



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Áhrif mælingahraða og mælingabils á gæði gammamælinga í borholum

Sigvaldi Thordarson

Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar

1999

OS-99110



ORKUSTOFNUN
Rannsóknasvið

Skýrsla
OS-99110
Verknr. 8-720-105

Sigvaldi Thordarson

Áhrif mælingahraða og mælingabils á gæði gammamælinga í borholum

Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar

OS-99110

Desember 1999



Skýrsla nr: OS-99110	Dags: Desember 1999	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Áhrif mælingahraða og mælingabils á gæði gammamælinga í borholum	Upplag: 30	Fjöldi síðna: 34
Höfundar: Sigvaldi Thordarson	Verkefnisstjóri: Ómar Sigurðsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Forðafræðistuðlar. Gammamælingar í borholum	Verknúmer: 8-720-105	
Unnið fyrir: Auðlindadeild Orkustofnunar		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Athugað var hvernig mælingahraði hefði haft áhrif á gæði gammamælinga sem gerðar voru í holu LL-03 í Nefsholti í Holtum (staðarnúmer 83443). Til eru margendurteknar mælingar úr þeiri holu þar sem mælingahraði var 6–50 m/mín og mælingabil annaðhvort 0.1 m eða 0.5 m. Notast var við tvær mismunandi úrvinnsluaðferðir, annarsvegar síun (Gauss) og hins vegar söfnun yfir mislöng dýptarbil (safnað í kassa), og var síðan gerður tölfræðilegur samanburður á mæliferlum sem safnað var á mælihraða 6–50 m/mín. Bíðinn var til viðmiðunarferill fyrir hvora aðferð fyrir sig, sem var meðaltal þriggja mælisyrpna. Aðrar mælisyrpur voru síðan bornar saman við þennan viðmiðunarferil, auk þess sem áhrif mislangra sífa og kassa á hann voru athuguð sérstaklega. Sýnt er hvaða áhrif mælingahraði hefur á mæliferla, bæði hvað varðar útlit og óvissu þeirra, en hlutfallsleg óvissa eykst eftir því sem hraðar er mælt, bæði fyrir Gauss síun og söfnun í kassa. Dýptarupplausn minnkar eftir því sem safnað er yfir lengra bil, en erfitt er að meta áhrif lengri síu á dýptarupplausn.</p>		
Lykilord: Gammamælingar í borholum, mælingahraði, mælingabil, Gauss síun, söfnun yfir dýptarbil.	ISBN-númer:	Undirskrift verkefnisstjóra:
		Yfirlarið af: VS, PI

Efnisyfirlit

1	Inngangur	4
2	Mat á mæliskekkjum með Gauss síun	7
3	Gammageislun reiknuð yfir mislöng dýptarbil	20
4	Umræða og niðurstöður	29
	Heimildir	34

Töfluskrá

1	Yfirlit yfir gammamælingar í LL-03.	4
2	Hámarks-, lágmarks- og meðalgildi á dýptarbilinu 947–950 m fyrir mismunandi síðan viðmiðunarferil.	7
3	Meðalgildi á nokkrum dýptarbilum fyrir mismunandi síðan viðmiðunarferil.	12
4	Meðalgildi gammamælinga á dýptarbilinu 906–994 m fyrir 1–3 m Gauss síur.	13
5	Meðalgildi gammamælinga á dýptarbilinu 920–940 m fyrir 1–3 m Gauss síur.	15
6	Meðalgildi gammamælinga á dýptarbilinu 960–970 m fyrir 1–3 m Gauss síur.	15
7	Meðalgildi gammamælinga á dýptarbilinu 947–950 m fyrir 1–3 m Gauss síur.	16
8	Heildartalning gammageislunar og hlutfallsleg óvissa allra mæliferla á dýptarbilinu 906–994 m.	22
9	Tölfræði mæliferla mældra á 15 m/mín og safnað í 1 m kassa á dýptarbilinu 920–940 m.	23

Myndaskrá

1	Viðmiðunarferlar fyrir 0.2–0.4 m Gauss síun.	8
2	Viðmiðunarferlar fyrir 0.5–1.0 m Gauss síun.	9
3	Viðmiðunarferlar fyrir 1.5–5 m Gauss síun.	10
4	Mæliferlar sem notaðir eru í viðmiðunarferilinn, ásamt honum, síðir með 1.5 m Gauss síu.	11
5	Hlutfallsleg óvissa, á dýptarbilinu 920–940 m, sem fall af mælingahraða.	14
6	Mælisyrpur sem mældar eru niður í samanburði við viðmiðunarferilinn.	17

7	Mælisyrpur sem mældar eru á hraðanum 15 m/mín í samanburði við viðmiðunarferilinn.	18
8	Upprunalegir mæliferlar, ósíðir, sem notaðir voru í viðmiðunarferilinn, ásamt viðmiðunarferlinum síuðum með 1.5 m Gauss síu, á 920–940 m dýpi.	19
9	Viðmiðunarferill, safnað í 0.5–10 m kassa.	21
10	Mæliferlar (óhliðraðir) sem notaðir eru í viðmiðunarferilinn, ásamt honum, safnað í 1 m kassa.	24
11	Viðmiðunarferillinn, ásamt ásamt mælingum sem mældar eru á 15 m/mín, safnað í 1 m kassa.	25
12	Hlutfallsleg óvissa, á dýptarbilinu 920–940 m, sem fall af mælingahraða.	26
13	Viðmið-22588, safnað í 0.5 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.	26
14	Viðmið-22588, safnað í 1 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.	27
15	Viðmið-22588, safnað í 5 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.	27
16	Viðmið-22588, safnað í 10 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.	28
17	Viðmið-22582 (35 m/mín), safnað í 1 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.	28
18	Hlutfallsleg óvissa sem fall að mælingahraða.	29
19	Mæling 22574 ásamt óvissu, safnað í 1 m kassa.	31
20	Mæling 22574 ásamt óvissu, safnað í 2 m kassa.	32
21	Mælisyrpur mældar upp á hraðanum 6–50 m/mín, safnað í 2 m kassa.	33

1 Inngangur

Tilgangur þessa verks er að gera úttekt á endurteknum gammamælingum sem gerðar hafa verið í holu LL-03 í Nefsholti. Sérstaklega verður athugað hvaða áhrif mælingahraði (logging speed) hefur á útslagið. Einnig verður athugað sérstaklega hver áhrif fjarlægð milli mælipunkta, mælingabil (sampling frequency), hefur á nákvæmni mælinga og útslag.

Náttúruleg gammageislun er einkum háð magni þriggja geislavirkra ísótópa, ^{40}K , ^{238}U og ^{232}Th . Í íslensku bergi er geislavirkni tengd kísilinnihaldi (SiO_2) bergsins og eykst geislavirknin ef farið er frá basísku yfir í suð Berg. Þar sem íslenskt berg er yfirleitt þóleitískt basalt er gammageislunin í því jafnan lág, með nokkrum toppum þar sem súrara berg fyrirfinnst (Stefánsson and Steingrímsson 1990).

Gerðar hafa verið 20 gammamælingar í holu LL-03 í Nefsholti, (staðarnúmer 83443), á mælingahraða frá 6 m/mín uppí 50 m/mín, með mælingabili annaðhvort 0.1 m eða 0.5 m eins og sýnt er í töflu 1.

Tafla 1: Yfirlit yfir gammamælingar í LL-03.

Dagsetning	Tími	Svunta	Dýptarbil (m)	Mælihraði (m/mín)	Bil milli mælipunkta (m)	Mælistefna
11.09.1996	14:50	17703	0-1098	50	0.5	niður
11.09.1996	15:10	17705	0-1099	6	0.1	upp
11.09.1996	18:20	17707	0-199	6	0.1	upp
13.09.1996	12:40	17713	0-1098	50	0.5	niður
13.09.1996	13:00	17715	899-1099	6	0.1	upp
13.09.1996	13:40	17717	898-998	6	0.1	niður
13.09.1996	14:00	17719	899-998	6	0.1	upp
13.09.1996	14:20	17721	898-1003	6	0.1	niður
13.09.1996	14:40	17723	899-1003	15	0.1	upp
13.09.1996	15:00	17725	1-898	6	0.1	upp
23.04.1999	21:20	21422	3-1080	40	0.5	niður
23.04.1999	21:50	21424	0-1080	7	0.5	upp
27.10.1999	16:08	22572	900-1005	15	0.5	upp
27.10.1999	16:18	22574	900-1005	15	0.5	upp
27.10.1999	16:28	22576	900-1005	15	0.1	upp
27.10.1999	16:39	22578	890-1005	9	0.5	upp
27.10.1999	16:56	22580	890-1005	25	0.5	upp
27.10.1999	17:05	22582	900-1010	35	0.5	upp
27.10.1999	17:12	22584	900-1020	50	0.5	upp
27.10.1999	17:19	22588	10-1080	6-7	0.5	upp

Til að meta áhrif mælingahraða og mælingabils var búinn til viðmiðunarferill fyrir dýptarbilið 906-994 m og allar mælingar sem til voru á því dýptarbili bornar saman við hann. Í viðmiðunarferilinn voru 3 mælingar notaðar, en það voru mælingar með svuntunúmerin 17705, 17715 og 17719. Pessar mælingar eru allar gerðar upp holuna, mælingahraðinn er 6 m/mín og mælingabilið er 0.1 m, og eru þetta því nákvæmustu mælingarnar sem til eru í

holunni, þ.e. mældar hægast og safnað örast, og því notaðar til grundvallar.

Pegar viðmiðunarferillinn var búinn til var byrjað á að athuga hvort einhver hliðrun væri milli þeirra mælinga sem notaðar voru í hann. Þetta var gert með því að reikna fylgnistuðul (covariance, gert með forritinu bhmcov) milli mælinganna fyrir mismunandi síun á þeim. Síun mæliferlanna var gerð með skipuninni filter1d í GMT forritapakkanum (Wessel and Smith 1991), og var síða með 1–2 m Gauss síu til að meta hliðrunina milli mælisyrpnanna. Mæling 17715 var notuð sem viðmið og hinum tveim hliðrað þannig að hámarks covariance fengist við 0 m hliðrun fyrir 1–2 m síun. Mælingu 17705 var hliðrað um -0.4 m og mælingu 17719 um +0.1 m út frá þessum athugunum.

Til að meta áhrif mælingahraða og mælingabils á nákvæmni mæligagna var viðmiðunarferillinn úr holu LL-03 í Nefsholti lagður til grundvallar og frummælingar síðan bornar saman við hann. Mælisyrpur þær sem til eru úr holu LL-03 eru tíundaðar í töflu 1. Til eru 8 mælisyrpur frá 1996 á dýptarbilinu 900–1000 m, þar af eru 4 mældar niður, en það veldur hærri talningu þar sem gammaneminn fer í gegnum gammageislun sem myndast kringum nifteindalindina. Af þeim 4 sem þá eru eftir, eru 3 mældar á 6 m/mín og 1 á 15 m/mín, allar með mælingabili 0.1 m. Mælingarnar sem gerðar voru 23. apríl 1999 (mælingahraði 40 og 7 m/mín, mælingabil 0.5 m) eru ekki nothæfar þar sem útleiðsla frá rafstöð truflaði mælingarnar. Því þurfti að endurtaka þessar mælingar og var tækifærið notað til að bæta nokkrum mælisyrpum við á dýptarbilinu 900–1000 m, til að hægt væri að meta áhrif mælingahraða og mælingabils á nákvæmni mæligagna. Þetta var gert þann 27. október 1999, og voru þá mældar 8 mælisyrpur þar sem hraðinn var milli 6 og 50 m/mín.

Par sem allnokkur dýptarhliðrun var á milli mælinganna sem gerðar voru 1996 og október 1999 (um 3.5–6 m milli viðmiðunarferils og mælinga frá 1999), var ákveðið að hliðra 1999 mælisyrpum áður en frekari úrvinnsla færi fram. Ákveðið var að hliðra öllum mælisyrpum frá október 1999 um sama gildi, 4.5 m, frekar en að hliðra hverri um sig um það gildi sem bhmcov reiknar, þar sem eðlilegt er að einhverjar hliðrunarskekkjur séu milli mælinga. Hliðrunin er þó of mikil til að hægt sé að hafa hana alveg óleiðréttu, þar sem sum dýptarbilin sem notuð eru í reikningunum hér eru það lítil að svona skekkja hefði afgerandi áhrif á niðurstöður samanburðarins. Ekki er vitað hverju þessi mikla hliðrun milli mælinganna frá 1996 og 1999 sætir, en hugsanlega hefur annað dýptarviðmið verið valið, eða þá að kvörðun dýptarteljarans hefur breyst.

Czubek (1981) lýsir helstu þáttum sem hafa áhrif á úrvinnslu gammamælinga, auk þess sem þar má finna skilgreiningu á API einingunni (bls. 15), en hún er skilgreind út frá geislunarmun tveggja "jarðlaga" í tilraunaholu í Bandaríkjunum (Houston, Texas). Þar er t.d. sýnt að jarðlagaskil (milli gammageislandi og ógeislandi jarðlaga) eiga að vera í miðju útslagi gammaferils, og að lengd gammamælis hefur áhrif á dýptarupplausnina, auk þess sem jarðlagabykkt getur haft áhrif á lögun ferilsins. Ekki verður farið út í slíkar úrvinnsluaðferðir hér, heldur einblínt á áhrif mælingahraða og mælingabils á mælda gammaferla.

Til að átta sig betur á áhrifum mælingahraða og söfnunartíðni á gammamælingarnar, er rétt að nefna aðeins hvernig skráning gammamælingar inn í mætitölvu mælingabílsins fer fram. Tölvan skráir mælingar annaðhvort með jöfnu dýptarbili (0.1 m eða 0.5 m), eða eftir ákveðinn tíma (6 s) frá síðustu skráningu. Í hverri skráningu er öll gammageislun sem talin hefur verið frá síðustu skráningu færð til bókar í mælitölvunni, og er þannig tryggt að öll gammageislun sem mæld er í holunni er skráð. Það að öll geislunin sé skráð er mjög mikilvægt þegar gera á úttekt á gæðum mælinganna eins og hér er gert, sérstaklega þar sem gammageislun er lítil og óvissa í hverri mælingu því hlutfallslega mikil, en óvissa hverrar mælingar er jöfn \sqrt{c} , þar

sem c er fjöldi mældra gammageisla (counts) (sjá t.d. Theys (1991)). Czubek (1981) sýnir hvernig gammaferill lítur út ef mælt er yfir gammageislandi jarðlag og notaður rate-meter með ákveðnum tímakonstanti, en þá hliðrast toppurinn til þ.a. ákvörðun á jarðlagaskilum og jarðlagabykkt verður erfið, nema mæliferillinn sé leiðréttur sérstaklega fyrir þessu. Í þeim mælingum sem hér er lýst er ekki safnað í gegnum rate-meter með tímakonstanti (allir taldir púlsar eru skráðir) og því ættu þessi áhrif að hverfa að mestu, en mælingabilið hefur þó einn áhrif á það hversu nákvæmlega hægt er að sjá jarðlagaskil, þar sem sú nákvæmni hlýtur að vera minni en mælingabilið.

Í borholumælingum er yfirleitt reynt að safna mæligildunum með jöfnu dýptarbili, sem fyrir gammamælingarnar þýðir að hraðinn verður að vera nægur til þess að neminn fari yfir það dýptarbil sem safnað er á áður en tímaskrefinu (6 s) hefur verið náð. Ef til dæmis er mælt á 5 m/mín og safnað á 0.5 m bili, þá er neminn um 6 s að að fara 0.5 m, þ.a. ef hraðinn er ekki alveg jafn þá er óvist hvort mælt er með jöfnu dýptarbili eða mælingar skráðar eftir að tímaskrefi er náð (á því dýpi sem þá er). Ýmis úrvinnsla mælinganna er auðveldari ef safnað er með jöfnu dýptarbili, en það er þó engan veginn nauðsynlegt. Hlutfallsleg nákvæmni gammamælinganna eykst ef mæligildið hækkar, þ.a. hún eykst ef talning gammageislunar eykst, sem þýðir að lítill mælingahraði skilar sér í hlutfallslega nákvæmari mælingu. Því er mikilvægt að velja mælingahraða og mælingabil sem skilar nægri nákvæmni og dýptarupplausn.

Til að bera mælingarnar saman voru tvær aðferðir notaðar, annars vegar að sía mælisyrpurnar með mislöngum Gauss síum yfir mælidýpið, og hins vegar að safna öllum mæligildum mælisyrpu saman yfir mislög dýptarbil og skrifa út eitt mæligildi fyrir hvert mælibil (kassa). Verður fjallað um báðar þessar aðferðir í næstu köflum.

2 Mat á mæliskekkjum með Gauss síun

Útbúinn var viðmiðunarmæling fyrir hverja síun og voru þá mælingarnar (hliðraðar) sem notaðar eru í viðmiðunarferilinn (17705, 17715 og 17719), síaðar með 0.2–5 m Gauss síu og síðan fyrir hverja síun fundið meðaltalsgildi fyrir hvert mælidýpi (á 0.1 m fresti) á dýptarbilinu 906–994 m.

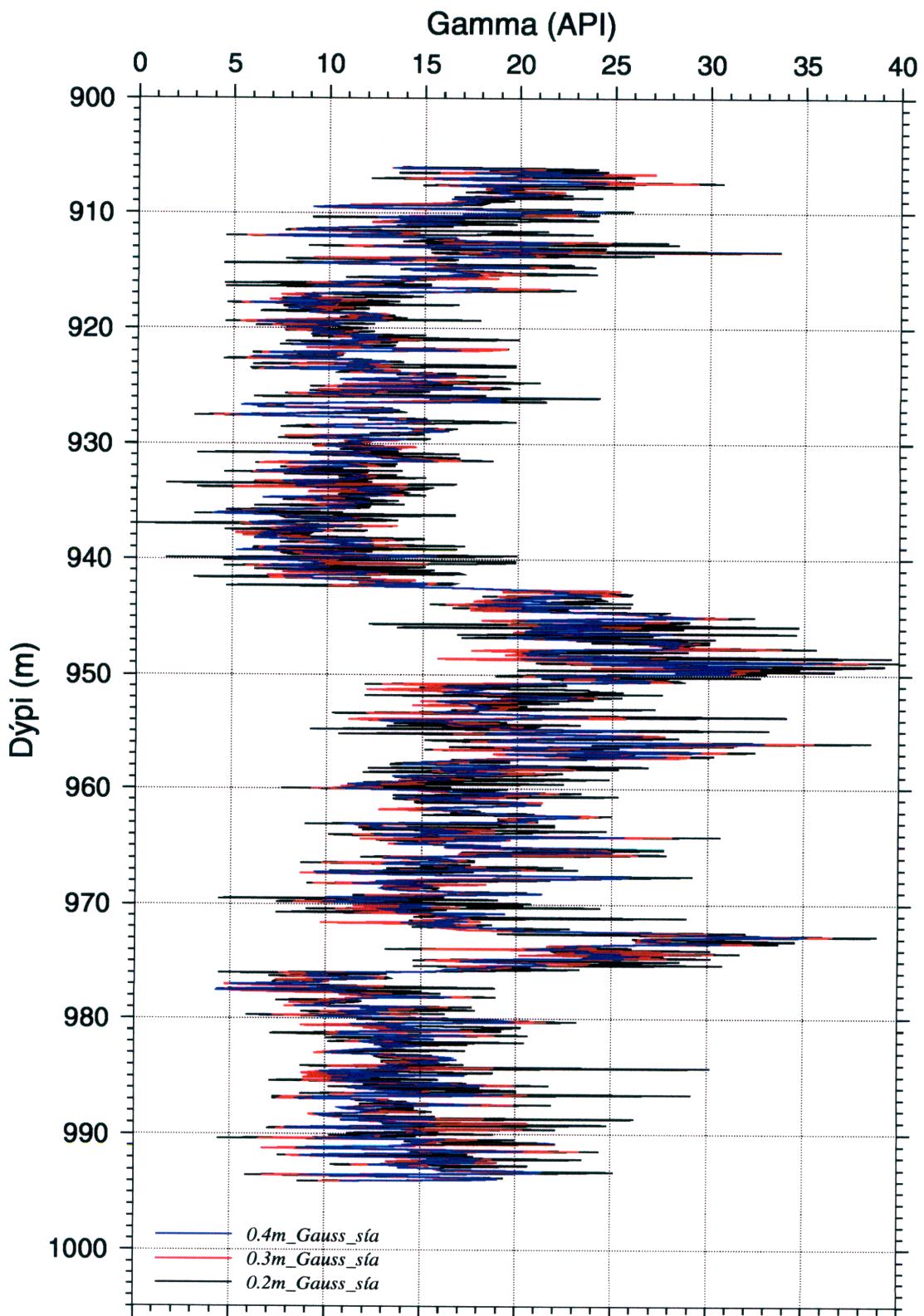
Pegar skoðað var hvernig fylgnistuðlar milli þeirra mæliferla sem notaðir voru í viðmiðunarférilinn og viðmiðunarferilsins sjálfs breytast með síun kom í ljós að fylgnin batnaði með aukinni lengd síu og það sama má segja um fylgnistuðla milli mæliferlanna sjálfra. Þetta kemur ekki á óvart þar sem búast má við að lengri síur jafni betur út mæliskekkjur vegna talningar á geisluninni, en óvissa í hverri mælingu er jöfn \sqrt{c} þar sem c er fjöldi mældra gammaeinda. Það er því ljóst að kanna þarf áhrif síulengdar á mælingarnar, bæði hvað varðar mæligildin sjálf og einnig hvort dýptarupplausn breytist verulega með lengd síu.

Til að byrja með er fróðlegt að sjá hvernig viðmiðunarferillinn lítur út eftir mismunandi síanir, en þetta er sýnt á myndum 1-3. Þar má sjá að fyrir síur styttri en 1 m sveiflast mæligildin mikið á stuttum dýptarbilum, þannig að erfitt er að túnka þær mælingar með tilliti til meðal-gammagildis fyrir ákveðin jarðlög. Þetta verður auðveldara eftir því sem sian verður lengri, en athyglisvert er að þá minnka einnig hámarkssveiflurnar á hverju dýptarbili. Þetta sést glögglega t.d. fyrir dýptarbilið 947–950 m þar sem gammageislun nær hámarki, og í töflu 2 er sýnt hvernig hámarks-, lágmarks- og meðalgildi á þessu dýptarbili breytast með mismunandi síum. Þar kemur glöggt fram að hámarks- og lágmarksgildin breytast kerfisbundið með lengd síunnar, en áhrifin á meðalgildið eru mun minni.

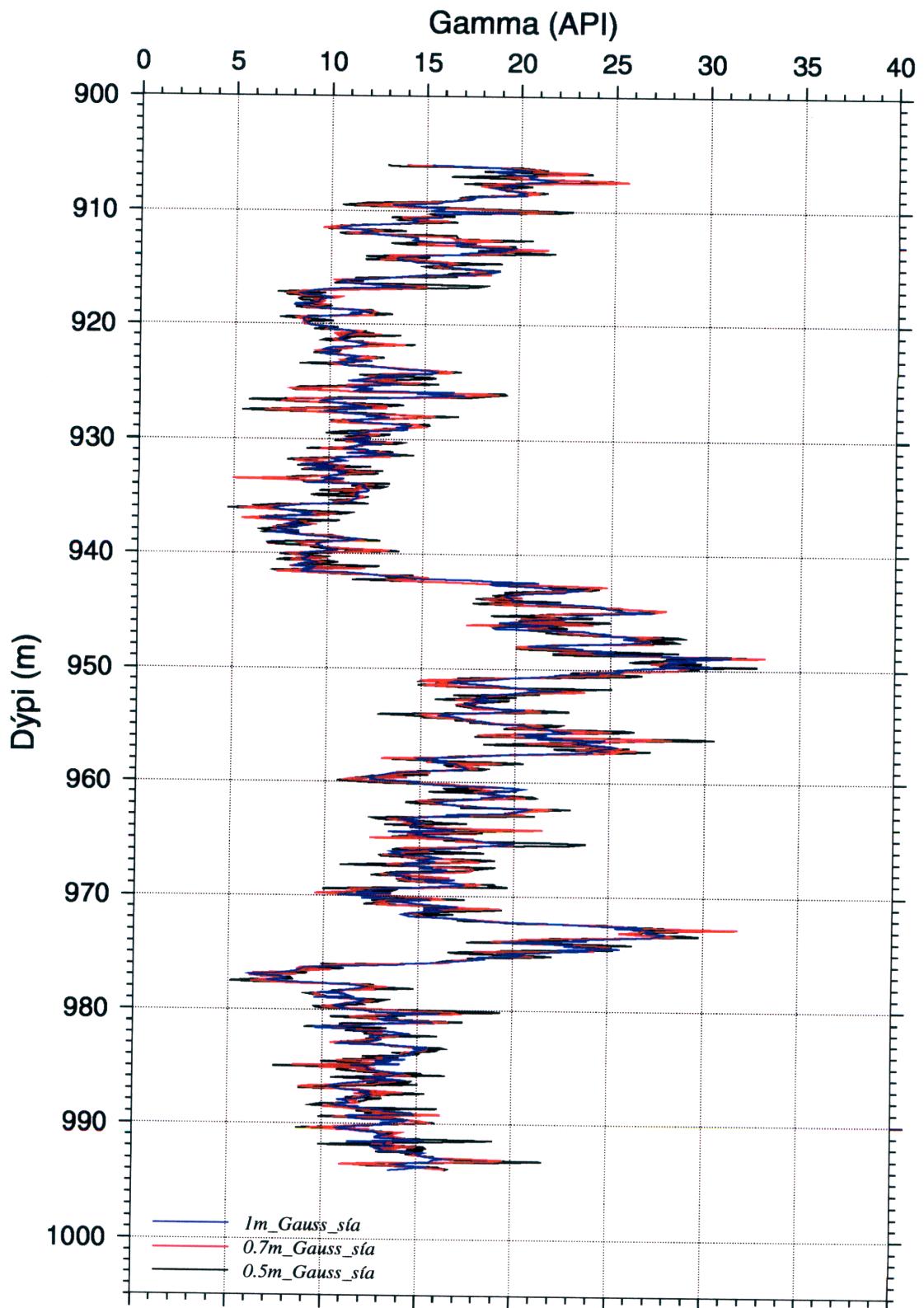
Tafla 2: Hámarks-, lágmarks- og meðalgildi (API) á dýptarbilinu 947–950 m fyrir mismunandi síaðan (Gauss sía) viðmiðunarferil.

Lengd síu (m)	Minnsta gildi	Hæsta gildi	Meðal gildi
0.2	19.65	40.63	28.06
0.3	15.80	38.32	26.42
0.4	20.19	36.61	26.58
0.5	20.03	32.79	26.46
0.7	20.03	33.14	26.23
1.0	20.62	31.33	26.22
1.5	21.67	29.81	26.07
2.0	23.65	27.98	25.67
3.0	24.48	27.19	25.74
5.0	24.37	26.01	25.27

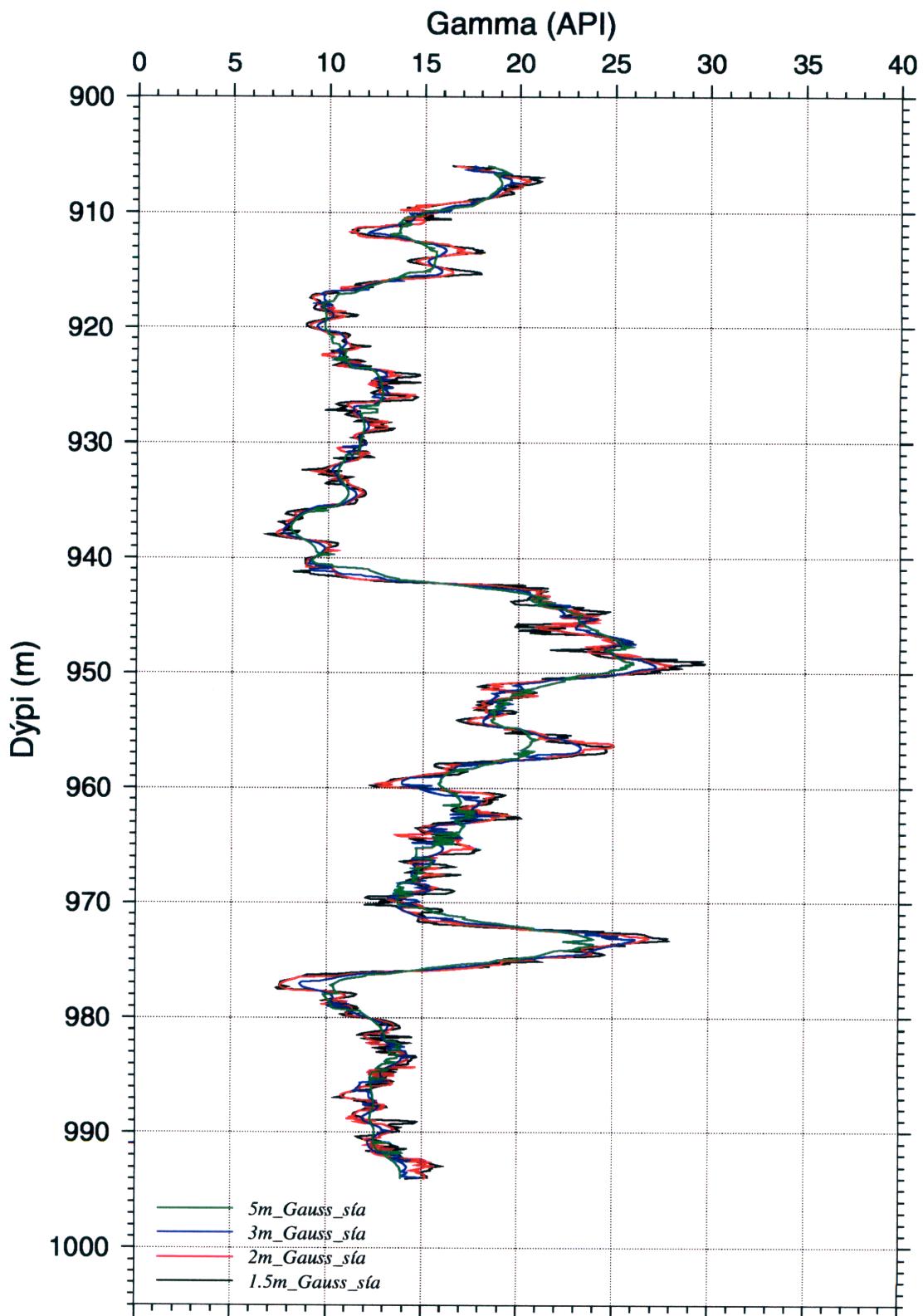
Einnig er athyglisvert að sjá hversu mikil samsvörun er milli einstakra mælisyrna, og á mynd 4 er viðmiðunarferillinn ásamt þeim mæliferlum sem notaðar eru til að búa hann til sýndir, eftir síun með 1.5 m Gauss síu. Þar sést greinilega hversu mikil óvissa er í hverri mælingu, en á einstaka dýpum getur munað allt að 10–15 API, þrátt fyrir að allar mælingarnar séu gerðar á svipuðum tíma, af sömu mælingamönnum og sömu nákvæmni.



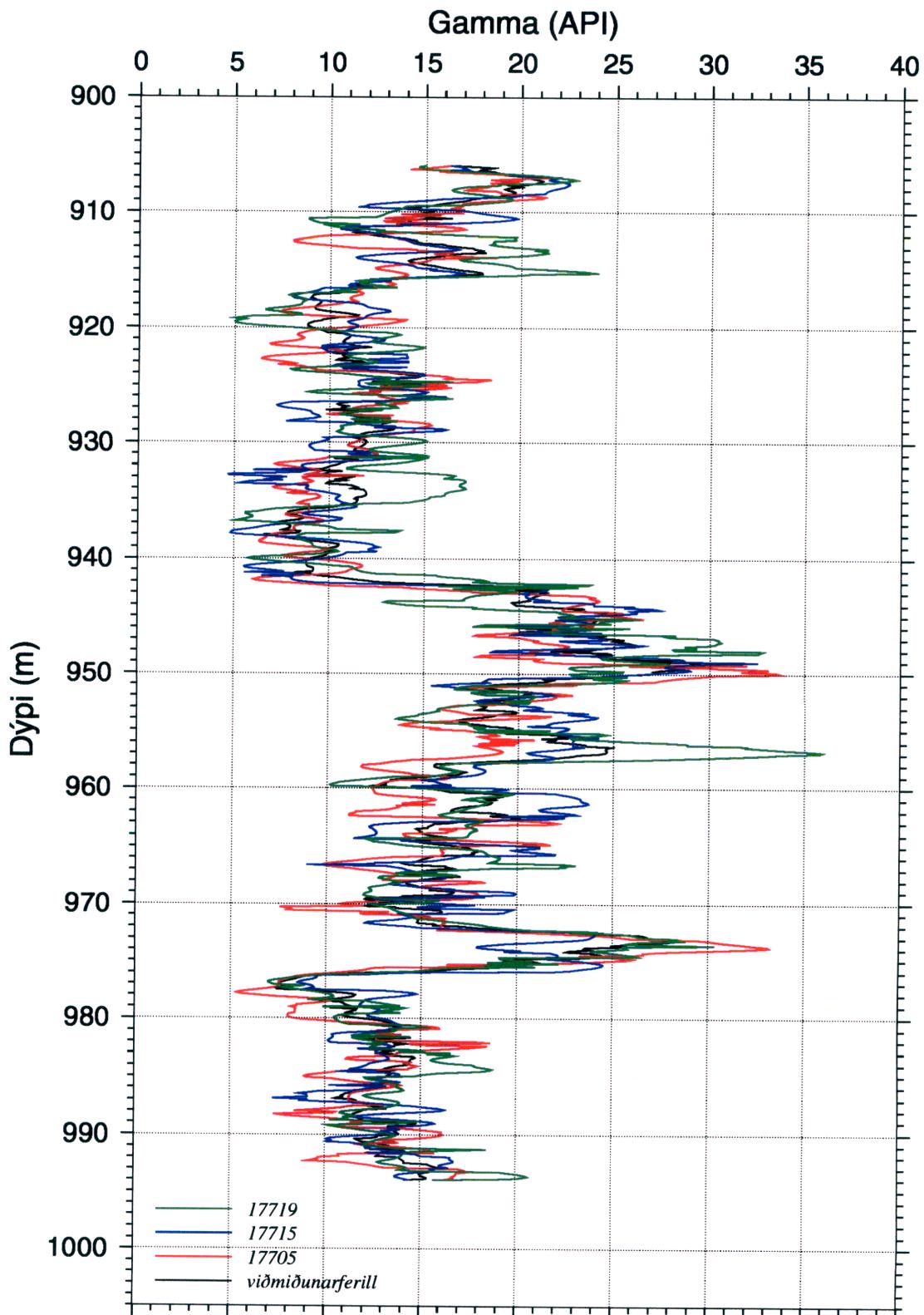
Mynd 1: Viðmiðunarferlar fyrir 0.2–0.4 m Gauss sún.



Mynd 2: Viðmiðunarferlar fyrir 0.5–1.0 m Gauss sfun.



Mynd 3: Viðmiðunarferlar fyrir 1.5–5 m Gauss sín.



Mynd 4: Mæliferlar sem notaðir eru í viðmiðunarferilinn, ásamt honum, sfaðir með 1.5 m Gauss síu.

Næsta skref í athugun á áhrifum síunar var að skoða hvernig meðalgildi viðmiðunarferilsins breyttist með síulengd á nokkrum dýptarbilum, og í töflu 3 má sjá þetta fyrir dýptarbilin 906–994 m, 920–940 m og 960–970 m. Þar má sjá að meðalgildin eru mjög lík fyrir mismunandi síulengdir, einna helst eru það gildin fyrir stystu síuna sem skera sig úr. Meðaltölin í töflum 2 og 3 má síðan bera saman við samsvarandi meðaltöl úr upprunalegu mæliferlunum til að meta skekkju þeirra (miðað við þennan viðmiðunarferil).

Tafla 3: Meðalgildi (API) á nokkrum dýptarbilum fyrir mismunandi síðan (Gauss sía) viðmiðunarferil.

Lengd síu (m)	Dýptarbil (m)		
	906–994	920–940	960–970
0.2	16.40	11.67	17.19
0.3	15.33	10.86	16.50
0.4	15.37	10.85	16.59
0.5	15.15	10.86	16.29
0.7	15.11	10.86	16.24
1.0	15.05	10.92	16.14
1.5	15.04	10.91	16.14
2.0	14.97	10.82	16.09
3.0	14.98	10.79	15.83
5.0	14.95	10.80	15.65

Þegar einstakir mæliferlar voru bornir saman við viðmiðunarferilinn til að meta frávik þeirra frá honum, var sú athugun einskorðuð við síur á bilinu 1–3 m, enda sýna niðurstöðurnar í töflum 2 og 3 að sáralítill munur er á meðaltölunum eftir síulengd, og á myndum 2–3 sést að fyrir þær síur fást ”sæmilega túlkanlegir” ferlar.

Til að bera einstaka mæliferla saman við viðmiðunarferilinn, er áhugavert að skoða hvernig meðaltolum þeirra, ásamt staðalfráviki beggja, ber saman. Eins og sést í töflu 4 eru allar mælisyrpurnar innan óvissumarka (samanlagt staðalfrávik beggja mælisyrpnanna), en tvær mælisyrpur (17717 og 17721) eru alveg á mörkunum. Þær eru báðar mældar niður, sem eins og áður hefur verið vikið að, veldur hærri gammatalningu, og sést það vel á meðaltalsgildum þessara mælinga. Hinar tvær mælingarnar sem mældar eru niður (17703 og 17713) eru mældar mjög hratt (50 m/mín) sem veldur miklum sveiflum í mældum gammagildum, eins og sést á mynd 6, og meðaltöl þeirra verða illa ákvörðuð (hátt staðalfrávik). Yfir heildina má segja að bæði staðalfrávikið og frávik meðaltals mælisyrpna frá meðaltali viðmiðunarferils, aukist með auknum hraða. Þó er þetta alls ekki einhlítt, t.d. er mikill munur á þeim mælisyrpum sem mældar eru á 15 m/mín. Á mynd 5 er sýnd hlutfallsleg óvissa fyrir dýptarbilið 920–940 m (reiknuð sem $\frac{\sigma(c)}{c}$), en þar virðist vera einsleitt berg og því ekki um það að ræða að talning og óvissa breytist vegna þess að mælt er í mis gammageislandi bergi. Þar sést greinilega hvernig hlutfallsleg óvissa vex með auknum hraða, og einnig hvernig samsvörun milli mælisyrpna eykst ef lengri sía er notuð.

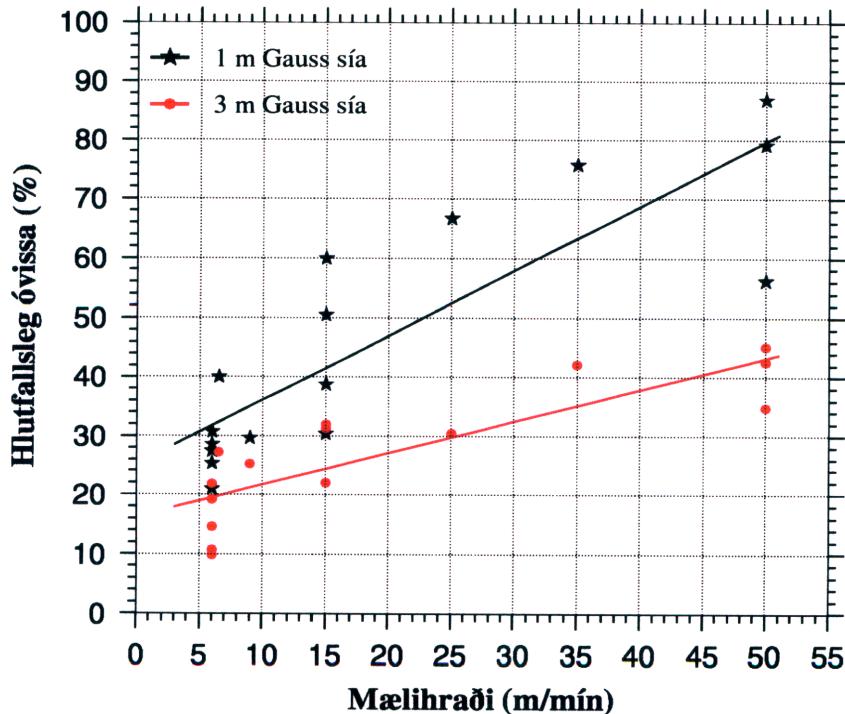
Hafa verður í huga að staðalfrávikið er mjög háð þeim sveiflum sem eru í mæligildunum, þ.a. ef mælt er í gegnum margar bergeiningar með mismikilli gammageislun, þá hækkar staðalfrávikið vegna þess að dreifðin í mæligildunum eykst. Þess vegna voru hér skoðuð sérstaklega dýptarbil þar sem gammageislun virtist vera nokkuð stöðug yfir allt bilið, en þetta voru dýptarbilin 920–940 m, 960–970 m og 947–950 m (sjá töflur 5–7), en síðastnefnda dýptarbilið er sniðið yfir topp í gammamælingunni þar sem hún nær hámarki (hugsanlega þunnt berglag

Tafla 4: Meðalgildi gammamælinga (API) á dýptarbilinu 906–994 m fyrir 1–3 m Gauss síur. Uppgefin skekkja, \pm , er eitt staðalfrávik.

Svuntunúmer mæliferils	Hraði (m/min) og stefna	Gauss sía (m)			
		1.0	1.5	2.0	3.0
17703	50, niður	17.1 \pm 12.4	17.2 \pm 11.4	17.2 \pm 9.8	17.1 \pm 8.4
17705	6, upp	14.4 \pm 5.8	14.3 \pm 5.4	14.3 \pm 5.1	14.3 \pm 4.9
17713	50, niður	17.2 \pm 9.5	17.2 \pm 8.5	16.9 \pm 6.9	16.5 \pm 5.7
17715	6, upp	15.2 \pm 5.7	15.2 \pm 5.3	15.1 \pm 5.1	15.1 \pm 4.9
17717	6, niður	25.2 \pm 7.0	25.2 \pm 6.4	25.2 \pm 6.0	25.1 \pm 5.5
17719	6, upp	15.6 \pm 5.8	15.6 \pm 5.6	15.6 \pm 5.4	15.6 \pm 5.2
17721	6, niður	25.0 \pm 7.3	25.0 \pm 6.9	25.1 \pm 6.4	25.1 \pm 5.9
17723	15, upp	14.4 \pm 8.0	14.6 \pm 7.1	14.6 \pm 6.4	14.2 \pm 5.7
22572	15, upp	17.1 \pm 7.5	17.2 \pm 7.1	17.4 \pm 6.6	17.1 \pm 5.8
22574	15, upp	16.5 \pm 5.7	16.5 \pm 5.4	16.3 \pm 4.8	16.3 \pm 4.1
22576	15, upp	14.5 \pm 8.0	14.7 \pm 7.0	14.7 \pm 6.3	14.7 \pm 5.6
22578	9, upp	16.2 \pm 6.3	16.2 \pm 6.1	16.3 \pm 6.0	16.1 \pm 5.3
22580	25, upp	15.0 \pm 7.7	15.1 \pm 7.2	14.7 \pm 6.4	14.6 \pm 5.9
22582	35, upp	15.8 \pm 9.2	15.8 \pm 8.6	15.3 \pm 7.0	15.2 \pm 6.2
22584	50, upp	18.2 \pm 12.1	18.2 \pm 11.1	17.8 \pm 9.1	17.4 \pm 8.4
22588	6-7, upp	16.2 \pm 6.1	16.2 \pm 5.8	16.0 \pm 5.0	16.0 \pm 4.8
viðmiðunarferill	6, upp	15.1 \pm 4.9	15.0 \pm 4.8	15.0 \pm 4.7	15.0 \pm 4.6

eða innskot). Niðurstöðurnar fyrir þessi dýptarbil eru mjög svipaðar og fyrir allt dýptarbilið, en hér lenda tvær mælisyrpur utan staðalfrávika frá meðalgildi viðmiðunarferils, mælisyrpur 17717 og 17721.

Til að gera nákvæmari úttekt á reiknuðum meðaltölum mælisyrpnanna þarf að beita þróaðri tölfræði en þeiri sem að framan er lýst. Hér var aðeins skoðað hvaða niðurstöður Student's t-test (sjá t.d. Mendenhall, Scheaffer, and Wackerly (1981)) gæfi fyrir 1.5 m Gauss síu fyrir dýptarbilin 920–940 m og 960–970 m. Slíkur samanburður á meðalgildum gefur vísbindingu um það hvort munurinn á þeim sé marktækur eður ei. Hér var miðað við 95% öryggismörk (5% significance level) í samanburðinum, sem þýdir að í 95% tilfella segir þessi tölfræði rétt til um það hvort raunverulegur munur sé á meðaltali þeirra, út frá meðaltali, variance og fjölda mæligilda beggja mælisyrpnanna. Fyrir 920–940 m dýptarbilið leiddi þessi athugun í ljós að 6 mælisyrpnanna höfðu sambærilegt meðalgildi og viðmiðunarmælingin, en það voru mælisyrpurnar: 17715, 22572, 22578, 22580, 22582 og 22588. Fyrir 960–970 m dýptarbilið voru það einungis 3 mælisyrpur sem höfðu sambærilegt meðalgildi og viðmiðunarmælingin, en það voru mælisyrpurnar: 17719, 17723, 22580. Athyglisvert er að einungis ein mælisyrpan (22580) hefur sambærilegt meðaltal og viðmiðunarmælingin fyrir bæði dýptarbilin, sem skýrist aðallega af því að staðalfrávik þeirrar mælingar er hátt og meðalgildið ekki mjög fjarri meðalgildi viðmiðunarmælingarinnar. Einnig er eftirtektarvert að þær mælisyrpur sem standast þetta próf er mældar á mjög mismunandi hraða, frá 6 m/mín upp í 50 m/mín, en ástæðan fyrir því að þær sem hraðar eru mældar standast prófið er aðallega sú að staðalfrávik þeirra er hátt. Eins hefði verið eðlilegt að allar þær mælisyrpur sem notaðar voru til að búa til viðmiðunarferilinn stæðust prófið, en svo var ekki, einungis mælisyrpa 17715 á dýptarbilinu 920–940 m, og mælisyrpa 17719 á dýptarbilinu 960–970 m stóðust prófið.



Mynd 5: Hlutfallsleg óvissa, $\frac{\sigma(c)}{c}$, á dýptarbilinu 920–940 m, sem fall af mælingahraða. Reiknað er fyrir mæliferla sem hafa verið síaðir með 1 m og 3 m Gauss síu, og til glöggvunar er sýnd besta lína reiknuð í gegnum hvort gagnasafnið.

Af þeim mælingum sem gerðar voru 1996 er söfnunartíðni flestra þeirra 0.1 m, en þær sem gerðar voru í október 1999 hafa flestar söfnunartsíðnina 0.5 m (sjá töflu 1). Á mynd 7 sjást þær mælingar sem gerðar voru á 15 m/mín, og má þar sjá að þegar safnað er á 0.1 m bili þá er talningin núll á sumum þessara bila, sem veldur því að erfiðara er að túnka mælinguna vegna meiri sveiflna í mæligildum. Það ætti að hafa lítil áhrif á meðaltalsreikninga hvort safnað er á 0.1 m eða 0.5 m fresti þar sem öll gammageislunin er skráð í báðum tilfellum, og því ættu einu áhrifin sem söfnunartíðnin hefur á gammaælinguna að vera dýptarupplausnin, þ.e. hversu nákvæmlega hægt er að staðsetja skil milli ákveðinna bergeininga. Ef mæliferlar mældir á 15 m/mín eru skoðaðir í töflu 4–7, sést að í nær öllum tilfellum eru meðaltalsgildin lægri þegar safnað er á 0.1 m fresti (undantekningin er mæling 17723 á dýptarbilinu 947–950 m), og virðist hér að mest muni um þau dýptarbil þar sem talningin fer niður í núll (sjá mynd 7). Þegar gammageislunin er lítil virðist því skipta máli að tryggja að talning fáist á hverju dýptarbili sem skráð er á, og því nauðsynlegt að velja hraða og söfnunarbil í samræmi við það. Söfnunartíðnin virðist hins vegar ekki hafa neina raunverulega þýðingu í sambandi við dýptarupplausnina, því eins og sést á myndum 4 og 7, er fjarri því að hægt sé að staðsetja dýpi á skilum milli bergeininga með meira en nokkurra metra nákvæmni. Það má út frá þessu leiða líkur að því að meðaltal sem reiknast fyrir viðmiðunarferilinn sé of lágt, allavega á þeim dýptarbilum þar sem talningin er mjög lág. Ef þeir ferlar sem notaðir eru í viðmiðunarferilinn eru skoðaðir á dýptarbilinu 920–940 m (mynd 8), sést að á mörgum stöðum fara einstakir ferlar niður í núll (aldrei allir á sama stað, þ.a. viðmiðunarferillinn fer aldrei niður í núll) og því viðbúið að meðaltal sem reiknað er fyrir þetta dýpi verði of lágt.

Tafla 5: Meðalgildi gammamælinga (API) á dýptarbilinu 920–940 m fyrir 1–3 m Gauss síur. Uppgefin skekkja, \pm , er eitt staðalfrávik.

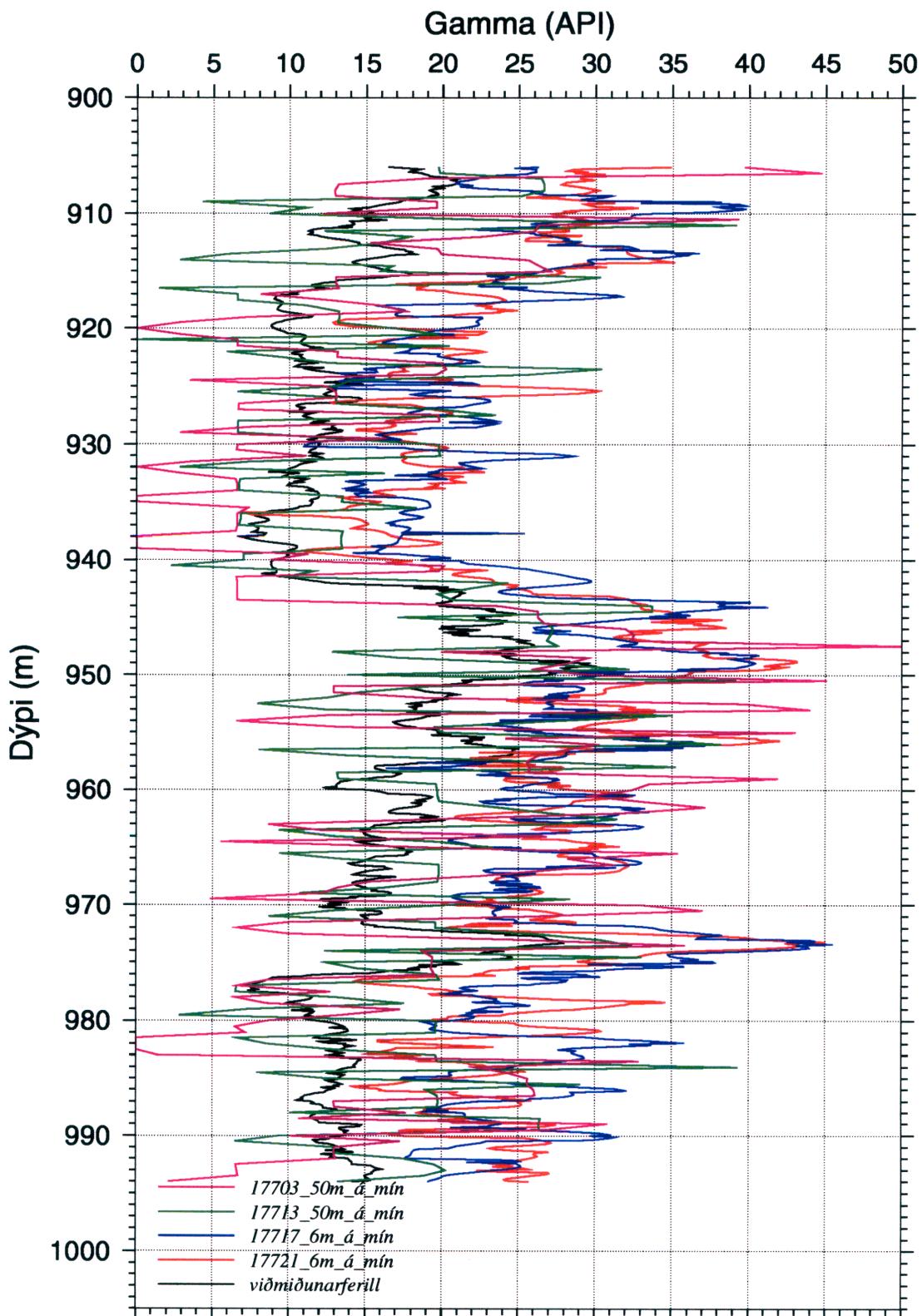
Svuntunúmer mæliferils	Hraði (m/min) og stefna	Gauss sía (m)			
		1.0	1.5	2.0	3.0
17703	50, niður	7.7 \pm 6.7	8.0 \pm 6.1	9.4 \pm 5.3	9.4 \pm 4.0
17705	6, upp	10.1 \pm 3.1	10.3 \pm 2.7	10.1 \pm 2.4	10.1 \pm 2.2
17713	50, niður	12.8 \pm 7.2	12.6 \pm 6.6	12.5 \pm 5.2	11.8 \pm 4.1
17715	6, upp	10.5 \pm 3.0	10.5 \pm 2.5	10.4 \pm 2.1	10.3 \pm 1.5
17717	6, niður	18.1 \pm 3.8	18.3 \pm 3.2	18.3 \pm 2.6	18.3 \pm 1.8
17719	6, upp	12.1 \pm 3.4	11.9 \pm 2.9	11.9 \pm 2.7	12.0 \pm 2.3
17721	6, niður	17.8 \pm 4.5	17.8 \pm 3.7	17.8 \pm 2.6	17.7 \pm 1.9
17723	15, upp	9.7 \pm 4.9	10.1 \pm 4.1	10.2 \pm 3.6	9.9 \pm 3.1
22572	15, upp	11.6 \pm 4.5	11.6 \pm 4.1	11.8 \pm 3.4	11.8 \pm 2.6
22574	15, upp	13.8 \pm 4.2	13.7 \pm 3.9	13.4 \pm 3.6	13.2 \pm 2.9
22576	15, upp	9.5 \pm 5.7	9.9 \pm 5.0	10.3 \pm 3.8	10.0 \pm 3.2
22578	9, upp	11.1 \pm 3.3	11.1 \pm 3.0	11.0 \pm 2.9	11.1 \pm 2.8
22580	25, upp	12.0 \pm 8.0	11.9 \pm 7.4	10.5 \pm 4.7	9.5 \pm 2.9
22582	35, upp	10.3 \pm 7.8	10.5 \pm 7.1	10.3 \pm 5.6	10.2 \pm 4.3
22584	50, upp	13.4 \pm 10.6	13.4 \pm 9.3	13.8 \pm 7.8	12.6 \pm 5.7
22588	6-7, upp	11.5 \pm 4.6	11.5 \pm 4.3	11.4 \pm 3.5	11.4 \pm 3.1
viðmiðunarferill	6, upp	10.9 \pm 1.9	10.9 \pm 1.7	10.8 \pm 1.6	10.8 \pm 1.4

Tafla 6: Meðalgildi gammamælinga (API) á dýptarbilinu 960–970 m fyrir 1–3 m Gauss síur. Uppgefin skekkja, \pm , er eitt staðalfrávik.

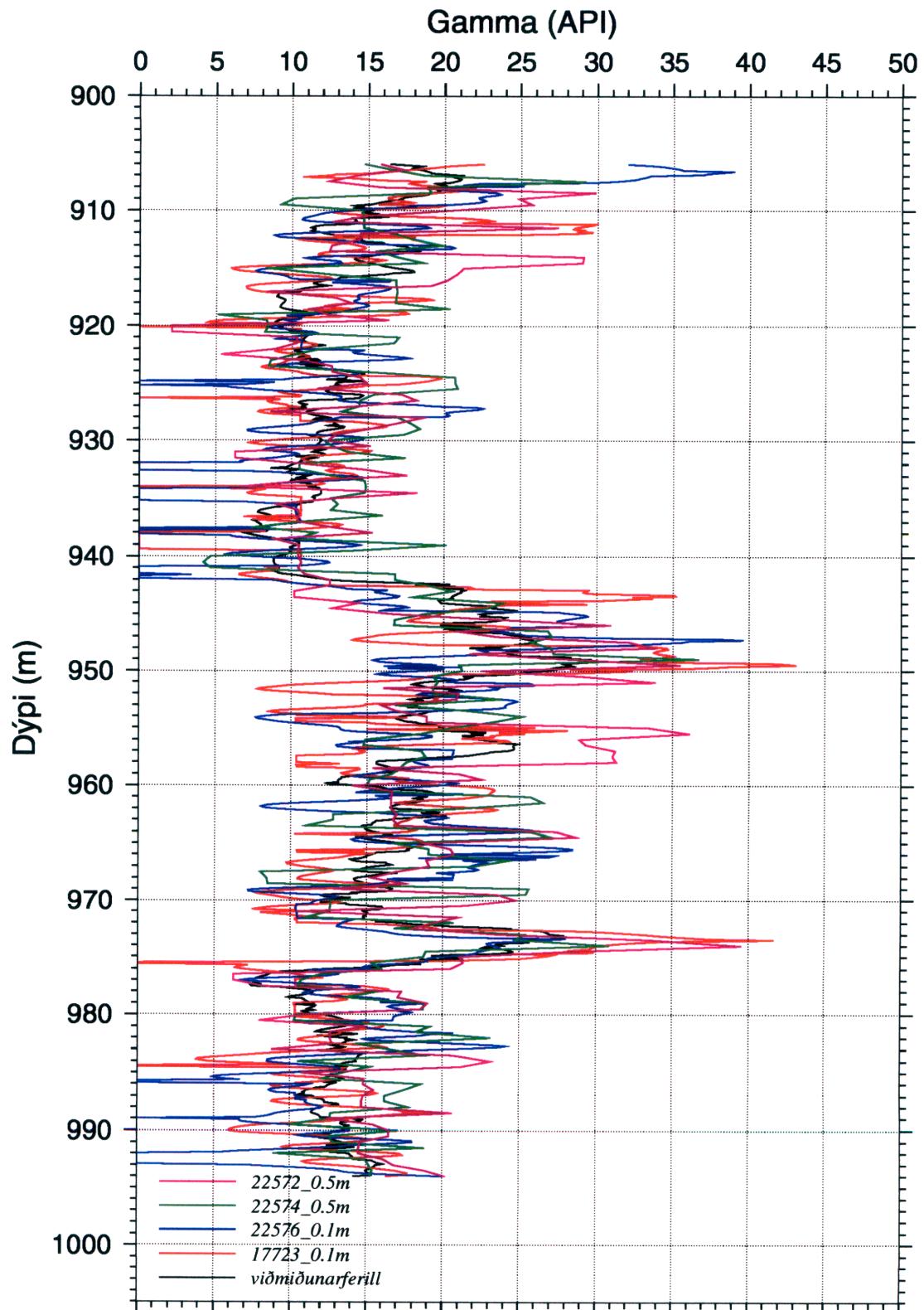
Svuntunúmer mæliferils	Hraði (m/min) og stefna	Gauss sía (m)			
		1.0	1.5	2.0	3.0
17703	50, niður	22.8 \pm 11.8	22.8 \pm 10.3	22.3 \pm 9.1	23.5 \pm 6.5
17705	6, upp	15.2 \pm 3.5	15.0 \pm 2.9	14.9 \pm 2.5	14.4 \pm 2.0
17713	50, niður	19.7 \pm 7.3	19.6 \pm 6.1	18.9 \pm 4.8	18.3 \pm 2.4
17715	6, upp	17.0 \pm 4.6	17.2 \pm 3.9	17.3 \pm 3.4	17.2 \pm 3.0
17717	6, niður	26.5 \pm 4.7	26.4 \pm 4.1	26.4 \pm 3.5	26.5 \pm 2.8
17719	6, upp	16.3 \pm 3.0	16.3 \pm 2.7	16.1 \pm 2.3	15.8 \pm 2.1
17721	6, niður	27.1 \pm 3.8	27.2 \pm 3.3	27.5 \pm 2.9	27.8 \pm 2.5
17723	15, upp	15.1 \pm 5.7	15.8 \pm 4.5	15.9 \pm 4.2	15.8 \pm 3.9
22572	15, upp	18.7 \pm 4.5	18.9 \pm 4.1	18.5 \pm 2.8	18.1 \pm 2.1
22574	15, upp	18.3 \pm 6.9	18.2 \pm 6.7	16.5 \pm 5.3	16.6 \pm 3.9
22576	15, upp	17.7 \pm 7.0	17.8 \pm 5.4	17.6 \pm 4.6	17.6 \pm 3.6
22578	9, upp	17.7 \pm 3.5	17.7 \pm 3.2	17.4 \pm 3.0	17.2 \pm 2.5
22580	25, upp	16.5 \pm 8.3	16.7 \pm 7.8	17.4 \pm 6.5	17.4 \pm 4.9
22582	35, upp	19.0 \pm 7.3	19.0 \pm 6.4	18.2 \pm 3.6	17.8 \pm 2.8
22584	50, upp	20.6 \pm 6.8	20.7 \pm 6.0	21.5 \pm 6.9	20.1 \pm 6.7
22588	6-7, upp	19.4 \pm 4.5	19.2 \pm 4.2	18.9 \pm 2.6	19.1 \pm 2.0
viðmiðunarferill	6, upp	16.1 \pm 2.2	16.1 \pm 1.8	16.1 \pm 1.6	15.8 \pm 1.3

Tafla 7: Meðalgildi gammamælinga (API) á dýptarbilinu 947–950 m fyrir 1–3 m Gauss síur. Uppgefín skekkja, \pm , er eitt staðalfrávik.

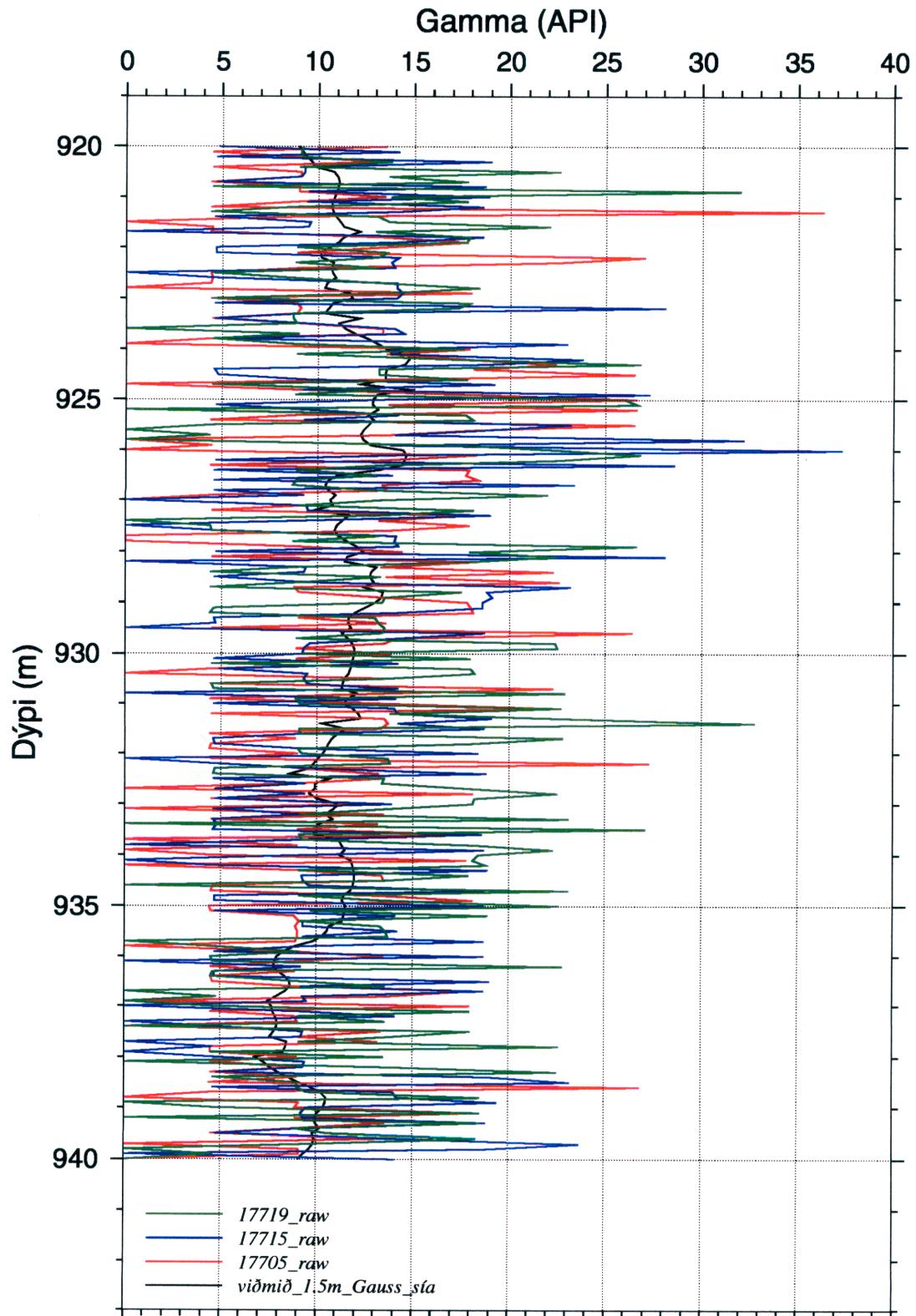
Svuntunúmer mæliferils	Hraði (m/min) og stefna	Gauss sía (m)			
		1.0	1.5	2.0	3.0
17703	50, niður	30.5 ± 13.2	30.9 ± 9.5	33.7 ± 4.6	32.3 ± 1.2
17705	6, upp	23.8 ± 5.7	24.0 ± 5.1	23.6 ± 3.6	23.9 ± 2.6
17713	50, niður	21.2 ± 9.6	22.3 ± 7.6	26.3 ± 2.8	25.0 ± 3.4
17715	6, upp	26.4 ± 5.9	25.7 ± 3.4	25.1 ± 2.5	24.8 ± 1.7
17717	6, niður	36.8 ± 3.5	36.1 ± 3.7	35.9 ± 3.0	35.8 ± 2.1
17719	6, upp	27.1 ± 3.5	27.2 ± 3.2	27.0 ± 2.8	27.4 ± 2.5
17721	6, niður	38.6 ± 3.0	38.5 ± 2.8	37.8 ± 2.7	35.8 ± 2.0
17723	15, upp	31.0 ± 10.2	30.2 ± 9.3	29.1 ± 8.5	27.8 ± 7.5
22572	15, upp	27.8 ± 7.4	28.2 ± 5.7	29.9 ± 2.7	28.0 ± 1.6
22574	15, upp	27.0 ± 6.2	26.6 ± 5.2	26.0 ± 4.6	25.0 ± 3.4
22576	15, upp	25.3 ± 9.1	24.2 ± 7.4	23.2 ± 5.5	22.3 ± 4.2
22578	9, upp	26.0 ± 5.5	26.2 ± 4.8	28.6 ± 3.5	27.6 ± 1.9
22580	25, upp	21.0 ± 6.0	21.6 ± 5.1	21.7 ± 3.5	22.9 ± 3.1
22582	35, upp	26.8 ± 12.7	26.1 ± 11.1	24.9 ± 6.5	24.8 ± 4.3
22584	50, upp	19.7 ± 12.9	19.8 ± 12.5	20.5 ± 8.5	22.6 ± 7.1
22588	6-7, upp	23.4 ± 7.3	23.4 ± 6.2	21.2 ± 2.3	20.7 ± 1.6
viðmiðunarferill	6, upp	26.2 ± 2.7	26.1 ± 2.0	25.7 ± 1.4	25.7 ± 0.9



Mynd 6: Mælisyrpur sem mældar eru niður í samanburði við viðmiðunarferilinn. Notuð er 1.5 m Gauss sía.



Mynd 7: Mælisyrpur sem mældar eru á hraðanum 15 m/mín í samanburði við viðmiðunarfílinn. Notuð er 1.5 m Gauss síð og söfnunartíðni er ýmist 0.1 m eða 0.5 m.



Mynd 8: Upprunalegir mæliferlar, ósíðir, sem notaðir voru í viðmiðunarferilinn, ásamt viðmiðunarferlinum sínunum með 1.5 m Gauss síu, á 920–940 m dýpi.

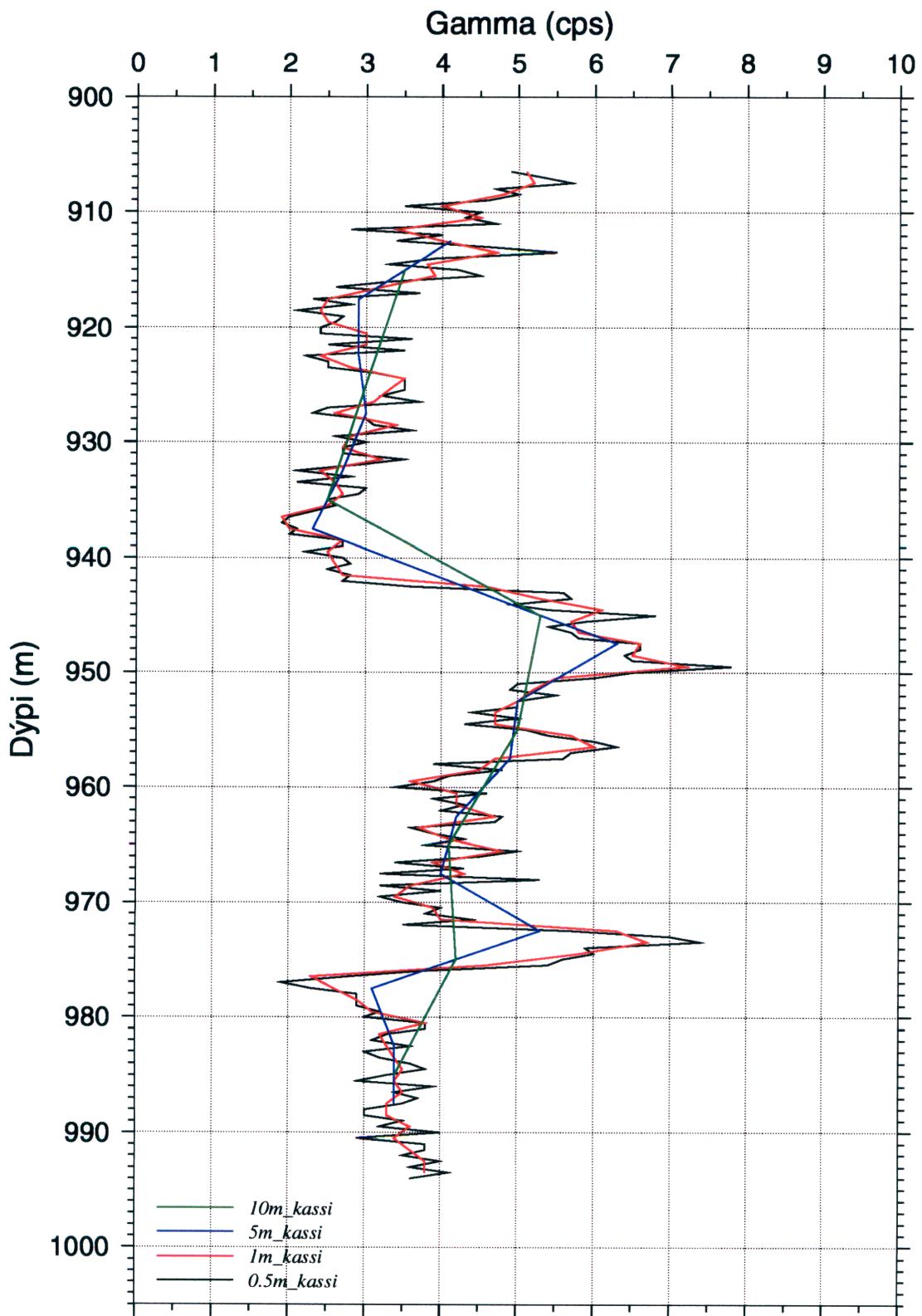
3 Gammageislun reiknuð yfir mislöng dýptarbil

Eftir að áhrif síunar á gamma-mæliferla hafði verið skoðuð, var ákveðið að athuga hvort nýtari upplýsingar fengjust um gæði mælinganna með því að safna öllum mæligildum saman yfir mislöng dýptarbil og skrifa út eitt gildi fyrir hvert dýptarbil. Þetta er gert með því að breyta gammamælingunni úr API einingum í cps, leggja saman allar talningar á dýptarbilinu og skrifa út cps (counts per second) og counts fyrir hvert dýptarbil (kassa), og er það skrifað út á miðju dýptarbilinu ef það er stærra en 0.5 m, annars er skrifað út í byrjun þess. Til að breyta cps í counts þarf að vita tímann sem talningin tók, og er mælihraðinn notaður til að reikna hann. Það er því mikilvægt að hraðinn sé nákvæmt skráður og breytist ekki meðan á mælingunni stendur, þar sem slíkt veldur skekkju í umrekningunum. Með þessu móti er hægt að reikna óvissuna í hverju mæligildi, en hún er eins og fram hefur komið, \sqrt{c} , þar sem c er fjöldi mældra gammaeinda (counts). Byrjað var á að búa til viðmiðunarferil, svipað og lýst var í kafla 2, nema að hér er búinn til einn viðmiðunarferill úr þessum sömu 3 mælisyrpum (hliðruðum eins og áður) og sá ferill síðan endurunninn (safnað í misstóra kassa). Á mynd 9 sést hvernig viðmiðunarferillinn lítur út eftir að safnað hefur verið í misstóra kassa. Þar sést greinilega hvernig dýptarupplausnin minnkar eftir því sem kassarnir (dýptarbilin sem safnað er yfir) stækka. Eftir því sem kassarnir stækka, verður reiknað gamma-gildi meðaltal yfir sífellt stærra dýptarbil.

Á mynd 10 má síðan sjá hvernig firlarnir sem notaðir eru í viðmiðunarferlinum ber saman við hann sjálfan, og á mynd 11 má sjá hvernig mælisyrpum sem mældar eru á 15 m/mín ber saman við viðmiðunarferilinn, þar sem öllu er safnað í 1 m kassa. Áhugavert er að bera saman myndir 4 og 10, en þá sést að í grófum dráttum ber þessum aðferðum vel saman. Greinileg eru þó áhrif þess að skrifa aðeins út eitt gildi í hverjum kassa, borið saman við Gauss-síuna sem skrifar út gildi á öllum sömu dýpum og mælt er á (0.1 m fyrir viðmiðunarferilinn), þ.e. dýptarupplausnin virðist meiri. Hvað sveiflur í mæliferlunum varðar, virðist vera gott samræmi milli úrvinnsluaðferðanna, einnig virðist innbyrðis afstaða mæliferla haldast óbreytt. Einnig virðist raunveruleg dýptarupplausn, þ.e.a.s. ákvörðun á skilum milli jarðlaga, vera mjög svipuð í báðum aðferðum.

Ef myndir 7 og 11 (mælisyrpur sem mældar eru á 15 m/mín) eru bornar saman, má sjá nokkurn mun milli þessara aðferða. Til dæmis fara tveir mæliferlanna niður í núll á nokkrum dýptarbilum (17723 og 22576) þegar 1.5 m Gauss sían er notuð, en ekki ef safnað er í 1 m kassa. Ef skilin milli bergeininga á um 942 m dýpi eru skoðuð, sést að samræmi milli mæliferla er nokkuð svipað milli aðferða, ef eitthvað er þá virðist samræmið heldur skárra ef safnað er í kassa, en ónákvæmnin er samt sem áður 2–3 m. Ef einstakir mæliferlar eru skoðaðir nánar, sést að í sumum þeirra mætti hugsanlega greina gammatoppa sem ekki sjást í viðmiðunarferlinum (t.d. á um 927 m dýpi), né hinum mæliferlunum, og gæti þetta valdið rangtúlkun ef þetta væri eina gammamælingin í holunni. Þetta undirstrikar helstu vandkvæðin við túlkun gammamælinga, þ.e. að í þeim er töluverð óvissa sem verður meira áberandi þar sem gammageislunin er lítil.

Næsta skref í athuguninni var að gera samanburð á mælisyrpunum eftir að þeim hafði verið safnað í misstóra kassa. Þar sem reiknað var út hver raunveruleg talning (counts, c) var á hverju dýpi (út frá skráðu API gildi og hraða), var auðvelt að reikna óvissuna í hverri mælingu og í hverjum kassa. Þetta var gert og eru niðurstöðurnar dregnar saman í töflu 8. Þar er heildartalningin, $\sum c$, yfir allt dýptarbilið (906–994 m) reiknað, en hún er óháð kassastærðinni, auk þess sem meðaltal hlutfallslegrar óvissu, $\frac{\sqrt{c}}{c}$, er fundið fyrir misstóra kassa.



Mynd 9: Viðmiðunarferill, safnað í 0.5–10 m kassa.

Tafla 8: Heildartalning gammageislunar, $\sum c$, yfir dýptarbilið 906–994 m, ásamt meðaltali hlutfallslegrar óvissu, $\frac{\sqrt{c}}{c}$, eftir söfnun í misstóra kassa. Einnig er meðal gammageislunin sýnd í API einingum fyrir 1 m kassa.

Svunta	Hraði (m/mín), mælingabil (m), og stefna	Gammageislun 1 m kassi		Hlutfallsleg óvissa (%).					
		$\sum \bar{c}$	API	Meðaltal, safnað í misstóra kassa.	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m
17703	50, 0.5, ↓	446	17.3	62.8	48.4	34.8	21.3	14.8	
17705	6, 0.1, ↑	3279	15.2	24.7	17.2	12.1	7.6	5.3	
17713	50, 0.5, ↓	445	17.3	64.8	49.2	33.0	20.7	14.3	
17715	6, 0.1, ↑	3410	15.9	24.0	16.7	11.8	7.4	5.2	
17717	6, 0.1, ↓	5571	25.9	18.2	12.8	9.0	5.7	4.0	
17719	6, 0.1, ↑	3617	16.9	23.2	16.2	11.4	7.2	5.0	
17721	6, 0.1, ↓	5536	25.8	18.5	12.9	9.1	5.7	4.0	
17723	15, 0.1, ↑	1363	15.9	39.2	27.3	18.9	11.9	8.2	
22572	15, 0.5, ↑	1491	17.3	37.8	25.7	17.9	11.2	7.9	
22574	15, 0.5, ↑	1446	16.8	37.8	25.6	17.9	11.2	7.9	
22576	15, 0.1, ↑	1404	16.3	39.5	26.6	18.6	11.5	8.2	
22578	9, 0.5, ↑	2313	16.1	29.4	20.4	14.4	9.0	6.3	
22580	25, 0.5, ↑	821	15.9	51.6	35.7	24.5	15.0	10.7	
22582	35, 0.5, ↑	616	16.7	56.4	41.8	28.1	17.5	12.3	
22584	50, 0.5, ↑	478	18.6	57.2	48.3	33.6	20.2	14.2	
22588	6–7, 0.5, ↑	3236	16.3	24.7	17.2	12.1	7.6	5.3	
Viðmið	6, 0.1, ↑	3437	16.0	23.5	16.6	11.7	7.4	5.2	

Í töflu 8 sést greinilega hvernig óvissa mælinga eykst með auknum hraða, þar sem hraða-aukning hefur bein áhrif á mælda gammageislun yfir ákveðið dýptarbil. Einnig er áberandi hærri talning þegar mælt er niður á 6 m/mín heldur en upp, eins og bent hefur verið á hér að framan, en så munur sést ekki þegar mælt er á 50 m/mín, en hafa ber í huga að þær mælingar hafa mikla óvissu eins og sést í töflunni. Athyglisvert er að bera meðal gammageislunina yfir dýptarbilið, mælda í 1 m kössum, saman við niðurstöðurnar í töflu 4. Þá sést að meðalgildin eru nær alltaf hærri þegar safnað er í kassa, og er athyglisvert að meðalgildið fyrir viðmiðunarferilinn er um 1 API hærri þá, og yfirleitt virðist munurinn meiri þegar mæliferillinn er mældur á 0.1 m fresti. Þetta rennir stoðum undir þá ályktun í kafla 2 að söfnun með 0.1 m mælingabili geti hliðrað (lækkað) reiknuðu meðalgildi þegar síun er notuð.

Mynd 12 sýnir greinilega hvernig hlutfallsleg óvissa vex með auknum hraða, og einnig hvernig samsvörun milli mælisyrpna eykst ef lengri kassar eru notaðir. Þetta er reiknað fyrir dýptarbilið 820–940 m, eins og í reikningunum fyrir Gauss síun (sjá mynd 5), og eru niðurstöðurnar hér í góðu samræmi við þær sem þar fengust.

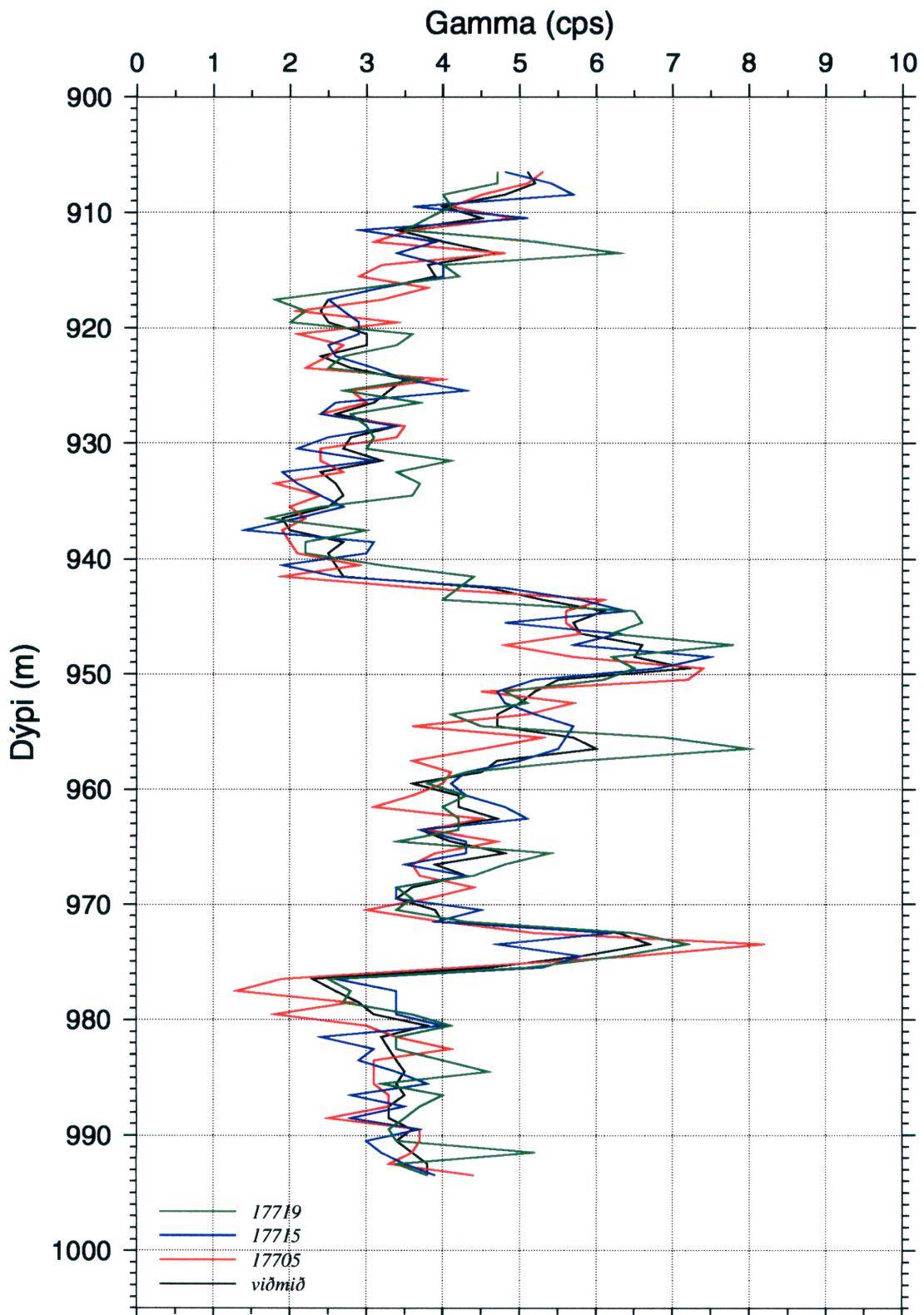
Næst voru þær mælisyrpur sem mældar voru á 15 m/mín skoðaðar aðeins nánar á dýptarbili 920–940 m, til að sjá hvort einhver tölfræðilegur munur væri á þeim. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 9, en athyglisvert er að skoða hana með hliðsjón af töflu 5. Sá samanburður leiðir í ljós að samsvörun milli mæliferla er mun betri þegar safnað er í 1 m kassa en þegar Gauss sía er notuð, og ef Student's t-test er framkvæmt kemur í ljós að allar þessar mælisyrpur, nema 225784 hafa sambærilegt meðalgildi (\bar{cps}) og viðmiðunarferillinn. Þar sem gammageislun er lítil virðist sem betra samræmi sé milli mæliferla þegar þessi úr-

vinnsluaðferð er notuð, og ekki eins mikill munur á meðalgildum þegar safnað er á mislöngu mælingabili og þegar Gauss síun er notuð.

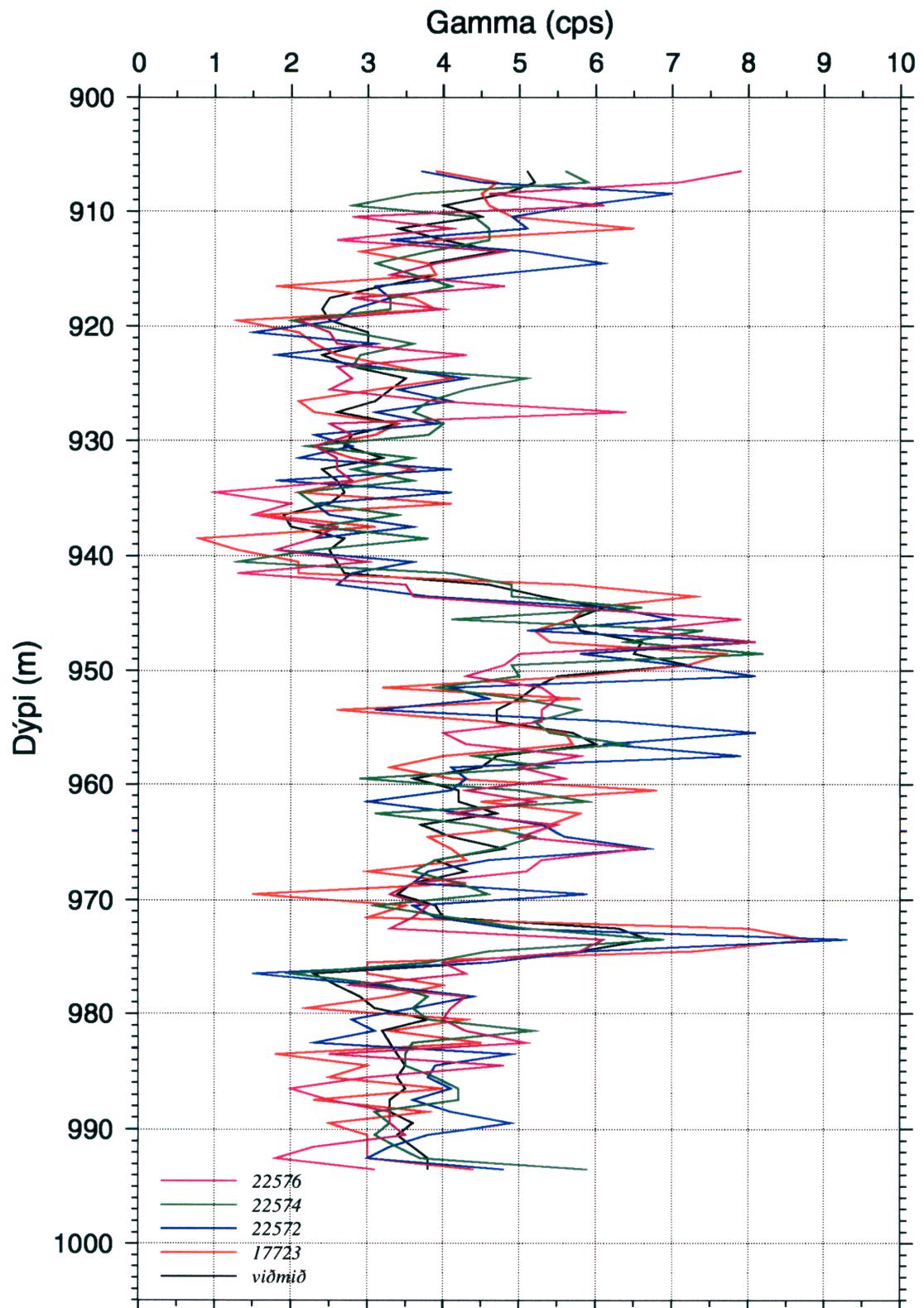
Tafla 9: Tölfræði mæliferla mældra á 15 m/mín, ásamt viðmiðunarferli, safnað í 1 m kassa á dýptarbilinu 920–940 m. Sýnd er heildartalning gammageislunar, $\sum c$, ásamt meðaltali hlutfallslegrar óvissu, $\frac{\sqrt{c}}{c}$, meðal gammageislunin í counts (\bar{c}), cps (ásamt staðalfráviki, $\sigma(cps)$) og API (\overline{API}) einingum.

Svunta	$\sum c$	$\frac{\sqrt{c}}{c} (%)$	\bar{c}	\overline{cps}	$\sigma(cps)$	\overline{API}
17723	212	32.4	10.6	2.66	0.88	10.9
22572	232	30.5	11.6	2.90	0.91	11.9
22574	260	28.3	13.0	3.26	0.81	13.3
22576	218	31.9	10.9	2.72	1.12	11.1
viðmið	551	19.2	27.6	2.76	0.43	11.3

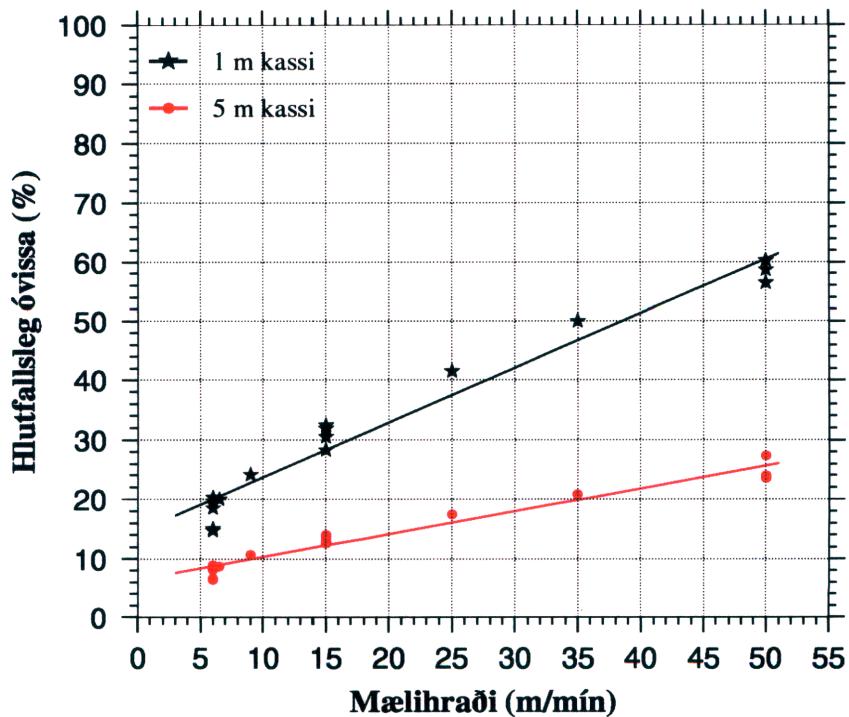
Lokaskrefið í þessum samanburði á gammamælingum var síðan að teikna mismuninn á viðmiðunarferlinum og öðrum mæliferlum og athuga hvort haðn væri innan óvissumarka ferlanna. Þetta er sýnt fyrir mæliferil 22588 (sjá myndir 13–16) sem mældur er á 6–7 m/mín, svipað og viðmiðunarferillinn (6 m/mín), og einnig fyrir mæliferil 22582 sem mældur er á 35 m/mín (sjá mynd 17). Á myndunum hefur mæligildi verið breytt í cps til að auðvelda samanburð milli misstórra kassa, en óvissan er sem áður reiknuð út frá talningunni, c . Þær sýna glögglega hvernig óvissan og flöktið í mismuni ferlanna minnkar eftir því sem kassarnir lengjast (talningin verður þá hærri í hverjum kassa), og í langflestum tilfella er munurinn innan óvissumarka. Einnig koma áhrif mælingahraðans í ljós ef myndir 14 og 17 eru bornar saman, en í mælingunni sem gerð er á 35 m/mín (22582) verða óvissurnar stærri og flöktið meira, en hún er samt sem áður mestmagnis innan óvissumarka.



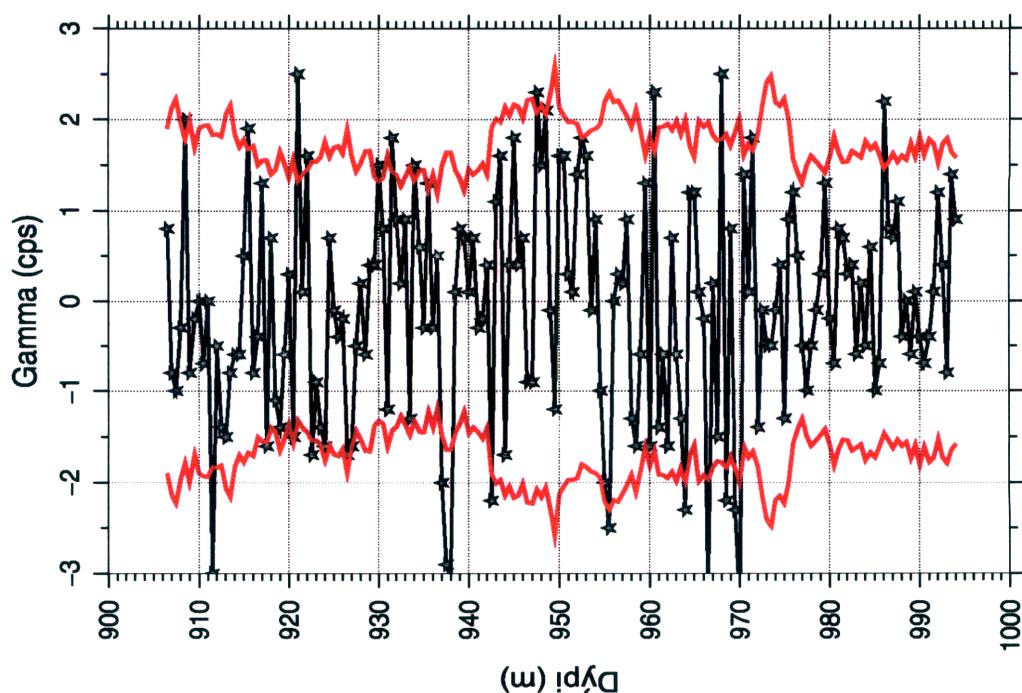
Mynd 10: Mæliferlar (óhliðraðir) sem notaðir eru í viðmiðunarferilinn, ásamt honum, safnað í 1 m kassa.



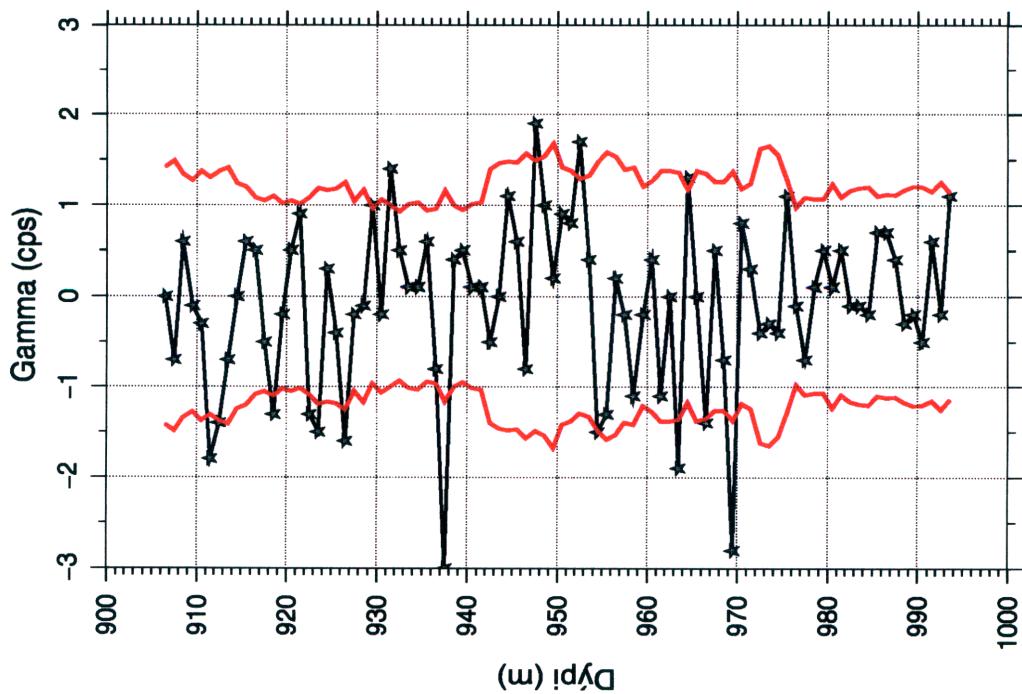
Mynd 11: Viðmiðunarferillinn, ásamt ásamt mælingum sem mældar eru á 15 m/mín, safnað í 1 m kassa.



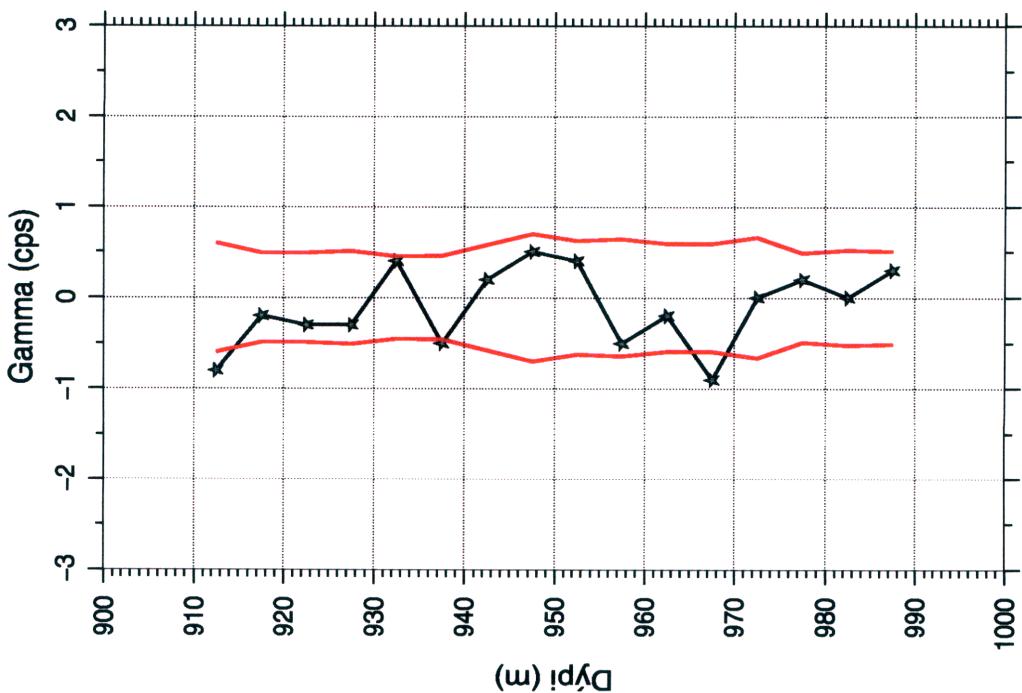
Mynd 12: Hlutfallsleg óvissa, $\frac{\sqrt{c}}{c}$, á dýptarbilinu 920–940 m, sem fall af mælingahraða. Reiknað er fyrir mæliferla sem safnað hefur verið í 1 m og 5 m kassa, og til glöggvunar er sýnd besta lína reiknuð í gegnum hvort gagnasafnið.



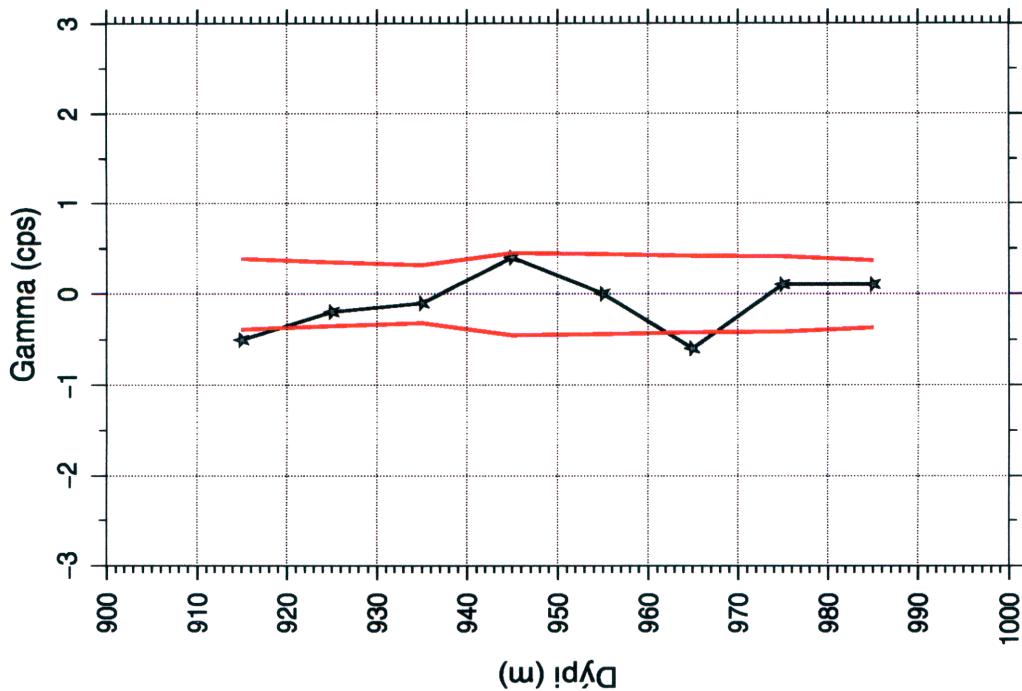
Mynd 13: Viðmið-22588, safnað í 0.5 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.



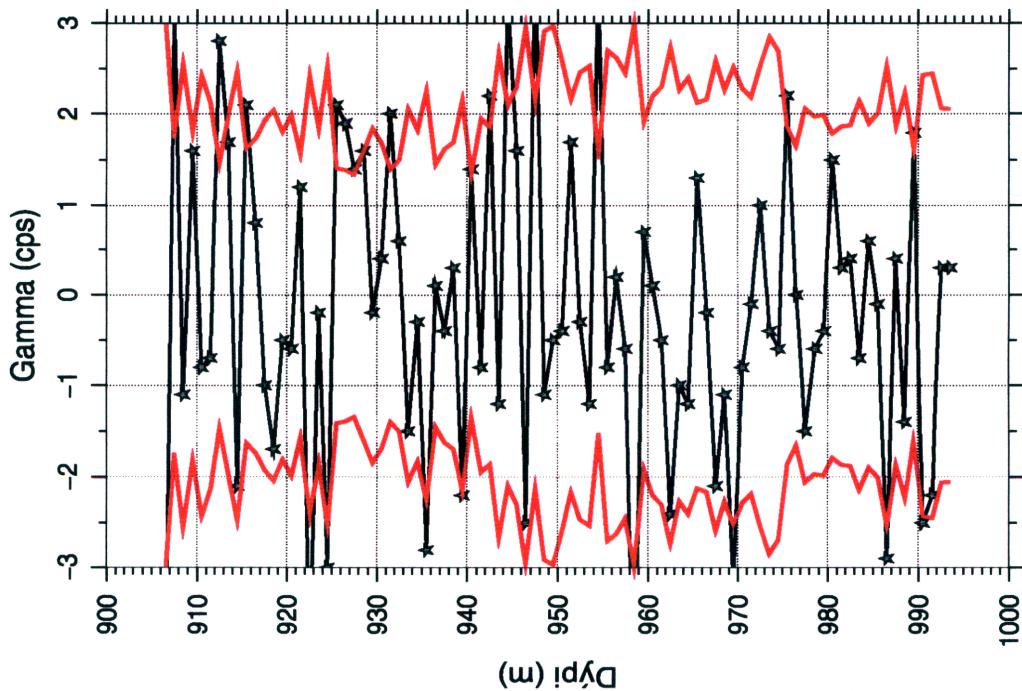
Mynd 14: Viðmið-22588, safnað í 1 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.



Mynd 15: Viðmið-22588, safnað í 5 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.



Mynd 16: Viðmið-22588, safnað í 10 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.



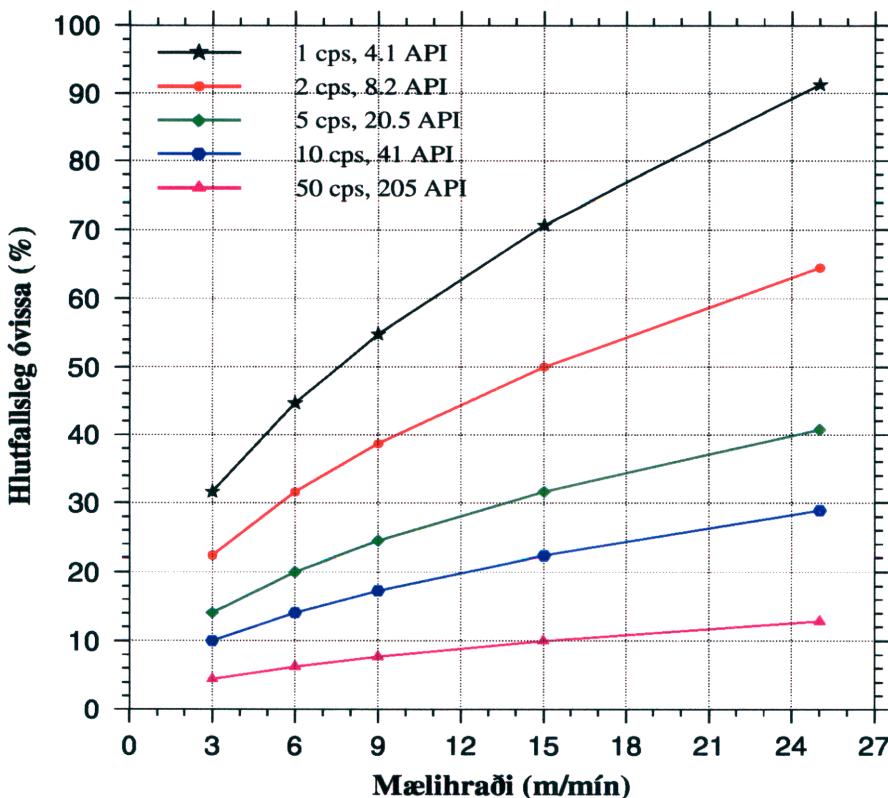
Mynd 17: Viðmið-22582 (35 m/mín), safnað í 1 m kassa, ásamt samanlagðri óvissu mæliferlanna.

4 Umræða og niðurstöður

Í þessari könnun kom í ljós að erfitt er að gera raunhæfan samanburð á gæðum gammamælinga eftir mælingahraða með því að síða mælingarnar. Ástæðan er aðallega sú að meðaltölun breytast frekar rólega og óvissurnar (staðalfrávik) geta verið miklar, sérstaklega þegar mælingahraðinn eykst. Þetta veldur því að þegar ákveðin dýptarbil eru skoðuð þá er oft erfitt að meta tölfræðilegan mun á mælisyrpum.

Þó má segja út frá myndum 1–3 að nauðsynlegt sé að síða mælingarnar með 1–3 m sífu til að hægt sé að túlka mælingarnar án truflana vegna óvissuflökts. Vegna þess að erfitt er að sýna mælióvissu í mælisyrpum þegar þær eru síðar var mælisyrpum endursafnað í misstóra kassa og API gildum breytt yfir í counts. Þannig var hægt að bera saman óvissur þegar safnað er yfir mislöng dýptarbil.

Til að átta sig betur á áhrifum mælingahraða á hlutfallslega óvissa í mælingunni, var hún reiknuð fyrir berg þar sem gammageislunin er frá 1–50 cps (4.1–205 API), og safnað er yfir 0.5 m bil. Þetta er sýnt á mynd 18 og má þar sjá hversu mikill munur er á óvissunni eftir mælingahraða. Hægt er að auka nákvæmni mælingar með því að safna yfir lengra bil og ef bilið er tvöfaltað næst sama nákvæmni á helmingi meiri hraða, en það hins vegar helmingar dýptarupplausnina. Þessar upplýsingar má því notfæra sér til að velja mælingahraða og söfnunarbil ef halda á mælingunni innan ákveðinnar óvissa og einhverjar hugmyndir eru um gammageislunina.



Mynd 18: Hlutfallsleg óvissa sem fall að mælingahraða, þegar safnað er yfir 0.5 m bil og gammageislun bergs er frá 1–50 cps (4.1–205 API).

Myndir 5 og 12 sýna samskonar hegðun og sést í mynd 18, en til að fá nákvæman samanburð milli myndanna þyrfti að reikna með áhrifum misstórra kassa og sía á mæliferlana m.v. ákveðna talningu (cps) sem safnað er í 0.5 m kassa, en þó er greinilegt að báðar þessar aðferðir sýna þá hegðun sem við var búist, þ.e. að hlutfallsleg óvissa eykst með vaxandi hraða.

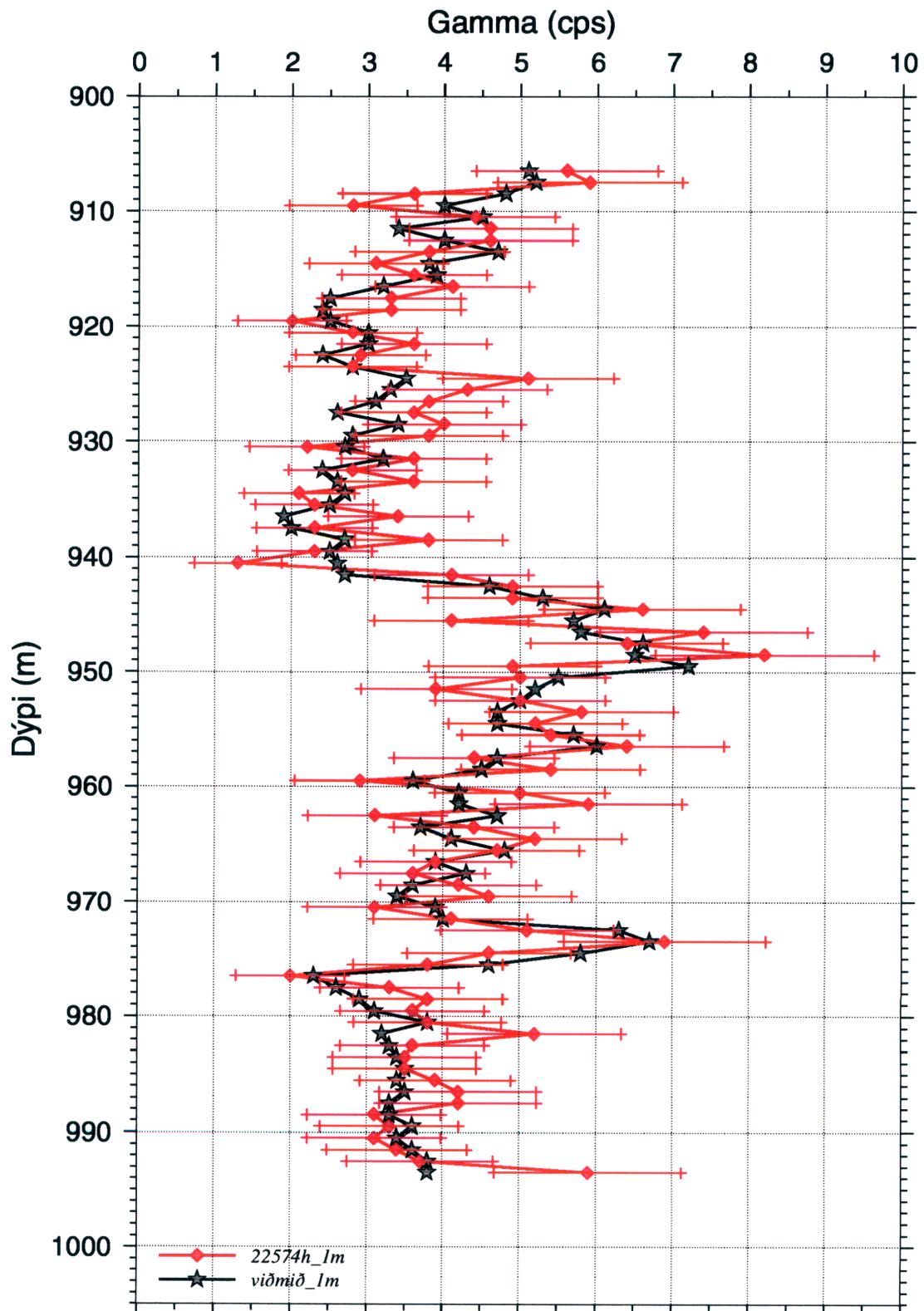
Þar sem í raun er yfirleitt ekki gerð mjög stíf krafa um nákvæmni gammamælinga, heldur frekar reynt að fá mæliferla sem sýna glögglega helstu jarðlagaskil, þá skiptir mestu máli að fá mæliferla sem auðvelt er að túlka. Þá er nauðsynlegt að fjarlægja allar sveiflur í mælingunni sem telja má ómarktaekar, eins og eru t.d. mjög áberandi á mynd 1, en halda samt nægjanlegri dýptarupplausn og nákvæmni. Dálítill munur er á framsetningu mæliferlanna eftir því hvort þeir eru síðir eða safnað í kassa.

Þegar síun er notuð er einhverskonar meðaltal mæligilda skrifað út á sömu dýpum og í upprunalega mæliferlinum, og nær meðaltalið yfir lengra dýptarbil eftir því sem síulengdin lengist. Þar sem skrifað er út gildi á sömu dýpum og í mæliferlinum virðist dýptarupplausnin ekki minnka, en sveifurnar dempast, sjá töflu 2, og erfitt er að reikna óvissuna í hverjum mælipunkti.

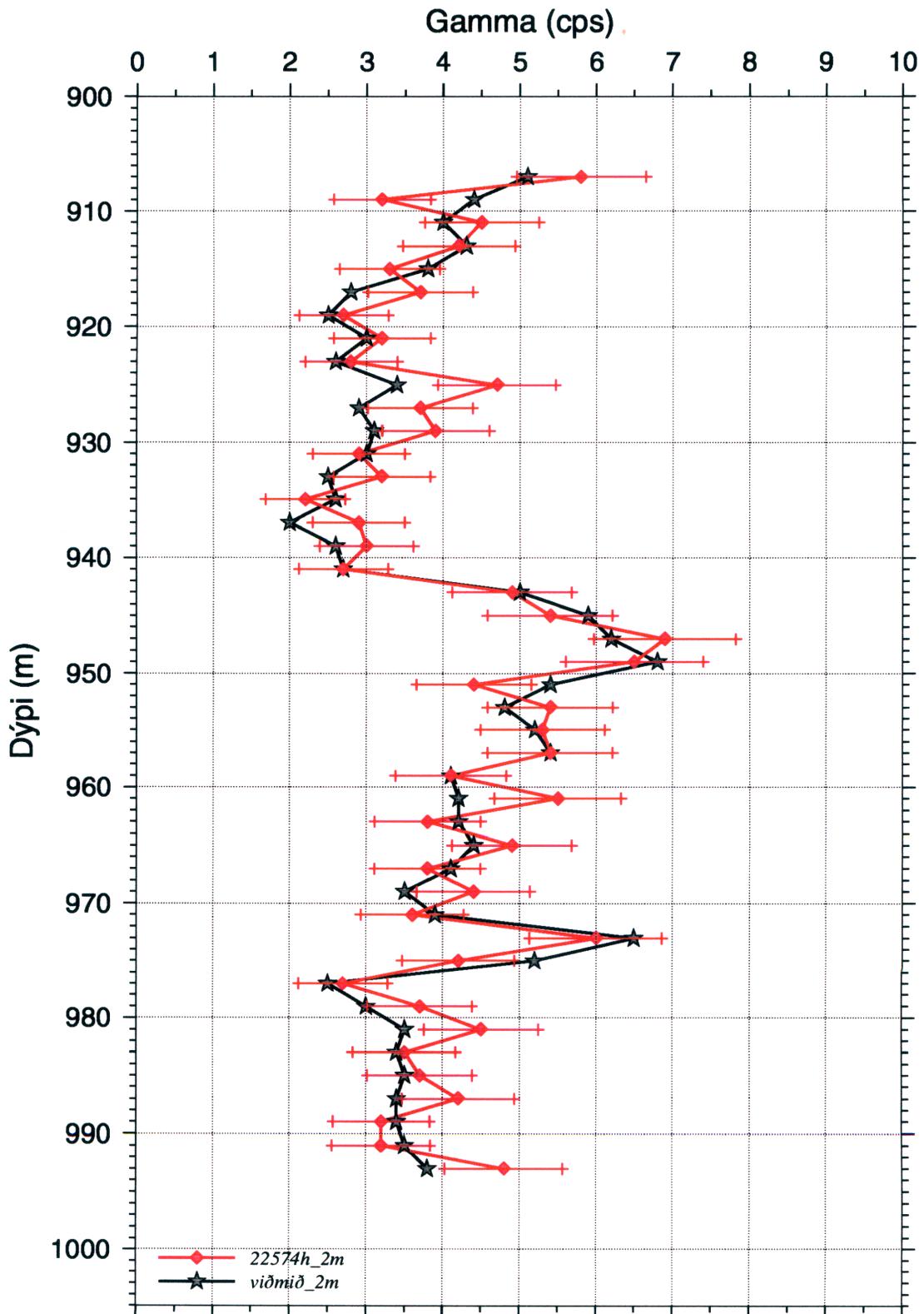
Ef hins vegar er safnað yfir ákveðin dýptarbil, er auðvelt að reikna óvissuna á hverju mælibili, en kassastærðin hefur bein áhrif á þá dýptarupplausn sem fæst. Áhrifin á dýptarupplausnina sjást greinilega á mynd 9, og myndir 13–17 sýna hvernig hlutfallsleg óvissa eykst eftir því sem kassastærðin minnkar og hraðinn eykst. Önnur leið til að sýna þetta er að teikna einhvern mæliferil ásamt óvissu í mælingunni, eftir að hafa safnað ferlinum í misstóra kassa. Þetta er sýnt á myndum 19 og 20, þar sem mæling 22574 (mælihraði 15 m/mín) er teiknuð ásamt óvissum (og viðmiðunarferlinum til samanburðar) eftir að mæliferli var safnað í 1 og 2 m kassa. Á myndunum sést að meiri smáatriði sjást þegar safnað er í 1 m kassa, en ekki er ljóst hvort þau sýni öll raunverulegan mun í gammageislun eða hvort hér er einungis um óvissuflökt að ræða, en óvissan í hverju gildi er mun meiri í 1 m kassa en 2 m. Söfnun í 2 m kassa virðist hins vegar ekki hafa veruleg áhrif á skiptingu í bergeiningar miðað við söfnun í 1 m kassa, og mætti því segja að nægar upplýsingar fengjust með söfnun í 2 m kassa í þessu tilviki. Hins vegar sést á mynd 9 að ef safnað er í 5 eða 10 m kassa þá verður túlkunin mjög gróf.

Val á mælingahraða og söfnunarbili hlýtur að stjórnast af þeim skorðum sem fyrirhuguð túlkun, og sá hana framkvæmir, setur. Í þeirri athugun sem hér var gerð, er ekkert sem bendir til þess að þörf sé á að safna gammagildum á 0.1 m fresti, þvert á móti virðist frekar að það geti haft slæm áhrif á niðurstöðurnar, þar sem þá eykst hættan á að á sumum mælibilanna fáist ekki talning ef gammageislun bergsins er lítil. Því virðist 0.5 m mælingabil henta betur fyrir mælingarnar, en síðan er æskilegt að mælingarnar verði annaðhvort síðar með 1–2 m síu, eða safnað í 1–2 m kassa, en ekki virðist vera hægt að gera ráð fyrir meira en nokkurra metra dýptarupplausn í þessum gammamælingum. Fyrir þá mæliferla sem hér eru skoðaðir gefur 1–2 m síun heldur lægri gammagildi en söfnun í 1 m kassa, en mismunurinn virðist vera innan óvissumarka mælinganna.

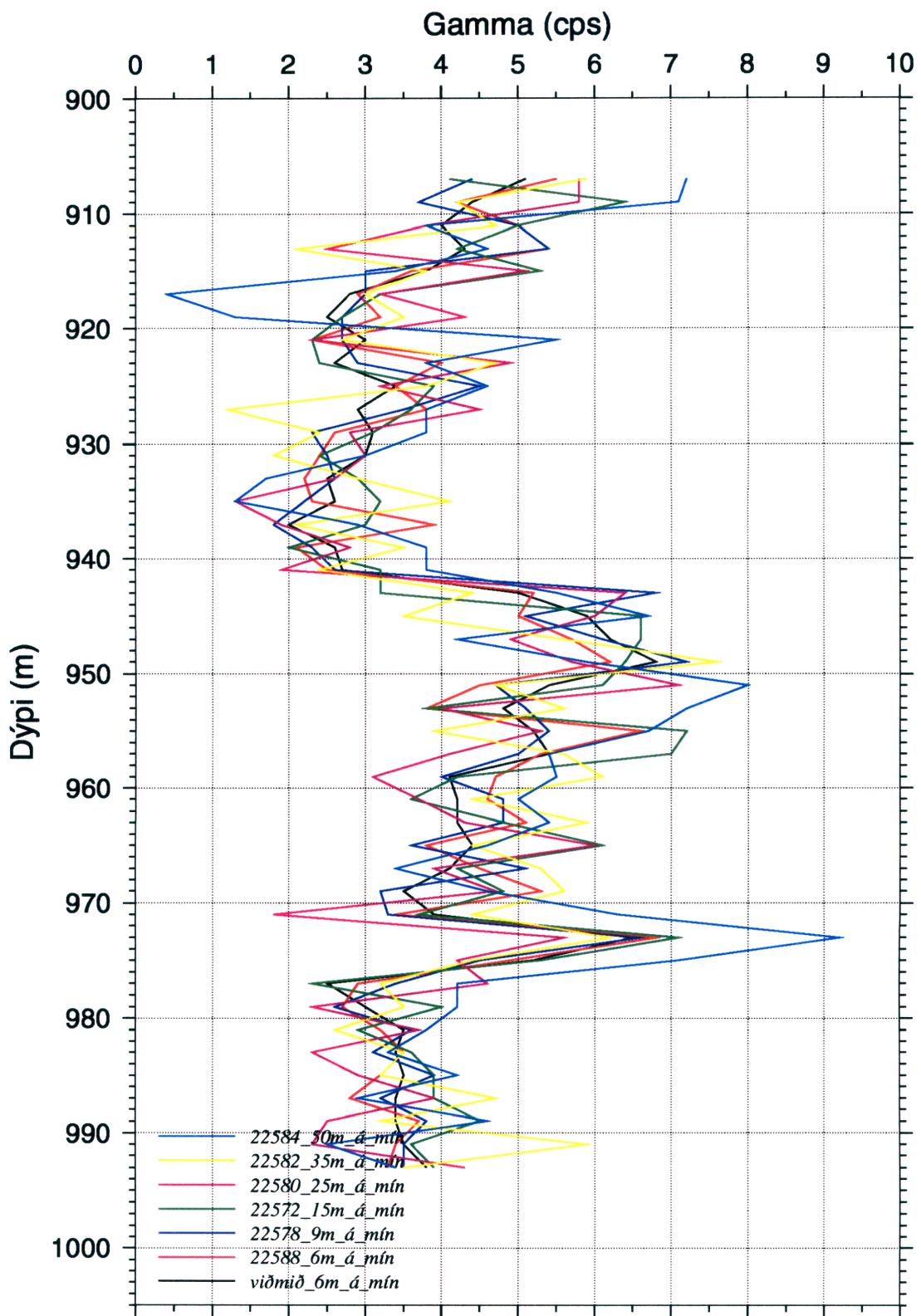
Eins og sést á mynd 21, þar sem sýndar eru mælisyrpur sem mældar eru upp á hraðanum 6–50 m/mín safnað í 2 m kassa, er erfitt að setja stífar skorður á mælingahraðann út frá últiti mæliferlanna sjálfra. Þó má segja að sveiflur virðast aukast með auknum hraða, og aðrar niðurstöður í þessari athugun sýna einnig að nákvæmari mælingar fást eftir því sem hraðinn minnkar.



Mynd 19: Mæling 22574 ásamt óvissu, safnað í 1 m kassa. Viðmiðunarmælingin er sýnd til viðmiðunar, en án óvissu.



Mynd 20: Mæling 22574 ásamt óvissu, safnað í 2 m kassa. Viðmiðunarmælingin er sýnd til viðmiðunar, en án óvissu.



Mynd 21: Mælisyrpur mældar upp á hraðanum 6–50 m/mín, safnað í 2 m kassa.

Heimildir

- Czubek, J. A. (1981). Some aspects on nuclear well logging in igneous rock. Lecture notes OS81009/JHD05, Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík.
- Mendenhall, W., R. L. Scheaffer, and D. D. Wackerly (1981). *Mathematical Statistics with Applications* (Second ed.). Boston, Massachusetts, USA: PWS Publishers.
- Stefánsson, V. and B. Steingrímsson (1990). Geothermal logging I. An introduction to techniques and interpretation. Third ed. OS80017/JHD09, Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík.
- Theys, Ph. (1991). *Log data acquisition and quality control*. 27 Rue Ginoux, 75737 Paris: Éditions Technip.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991, October 8). Free software helps map and display data. *EOS, Trans. Am. geophys. Un.* 72(41), 441, 445–446.