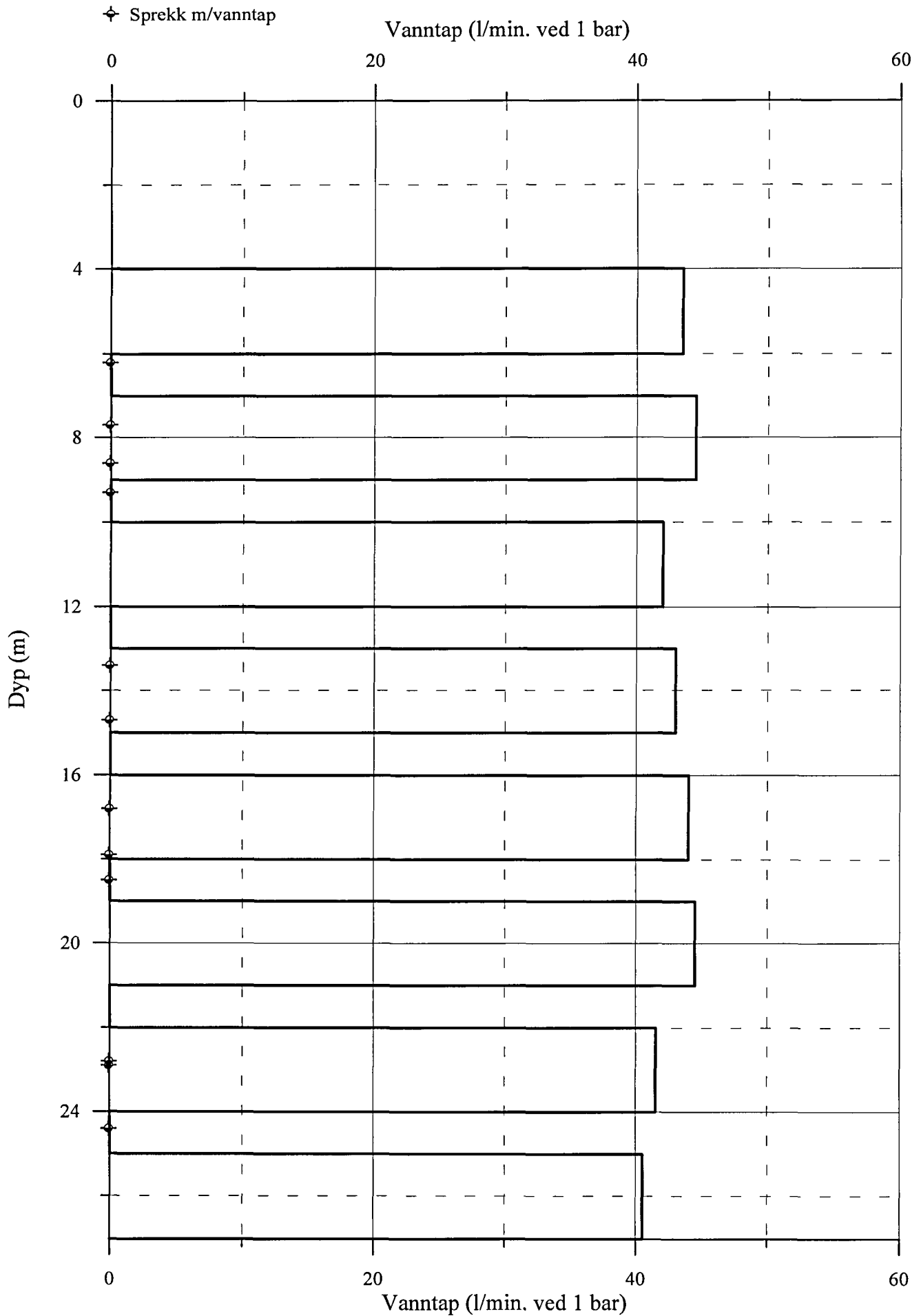
Basert på hastighets- og dempningstomogram, gjennomsnittlig startmodell



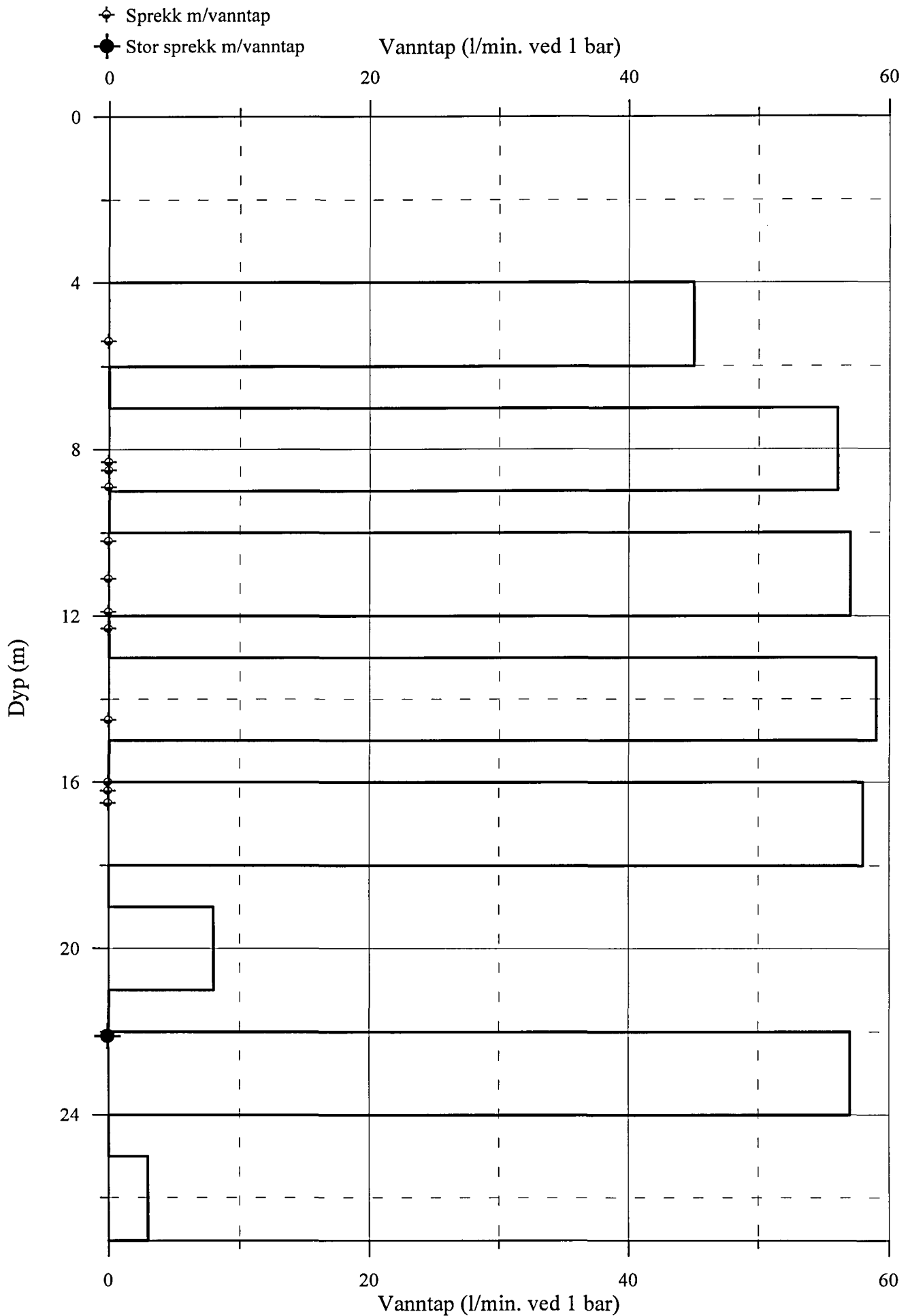
Dekningsgrad (antall stråler gjennom celle)



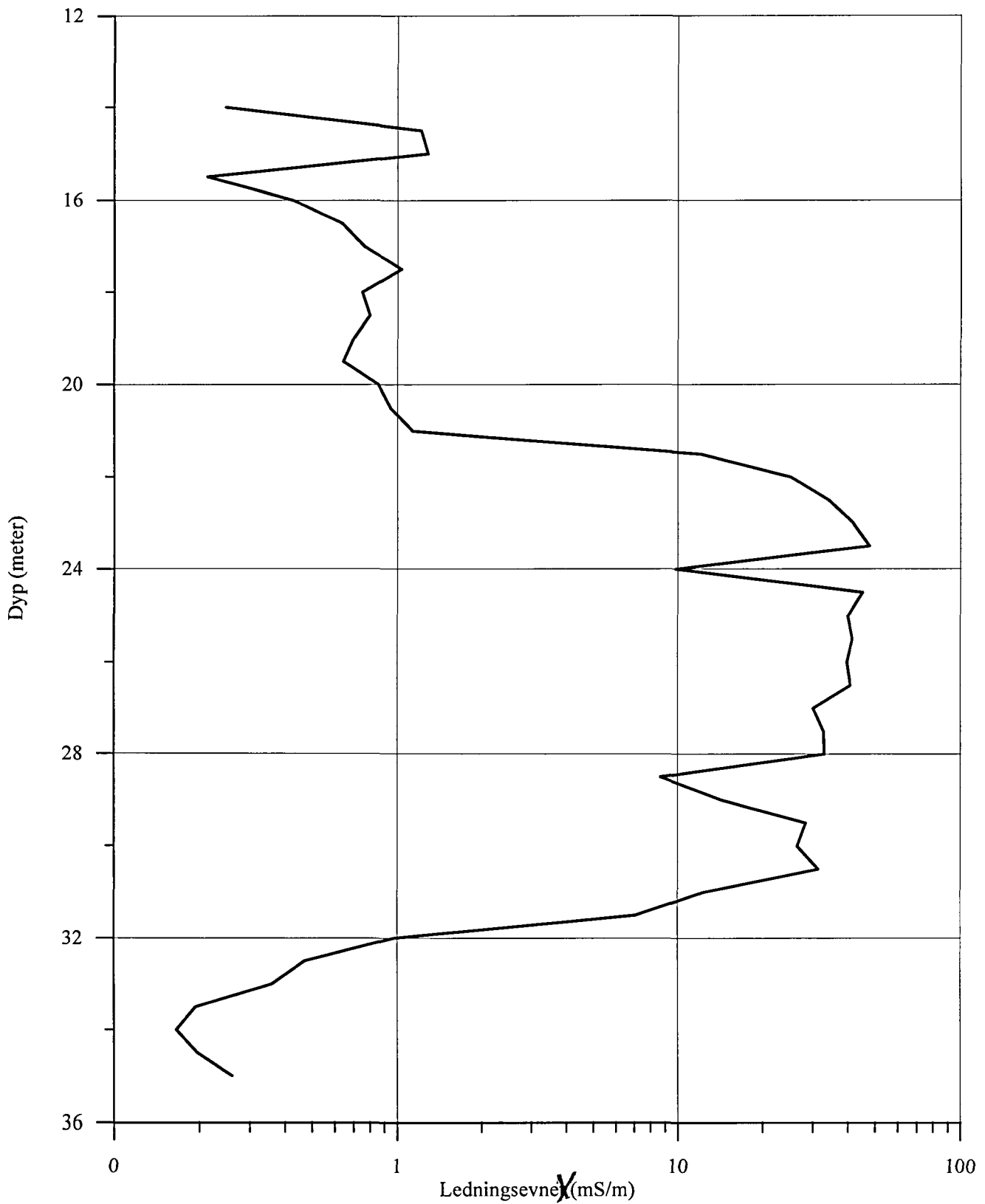
BLEIKVASSLI, vanntapsmålinger og sprekkeindikasjoner fra borehull 6

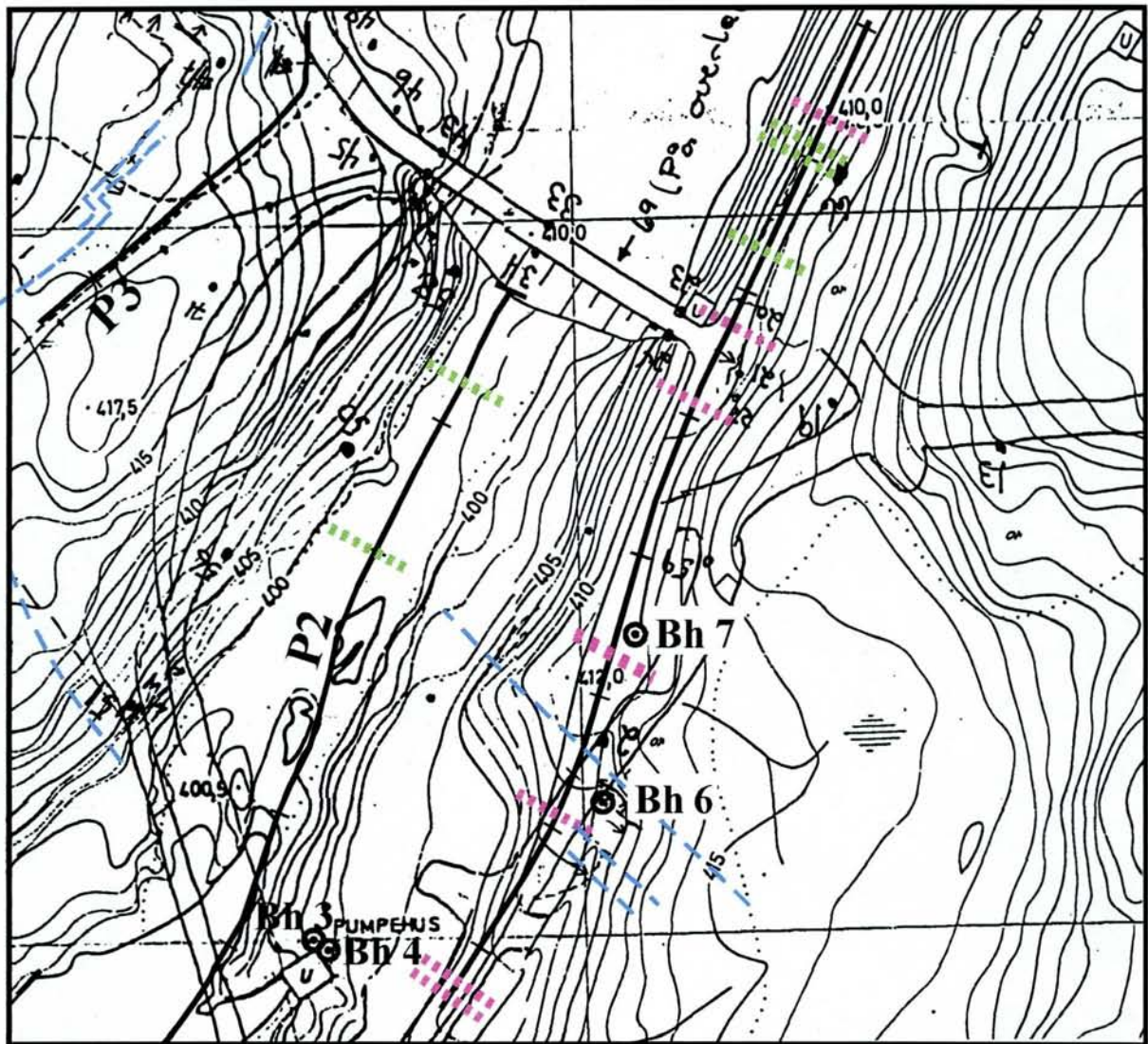


BLEIKVASSLI, vanntapsmålinger og sprekkeindikasjoner fra borehull 7



BLEIKVASSLI, ledningsevne måling i vannmettet sone, borehull 6





NGU
OVERSIKTSKART

BLEIKVASSLI

HEMNES KOMMUNE, NORDLAND

NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE
TRONDHEIM

MÅLESTOKK

1:1000

MÅLT JSR

TEGN EM

TRAC

KFR

April -98

Sept. -98

TEGNING NR
98.117-01

KARTBLAD NR
1935 IV