

RAPPORT D2009:01

Övervakning av tätskikt i deponier
med impedansspektroskopi

ISSN 1103-4092



FÖRORD

Sedan årsskiftet ska samtliga svenska deponier uppfylla kraven i förordningen om deponering av avfall. Kraven omfattar bland annat hur mycket nederbörd som tillåts infiltrera genom deponierna. Detta säkerställs genom anläggande av ett tätskikt i samband med sluttäckningen av deponier. Ett sådant tätskikt ska uppvisa god beständighet över tiden och i en sluttäckning för en deponi för ickefarligt avfall fungera under flera hundra år. Det är därför viktigt att kunna övervaka tätskiktets funktion över tiden. Detta projekt syftar till att utvärdera en geofysisk mätmetod, impedansspektroskopi, för detta ändamål.

Projektet har utförts av Rolf Sjöblom, Tekedo AB med stöd från Torbjörn Gustafsson, Uppsala Universitet och Gustav Tham, Telge AB.

Malmö april 2009
Avfall Sverige

Hans-Erik Olsson
Ordf. i arbetsgruppen Deponering

Weine Wiquist
VD Avfall Sverige

SAMMANFATTNING

Enligt Naturvårdsverket skall ett tätskikt i en sluttäckning för en deponi för icke farligt avfall fungera på tilltänkt sätt under "ett flertal hundra år", och för deponier för farligt avfall gäller "ett tusenårsperspektiv". Dessa tider sträcker sig bortom dem som är direkt åtkomliga med experiment, och en förutsättning för denna rapport är att tätskiktets funktion över tid skall kunna övervakas.

För tätskikt med lera och aska har funktionskraven för ett övervakningssystem identifierats som följer:

- enkelt att tillämpa
- låg kostnad
- lägesspecifikt
- fältmässighet
- bibehållen funktion under lång tid
- relevans för egenskaper av intresse

Sammantaget innebär dessa krav att prognosen är god för en elektrisk metod där elektroden utgörs av ett långtidsbeständigt återvinningsmaterial, och där elektroden kan anslutas elektriskt genom att man från tid till annan penetrerar överliggande skyddsskikt med järnrör. Tidigare försök med bentonitmattor har visat att impedansspektroskopi kan användas för mätning av såväl fukthalt som salthalt i ett lermaterial.

Sluttäckningsförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning avser sluttäckning med återvinningsmaterial där tätskiktet utförs med härdande aska. Syftet med det arbete vars resultat redovisas i denna rapport är att undersöka om impedansspektroskopi kan användas för övervakning av dessa tätskikt. Insatserna avser dels en teoretisk genomgång av förutsättningarna genom informationssökning, dels försök i laboratorie-, fat- och fältskala (med avståndet mellan elektroden av storleksordningarna några millimeter, en decimeter respektive en meter).

Informationssökningen har avsett metodiken med impedansspektroskopi, dvs mätning av resistens och kapacitans som funktion av frekvensen över två elektroder med det aktuella materialet emellan, samt metodik för tolkning av data. Särskilda genomgångar har gjorts av förutsättningarna för inducerad polarisation i askor och i bentonitlera. Informationssökningen har även avsett geofysiska metoder, och särskilt impedansmätningar (inducerad polarisation). Teknikerna har jämförts och potentialen för användning för övervakning analyserats.

Resultatet av informationssökningen är att det är svårt att ur ett flerfasigt material kunna härleda de precisa sambanden mellan struktur och impedansdata. En förståelse av de fenomen som avgör utseendet hos impedansspektra är ändå av stort värde i arbetet genom att man får ledning beträffande vilka samband som kan utnyttjas samt får underlag och förutsättningar för att bedöma vilka variationer som kan förväntas. Syftet med arbetet har emellertid inte varit att tolka detaljer i spektra utan att praktiskt tillämpa de variationer som kan registreras.

Det som hittills framkommit pekar på att övervakning med hjälp av en färdigutvecklad metod bör kunna utföras med ordinarie personal utan specialkunskaper.

Jämförelse har gjorts med andra geofysiska metoder men ingen av dessa har kunnat identifieras ha någon liknande god prognos att uppfylla funktionskraven som den metod som huvudsakligen studerats i denna rapport.

Försök har utförts med flygaska, aska blandad med bentonitlera och en åldrad kompositaska, och i laboratorie-, fat- och fältskala. Elektrodmaterialens långtidsbeständighet har särskilt studerats och verifierats. Inför fältförsöken gjordes särskilda analyser beträffande störningar och dimensionering. Inga av dessa visade sig innebära några problem i samband med utförandet. Däremot visade det sig svårt att erhålla stabilitet hos impedansspektrometern vid försöken i fältskala, vilka så småningom visade sig hänga samman med vissa detaljer i instrumentets konstruktion. I några fall lyckades det ändå att registrera spektra, men dessa har inte tolkats eftersom kvaliteten är okänd.

Resultaten från försöken i laboratorieskala innefattar följande:

- Det instrument som använts har en mycket hög reproducerbarhet
- Provberedningen ger reproducerbara resultat (med visst undantag för inhomogenitet i prover med blandning av aska och bentonit)
- Signalen är mycket känslig med avseende på fukthalt

Resultaten från försöken i fätskala innefattar följande:

- Uppskalningen till fätskala var helt oproblematiske
- Kurvformen (d v s totala impedansen respektive fasvinkeln som funktion av frekvensen) var som väntat något avvikande jämfört med laboratorieproverna till följd av ändrad geometri

Resultaten från försöken i fältskala innefattar följande:

- Störningarna från omgivningen var obetydliga
- Instrumentet var episodiskt instabilt till följd av att det inte var särskilt konstruerat för fältmätningar
- De stabila mätningarna var reproducerbara

Slutsatsen av arbetet är att prognosen för att den metod som studerats skall svara mot funktionskraven är god. Inga omständigheter har kunnat identifieras som skulle indikera att något av kraven inte uppfylls.

Informationssökningen har bekräftat det som vi kände till från början, nämligen att metodutvecklingen är krävande med avseende på teori och praktik, men att detta sannolikt inte gäller för rutinmässig användning.

Ett instrument för övervakning behöver inte vara en spektrometer, utan det räcker sannolikt med att det har ett fåtal fasta frekvenser.

De försök som utförts har verifierat samtliga förhoppningar med följande undantag.

- Vi har fått tydliga indikationer på, men inte visat, att metoden kan mäta inte bara vattenhalt utan också salthalt.
- För mätning i fält krävs mätutrustning som är speciellt utformad för att klara att man mäter mot verklig jord. Sådan utrustning finns emellertid kommersiellt tillgänglig.

Ytterligare kunskapsunderlag bör tas fram, och erfarenhet av tillämpning föreligga, innan metoden kan rekommenderas för rutinmässig användning av personer utan särskild utbildning.

Det är viktigt att skilja på vad som erfordras för ett utvecklingsarbete, och hur en metod kommer att fungera i tilltänkt användning. Eftersom den aktuella metodiken är teoretiskt och informationsmässigt krävande finns det en påtaglig risk att den väljs bort till förmån för andra metoder som visserligen är lätta att kvalificera, men som kanske inte uppfyller funktionskraven.

SUMMARY

According to the Swedish Environmental Protection Agency (Naturvårdsverket), a seal in a cover in a landfill for non-hazardous waste should function in the intended manner for “several hundred years” and for a landfill for hazardous waste there exists a “thousand year perspective”. These time-spans extend beyond those directly accessible by experiments, and a prerequisite for the present report is that it should be possible to monitor the appropriate functioning of a seal.

For seals comprising clay and ash, the requirements on a monitoring system have been identified as follows:

- simple to apply
- inexpensive
- position specific
- adapted to field conditions
- maintain its intended function over a long time
- relevance for properties of interest

These requirements combined imply that the prognosis is good for an electrical method where the electrodes are made of a long term durable recycled material, and where these electrodes can be contacted electrically by penetration from time to time by an iron pipe through the protective layer above the seal. Earlier experiments with bentonite mats (geosynthetic clay liners) have shown that impedance spectroscopy can be used for measuring moisture content as well as salt content in a clay material.

The full scale tests with final covers at the Tveta Recycling Plant (Tveta Återvinningsanläggning) are performed using seals made of reactive ash. The purpose of the work leading to the results presented in the present report is to investigate if impedance spectroscopy might be utilized for monitoring such seals. The work comprises an information search regarding the prerequisites, as well as experiments in the laboratory, drum and field scale (with the distances between the electrodes on the order of a few millimetres, one decimetre and one metre, respectively).

The information search has concerned the methodology of impedance spectroscopy, i.e. measurements of resistance and capacitance as a function of frequency over two electrodes with the material in question in between, as well as methodology for interpretation of data. Special compilations have been made of the prerequisites for induced polarization in ash and in bentonite clay. The information search has also covered geophysical methods, and especially measurements of impedance (induced polarization). Comparisons have been made and the potential for use for monitoring has been analyzed.

The result of the information search is that it is difficult to identify the specific relations between structure and impedance data for a multi-phase material. An understanding of the phenomena involved is nonetheless of great value since it provides guidance for identification of what relations might be utilized, as well as prerequisites for assessing what variations might be expected. However, the purpose of the present work has not been to interpret details in the spectra, but to utilize in practice the variations that can be measured.

The information compiled and results obtained so far indicate that a commercial product based on the presently investigated methodology can be used by the ordinary staff without any specialist knowledge.

Comparison has been made with other geophysical methods, but none of them has been identified to possess any similar positive prognosis for fulfilling the functional requirements as the main method studied in the present report.

Experiments have been made with fly ash, ash mixed with bentonite clay and an aged composite ash. They have been carried out on a laboratory, a drum and a field scale.¹ A special study has been made on verification of the longevity of the electrode material. In the initial phases of the project, special analyses were made on dimensioning as well as the possibilities of disturbances from external sources. It was found that none of them gave rise to any problems in conjunction with the execution of the tests on the field and other scales. However, it proved difficult to obtain stability in the instruments used in the field tests. Eventually, it became evident that the reason for this was connected to details in the design of the instruments. Nonetheless, spectra could be recorded in some cases. They have not been interpreted, however, since the quality is unknown.

The results of the tests on the laboratory scale include the following:

- The instrument used had a very high reproducibility
- The sample preparation gave rise to reproducible results (with certain exceptions for inhomogeneity in the samples with a mixture of bentonite and ash)
- The signal is very sensitive with regard to moisture content

The results of the tests on a drum scale include the following:

- The scaling up to drum scale was entirely unproblematic
- The curve shapes (absolute impedance and phase angle, respectively, versus frequency) deviated somewhat from those of the laboratory scale. This was expected in view of the differences in geometry.

The results of the tests on the field scale include the following:

- The external disturbances were insignificant
- The instrument was unstable episodically since it was not constructed specially for field use
- The stable measurements were reproducible

The conclusion is that the prognosis for the method meeting the functional requirements is good. No circumstances have been identified that might suggest that any of the requirements might not be fulfilled.

The information search has confirmed what we knew from the beginning, namely that the methodology development is daunting with regard to theory and practice, but that this is probably not the case for routine application.

¹ The ash in question originates from recycled fuels mainly containing wood. The composite ash might contain some ash from coal combustion, but otherwise very little coal is combusted in Sweden at present.

An instrument for monitoring does not need to be a spectrometer. It is probably sufficient that measurements can be made at a few fixed frequencies.

The experiments performed have confirmed all of the expectations with the following exceptions:

- We have received clear indications, but not shown, that the instrument can measure not only water content but also salt content
- For measurements on the field scale it is required that the measuring equipment is specially designed for field measurements with real earth. Such equipment is commercially available, however.

The present knowledge base should be extended, and experience from field tests should exist before the method can be recommended for routine use by personnel without special education for the purpose.

It is important to differentiate between what is required for development work, and how a method is to be applied for routine use. The present method is theoretically and knowledge-wise daunting. Therefore, there is a substantial risk that it becomes repudiated to the advantage of other methods that are easier to qualify, but that perhaps do not fulfil the functional requirements.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning

Summary

1	Bakgrund	1
1.1	Behov av och syfte med övervakning av tätskikt i deponier	11
1.2	Val av metodik	12
1.3	Sluttäckningsförsöken vid tveta återvinningsanläggning	14
2	Syfte och uppdrag samt strukturering av arbete och rapportering	17
2.1	Syfte och uppdrag	17
2.2	Strukturering av arbete och rapportering	18
2.2.1	Allmänt	18
2.2.2	Utförandeformer	19
2.2.3	Struktureringen av denna rapport	20
2.2.4	Tack	20
3	Informationssökning och kunskapssammanställning	22
3.1	Impedanssprktroskopi	22
3.1.1	Grundläggande teori	22
3.1.2	Om ekvivalensketsar och representationer i diagram	24
3.1.3	Mättekniken	27
3.2	Förutsättningar för inducerad polarisation i askor	28
3.2.1	Allmänt	28
3.2.2	Faser i färska och åldrade askor samt deras egenskaper	30
3.2.3	Tänkbara mekanismer	37
3.3	Tidigare arbeten med bentonit	38
3.3.1	Tänkbara mekanismer för polarisationen	38
3.3.2	Experimentella resultat	42
3.4	Geofysiska mätningar	46
3.4.1	Impedansmätningar	46
3.4.2	Andra tekniker	47
3.4.3	Tillämpningar och jämförelser	49
4	Försök	51
4.1	Experimentellt	51
4.1.1	Askmaterialen	51
4.1.2	Elektrodmaterialen	53
4.1.3	Störningar och dimensionering	56
4.1.4	Mätinstrumenten	57
4.1.5	Uppläggning och utförande av fatförsöken	58
4.1.6	Uppläggning och utförande av fältförsöken	59
4.2	Resultat från mätningarna	65
4.2.1	Resultat från försöken i laboratorieskala	65
4.2.2	Resultat från fatförsöken	76
4.2.3	Resultat från fältförsöken	82
5	Diskussion och slutsatser	84
5.1	Resultat från informationssökningen	84
5.2	Resultat från försöken	84
5.3	Slutsatser från studien	86
5.4	Diskussion och slutsatser beträffande kostnader	87
6	Referenser	89
7	Appendix A – Positionsdata för fältinstallationerna	95

1 BAKGRUND

1.1 Behov av och syfte med övervakning av tätskikt i deponier

Avfall kan ibland ha sådana egenskaper att det inte kan återvinnas utan måste deponeras, eventuellt efter behandling. Deponeringen skall utföras på ett sådant sätt att risken för skada på hälsa och miljö är liten såväl nu som i framtiden. Därför finns det regler, dels för hur en deponi skall vara utformad[1], dels för vilka typer av avfall som får läggas upp på olika klasser av deponier[2-3].

Reglerna om utformning[1] säger bland annat följande:

Typ av deponi	Transporttid genom geologisk barriär, år	Maximalt läckage genom tätskikt, liter/m ² år
Deponi för farligt avfall	200	5
Deponi för icke farligt avfall	50	50
Deponi för inert avfall	1	-

Om avfall skall anses vara farligt avfall eller inte avgörs enligt Avfallsförordningen[2], och ytterligare bestämmelser, bland annat beträffande acceptabel tillgänglighet för perkolerande vatten, återfinns i Naturvårdsverkets acceptanskriterier[3].

Ett tätskikt behöver inte skydda efter det att alla potentiellt miljöstörande ämnen lakats ut eller omvandlats till ofarliga ämnen. Detta kan dock i många fall ta mycket lång tid.

Antag exempelvis att ett icke farligt avfall med maximal blyhalt enligt Avfallsförordningen (0,5 viktsprocent) lakas med maximalt tillåten hastighet enligt Naturvårdsverkets acceptanskriterier (1 mg/liter) i en deponi för icke farligt avfall, d v s med maximalt läckage 50 liter per år. För en deponi med höjden 10 meter och densiteten 2 kg/liter tar det med dessa förutsättningar ca 2 miljoner år innan allt bly lakats ut.

Denna tid för utlakning är uppenbarligen orealistisk eftersom man kan räkna med ett antal glaciationer under denna tid och att var och en av dessa kan förväntas allvarligt störa eller omintetgöra funktionen hos ett tätskikt.

Undersökningar har också visat[4] att många typer av avfall stabiliserar sig själva med tiden och gör ingående potentiellt miljöstörande ämnen otillgängliga. Därmed kan behovet av funktion hos ett tätskikt vara begränsat i tid.

Utgångspunkten i denna rapport är Naturvårdsverkets uttalande [5], där det anges att en deponi för icke farligt avfall skall fungera på tilltänkt sätt under "ett flertal hundra år" och att för deponier för farligt avfall gäller ett "tusenårsperspektiv".

Erfarenheterna från kärnavfallsforskningen[6] visar på att prediktioner över hur ämnen uppträder under långa tider måste göras delvis på ett annorlunda sätt jämfört med dem för sådana kortare tider som är direkt åtkomliga genom experiment och erfarenhetsåterföring. För långa tider krävs tillgång till naturliga och antropogena analogier samt en förståelse beträffande de mekanismerna som har betydelse.

Aktuella slutförvar för kärnavfall i Sverige är förlagda i berg, vilket innebär betydligt mera begränsade möjligheter till reparation jämfört med deponier för ”vanligt” avfall, vilka i de allra flesta fall ligger i markytan.

Utgångspunkten för utformning av tätskikt i deponier är därför dels att de skall behålla sin funktion under lång tid (hundratals och tusentals år för icke farligt respektive farligt avfall [5]), dels att denna funktion skall kunna övervakas. Övervakningen syftar dels till bekräftelse av att den tilltänkta funktionen upprätthålls, dels till att ge indikation om och när eventuell reparation kan behöva övervägas.

1.2 Val av metodik

Idéerna bakom det arbete vars resultat redovisas i denna rapport uppkom bl a i ett tidigare uppdrag om Långtidsegenskaper hos tätskikt innehållande bentonit[7]². I denna rapport identifierades bl a ett antal potentiella svagheter hos bentonitmattor med avseende på deras funktion under lång tid, samtidigt som det i den internationella litteraturen påpekades att det föreligger ett behov av metodik för övervakning som är tillämplig för bentonitmattor[8-10].

Bakgrunden till detta konstaterande är att det sedan många år finns kommersiellt tillgänglig metodik för mätning av läckage genom tätskikt med plastfolie. Detta görs med hjälp av system med elektriskt ledande trådar över och under tätskiktet. Trådarna över tätskiktet är orienterade i 90 graders vinkel i förhållande till dem under och detta innebär att man relativt noggrant kan bestämma platsen för ett eventuellt läckage.

Något motsvarande är inte möjligt för bentonitmattor eftersom dessa är elektriskt ledande i deponimiljö. Det som främst står till buds är övervakning av lakvatten, vilket dock inte är särskilt lägesspecifikt eftersom utgående dränage normalt kommer från en relativt stor deponiyta.

Det är viktigt i industriellt utvecklingsarbete att tidigt klarlägga vilka krav på funktion som föreligger. För tätskikt med lera och aska har funktionskraven identifierats som följer:

- enkelt att tillämpa
- låg kostnad
- lägesspecifikt
- fältmässighet
- bibehållen funktion under lång tid
- relevans för egenskaper av intresse

Det finns många exempel på naturliga och tillverkade ämnen och som kan bibehålla sin integritet i mark under långa tider. Så snart en någorlunda sofistikerad funktion efterfrågas blir dock erfarenheterna av långtidsfunktion få. Generellt observeras snarare att så snart någon typ av sond skall ligga i markmiljö under en längre tid så uppkommer problem av olika slag.

Det arbete vars resultat redovisas i denna rapport gör inte anspråk på att innefatta någon uttömmande inventering av de möjligheter som kan tänkas stå till buds. Inte heller har någon studie påträffats avseende övervakning av tätskikt innehållande aska med undantag av studier med lysimetrar under tätskiktet samt kontroll av dränage från under tätskiktet. (Ytterligare material kring detta finns i Avsnitt 3.4).

² Detta arbete finansierades av Ragn-Sells Avfallsbehandling AB, SÖRAB, Avfall Sverige, Telge Återvinning AB och Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse.

Däremot har man studerat förekomst och förflyttning av vatten i deponier med hjälp av olika metoder, och en sammanfattning av kunskapsläget ges i Referens [11]. I denna översiktsartikel beskrivs följande tekniker: neutronprob, elektrisk resistens och impedans, elektromagnetiska mätningar, elektrisk resistenstomografi, PGTT och optiska fibrer. PGTT står för Partitioning Gas Tracer Technique som innebär att lätt detekterbara och flyktiga ämnen (t ex sådana som är märkta med radionuklider) injiceras i deponin. Två ämnen injiceras samtidigt. Det ena har en stark och det andra en svag absorption till förekommande porvatten. Skillnaden i transporttid återspeglar vattenhalten.

Rapporten kommer fram till att elektriska motstånds- och impedansmätningar kan ge upphov till systematiskt överdrivna värden, vilket knappast är förvånande med tanke på att avfall i deponier innehåller obestämda och ojämnt fördelade andelar metalliskt material. Elektriska mätningar uppges emellertid vara lämpliga för att följa fuktfronter och för att de är snabba. De bästa resultaten uppnåddes med PGTT. Den fiberoptiska metoden uppges vara lovande men behöver undersökas vidare innan den kan utvärderas.

De problem med inhomogeniteter samt förekomst av metallskrot som redovisats kan dock knappast förväntas uppkomma för tätskikt med leror och / eller askor. Inte heller diskuterar översiktsartikeln [11] långa tider.

För att en övervakning skall fungera över långa tider bör graden av komplexitet hos eventuella sonder som används vara liten. Däremot kan det vara acceptabelt att den mätutrustning som från tid till annan kopplas in kan få vara komplicerad. Det är inte heller något krav att uttolkning av data skall vara enkel. Däremot kan man förvänta sig att sådan utvärdering kan utföras av datorer åtminstone efter en initial karakterisering.

Allt detta talar för att potentialen kan vara god för elektriska mätningar.

Elektrisk ledningsförmåga är vidare en egenskap som kan variera, varieras och mätas över ett stort antal tiopotenser, vilket talar för att en sådan metod också skulle mäta något med tillräcklig relevans för bedömning av funktionen hos tätskiktet.

Tidigare studier i laboratorieskala med bentonitmattor[12-13] har pekat på att impedansmätningar kan göras över en bentonitmatta och att elektroderna på ömse sidor om mattan kan utföras i återvinningsmaterialet hyttso. (Detta arbete beskrivs i Avsnitt 3.3 nedan).

Uppskalning innebär en motsvarande linjär ändring av kapacitans och resistans. En mätkonfiguration med planparallella elektroder med aktuellt material mellan dem får vid en linjär förstoring på 10 gånger alltså en 100 större elektrodyta och ett 10 gånger större avstånd mellan elektroderna. För oförändrade dielektricitetstal och resistivitet innebär detta att resistensen blir 10 gånger lägre för den större cellen jämfört med den mindre, och kapacitansen 10 gånger större.

För aktuella resistiviteter och dielektriska egenskaper bör det alltså i princip bli lättare att mäta såväl resistens som kapacitans för en uppskalad krets. Dock blir kablarna längre, varför deras kapacitans kan kräva uppmärksamhet och särskild dimensionering.

Det förekommer också olika externa elektriska störningar som kan tänkas påverka mätningarna. Under arbetets gång tvingades vi också att uppmärksamma att instrumentens konstruktion också hade betydelse.

1.3 Sluttäckningsförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning

Tveta Återvinningsanläggning ligger utanför Södertälje. Den drivs av Telge Återvinning AB, som är ett dotterbolag till Telge AB. I dag tar anläggningen emot ca 200 tusen ton material per år varav ca 95 % återvinns.

Inkommande material består av hushållsavfall, verksamhetsavfall och aska samt gatu- och industrislag. Hushållsavfallet sorteras i bl a en fraktion som rötas och komposteras för användning som jordförbättringsmedel, och verksamhetsavfallet sorteras huvudsakligen till skrot och bränsle. Inkommande aska från fjärrvärmeanläggningar används huvudsakligen för sluttäckningsändamål.

Metodiken för sluttäckning har utprovats på ett ca 4 hektar stort område med sju olika försöksytor på vilka olika materialkombinationer testas. Testerna har även omfattat olika appliceringsförfaranden och släntlutningar. Ett flygfoto över Tveta Återvinningsanläggning visas i Figur 1.

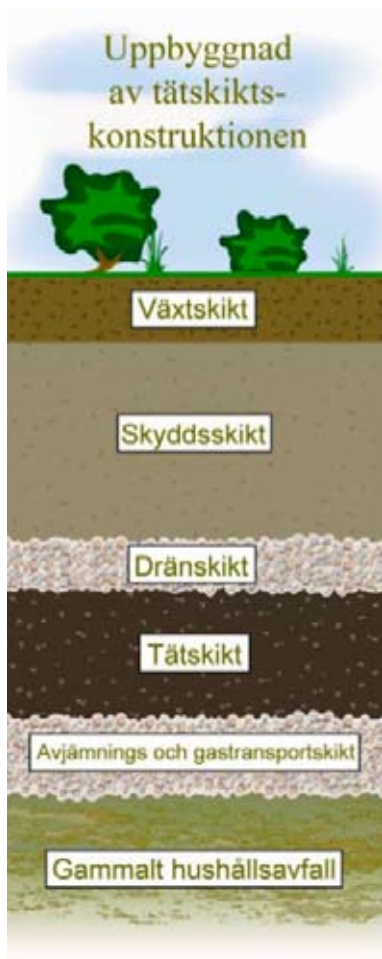
Impedansspektroskopiska mätningar har utförts i yta 3, se särskild markering i Figur 1.

Sluttäckningens principiella uppbyggnad visas i Figur 2 där också ingående material för yta 3 redovisas. En allmän översikt över sluttäckningsförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning har nyligen publicerats[14].

Syftet med sluttäckningsförsöket är främst att pröva om askor kan fungera som tätskiktmaterial. De askor som ingår i tätskikten är mycket reaktiva och härdar till ett kompakt och tätt men segt material (dvs segt jämfört med t ex portlandcement).



Figur 1 Ovan. Flygbild över Tveta Återvinningsanläggning med askupplaget i bakgrunden och östra slänten med de sju ytorna med sluttäckningsförsök inramade med rött i förgrunden. Försöken med impedansspektroskopi ägde rum vid den runda ringen i yta tre, se gul markering på fotot.



Figur 2 Vänster. Den principiella uppbyggnaden av tätskiktskonstruktionen (figuren är ej skalenlig) i de sju försöksytorna. I var och en av ytorna testades olika material och appliceringsförfaranden. I yta 3 användes följande material:

Växtskikt ($\approx 0,2$ m)	Kompost från bioavfallskompostering
Skyddsskikt ($\geq 1,5$ m)	Avvattnat rötat slam från reningsverk blandat med finfraktion från slaggrus från avfallsförbränning
Dräneringsskikt ($\approx 0,3$ m)	Upparbetat slaggrus från avfallsförbränning
Tätskikt ($\geq 1,0$ m)	0,3 meter: bottenaska från samförbränning (biobaserad aska från samförbränning) med 12 % inblandning av bentonitlera av kvaliteten Friedland ton + 0,7 meter: flygaska från samförbränning
Avjämnings-skikt ($\geq 0,3$ m)	Bäddsand

Resultaten hittills visar att ytorna klarar kravet enligt ovan för deponi för icke farligt avfall vilket uppgår till 50 liter per kvadratmeter och år. Ett par av ytorna klarar till och med kravet för deponi för farligt avfall, vilket är 5 liter per kvadratmeter och år.

Sluttäckningsförsöken är upplagda och planerade som långtidsförsök, d v s det sker en kontinuerlig uppföljning av utvecklingen av porvattenkemin i olika delar av sluttäckningarna. I ett par fall har man efter några år grävt ner till tätskiktet och tagit prov. Undersökningar av dessa har visat att materialet är starkt konsoliderat.

2 SYFTE OCH UPPDRAG SAMT STRUKTURERING AV ARBETE OCH RAPPORTERING

2.1 Syfte och uppdrag

Syftet med uppdraget är att försöka få fram en tillämpning i full skala av impedansspektroskopisk metodik som kan tillämpas på tätskikt av aska och bentonit och som uppfyller de funktionskrav som redovisats i Avsnitt 1.2.

Huvuduppgifterna är således att få fram kunskap om följande:

- hur metodiken fungerar för aska och för blandningar av aska och bentonit
- hur metodiken fungerar i pilot³- och fältskala

Kunskapen skall tas fram på följande sätt:

- informationssökning
- praktiska försök i laboratorie-, pilot- och fältskala

För att uppfylla funktionskravet avseende enkelhet att tillämpa i kombination med bibehållen funktion under lång tid har slutsatsen dragits att inga ledningar får dras genom tätskiktet.

I arbetet har vidare följande frågeställningar ingått så långt möjligt:

- Variationer av mätmöjligheterna med hänsyn till sammansättningen hos tätskikt och eventuella övriga delar av tätskiktet som kan komma att befinna sig mellan ”elektrodena”
- Planering med hänsyn till betydelsen av elektriska störningar
- Bestämning av vad det är man kommer att mäta i form av t ex uttorkning, förändring av mikrostrukturen till följd av ökad salthalt, förstörelse av mikrostrukturen vid hög halt alkali, e t c
- Hur detta hänger samman med företeelser i deponin i form av sättningar och förändringar i kemisk miljö
- Materialfrågor, till exempel om ingående platt- eller nätmaterial samt kablar korroderar.
- Lämplig mätgeometri
- Lämplig utformning av elektriska förbindelser över en deponi
- Specifikationer inför tillverkning
- Specifikationer inför utläggning av material på deponin

I uppdraget ingår också att relatera tekniken med impedansspektroskopi till andra geofysiska metoder.

³ Med pilotskala avses fältskala.

2.2 Strukturering av arbete och rapportering

2.2.1 Allmänt

Inför tillämpning av en i och för sig känd teknik - såsom impedansspektroskopi - på nya material och i annan skala, dvs fältskala, krävs en strategi som innebär att man så tidigt som möjligt försöker identifiera vad som kan vara annorlunda med andra material och med annan skala och därmed kräva utvecklingsinsatser.

Att arbeta i annan skala eller med andra material behöver dock inte alltid vara någon utmaning i sig. Om förutsättningarna är desamma behövs ju nämligen bara en verifiering av att det hela fungerar.

Uppskalning kräver särskild uppmärksamhet, eftersom storskaliga försök ofta är betydligt kostsammare jämfört med försök laboratorieskala. Därför är det särskilt viktigt i samband med uppskalning att så långt möjligt söka tänka sig in i vad som kan skilja mellan liten och stor skala, och vad som därför kräver särskilda insatser och utprovning, och vad som rimligen kan förväntas bara kräva verifiering.

Detta återspeglas i de frågeställningar som redovisats i Avsnitt 2.1 Syfte och uppdrag. Sålunda utfördes impedansmätningar i först i laboratorieskala, och därefter i fat- och fältskala.⁴ Inför fältmätningarna gjordes särskilda utredningar om geometri och dimensionering av ledningar mm, samt mätningar avseende elektriska störningar av olika slag såväl i nät⁵- som i markjorden.

Inga av de potentiella problem som hade identifierats initialt visade sig leda till några egentliga svårigheter. Informationssökningen har därmed gett förväntade resultat liksom försöken i laboratorie- och fätskala.

Däremot visade det sig att de två impedansspektrometrar från Uppsala Universitet som användes under försöken inte var konstruerade för att mäta på annat än prover med helt fritt flytande jord⁶. Som närmare beskrivs i Avsnitt 4.1.6 visade det sig vidare vara svårt att såväl undersöka som få besked från tillverkarnas tekniska support om vari dessa begränsningar bestod samt i hur mätningar i fält kunde utföras. Till slut deltog en person från den tekniska supporten för en av tillverkarna i en fältmätning, men inte heller han lyckades få instrumentet att fungera tillfredsställande. Därmed lades betydligt mer arbete än ursprungligen planerat ner på att försöka lösa problemen med fullskalemätningarna. Som närmare beskrivs i Avsnitt 4.1.6 har vi nu funnit orsaken till problemen, och även kunnat dra slutsatsen att problemen handlar om instrumentkonstruktionen. Delar av fältmätningarna är emellertid reproducerbara och ger därmed information om vad som kan förväntas i fältskala. Kvaliteten och tillförlitligheten är emellertid lägre än den ursprungligen förväntade. Vi ser ändå erfarenheten om betydelsen av instrumentens interna uppbyggnad, vilken ”hemlighålls” av tillverkarna, som en viktig kunskap att redovisa för fortsatt arbete med impedansspektroskopisk övervakningsmetodik.

En lägesrapport presenterades 2005-01-19. Där redovisades att mätningar i laboratorieskala pågick, att faten för försöken i fätskala var färdiga för mätning, samt att dimensionering och installation utförts för fullskaleförsöken. Resultaten av arbetet i detta skede presenterades också i form av en poster till Third International Landfill Research Symposium som ägde rum i Sapporo under tiden 29 november – 2 december år 2004.

⁴ Storleksordningar för avstånd mellan elektroder för olika skalor: laboratorieskala = några mm, fätskala = en dm, fältskala = en meter.

⁵ Nätjord = den jord som finns i eluttaget.

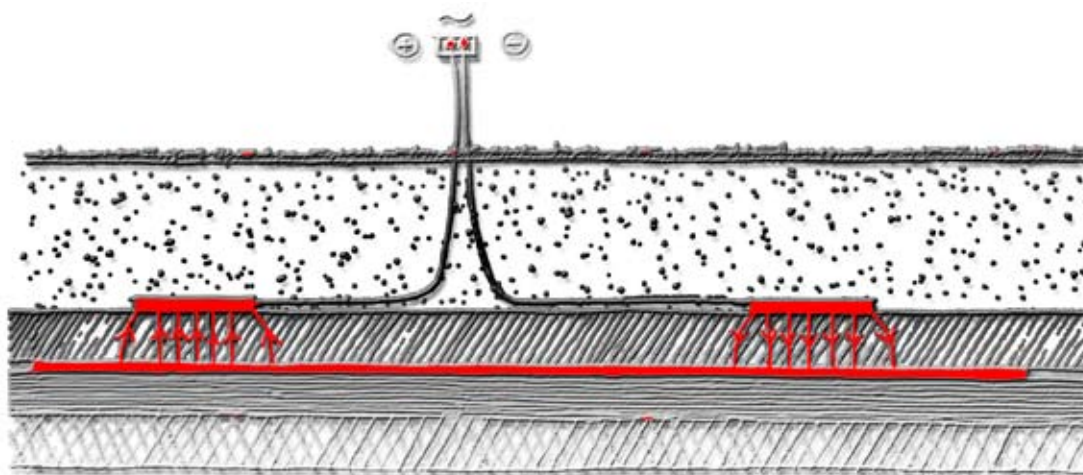
⁶ Dvs instrumenten var inte utformade för att klara mätningar i mark ens när deras chassijordning flöt.

2.2.2 Utförandeformer

Såvitt vi känner till har materialundersökningstekniken impedansspektroskopi och dess geofysiska motsvarighet inducerad polarisation inte undersökts tidigare med avseende på övervakning av tekniska konstruktioner under långa tider. Information kring undersökningar som utförts redovisas i Avsnitt 3.4.

Det är samma interaktioner som man mäter på såväl med impedansspektroskopi som med inducerad polarisation inom geofysiken. I båda fallen mäter man inducerad polarisation. Impedansspektroskopi innebär att man mäter vid olika specifika frekvenser (steady state), medan man ofta använder sig av transienter inom geofysiken. För vidare förklaring, se Avsnitt 3.4.1.

Två innovationer utgör förutsättningar för att funktionskraven ovan (se Avsnitt 1.2) skall kunna uppfyllas.



Figur 3. Utformning med två mindre elektroder över tätskiktet och en större under. Arrangemanget innebär att inga ledningar behöver dras genom tätskiktet. Dock måste mätningen avse en överlagring av två mätningar över tätskiktet.

Den ena avser användning av långtidsbeständigt återvinningsmaterial som kan erhållas till låg kostnad. Vid reducering av järnmalm i en hytta uppkommer ett sot som biprodukt. Detta har goda elektriska ledningsegenskaper samt kan antas ha en mycket god långtidsbeständighet, se Avsnitt 4.1.2.

Den andra innovationen gäller utformningen av elektroderna så att inga elektriska eller andra ledningar behöver dras genom tätskiktet. Utformningen framgår av Figur 3.

I den utförandeform som använts för försöken användes transmissionskablar för kabel-TV för att erhålla låg resistiv såväl som kapacitiv impedans i ledarna. Vidare användes kopparplattor som bäddades ner i hyttotet för bästa elektriska kontakt med elektrodmaterialiet. I en verklig tillämpning kan man antagligen bara sticka ner rör ner till lagret med hyttotet och sedan injektera en liten volym saltlösning för bästa elektriska kontakt.

2.2.3 Struktureringen av denna rapport

Rapporten är i stort sett strukturerad efter informationssökningen (Avsnitt 3) och experimenten (Avsnitt 4) samt diskussion och slutsatser (Avsnitt 5).

Den impedansspektroskopiska metodiken är förrädiskt enkel i sin grundprincip, d v s att mäta kapacitans och resistens som funktion av frekvensen, samt tolka vad detta innebär i form av materialegenskaper.

Teorin[15-16] är dock komplicerad, och utvecklad främst för vissa typer av applikationer såsom elektrokemi[17], batteriforskning, elektriska isolationsmaterial[18-19], och geofysik[20-21] samt inom ren grundforskning. Som framgår av Avsnitt 2.1.1 i [16] så finns det knappast någon enkel och generell metodik för att tolka data. Vidare krävs omsorg och försiktighet när elektriska ekvivalensscheman skall tolkas med avseende på karakteristiska företeelser i de material som studeras. Ofta stöter man på frekvensberoenden som avviker från vad som förväntas utgående från enkel teori.

Erfarenheterna från tidigare arbeten[12-13] har lärt oss att inte heller förvänta oss att kunna tolka mekanismerna, i vart fall inte i detalj. Ambitionsnivån har i stället varit att försöka påvisa hur materialegenskaper av intresse återspeglas i de mätdata som upptagits.

Däremot har vi försökt ställa samman information som finns spridd på olika håll, men som samman tagen ger en bakgrund till och förståelse för vad som kan mätas på prover av bentonit samt färsk och åldrad samt torr och våt aska.

2.2.4 Tack

SSAB Merox AB har bidragit med hyttsof, och Bro och Väg AB har utfört markinstallationerna. Ett särskilt erkännande riktas postumt till Professor Jörgen Tegenfeldt vid Institutionen för Materialkemi vid Uppsala Universitet. Han var en av initiativtagarna till projektet, men kom att delta bara under en kort tid i början till följd av sin sjukdom och hastiga bortgång. Kemiska analyser av proverna har utförts av Lale Andreas vid Luleå Tekniska Universitet. Från Tekedo AB har först Cecilia Sjöo och sedan Jytte Eriksen deltagit i arbetet, främst med provberedning och mätningar. Ett tack också till Dr. Ted Rönnevall vid Metrohm Nordic AB för diskussioner och teknisk hjälp vid en fältmätning. Författarna tackar för alla dessa viktiga bidrag till arbetet.

3 INFORMATIONSSÖKNING OCH KUNSKAPSSAMMANSTÄLLNING

3.1 Impedansspektroskopi

3.1.1 Grundläggande teori

För generella referenser till detta avsnitt hänvisas till [15-22].

Impedansspektroskopi grundar sig på hur ett material reagerar på elektrisk spänning.

För många material gäller Ohms lag, d v s strömmen genom en kropp liksom strömtätheten i ett volumselement i kroppen är proportionell mot den pålagda spänningen.

Det finns material med mycket stora avvikelser från Ohms lag. Exempelvis förekommer material i elektriska spänningsskydd där en ökning med pålagd spänning med 50 % kan innebära att strömmen ökar med en miljon gånger. En vanlig orsak till avvikelse från Ohms lag är elektrokemiska reaktioner på elektroder.

I många tillämpningar gäller emellertid Ohms lag och detta är också förutsättningen i denna rapport utom i de fall då avvikelse särskilt anges.

För en pålagd likspänning gäller följande enligt Ohms lag:

$$I = U / R \quad (1a)$$

där

I = strömmen i Ampere

U = spänningen i volt, och

R = resistensen i Ohm

Om en isolator placeras mellan elektroderna blir resistensen mycket hög och ingen mätbar ström passerar genom materialet. Vid själva inplaceringen uppkommer dock en liten tillfällig ström genom kretsen genom att polariserbarheten i det som finns mellan elektroderna ändras. Man kan få denna effekt att upprepas hela tiden genom att i stället slå på och av strömmen, eller genom att applicera växelström. Kretsen med elektroderna och mellanliggande material bildar då en kondensator som laddas upp när spänningen ökar och som laddas ur när den minskar. Vid högsta och lägsta värde på spänningen är alltså strömmen noll.

Kondensatorn skiljer sig här fundamentalt från motståndet. Denna släpper igenom mest ström vid högsta absoluta spänningen (motsatt strömriktning vid negativ spänning). Man säger att kondensatorn och resistensen ligger i 90 grader fasskillnad i förhållande till varandra. För ett motstånd ligger strömmen i fas med den pålagda spänningen, medan för en kondensator så ligger strömmen 90 grader före i fas.

För pålagd växelspänning, liksom när man lägger på och slår av en spänning över ett par elektroder med ett material emellan så reagerar materialet i fråga oftast både som ett motstånd och som en kondensator.

Vid kalkyler som innefattar växelström är det ändamålsenligt att använda komplexa tal eftersom man då kan få med såväl resistiva som kapacitiva effekter samtidigt. Ohms lag lyder då i sin generaliserade form enligt följande:

$$I(w) = U(w)/Z(w) = U(w)/[Z'(w) + Z''(w)i] \quad (1b)$$

där

$U(w)$ = den pålagda spänningen

$Z(w)$ = impedansen

w = vinkelfrekvensen⁸ för den pålagda spänningen

$I(w)$ = den resulterande elektriska strömmen

$Z'(w)$ = den reella (d v s resistive) delen av impedansen, och

$Z''(w)$ = den imaginära (vanligen kapacitiva) delen av impedansen

$i = \sqrt{-1}$, d v s kvadratroten ur (-1) ⁹

Vidare gäller följande:

$$|Z(w)| = \sqrt{Z'(w)^2 + Z''(w)^2} \quad \text{och} \quad (2)$$

$$\tan q(w) = Z''(w)/Z'(w), \text{ där}^{10} \quad (3)$$

$|Z(w)|$ = det absoluta beloppet av den komplexa impedansen $Z(w)$

$q(w)$ = fasvinkeln

$Z'(w)$ = den reella delen av den komplexa impedansen $Z(w)$,
d v s den vanliga resistensen R

$Z''(w)$ = $-i/wC$, där

C = den ekvivalenta kapacitansen

Ofta betraktar man resistensen R och kapacitansen C som frekvensoberoende. Elektriska komponenter som man kan köpa kommersiellt har ofta värden på resistens respektive kapacitans som är nära lika för stora intervall i frekvens.[22] Kapacitanser baserade på luftgap mellan elektroder har också ett stort frekvensoberoende.

Impedansmätningar sker emellertid över många tiopotenser i frekvens samtidigt som materialegenskaperna ofta är komplexa. Därför bör man räkna med att såväl resistensen (R) och kapacitansen (C), och särskilt kapacitansen, är frekvensberoende och således bör skrivas som $R(w)$ och $C(w)$. I själva verket varierar ofta kapacitansen så mycket att det i praktiken är bättre att arbeta med $1/wC(w)$ (d v s $-Z''(w)$) eller med fasvinkeln.

⁸ Denna är 2 gånger π (d v s $2 \cdot 3,14159$) gånger större än frekvensen i Hertz (cykler per sekund)

⁹ Med andra ord är $i \cdot i = -1$

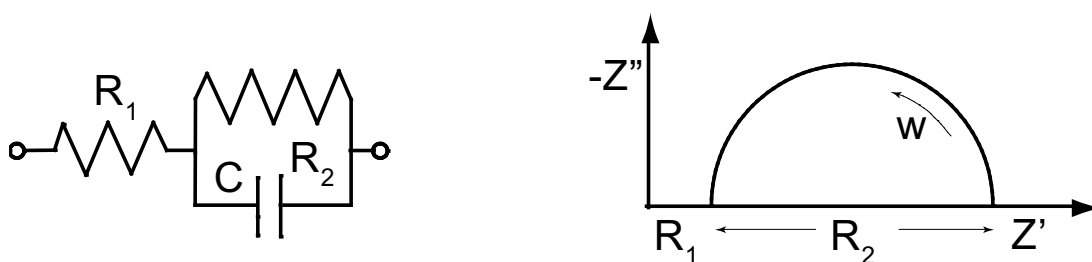
¹⁰ I en rätvinklig triangel kallas den sida som är motstående till den räta vinkeln för hypotenusan, och övriga sidor för kateter. Tangens för en vinkel (förkortat "tan") är motstående katet dividerat med närliggande katet. Vinkeln kan anges antingen i grader (360 grader på ett varv) eller i radianer (två gånger π , d v s $2 \cdot 3,14159$ radianer på ett varv).

3.1.2 Om ekvivalenskretsar och representationer i diagram

Texten i föregående avsnitt förutsätter att man mäter resistens och kapacitans mellan elektroderna på ömse sidor av ett materialprov med en god elektrisk kontakt mellan elektroderna och materialet i fråga. I praktiken får man då olika resistens och kapacitans beroende på vid vilken frekvens man mäter.

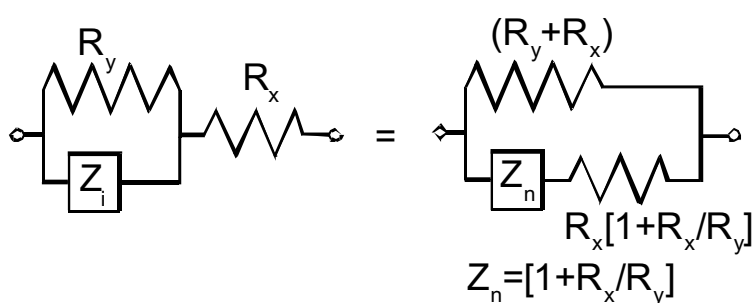
Dessa variationer kan naturligtvis beskrivas med betydligt färre parametrar med användande av diverse matematiska funktioner och uttryck. För personer som arbetar med elektricitet och elektronik ligger det naturligtvis nära till hands att arbeta med ekvivalenskretsar, d v s elektroniska kretsar bestående av resistenser och kapacitanser som ger nära samma respons vid olika frekvenser som en verklig provkropp.

En enkel ekvivalenskrets visas i Figur 4 tillsammans med hur real- och imaginärdelarna av impedansen varierar med ökad frekvens.

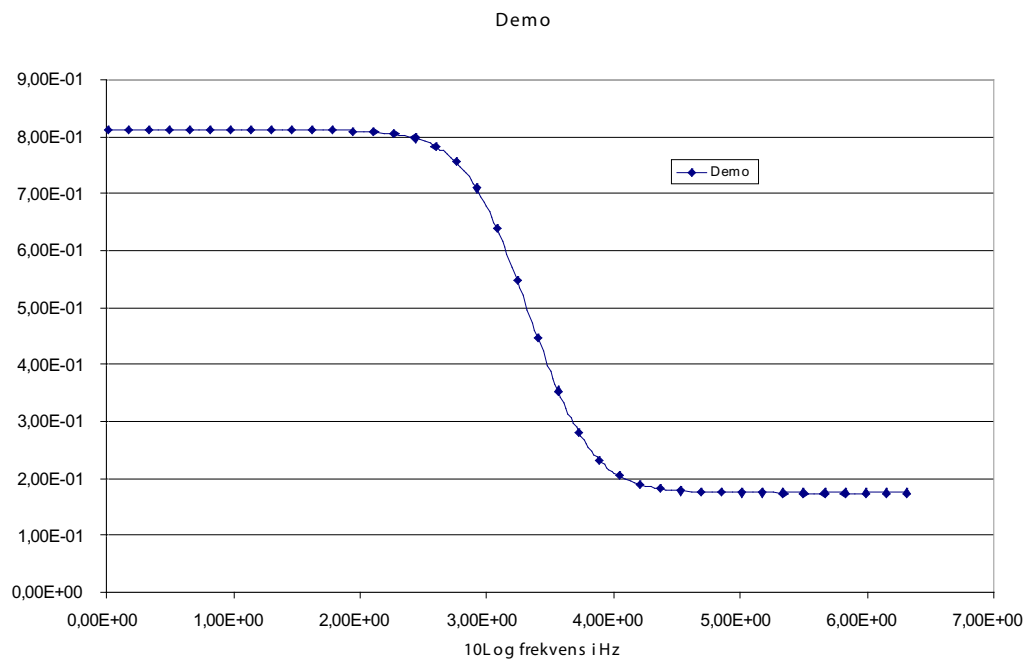


Figur 4. Till vänster en enkel ekvivalenskrets. Till höger hur real- och imaginärdelarna för denna krets varierar med ökad frekvens. Man kan visa att de följer begränsningsytan för en halvcirkel. En plot som den till höger kallas för ett Nyquistdiagram, och används ofta för att försöka identifiera delar av ekvivalenskretsar.

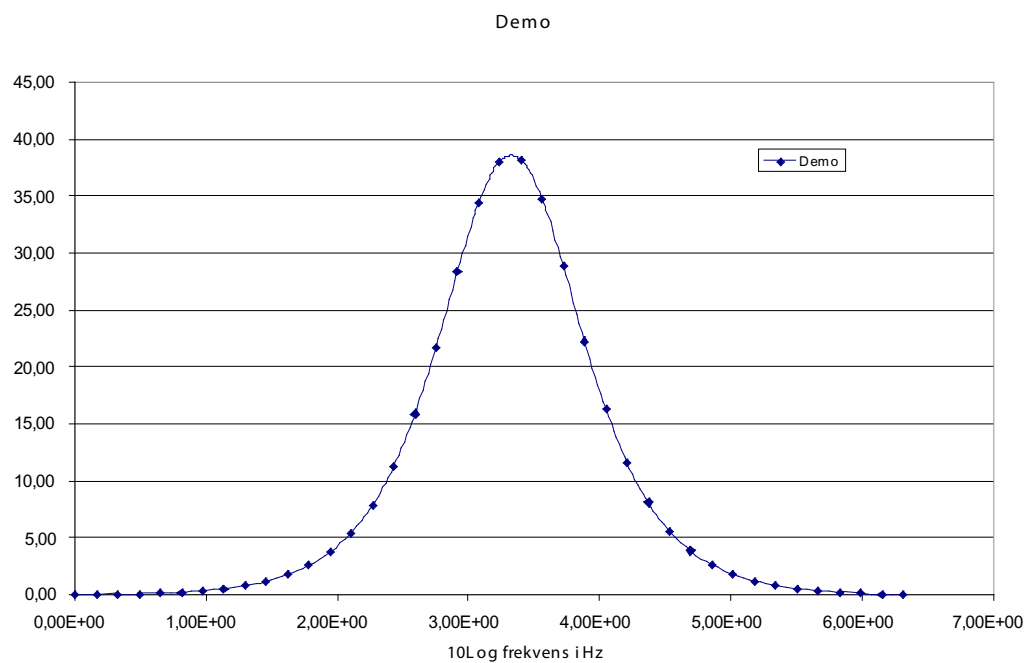
Man kan simulera provrespons med ganska komplicerade kretsar i vilka man försöker beskriva företeelser såväl på elektrodytorna som i ett kanske inhomogent prov. Man bör tänka på att ekvivalenskretsar inte är unika, se Figur 5.



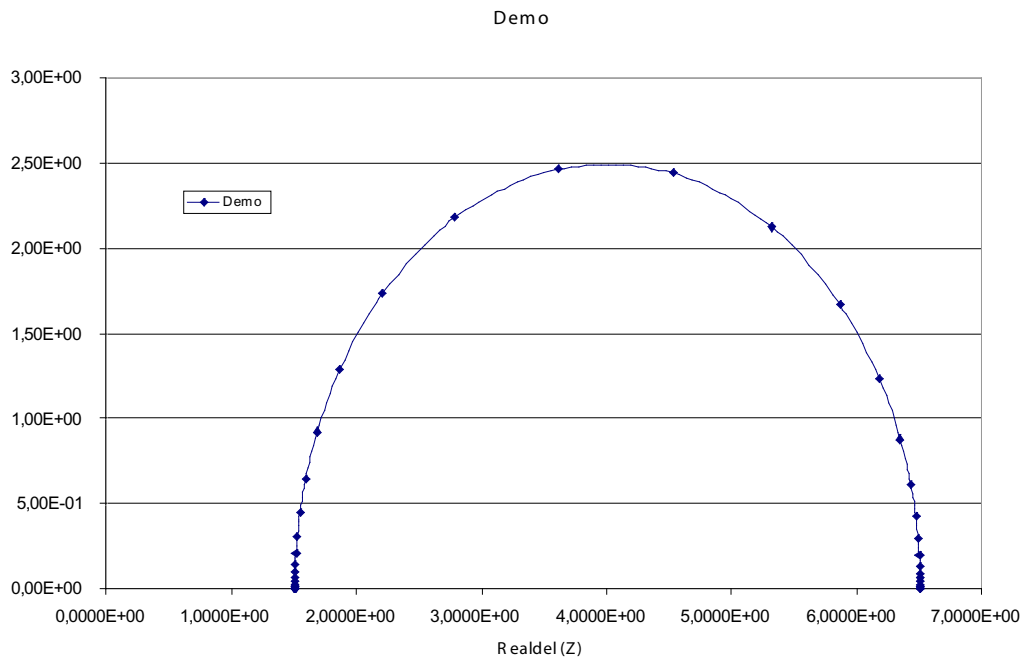
Figur 5. Kretsen till vänster ger exakt samma respons för samtliga frekvenser som den till höger. Figuren illustrerar att ekvivalenskretsar inte är unika.



Figur 6a. Bodediagram med logaritmen av absoluta beloppet av impedansen som funktion av logaritmen av frekvensen. För detaljer, se texten.



Figur 6b. Bodediagram med fasvinkeln som funktion av logaritmen av frekvensen. För detaljer, se texten.



Figur 7. Nyquistplot framräknad utgående från samma förutsättningar som för Bodediagram i Figurerna 6a och 6b. För detaljer, se text.

Förutom Nyquistdiagram används ofta Bodediagram med absoluta beloppet av impedansen samt fasvinkeln som funktion av logaritmen av frekvensen. De har räknats fram för en hypotetisk ekvivalens-krets enligt den i Figur 4. Parametrarna är som följer:

$R_1 = 1,5 \text{ ohm}$

$R_2 = 5 \text{ ohm}$

$CR_2/(2 \cdot \pi) = 0,001, \text{ d v s } C = 1,2566 \text{ mF}$

Ekvivalenskretsen i Figur 4 har följande totala impedans (för beteckningar se Avsnitt 3.1.1):

$$Z(w) = R_1 + R_2 \left(\frac{1}{1 + w^2 C^2 R_2^2} \right) + R_2 \left(\frac{i w C R_2}{1 + w^2 C^2 R_2^2} \right) \quad (4)$$

Mätdata i Avsnitt 4.2 är representerade på samma sätt som i Figurerna 6 och 7, varför figurerna ovan kan utnyttjas som referens för igenkänning av karakteristiska drag i upptagningarna på verkliga material.

3.1.3 Mättekniken

I princip är impedansmätningar mycket enkla att genomföra. Man behöver som minst tre motstånd, varav ett variabelt, en variabel kondensator och en galvanometer, se Figur 8. Som framgår av figuren justeras resistensen i det varierbara motståndet och kapacitansen i den varierbara kondensatorn tills galvanometern blir strömlös. Den okända impedansen räknas sedan ut genom att den är R_1/R_2 gånger impedansen i delkretsen med de varierbara komponenterna.

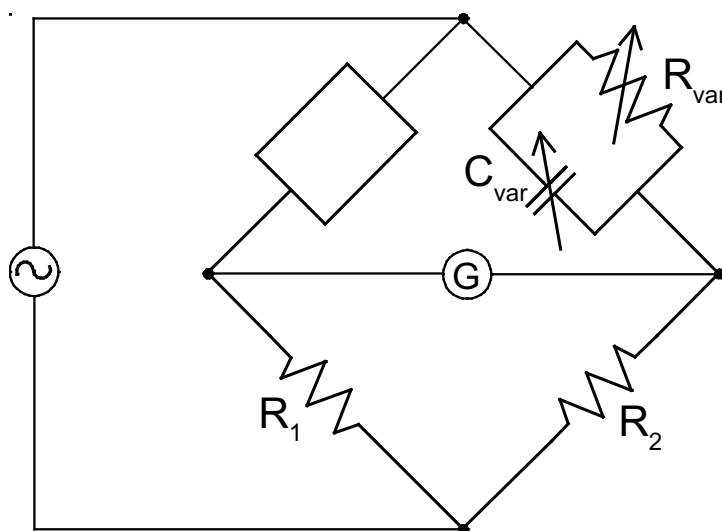
Som framgår av avsnitt 3.1.2 får man generellt sett räkna med att kapacitans och resistens hos provet varierar och måste bestämmas för varje frekvens.

För några decennier sedan utfördes också mätningar manuellt på liknande sätt eller med hjälp av oscilloskop. Känsligheten blev måttlig liksom antalet mätpunkter. För mätningar över större frekvensinter-

vall krävdes byte av komponenter samt område på tongenerator och oscilloskop.

I dag görs mätningar praktiskt taget uteslutande med kommersiella instrument som är tillverkade speciellt för uppgiften. Dessa medger att man kan mäta på ett stort antal punkter inom ett mycket stort frekvensområde. Instrumentets funktionssätt är dock olika inom olika frekvensområden, vilket man dock knappast märker av som användare.

Mätningarna kan påverkas av störningar utifrån. Vid mätningar i laboratorieskala brukar man därför placera det prov man mäter på i en sk Faradays bur, dvs i en burk eller låda med ledande plåt eller nät, och där detta ledande material kopplas samman med skärmen till de koaxialkablar som för signalerna mellan provet och spektrometern.



Figur 8. En växelströms brygga för uppmätning av en okänd (kapacitiv och resistiv) impedans. Resistenserna i motstånden R_1 och R_2 är fixa medan motståndet i resistensen R_{var} och kapacitansen i kondensatorn C_{var} kan varieras. Den okända resistensen kan bestämmas genom att R_{var} och C_{var} justeras tills galvanometern G blir strömlös.

I fält kan signalen störas av telluriska strömmar som inducerats av partiklarna från solen, samt diverse antropogena störfält, t ex läckande elledningar. Störningarna kan avse såväl växelström som likström.

Mätningarna kan också påverkas av olika ytfenomen, t ex elektrokemiska reaktioner. Vid försök i laboratorieskala brukar man därför lägga sig på spänningar kring någon hundradels volt. I [20] rekommenderas vidare att man håller sig under en strömtäthet på $0,001 \text{ A/m}^2$, åtminstone för låga frekvenser. I annat fall blir signalen olinjär.

I fältskala kan det dock vara svårt att hålla sig kring någon hundradels volt, och [20] rekommenderar att man håller sig mellan 1 och 10 volt.

Både i laboratoriet och i fält kan det vara svårt att få en tillräckligt god kontakt mellan elektrod och testmaterial. Därför använder man ofta saltlösningar för att underlätta detta.

3.2 Förutsättningar för inducerad polarisation i askor

3.2.1 Allmänt

Inför tolkning av impedansspektra är det viktigt att förstå skillnaden mellan sådana ändringar som hänger samman med dynamiska förlopp vilka sker med frekvenser i närheten av den applicerade, och ändringar som enbart kopplar till fördelningen av olika ämnen och material i mikrostrukturen samt till geometrin (förhållandet tjocklek/yta).

Ett exempel på en mikrostruktur, som inte har några molekyl- eller jonrörelser som ger upphov till ändring av polarisationen, men som ändå uppvisar ändrad impedans kan vara en elektronhalvledare där kristalliterna av huvudmaterialet omges av ett material med högre resistivitet. Ett sådant material får en hög polarisation vid låga frekvenser genom att elektroner leds genom halvledaren och ackumuleras på ömse sidor av skikten mellan kristalliterna. Vid högre frekvenser hinner emellertid denna uppladdning inte att ske till följd av begränsningen i ledningsförmåga hos det halvledande materialet.¹¹

För jordmaterial hänger dock huvuddelen av polarisationen i det pålagda externa elektriska fältet samman med rörelser för molekyler och joner. Dessa rörelser är av två principiellt skilda slag, vilka också ger olika effekter med avseende på utseendet hos motsvarande impedansspektra.

1. Translationsrörelser hos laddade specier (joner)
2. Reorientering av polära molekyler och andra specier (defekter och diskontinuiteter)

Translationsrörelserna för laddade specier liknar elektronledningen i exemplet ovan, men med den skillnaden att mobiliteten (migrationshastigheten) är lägre, och för samma resistivitet är antalet partiklar som rör sig större.

Joner i en lösning hoppar mellan jämviktslägen med en hastighet som ofta beskrivs utgående från en första ordningens reaktionshastighet. Om det finns en koncentrationsgradient så utjämnas denna med en hastighet som är proportionell mot gradientens storlek, d v s flödet är lika med minus diffusionskoefficienten gånger koncentrationsgradienten.[23]

På liknande sätt fungerar en elektrisk gradient, d v s en elektrisk fältstyrka, genom att joner förflyttar sig (makroskopiskt) med en hastighet som är proportionell mot fältets styrka. Dock leder transport av joner till uppbyggnad av laddning på elektrodytor, eller på ytor av isolerande material i mikrostrukturen. Dessa uppladdningar leder till motriktade fält som helt eller delvis eliminerar det externa fältet. Det som driver laddningsbärarna i lösning är bara nettofältet.

Det är emellertid inte alltid som laddning byggs upp på elektroderna. Om spänningen mellan elektroderna är tillräckligt hög kan även (eller i stället) kemiska reaktioner äga rum. I dessa fall "byts" jonladdningarna mot elektroner som tar bort laddning genom att ledas genom elektroder och elektriska ledningar.

De flesta enkla oorganiska joner som inte är komplexbundna har diffusionshastigheter i vatten inom samma storleksordning. Undantag till detta inkluderar oxonium¹² - och hydroxidjoner, vilka rör sig ca tio gånger snabbare än övriga.¹³ I alkaliska askor kan man därför tänka sig att polarisationen i vissa fall kan domineras av hydroxidjontransport.

¹¹ En av författarna, Rolf Sjöblom, har arbetat med sådana system under några år vid vad som i dag heter ABB Corporate Research. De används i ventilavledare och andra överspänningsskydd och består av halvledande kristalliter av zinkoxid vilka omges av andra oxider med en lägre elektrisk ledningsförmåga.

¹² Oxoniumjoner har den kemiska formeln H_3O^+ , och kallas i dagligt tal för vätejoner, H^+ , vilket dock är oegentligt.

¹³ Skälet för detta är att diffusion av oxonium- och hydroxidjoner inte kräver att syret förflyttar sig. Det räcker med att de små väteatomerna hoppar mellan angränsande syreatomer (samt att syre med tillhörande väteatomer reorienterar genom ren rotation).

Den faktor som har den största betydelsen för polariseringens frekvensberoende är emellertid diffusionslängden. Den diffusionslängd i olika riktningar som mikrostrukturen medger varierar mycket kraftigt mellan olika jordmaterial och också mellan olika mineral som finns i färska och åldrade askor samt i bentonit. Detta redovisas i Avsnitt 3.2.3. Här skall bara konstateras att polarisationen till följd av jonledning är proportionell mot koncentrationen och det polariserande fältet samt att motriktade fält som eliminerar polarisationen uppkommer vid låga frekvenser.

Polarisation till följd av reorientering av molekyler och andra specier med ett elektriskt dipolmoment förekommer inom stora frekvensintervall. Molekyler som inte är alltför symmetriska har i allmänhet en ojämn laddningsfördelning även om de totalt sett är elektriskt neutrala. På grund av neutraliteten migrerar de inte i externa homogena elektriska fält. Däremot fördelas laddningarna så att delar av molekylen med överskott på positiv laddning lägger sig närmare minuselektroden, och på motsvarande sätt för delar med övervägande negativ laddning. Omorienteringen innebär att man upplever en ökad kapacitans i provet.

Effekten är frekvensberoende. Om den externa fältriktningen byts alltför ofta hinner omorienteringen inte komma till stånd. Då blir polarisationen betydligt lägre.

Det finns emellertid en restpolarisation som uppkommer av andra orsaker, t ex polarisering av valenselektronerna. Sådan polarisation finns t ex för synligt ljus, och manifesterar sig genom att ljus bryts i en glaslins.

3.2.2 Faser i färska och åldrade askor samt deras egenskaper

Beskrivningar av bildning och fördelning av oorganiska ämnen under förbränningsprocessen finns publicerade i bland annat referenserna [24-33].

Ur askbildningssynpunkt kan förbränningsprocessen i hög grad liknas vid en fraktionerad kondensation. Detta innebär att de ämnen som har den högsta kokpunkten, dvs de flesta oxider utom alkalioxiderna, bildar aska först. De senare - dvs i första hand oxider av kalium och natrium samt klorider av natrium, kalium, zink, kadmium och bly - återfinns anrikade i flygaskan. Detta gäller också arsenik och antimon samt kvicksilver. Kviksilver kan uppträda i så flyktig form att det inte kondenserar alls.

I motsvarande grad blir bottenaskan utarmad med avseende på dessa ämnen. Beroende på betingelserna kan dock avsevärda andelar av ingående natrium, kalium och zink samt framförallt kalcium hamna i bottenaskan.

Det har tidigare nämnts att det svavel som finns i rökgasen fångas upp i rökgasreningen med hjälp av uppslamad släckt kalk (kalciumhydroxid) och bildar gips. Gipsbildningen sker ej omedelbart; först bildas kalciumsulfid som inom loppet av ett antal timmar oxideras till kalciumsulfat.

Även klor som finns i rökgasen i form av saltsyra binds till kalken och bildar kalciumklorid.

Det är de ämnen som finns i de högsta halterna som främst styr vilka faser som skall bildas. De ämnen som finns i lägre halter bildar sällan egna faser utan ingår i dem som bildas av huvudelementen i form av fast löslighet.

Några exempel på sammansättningar samt de faser som dessa ger upphov till dels i pannan, dels efter åldring, finns redovisade i Britt-Marie Steenaris doktorsavhandling.[24] Sammansättningarna avseende de element som finns i de högsta halterna finns återgivna i Tabell 1, och motsvarande faser återges i Tabell 2.

Som framgår av Tabellerna 1 och 2 så innehåller färsk askor vissa mineral som också förekommer i sand och silt, nämligen kvarts och fältspat. En del av detta kan komma från bäddmaterial och från jordmaterial som följt med bränslet, t ex vindburet material som fastnat i bark.

Andra faser har högre förhållande $(Ca + Na + K) / (Si + Al)$ än vad man finner i jordmaterial, dvs de är mera alkaliska. Dikalciumsilikat (Ca_2SiO_4), till exempel, ingår som en huvudkomponent i klinker och portlandcement.

Halterna sulfat och klorid beror i hög grad på hur rökgasreningen är anordnad och om rökgasreningssprodukterna blandas med askan eller inte.

Som framgår av Tabell 2 är fassammansättningen mycket annorlunda för åldrad aska jämfört med färsk.

I Tabell 3 visas ett exempel på fassammansättning för åldrad aska från avfallsförbränning.

Det bör påpekas att många av de reaktionsprodukter som bildas inte är kristallina utan amorfa. De kan därför inte fasbestämmas med röntgendiffraktion.

Tabell 1. Kemisk sammansättning för huvudelementen för de bioaskor vars fassammansättningar redovisas i Tabell 2. Data hämtade från Referens [24].

% w/w tort material	Cyklon- flygaska	CFB 1, flygaska	CFB 2, flygaska	CFB 3, flygaska	BFB, flygaska	Roster 1, Bottenaska	Roster 2, 80 % botten/ 20% flygaska	Galler 3, botten/ flygaska
Si	7,6	10,3	24,6	19,9	16,0	13,3	9,0	12,2
Al	3,05	4,04	4,76	3,54	2,37	3,44	2,24	2,59
Ca	28,4	17,9	11,91	16,8	16,4	29,8	24,8	14,7
Fe	1,76	1,94	2,86	1,60	1,33	1,70	1,80	1,99
K	1,08	4,40	4,35	4,36	4,75	4,10	8,30	4,50
Mg	2,96	2,25	1,62	1,81	1,64	3,70	3,05	1,84
Mn	0,63	1,68	0,89	1,11	1,56	2,70	2,35	1,39
Na	0,57	1,66	0,91	0,93	0,93	0,84	1,13	1,34
Ti	0,09	5,05	0,16	0,16	0,10	0,14	0,14	2,30
P	0,65	1,63	0,52	0,90	1,31	1,75	1,17	1,00
S	2,15	2,34	1,20	0,43†	1,46	0,04	1,34	0,97
Cl	0,06	1,62	0,10	0,29†	0,56	< 0,002	1,28	1,95
CM‡	10,3	1,1	1,6	9,1*	10,6	2,9	4,4	17,0

* Analyserat som glödningsförlust, vilket inkluderar karbonat. Detta gäller bara askan CFB 3.

† Vattenlösligt.

‡ Oförbränt.

Tabell 2. Kristallina faser identifierade för färska och åldrade bioaskor med kemisk sammansättning enligt Tabell 1. Data hämtade från Referens [24].

% w/w tort material	Cyklonflygaska	CFB 1, flygaska	CFB 2, flygaska	CFB 3, flygaska	BFB, flygaska	Roster 1, Bot-tenaska	Roster 2, 80 % botten/20% flygaska	Galler 3, botten/ fly-gaska
Färsk aska								
SiO ₂	X	X	X	X	X	X	X	X
CaO	X	X	X	X	X	X	x†	X
CaCO ₃	X	X	X	X	X	X	X	X
Ca(OH) ₂	X			X		X	X	X
CaSO ₄	X	X	X	X		X	X	
Ca ₃ Al ₂ O ₆	X	X	X				X	X
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	X		X					
MgO	X				X	X	X	X
Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂				X				
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇						X		
Ca ₂ SiO ₄						X	X	
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)					X			
KAlSi ₃ O ₈			X	X		X		
(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ *		X	X	X		X		X
K ₂ SO ₄				X	X		X	X
K,Na(SO ₄) ₂		X						
K ₂ Ca(CO ₃) ₂					X	X‡		
KCl		X		X	X		X	X
NaCl							X	
K _{0,2} Na _{0,8} Cl				X				
Fe ₂ O ₃		X	X				X	
TiO ₂		X						X
Åldrad aska								
Ca(OH) ₂	X					X	X	X
CaCO ₃	X	X	X	X	X	X	X	X
CaSO ₄ ·2H ₂ O				X	X		X	X
Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O	X	X	X		X		X	X
CaAl ₂ (CO ₃) ₂ (OH) ₄ ·6H ₂ O							X	
CaCO ₃ ·H ₂ O						X	X	
Ca ₃ (SiO ₃ OH) ₂ ·2H ₂ O						X		
K ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·H ₂ O								X
Ca(OH) ₂	X					X	X	X

* Kalcisk albit (Na,Ca)Al(Si,Al)3O8, används här som ett kollektivt namn för föreningar i albit – anortit serien med fast löslighet. Albit är natriumaluminiumsilikat och anortit är kalciumaluminiumsilikat. Mellan dessa rena föreningar är intermediära sammansättningar möjliga med samma principiella strukturella uppbyggnad. Det är inte möjligt att skilja mellan dessa med hjälp av röntgendiffraktion för de låga halter som förekommer i de aktuella proverna.

† Antagligen CaO,9MnO,1O.

‡ I form av Fairchildit.

Tabell 3. Mineralfaser i avfallsförbränningsaska efter åldring. Faser som förekommer i lägre halter är indikerade med kursiv stil. Data har tagits från doktorsavhandlingen[34].

Silikat		Oxid	
Melilit	$(Ca,Na)_2(Al,Mg)(Si,Al)_2O_7$	Hematit	Fe2O3
Wollastonit	$CaSiO_3$	Magnetit	Fe3O4
Clinopyroxene	$(Ca,Na)(Fe,Mg,Al)(Si,Al)_2O_6$	Karbonat	
Plagioklas	$(Ca,Na)Al(Al,Si)Si_2O_8$	Calcit	CaCO3
K-Fältspat	$(K,Na)(AlSi_3O_8)$	Hydroxid	
Biotit	$K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$	Portlandit	Ca(OH)2
Muscovit	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$	Göthit	FeO(OH)
Montmorillonit	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Boemit	AlO(OH)
Hydrat		Gibbsit	Al(OH)3
Hydrocalumit	$Ca_2Al(OH)_6[Cl_{1-x}(OH)_x] \cdot 3H_2O$	Fosfat	
Hydratiserad Gehlenit	$Ca_2Al_2SiO_7 \cdot 2H_2O$	Apatit	Ca(PO4)3
Sulfat			
(Cl,F,OH)			
Anhydrite	$CaSO_4$		
Ettringit	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$		
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$		

Det finns flera skäl till varför färsk aska är instabil vid rumstemperatur och i kontakt med vatten och luft:

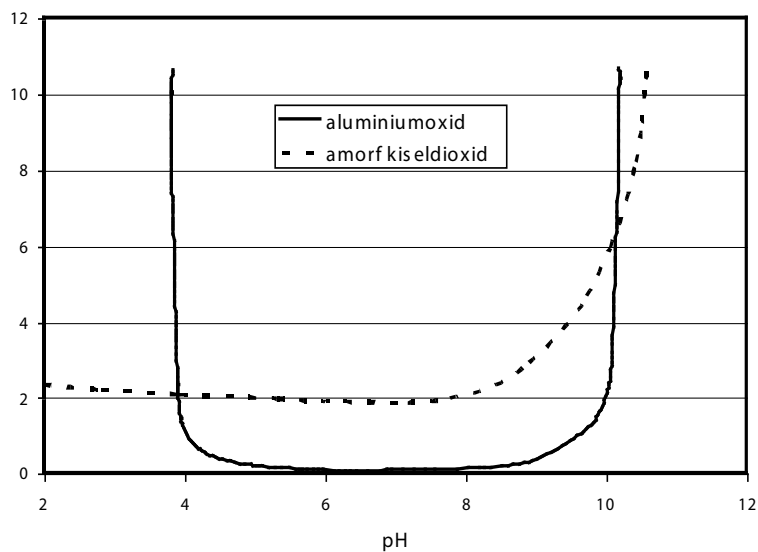
- De faser som ingår i torrutmattad aska är bildade vid hög temperatur och snabbkylda. De är därför i många fall inte termodynamiskt stabila vid rumstemperatur.
- Många av de ämnen som bildas vid hög temperatur tar upp vatten och bildar hydrater och hydroxider
- Dessa är i sin tur ofta reaktiva vilket leder till sekundära reaktioner. Askans höga alkalinitet innebär att reaktiviteten blir hög till följd av att många oxider – främst oxider av aluminium och kisel – får ökad löslighet, se Figur 9.
- Den höga alkaliniteten innebär också att askan gärna reagerar med luftens koldioxid varvid karbonat bildas. För bulkkvantiteter kan denna reaktion dock gå långsamt[24,35] till följd av att diffusionen är långsam.
- Omvandlingarna kan prognosticeras fortsätta även under lång tid, varvid lermineral bildas.
- Om den kemiska miljön är reducerande kommer organiskt material så småningom att reducera ingående sulfat varvid sulfid bildas.

Den principiella utvecklingen över tid illustreras i Figur 10.

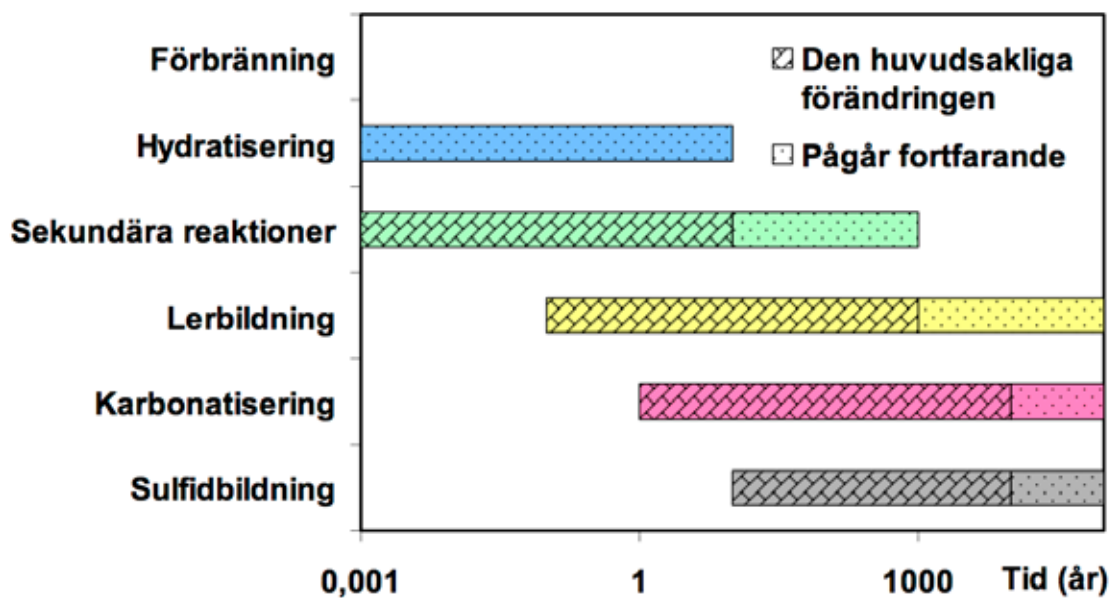
Hydratiseringen omfattar bland annat kalciumoxid, som omvandlas till kalciumhydroxid (portlandit), samt dikalciumsilikat som omvandlas till kiselsyrage och kalciumhydroxid. Detta är samma reaktioner som äger rum vid härdning av portlandcement där di- och trikalciumpsilikat övergår i kiselsyrage och kalciumhydroxid.[36] Trikalciumpsilikat förekommer dock knappast i aska från förbränning av trädbränslen eftersom temperaturen i pannan är för låg. Däremot finns överskott av kalciumoxid, som efter hydratisering till kalciumhydroxid reagerar med silikater och aluminater och bildar nya ämnen.

Alla dessa processer leder till en cementering av askan.

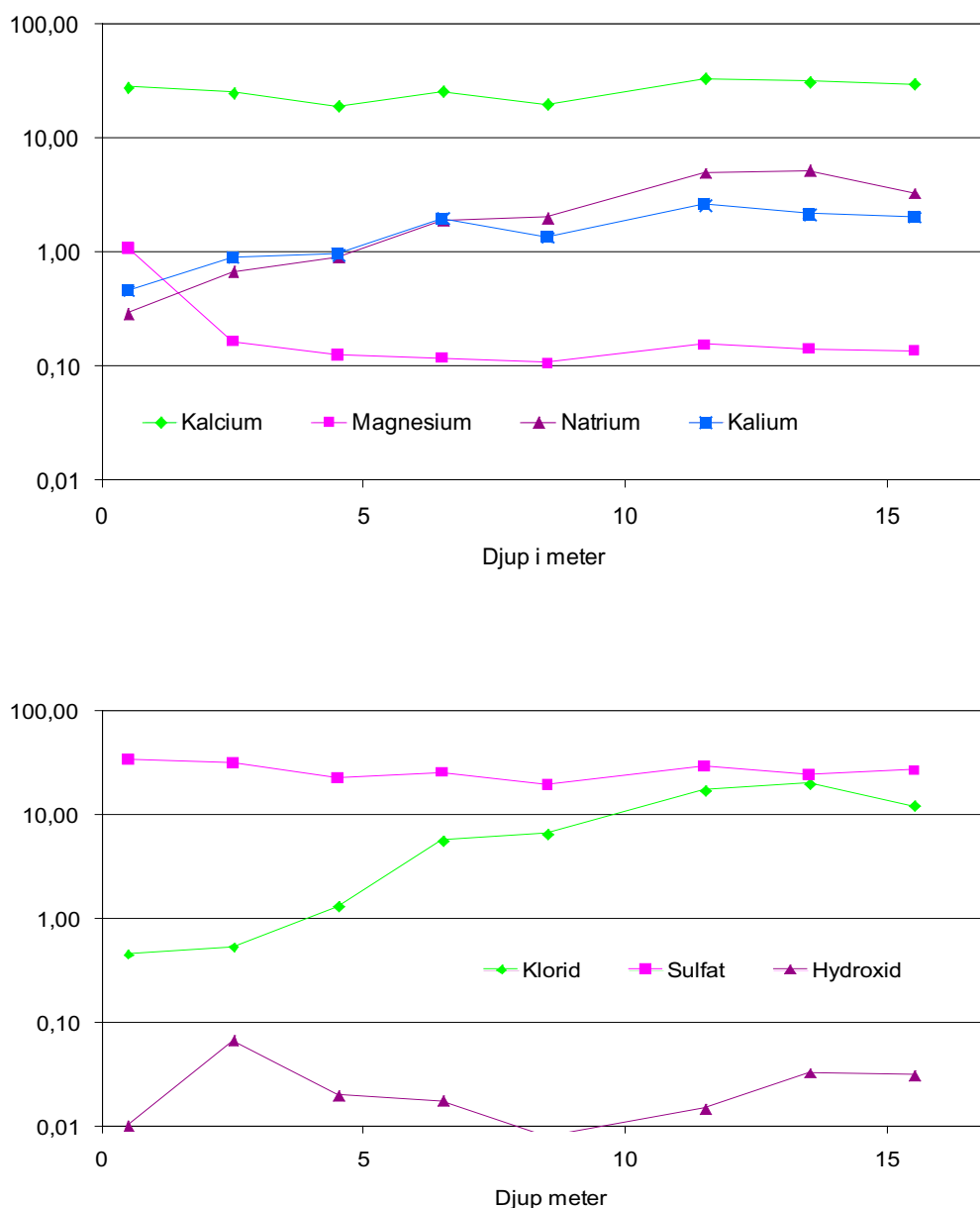
Cementering kommer också till stånd om luftens koldioxid får tillträde, i vilket fall kalciumkarbonat bildas.



Figur 9. Lösligheten för aluminiumoxid (Al_2O_3) och amorf kvarts ($SiO_2 \cdot (H_2O)_n$) som funktion av pH. Data tagna från Referenserna [37-38].



Figur 10. Den principiella utvecklingen över tid för åldrande askor i tätskikt.



Figur 11. Jonsammansättning hos lakvatten från askor från Telge Återvinningsanläggning. Överst katjoner och nederst anjoner. Lakning har skett med L/S 10, d v s 1 liter vatten per hundra gram prov räknat som torr vikt. Proverna är borrprover från hål 1 i askupplaget vid Telge Återvinningsanläggning.

Cementering enligt de ovan beskrivna mekanismerna leder till ett material som är hårt och relativt hållfast. Detta har nyligen verifierats genom grävningar ner till tätskiktet på ett par ställen på provytorna vid Telge Återvinningsanläggning.

Materialet blir emellertid inte lika hållfast som portlandcement, och framför allt inte alls lika sprött och sprickkänsligt, utan segt på liknande sätt som kalk- och murbruk. Detta är viktigt för att inte sprickor skall uppträda i en tätskiktetskonstruktion. Det är också värdefullt att kunna peka på att reaktionerna under mycket lång tid snarare leder till ett segare material än ett sprödare.

Ett segare material med troligen bibehållen täthet gentemot genomströmning av vatten erhålls när lermineral börjar bildas. Det finns ingen otvetydig definition på vad som menas med lermineral, men vanligen avses ett jordmaterial med en kornstorlek omkring och under 0,002 mm. Med lermineral avser man i allmänhet också ett jordmaterial som är plastiskt deformerbart.

Leror är ofta, men inte alltid, skiktsilikater, med negativt laddade skikt där laddningsneutralitetsvillkoret uppfylls genom att positiva motjoner sätter sig på ytorna. Vid kontakt med vatten dissocieras dessa från ytorna och bildar laddningsmoln, vilket ger leror speciella egenskaper, se Avsnitt 3.2.3. Leror som är skiktsilikater har mineral Korn som är plana, d v s två av dimensionerna kan vara någon eller några tiopotenser större än den minsta.

Intuitivt tänker man sig lätt att lerbildningsprocesser äger rum under mycket långa tider och att de kräver tusentals år. Kemister och mineraloger som arbetar med syntetisering av lermineral framställer dem emellertid ur alkaliska lösningar med bl a kalcium- och silikatjoner under loppet av dagar och månader. [39] Vidare finns det ett antal rapporter som beskriver hur kolaska omvandlas till zeolitlera inom loppet av några år, se t ex [40]. Skälet till den förhållandevis snabba omvandlingen till leror i askor är dels att askor är reaktiva, främst genom de förhöjda pH-värdena i porvattnen, dels att transportvägarna är korta och därmed också de tider som krävs för diffusion av material genom mikrostrukturerna.

Impedansen över ett askprov påverkas emellertid inte bara av de faser som bildats och de kationmoln som olika mineralpartiklar utvecklar i kontakt med vatten, utan också av porvattnet. Porvattnets elektriska ledningsförmåga hänger nära samman med dess innehåll av joner. Ett exempel på jonsammansättning hos lakvatten från askor från Telge Återvinningsanläggning visas i Figur 11.

Eftersom lakning skett med L/S 10, d v s med en liter vatten per hundra gram prov räknat som torr vikt avviker sammansättningen hos den för porvattnet. Den har en betydligt lägre volym, kanske 30 gånger mindre, varför lakvattnets sammansättning påverkats av olika ämnens lösligheter. Detta gäller främst kalciumsulfat, gips.

Figur 11 visar därmed både vad porvattnet innehåller på kort sikt, d v s klorider samt motjoner främst i form av natrium- och kaliumjoner, och på lång sikt, d v s kalcium- och sulfatjoner. Även om kloriderna så småningom lakas ut finns det kvar en hel del gips med begränsad vattenlöslighet som kommer att förse porvattnet med joner under mycket lång tid.

Innehållet av hydroxidjoner bör särskilt observeras eftersom dessa bidrar ca tio gånger mer till ledningsförmågan jämfört med övriga joner. De olika härdningsprocesserna innebär emellertid en sänkning av pH-värdet i porvattnet, och detta sker även utan någon karbonatisering. Det kan därför inte uteslutas att hydroxidjoner kan dominera ledningsförmågan på kort sikt, men på lång sikt bör de ha alltför låg koncentration för att ha någon större betydelse.

3.2.3 Tänkbara mekanismer

De olika faserna som bildas i askor liksom de porvatten som uppkommer påverkar impedansspektra på olika sätt. Polarisering kan erhållas såväl genom reorienteringar av polära molekyler som genom elektrisk jontransport och uppladdning kring isolerande skikt i mikrostrukturerna.

Reorienteringarna kan avse vattenmolekyler i fritt vatten och i form av hydratvatten, men också flerkärniga anjoner med partiell motjonsbesättning.

En större och mera varierande interaktion förväntas emellertid till följd av transport av joner på olika sätt.

Detta gäller såväl elektriskt ledande som elektriskt isolerande strukturer. Elektriskt ledande strukturer kan t ex medge laddningstransport med hjälp av joner, d v s bidra till en låg resistens. Elektriskt isolerande strukturer kan medge ackumulation av laddningar på ömse sidor av materialet, d v s bidra till kapacitiva effekter. Dessa är störst om de isolerande strukturerna är tunna och den elektriska fältgradienten går vinkelrätt mot huvudytorna.

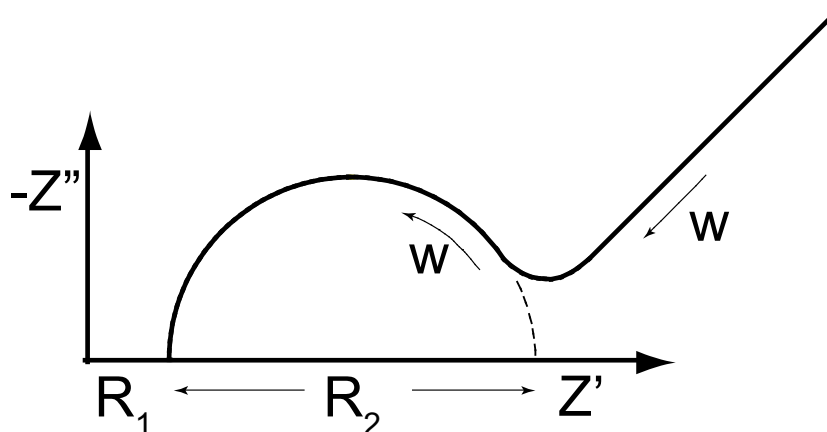
För elektriska laddningsbärare som kan röra sig fritt i porvattnet utan att stöta på någon barriär, "mass transfer control" på fackspråk[17], kan man visa att den reella och imaginära delen ökar lika mycket med minskad frekvens, d v s man får en linje i 45 graders vinkel mot axlarna i ett Nyquistdiagram, se figur 12.

Man kan samtidigt ha andra laddningsbärare som ackumuleras mot någon yta, antingen en elektrod eller laddningsmoln på ytor av lerpartiklar som har begränsad rörlighet, "kinetic control" på fackspråk[17]. Då kan man få ett Nyquistdiagram enligt Figur 4. Har man båda effekterna samtidigt kan ett Nyquistdiagram få utseende enligt Figur 12. Har man flera effekter överlagrade blir naturligtvis motsvarande diagram svåra eller omöjliga att tolka, i vart fall i detalj.

Det huvudsakliga syftet med det arbete vars resultat redovisas i denna rapport är emellertid inte att kunna tolka impedansspektra med avseende på de exakta mekanismerna för polarisation. Inte heller har några detaljerade och otvetydiga tolkningar påträffats i litteraturen [41-44]. I stället skall förekommande variationer i spektra utnyttjas för övervakning av funktionen hos tätskikt. Därmed kan det vara av värde att konstatera att bl a följande mönster kan förväntas:

- En högre andel porvatten och en högre salthalt i detta ger upphov till starkare elektriska strömmar med obegränsad rörlighet
- En lägre salthalt i mikroporsystemen leder till att laddningsmolnen breder ut sig, vilket gör dem mera polariserbara och leder till starkare effekter med begränsad rörlighet
- En lägre andel porvatten leder till mindre polarisering, i första hand för ledning med obegränsad rörlighet
- En åldrad aska innehåller större ytor med högre avvikelse från elektroneutralitet i den fasta fasen vid ytan vilket innebär en högre polarisering.

Vissa av dessa effekter har tidigare iakttagits för bentonit, se avsnitt 3.3.



Figur 12. Nyquistdiagram för ett spektrum med dels begränsad rörlighet hos laddningsbärarna (kinetic control) vid högre frekvenser, se halvcirkeln till vänster i figuren, dels obegränsad rörlighet (mass transfer control) vid låga frekvenser, se räta linjen till höger i figuren.

3.3 Tidigare arbeten med bentonit

3.3.1 Tänkbara mekanismer för polarisationen

Det arbete vars resultat redovisas i denna rapport bygger på tidigare arbeten med bentonit [7,12-13,45-46], se även [47-50]. Långtidsegenskaper för bentonitmattor samt blandningar av bentonit och andra material utvärderades i [7]. I detta arbete identifierades bl a behovet av övervakning, vilket ledde till fortsatta studier avseende bentonitmattor och dessa arbeten finns rapporterade i [12-13].

Den principiella uppbyggnaden av en bentonitmatta visas i Figur 13. Bentonitleran är kraftigt svällande och nålfiltningen respektive sömmen behövs för att hålla ihop mattan. Vid gynnsamma betingelser ger en sådan matta en ungefär lika god tätning som upp till en meter ordinär lera.

Skälet för detta är egenskaperna hos bentonitens mikrostruktur.

Lermineralpartiklar i en ”vanlig” lera har en principiell uppbyggnad samt ett omgivande laddningsmoln som framgår av Figur 14. Partikeln i figuren befinner sig i vatten, och laddningsmolnet av katjoner har uppkommit genom dissociation på samma sätt som sker med ett salt i vatten.

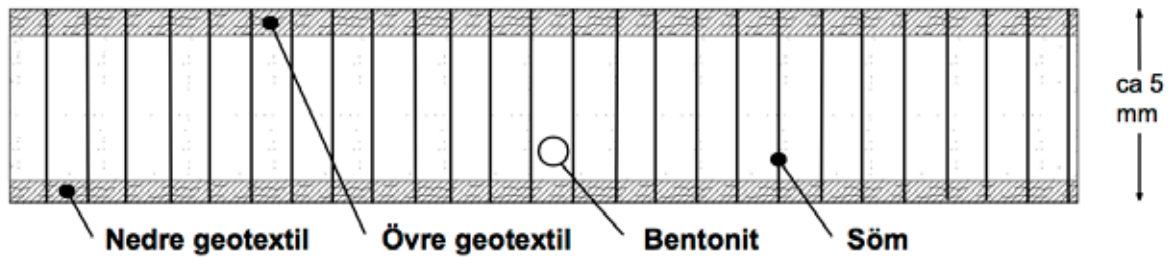
Vattnet som befinner sig i laddningsmolnet är stagnant och vattenmolekylerna rör sig genom diffusion ut från och in i molnet. Den tvärsnittsarea i en lera som är tillgänglig för vattenströmning är således mycket mindre än vad som svarar mot fukthalten. Detta är förklaringen till varför en lera har så låg hydraulisk konduktivitet.

I en montmorillonit där huvuddelen av motjonerna utgörs av natrium får lerpartiklarna egenskaper enligt Figur 15. Montmorillonit är det aktiva mineralet i bentonit. Som framgår av figuren bildas laddningsmoln inte bara på ytteryterna utan även på inneryterna. Avståndet¹⁴ mellan silikatskikten är förhållandevis stort till följd av upptag av vatten.

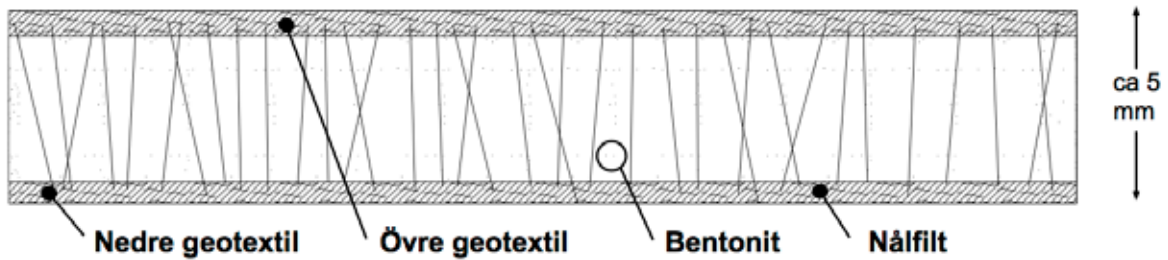
Upptaget av vatten gör bentonitlera starkt svällande, och vid höga överlagringstryck (några MPa) blir vattentransporten begränsad till diffusion, d v s extremt långsam. Vid de tryck som kan erhållas från ett skyddsskikt blir vattentätheten beroende även av hur de olika lerpartiklarna packas i förhållande till varandra. Yterna som är parallella med silikatskikten är negativt laddade och kanterna är positivt laddade. Vid lägre densiteter bildas därför korthusstrukturer, vilka också ger en låg hydraulisk konduktivitet.

¹⁴ Man har faktiskt visat att avstånden mellan successiva silikatskikt är ungefär lika stora.

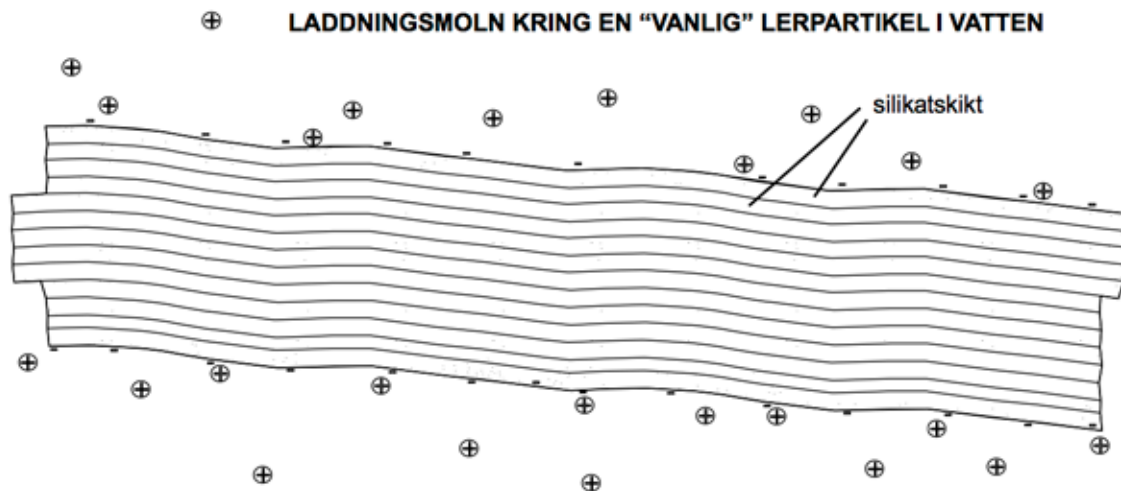
SYDD BENTONITMATT



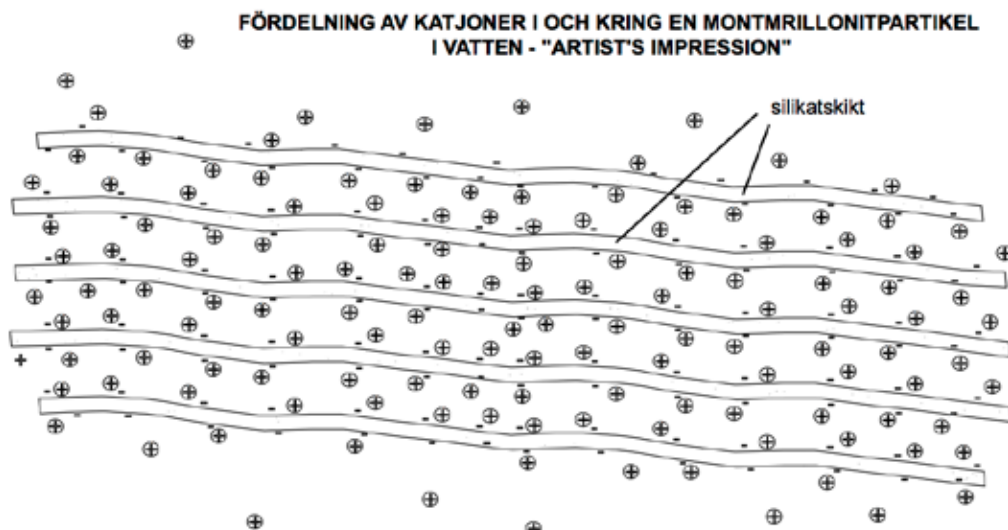
NÅLFILTAD BENTONITMATT



Figur 13. Principskiss av bentonitmattor. Figuren avser matta i torrt skick. Vid kontakt med vatten sväller mattan till drygt dubbla tjockleken.



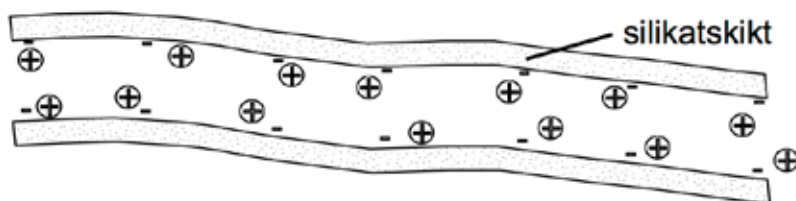
Figur 14. Lerpartikel med tillhörande laddningsmoln för en "vanlig" lera. Partikeln befinner sig i vatten. De flesta lermineral tar endast upp små eller mycket små mängder vatten mellan silikatskikten. Observera att laddningsmolnet tunnar ut när avståndet ökar till den positivt laddade ytan på lerpartikeln. Laddningsmolnet kan vara likartat även för en oxidpartikel som inte är ett lermineral.



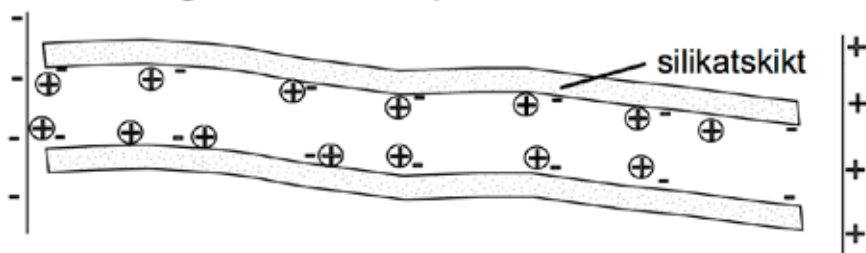
Figur 15. Lerpartikel av montmorillonit med tillhörande laddningsmoln samt motjoner i vattnet mellan silikatskikten. Partikeln befinner sig i vatten. Montmorillonit är det aktiva mineralet i handelsvaran bentonit.

POLARISATION I MONTMORILLONIT - "ARTIST'S IMPRESSION"

Fall A: Inget externt elektriskt fält

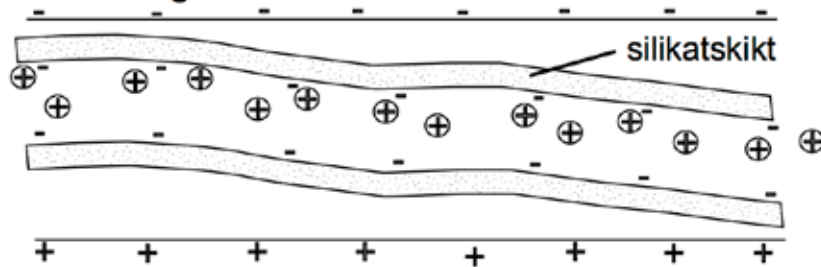


Fall B: Pålagt elektriskt fält parallellt med silikatskikten



Interaktionen är effektiv vid låg frekvens

Fall C: Pålagt elektriskt fält vinkelrätt mot silikatskikten



Interaktionen är effektiv vid hög frekvens

Figur 16. Förväntad polarisering i lermineralet natriummontmorillonit vid pålagda externa elektriska fält. Montmorillonit är det aktiva mineralet i handelsvaran bentonit. Observera förflyttningarna av de positiva laddningarna som uppkommer som en reaktion på det pålagda fältet.

Den modell för polarisationen vid ett pålagt externt elektriskt fält som använts i de tidigare studierna [12-13] presenteras i Figur 16. Vid låga frekvenser bidrar jonrörelser parallellt med skikten mest till polarisationen, medan rörelser i alla riktningar bidrar vid höga frekvenser. Det senare innebär att det är polarisationen vinkelrätt mot silikatskikten som blir styrande för impedansen vid de höga frekvenserna.

För andra lermineral[51] samt för mineralpartiklar med oxider (d v s åldrade askor) förväntar man sig att laddningsmolnen skall polariseras på ett likartat sätt. Dock förväntas polarisationen p g a denna effekt vara svagare jämfört med bentonit.

Till dessa laddningsmolnseffekter kommer effekter som hänger samman med jontransport i porvattnet.

3.3.2 Experimentella resultat

Resultat från impedansmätningar i laboratorieskala på bentonit redovisas i Figurerna 17 (utan salt) och 18 (med salt). De olika salthalterna har erhållits genom perkolation med saltvatten.

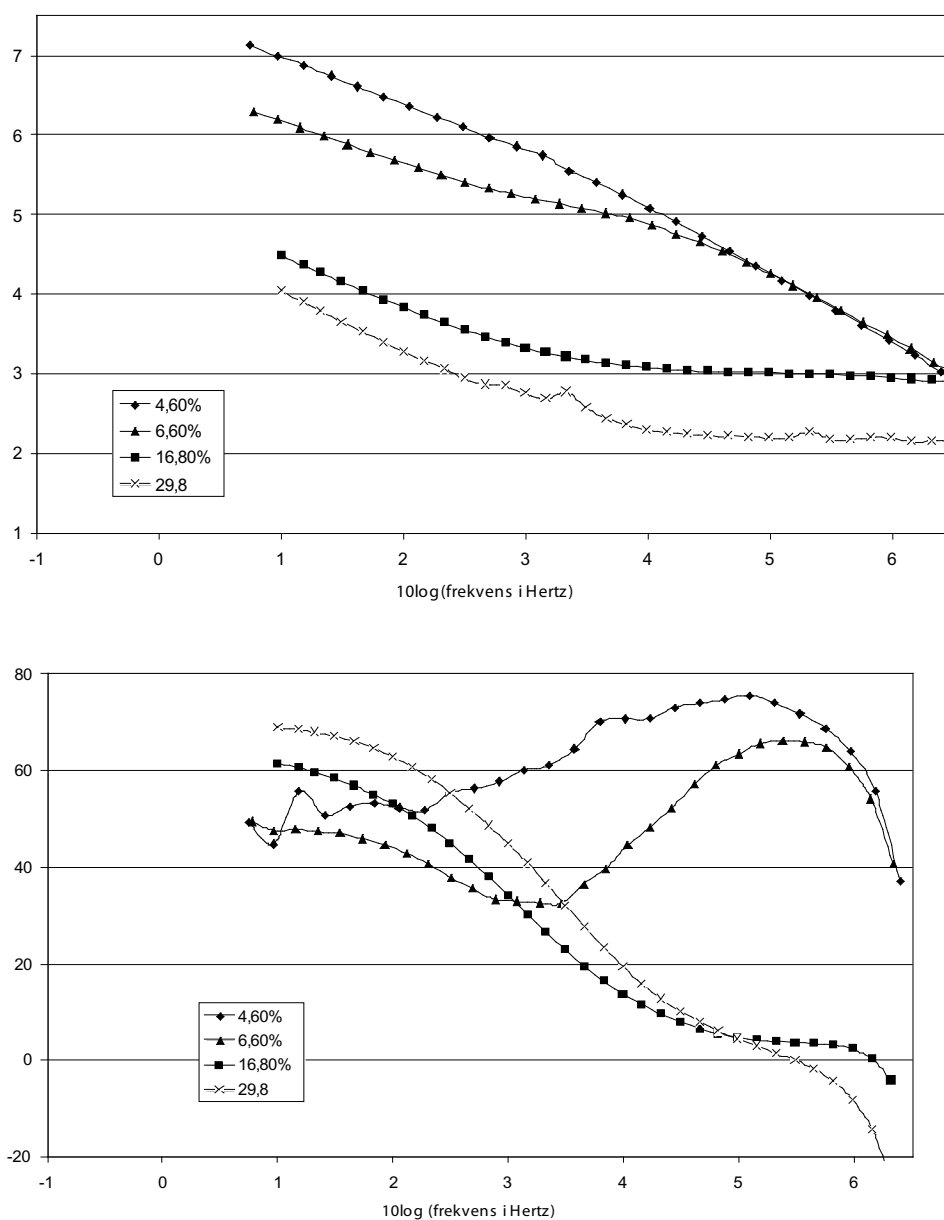
Mätningar utfördes även i decimeterskala över en kommersiellt tillgänglig bentonitmatta, se Figur 19. Elektrodarrangemanget visas i Figur 20.

Slutsatsen var att skillnaden var stor mellan torr och våt bentonit och att det bedömdes möjligt att identifiera ett vått ställe med hjälp av korsade trådar eller band.

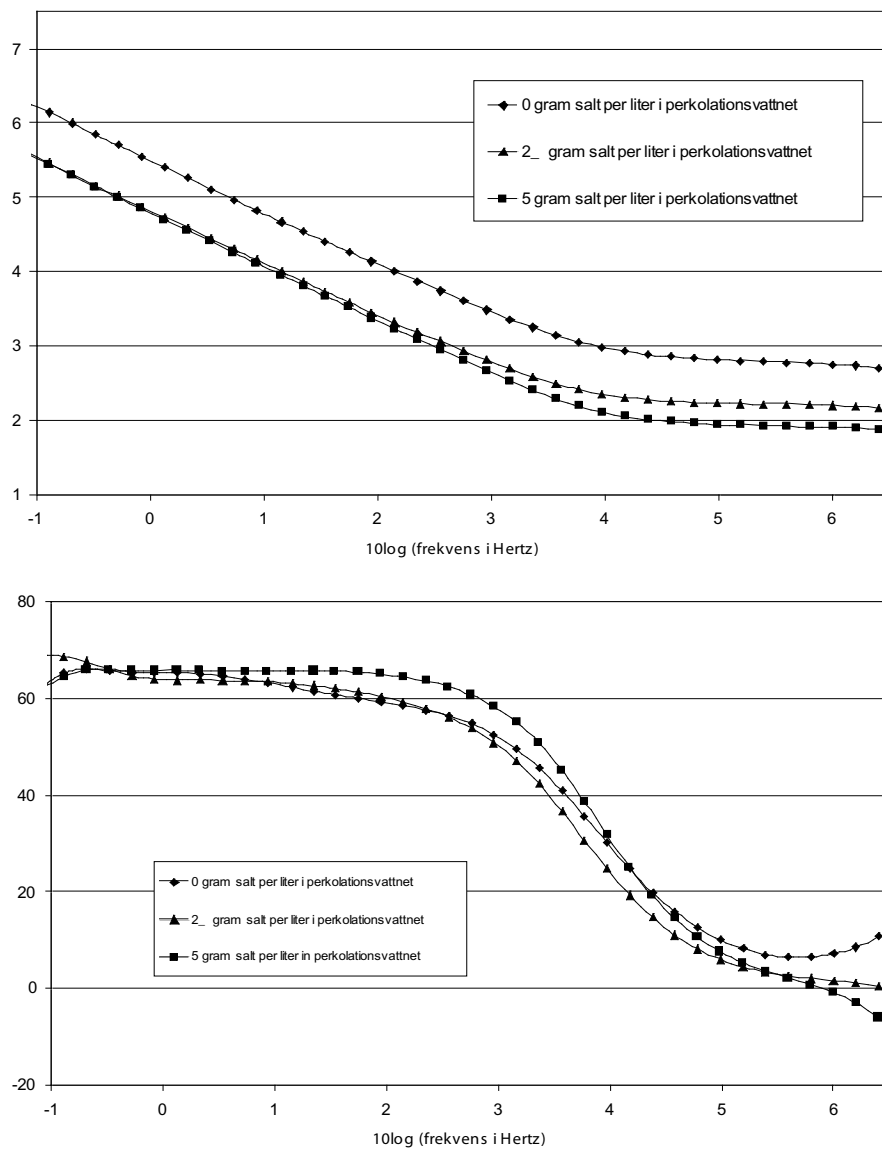
Det kunde noteras att effekten av tillsatsen av salt var begränsad. Detta förklarades med att en del salt fälldes ut. Vidare bedömdes salt föreligga tillsammans med fritt vatten i isolerade inneslutningar, vilkas bidrag till impedansen var begränsad. Förhöjd salthalt kan förväntas leda till minskade avstånd mellan silikatskikten, vilket kan förmodas leda till en minskad jonrörlighet.

Slutsatserna från studierna av bentonit var som följer[13]:

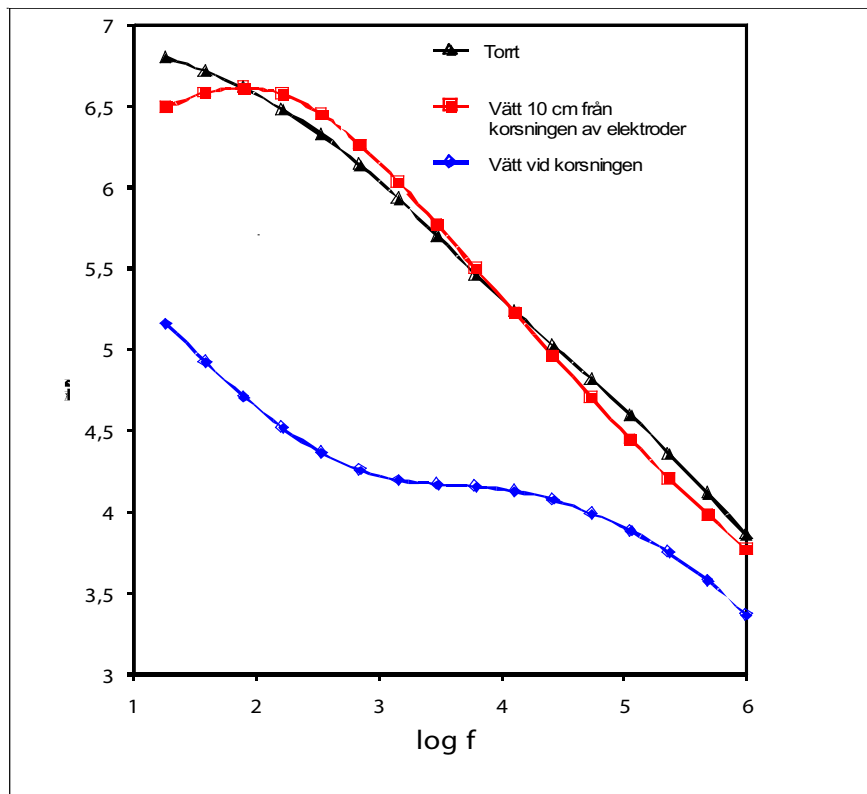
- Den totala impedansen beror av såväl vattenhalt som salthalt
- Impedansen minskar med ökad vattenhalt, särskilt vid låga frekvenser
- Förhållandet mellan impedansen vid låg och vid hög frekvens kan förmodas användas för att få ett kvalitativt mått på fukthalten
- Förändringar i en bentonitmatta kan förmodas lokaliseras med hjälp av korsade elektroder
- Impedansspektroskopi är en lämplig teknik för undersökning och förståelse av mikrostrukturella förhållanden i bentonit.



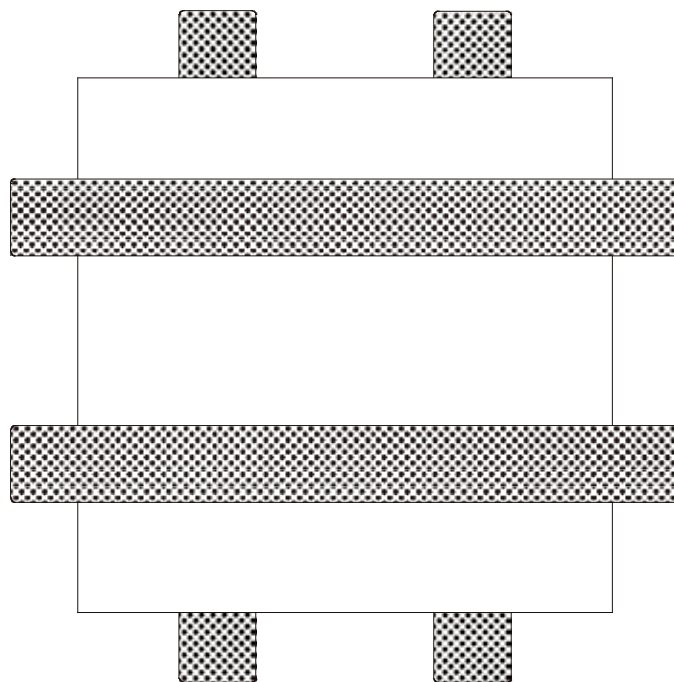
Figur 17. Impedansspektra för olika fukthalter i högkompakterad natriumbentonit (Volclay MX-80). Inget salt tillsatt.



Figur 18. Impedansspektra för bentonit (Volclay MX-80) vid olika salthalter (natriumklorid) i högkompakterad natriumbentonit (Volclay MX-80). Vattenkvot ca (vattenvikten i förhållande till torrvikten) 30 %.



Figur 19. Impedansmätningar över en bentonitmatta med korsade elektroder, se text.



Figur 20. Elektrodena utgjordes av band av metall som monterats vinkelrätt mot varandra samt över och under bentointmattan.

3.4 Geofysiska mätningar

3.4.1 Impedansmätningar

Med impedansmätningar avser man oftast mätning av såväl resistens som reaktans, d v s den reella respektive den imaginära delen av impedansen. För jordmaterial är den induktiva delen av reaktansen oftast försumbar¹⁵ och man arbetar således med den kapacitiva delen.

Den allra största delen av de impedansmätningar som utförs inom geofysiken avser enbart mätning av resistens, d v s man använder likspänning.[21] Som framgår av Avsnitten 3.1 – 3.4 innebär detta att man för jordmaterial i praktiken mäter den elektriska ledningsförmågan i porvattnet. Denna beror främst av porositeten, vattenmättnadsgraden och salthalten i vattnet. Det finns kommersiellt tillgängliga instrument för detta liksom datorkoder för utvärdering. Ofta utförs mätningarna genom att man mäter potentialen i ett stort antal punkter, varefter programmet räknar ut vilken struktur i marken som bäst svarar mot de uppmätta värdena. För att kalkylerna skall konvergera krävs att man antar att fördelningen av resistens i marken är relativt jämn.

Tekniken har testats på deponier. Telge Återvinningsanläggning har genom Tekniska Högskolan i Stockholm låtit mäta resistivitet i mark i närheten av sin deponi.¹⁶ Dessa data tillsammans med isotopdata har bl a entydigt visat att inga läckage till omgivningen av klorider förekommer (eller att de i vart fall är mycket små).

Beskrivningar av hur tekniken används för att bestämma och följa spridning av salt kring deponier och vägar återfinns i Referenserna [21,52-55].

Metoden har annars kommit till stor användning för prospektering av mineral, särskilt elektriskt ledande bergarter såsom sulfidmalmer.

De hittills nämnda metoderna utgår från att man använder sig av en egen artificiell strömkälla. Detta innebär att mätningarna är begränsade till det område som man kan förse med elektrisk ström och potential samt mäta.

En alternativ resistiv teknik innebär att man mäter elektriska potentialer från naturliga källor. En sådan källa är variationer i solvinden. Dessa variationer är inte likströmskällor i egentlig mening men huvuddelen av frekvensspektrum har en mycket låg frekvens (någon eller några cykler om dygnet), så att mätningar kan utföras som likströmsmätningar. Naturliga likspänningspotentialer kan också uppkomma av geokemiska orsaker. I båda fallen kan anomalier detekteras, vika kan vara relaterade till intressanta mineraliseringar.

Geofysiska mätningar av inducerad polarisation kan utföras på liknande sätt som mätningar av resistivitet. Strömkällan är då en växelströmskälla och ohmmetern är ett universalinstrument.

Den vanligaste metodiken för mätningar av inducerad polarisation är att registrera reaktionen på en ändring av strömmen genom systemet. Om man exempelvis slår av en likströmskälla så kan man detektera en avklingning i spänningen efterhand som polarisationen försvinner.

¹⁵ I de tidigare utförda arbetena avseende bentonit har emellertid induktiv reaktans påträffats vid de allra högsta frekvenserna över ca 1 MHz. Detta har tolkats som ett resultat av koppling mellan jonernas laddning och massa.

¹⁶ Olofsson, B., (2001): Förhöjda kloridhalter vid Tveta återvinningsanläggning – analys av orsaker. Institutionen för Mark- och Vattenteknik, KTH. Rapport till Telge Återvinning AB.

Formellt sett är det samma sak man möter i steady state och med hjälp av en transient, och man kan visa att ett impedansspektrum är relaterat till avklingningen med en fouriertransform. I praktiken är dock upptagning av en transient betydligt snabbare men ger inte lika detaljerad information som upptagningar vid steady state för ett antal frekvenser.

Oftast används tekniken empiriskt och utan att man gör några detaljerade tolkningar beträffande mekanismerna. I litteraturen [20-21] presenteras dock mekanismerna och deras mikrostrukturella orsaker, varför det kan antas att geofysikerna gör ungefär samma ansats som i denna rapport, nämligen att ha teorin som en bakgrund för att förstå hur spektrum kan variera.

Ett exempel på undersökningar av tillämpning av tekniken med inducerad polarisation återfinns i Referens [56] där man undersökt om tekniken kan tillämpas för att detektera förekomst av andra vätskor än vatten i deponier. Prognosen för detta bedöms vara mindre god, och man pekar i stället på att metodiken bör vara känslig för lermaterial.

Ett annat exempel är [57] där man kartlagt ett läckage av bränsle från en brusten ledning. En av erfarenheterna var att man fick induktiv koppling från ledningar m m vid de högsta frekvenserna över 100 kHz.

Information om metoden med inducerad polarisation återfinns i Referenserna [56-63].

3.4.2 Andra tekniker

Det finns ett antal geofysiska tekniker i vilka olika slags interaktioner registreras. Ofta sammanställs resultat från olika tekniker för att bedöma var en noggrannare undersökning kan vara motiverad. Generellt kan teknikerna indelas enligt följande: potentialfältsmetoder (gravimetri och geomagnetism), seismiska metoder, elektriska metoder och elektromagnetiska metoder.[21]

De flesta av dessa är av mindre intresse för den aktuella frågeställningen och diskuteras därför inte vidare. Det finns emellertid några metoder som kan vara alternativ till impedansspektroskopi, och de som identifierats presenteras därför kortfattat i det följande.

De metoder som kan vara av intresse för övervakning är sannolikt också metoder som är av intresse inom arkeologin, varför även sådan litteratur konsulterats.[64-66]

Markpenetrerande radar[21-67] har utvecklats för rutinmässig tillämpning och det finns utrustning att köpa som påminner om en motorgräsklippare. För att få en hög upplösning behöver man använda höga frekvenser och då blir penetrationsdjupet sämre. Liksom vid seismik får man multipla reflexer från variationer i brytningsindex för radiovågor. Metoden förefaller därmed vara mera av ett komplement än ett alternativ till impedansmätningar genom att det direkt kan detektera sprickor.

För fuktmätning finns främst två tekniker förutom impedansmätning: protonmagnetisk resonans och neutronspridning. Dessa är dock inte så vanligt förekommande inom geofysiken.

Protonmagnetisk resonans är ett specialfall av kärnmagnetisk resonans (NMR = Nuclear Magnetic Resonance)¹⁷. Det är atomkärnornas – d v s i det aktuella fallet väteatomens – magnetiska moment som orienteras efter ett yttre magnetfält. Nettomomentet från alla kärnor kan växelverka med radiofrekventa magnetiska fält. För protoner (lätta vätekärnor) är det bara vid en viss frekvens som man får växelverkan, så kallad resonans. Denna frekvens är proportionell mot det externa stationära magnetfältet. Ett ytterligare villkor för mätningen är att den radiofrekventa pulsen är lagom lång, och här handlar det om att produkten av pulslängden och den magnetiska fältstyrkan i pulsen skall ha ett visst värde. Pulsen får dock inte vara alltför lång för då kan kärnspinnen reagera på annat under tiden.

Det går att mäta på protonerna redan vid den svaga magnetisering av kärnspinnen som man får till följd av det jordmagnetiska fältet. Frekvensen blir då låg. För fritt vatten har man ganska gott om tid på sig att påverka spinnen med en radiofrekvent signal, och därför fungerar metoden även för svaga radiofrekventa fält, d v s för stora avstånd mellan antennen och vattnet.

Metoden används för att mäta djupet hos permafrost. Isen i permafrosten är ”osynlig”, medan vattnet i berget nedanför ger signal. Eftersom fältstyrkan i pulsen avtar med avståndet från antennen är resonansvillkoret (fältstyrkan i pulsen gånger tiden) uppfyllt bara i närheten av en yta som ges av resonansvillkoret. Genom att variera styrka och längd i pulsen kan man variera den geometriska orten för mätningen. Metoden används också för att bestämma grundvattenytan i torra områden. Djup över 100 meter kan bestämmas med denna metod.

Mätning i jordens magnetfält kan göras också för mindre dimensioner, och ett exempel på detta är vissa magnetometrar, där man mäter den jordmagnetiska fältstyrkan genom att mäta frekvensen för protonresonansen.

Metoden finns beskriven i Referenserna [68-69].

Det finns en borrhålsvariant av NMR-metoden. Där använder man sig av starka permanenta magneter i en sond som sänks ner i ett borrhål. Sonden innehåller även sändare och mottagare för radiofrekventa elektromagnetiska signaler. Resonansvillkoret är uppfyllt i vissa ytor utanför magneternas poler. På detta sätt kan man mäta några få centimeter in i berget. Detta räcker dock för att man i ett oljeborrhål skall kunna bestämma porositeten, porstorleksfördelningen, vattenhalten och oljehalten. Det behöver kanske inte tilläggas att metoden, som finns beskriven t ex i Referens [70], blivit mycket populär.

Neutronspridningsmetoden kan också användas i borrhål. En neutronkälla skickar ut neutroner till omgivande material. Där kan de absorberas eller bromsas beroende på materialet i fråga. Väteatomer har den bästa bromsande effekten av alla atomer, varför förekomst av vatten ger en hög inbromsning och därmed en sänkning av absorptionstvärsnittet samt en högre återreflektion tillbaka till sonden där dessa neutroner detekteras. Metoden finns utvecklad t ex för mätning av fukthalt i jordmaterial, och finns beskriven t ex i Referens [71].

¹⁷ Eftersom ”nuclear” blivit farligt under de senaste decennierna utelämnar man vanligen ”nuclear” när det gäller medicinska tillämpningar. Därför heter bildupptagningsutrustningen som i dag finns på de flesta större sjukhus ”magnetkamera” och tekniken ”magnetisk resonans”. Vid tekniska tillämpningar heter det dock fortfarande NMR.

3.4.3 Tillämpningar och jämförelser

Någon uttömmande genomgång av samtliga artiklar som publicerats kring jämförelser mellan tänkbara metoder m m har inte genomförts. Däremot har ett tillräckligt underlag tagits fram för att identifiera metoder av intresse och att kunna jämföra dem med avseende på förutsättningarna för användning för övervakning på deponier.

Följande referenser handlar direkt om övervakning samt geofysisk karakterisering av deponier: [8-11,21,43,54,72-74]. De metoder som man hänvisar till finns kortfattat beskrivna i avsnitten 3.4.1 och 3.4.2 ovan.

Det finns också artiklar som beskriver övervakning av geotekniska konstruktioner. Dessa artiklar återfinns i Referenserna [8,9-11,21,43,52-54,56,62,67,72-75]. De metoder som används finns också beskrivna i tidigare avsnitt i denna rapport. Ofta handlar det om mätning av fukthalt och i de flesta fall om elektriska metoder, d v s impedansmätning (inklusive mätning av endast resistens). Inget fall har påträffats där man tar upp frågan om övervakning under mycket lång tid.

Översikter över metoder samt jämförelser har påträffats i följande Referenser [9-11,21,75-78]. Sådana jämförelser är inte alldeles enkla att göra eftersom såväl behoven som metoderna är sinsemellan mycket olika. Det kanske värdefullaste med dessa artiklar, se t ex [9,77,79], är att de presenterar scheman med karakteristik för behov och metoder, samt anger fördelar och nackdelar med olika metoder.

Referens [77] konstaterar att metodvalet bör ske platsspecifikt och att det ofta handlar om att använda en kombination av olika metoder. Det finns alltså ett internt beroende mellan de olika metoderna, vilket innebär, att man inte utan vidare kan peka ut en metod som ”bäst” utan behöver se till helheten.

Genomgången av materialet pekar på att elektriska metoder – d v s mätning av impedans och resistivitet i någon form – har den bästa potentialen för att uppfylla de funktionskrav som angavs i Avsnitt 1.2. Dessa ”familjer” av metoder är också populärast. Mätning av resistens är enklast men ger mindre information jämfört med mätning av impedans (d v s resistens och kapacitans som funktion av frekvens). Långsiktigheten i övervakningen beror främst av hur installationen av elektroderna utförts och behöver inte skilja mellan mätningar av resistens och impedans.

Genomgången ger på detta sätt stöd för den inriktning som valts för det arbete vars resultat redovisas i denna rapport. Möjligen kan man göra tillägget att det kan vara lämpligt att utföra utvecklingsarbetet på ett brett sätt så att man har underlag för att i ett senare skede eventuellt förenkla. I det aktuella fallet kan detta tänkas ske genom att man i stället bara mäter resistens, eller någon enstaka frekvens, alternativt några få frekvenser.

4 FÖRSÖK

4.1 Experimentellt

4.1.1 Askmaterialen

En allmän beskrivning av sluttäckningsförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning återfinns i Avsnitt 1.3, där det framgår att installationerna för elektrokinetisk övervakning utförts i försöksyta 3. Tätskiktet i denna bestod av två skikt, ett med flygaska från Söderenergi, och ett med åldrad aska försatt med 11 % bentonitlera av kvaliteten ”Friedland Ton”. Exempel på kemiska sammansättningar för dessa material visas i Tabell 4 tillsammans med kompositaska från borrhningarna i askupplaget.

Under inledningen av sluttäckningsförsöket utfördes borrhningar i askupplaget vid Telge Återvinningsanläggning. Sammanlagt borrades ca 80 meter i fyra hål. Kompositaskan i Tabell 4 avser en blandning av 20 prover från dessa borrhningar. Kvalificeringen av dessa askor finns närmare beskriven i Referens [28].

Utläggningen av askor på försöksyta 3 hade föregåtts av undersökningar av askornas härdningsegenskaper. För att ett tätskikt skall kunna packas och härda till en tät monolit krävs att den är kompakterbar, vilket bland annat beror på vattenhalten, samt att den har – och har kvar - förmåga att härda. Askan behöver alltså vara tillräckligt fuktig för att kunna packas, men tillräckligt torr för att inte härda i förtid. Vidare behöver askan kunna hanteras i samband med utläggningen, d v s den får inte härda under tiden som den hanteras.

Vissa av de askor som Tveta Återvinningsanläggning har tillgång till är mycket starkt härdande medan andra har svagt härdande egenskaper eller inga alls (som i åldrade askor). Därför har undersökningarna också innefattat¹⁸ reaktivering av åldrade askor med hjälp av färska askor. Resultatet av dessa undersökningar är att även åldrade askor under vissa förutsättningar kan användas i tätskikt.

Valet av prover i Tabell 4 representerar således askor som kan komma i fråga för användning i tätskikt:

- askor som är reaktiva (såsom flygaskan i Tabell 4),
- askor som kan användas efter reaktivering (såsom kompositaskan i Tabell 4) samt
- askor som inte är reaktiva men som blandas med den svällande och tätande leran bentonit (såsom ”åldrad aska” i Tabell 4)

Provtagning av flygaska visas i Figur 21, och härdad aska visas i Figur 22.

¹⁸ Dessa undersökningar är opublicerade.

Tabell 4. Kemisk sammansättning med avseende på huvudämnen i provmaterialen, se text. Viktsprocent räknat som oxider enligt nedan.

ICP-analys %, räknat som	Flygaska från Söderenergi 2004-11-11	Åldrad aska + 11 % bentonitlera 2004-11-02	Kompositaska från borrhningarna 2004-07-21†
S	3,9	3,1	3,2
Al ₂ O ₃	3,5	6,2	13,7
CaO	42,2	32,5	13,8
Fe ₂ O ₃	2,4	4,4	5,2
K ₂ O	1,5	1,6	1,8
MgO	1,7	2,2	1,9
MnO	0,1	0,1	0,1
Na ₂ O	1,5	1,1	1,0
P ₂ O ₅	0,4	0,5	0,3
SiO ₂	10,1	23,0	37,8
TiO ₂	0,5	0,8	0,6

† Datum för beredning av kompositprovet. Provborrhningarna hade ägt rum långt tidigare.



Figur 21. Provtagning av flygaska.



Figur 22. Åldrad aska.

4.1.2 Elektrodmaterialen

Elektrodmaterialen skall leda ström vid alla de frekvenser som är aktuella, bibehålla sina egenskaper under lång tid i aktuell miljö samt ha ett lågt pris. Helst skall det vara en återvinningsprodukt.

Mot denna bakgrund har ett antal material från SSAB:s anläggning i Oxelösund testats. De har tillhållits av SSAB:s dotterbolag för återvinning. SSAB Merox AB.

En jämförelse mellan de prover, som mottagits, redovisas i Figur 23.

Som framgår av figuren har hyttstöt de bästa elektriska egenskaperna. Det visade sig också under arbetet att motståndet genom hyttstötet hela tiden var lågt jämfört med det i provmaterialet.

För att belysa hyttstötets långtidsbeständighet i den aktuella miljön har en mindre informationssökning utförts. Referens [80] avser undersökningar av pyrolyskol i mark i Australien som daterats med kol-14-metoden till ungefär 45 000 år BP (before present). Genom isotopundersökningar av kolet har man också dragit slutsatser om det dåvarande klimatet. Isolering av pyrolyskolet från diverse organiskt kol i marken har skett enligt följande.[80]

“The determination of charcoal concentration as an indicator of fire activity was undertaken using two techniques. The first method quantified the mass of chemically resistant charcoal (oxidation resistant elemental carbon or OREC) as described in detail by Bird and Gröcke (1997). The technique involves the sequential pre-treatment of samples with HCl, HF and NaOH followed by a $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$ oxidation at 60 °C. Samples were left in the oxidation stage for 72 h. Owing to the high organic carbon content of the sediments (up to 60% weight mass), samples subsequently were treated with a 1 : 1 mix of 6 M KOH and 32% H_2O_2 solution for a further 12 h (Bird and Grocke, 1997). Carbon content was determined on the remaining material using an elemental analyser and the percentage OREC calculated by the difference between mass of sample prior and subsequent to treatment. The second method involved counting of charcoal particles greater than 10 μm maximum diameter within the prepared pollen samples and expressed as particles per cubic centimetre. A ratio of charcoal to pollen concentration also was calculated to account for possible variations in sedimentation rate.”

Som framgår av citatet[80] är det en mycket kraftig oxidation och kemisk behandling som markproverna genomgått (d v s utöver påverkan av markorganismer och luftsyre under 45 000 år). Ändå finns det kvar finpartikulärt pyrolyskol (med partikelstorlekar kring 10 – 100 mikrometer) som motstått dessa påkänningar.

Mera detaljerade beskrivningar av pyrolyskolet finns sammanfattade i [81], och sammanfattning av studier av gamla pyrolyskol redovisas i [82]

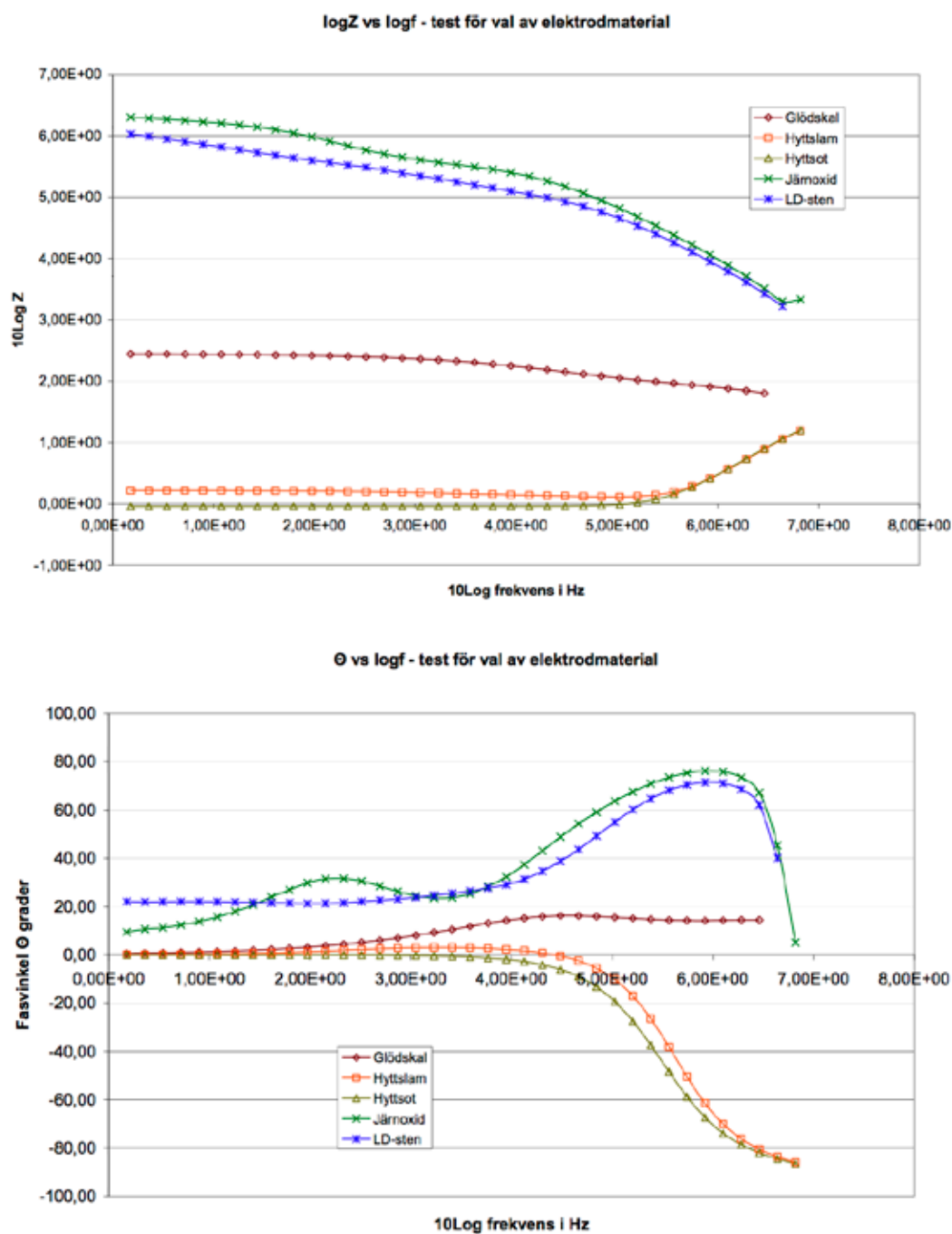
I [82] omnämns även försök som har utförts med våtoxidering med bikromatsvavelsyra under lång tid. Olika pyrolyskol har sinsemellan starkt varierande förmåga att motstå oxidation. Pyrolyskol med kolhalter överstigande 74 % är beständiga, medan de med kolhalter under detta värde oxideras jämförelsevis snabbt.

I referens [81] redovisas hur bl a kolstoft i rökgas är uppbyggt i form av nära sfäriska kroppar med lager av kondenserade bensenringar.

Där beskrivs också hur man kan konstatera om man verkligen har sådan uppbyggnad med hjälp av NMR (Nuclear Magnetic Resonance). De kärnmagnetiska dipol-dipol-kopplingarna elimineras genom att man roterar provet i den sk magiska vinkeln, d v s en viss vinkel i förhållande till det externa magnetfältet. Då kan man mäta de kemiska skiften vilka beror av de kemiska bindningsförhållandena. Här har kolatomer i kondenserade bensenringar värden som tydligt avviker från dem för andra typer av kolatomer. Detta möjliggör kvantifiering av pyrolyskol, eller egentligen en typ av kol som är nära elementärt kol i form av grafit.

Pyrolyskol består således till stor del av elementärt kol, och är mycket beständigt mot oxidation. Det kan finnas kvar i mark tiotusentals år efter det att det bildats. Det bryts heller knappast ner under våtoxidering med sur bikromatlösning.

Hyttsoth genereras vid högre temperaturer än de som redovisas ovan för generering av träkol. Sannolikt är kolhalten i förhållande till totalhalten element som bildar organiska föreningar betydligt högre i hyttsoth jämfört med träkol från bränder eller pannor. Därmed bör hyttsoth ha en utomordentligt god långtidsbeständighet.



Figur 23. Jämförelse mellan olika potentiella elektrodmaterial. Proverna var pastiller vilka pressats till måtten diameter 20,0 mm, tjocklek 2,0 mm.

4.1.3 Störningar och dimensionering

Vår miljö innehåller elektriska potentialer och elektromagnetiska fält från olika källor. Partiklarna från solen, dvs solvinden, ger upphov till strömmar med till stor del så låga frekvenser att de vid vanliga mätningar kan uppfattas som likströmspotentialer. Även den strömmande magman innanför jordskorpan ger upphov till elektriska potentialer med liknande frekvenser. Låga frekvenser kan också uppkomma från – delvis hemliga – radiofyrrar och sändare för undervattensbåtkommunikation.

Likspänningar kan erhållas geokemiskt, men även till följd av strömmande vatten genom avlänkning av laddade partiklar i jordens magnetfält.

Lokalt kan nätfrekvens uppträda till följd av bristande jordtag eller läckande elektrisk utrustning. Elektriska lok sänder ut elektromagnetiska vågor på alla frekvenser genom gnistbildningen mot matartråden. Denna effekt är särskilt framträdande vid viss väderlek, t ex vid isbildning på tråden.

Det finns många potentiella källor till störningar av både växelströms- och likströmskaraktär, och såväl kontinuerliga som intermittenta.

Ytterligare beskrivningar av potentiella störningar återfinns i Referenserna [20-21].

Referens [20] har ett särskilt kapitel om störningar ("telluric noise and electromagnetic coupling"). Kapitlet gäller mätningar över större avstånd än de enligt den metod som är aktuell i denna rapport.

Det redovisas i [20] att störningar inte bara beror av externa orsaker. Man kan få kapacitiva kopplingar mellan ledningar, och induktiva kopplingar till annan utrustning.

Genomgången ledde till ett antal överslagsberäkningar och jämförelser mellan olika strategier. Resistiv koppling undviks genom lämpliga val av isolermaterial. Den reaktiva kopplingen är antagligen lägst för fria ledare utan skärm. Sådana är emellertid mest mottagliga för störningar. Enkelledare motsvarar enkeltrådsöverföring i telefonins barndom. På grund av störningskänsligheten ersattes de med dubbelledare som var tvinnade kring varandra för att neutralisera alla störfält. Sedan kom skärmade ledare, som är det som används i dag. De är mycket effektiva.

Den största kapacitiva effekten får man om ledningar ligger nära varandra. Denna kan beräknas utgående från geometrin, och användas för eventuell korrigering av mätdata. Induktiv koppling kan emellertid inte korrigeras,[20] i vart fall inte på något enkelt sätt.

Överslagsberäkningar pekade på att det för det aktuella arrangemanget i fält var möjligt att arbeta med skärmad kabel under förutsättning att avståndet var stort mellan skärm och ledare så att kapacitansen per meter blir låg. Denna strategi innebär att man får en känd kapacitiv koppling som man kan korrigera för vid behov, samtidigt som störningar från ledningarna undviks. Själva elektroderna kan dock fånga upp störningar.

Alternativet med skärmad kabel valdes eftersom det bedömdes vara det tillförlitligaste alternativet.

För anslutningar till såväl fat som elektroder i fält valdes därför en basnätskabel för kabel-TV-transmission, KTV 2.0/8,3 CE från Nexans. Denna är betydligt grövre än gängse koaxialkabel som används till impedansspektrometrar, och det krävdes också särskilda kopplingar för denna kabel. Kabeln i fråga används normalt i frekvensintervallet 10 MHz – 1 GHz. Den består av en kopparledare med ett cirkulärt

tvärsnitt med en diameter på 2,0 mm samt en kopparskärm i plåt. Avståndet mellan ledare och skärm är ca 4 mm. Kabellängden för installationerna i Tveta är 3,0 meter, medan ledarna för faten är individuellt uppmätta.

I samtliga fall användes 1 mm tjocka kopparplattor som innerelektroder i elektroderna av hyttsot. Kontakt mellan ledaren i kabeln och kopparplattorna säkerställdes genom hårdlödning. Se vidare avsnitten 4.1.5 och 4.1.6.

Utgående från litteraturen hade störningar identifierats som det som i första hand kunde ge problem. Därför mättes likströmspotentialer och störnivåer med jämna mellanrum med hjälp av universalinstrument för impedans, ohmmeter och tvåkanaligt oscilloskop. Med hjälp av oscilloskopet var det möjligt att ”se” störningarna och att få en bild av frekvensfördelningen.

Det visade sig att störnivåerna för växelström var låga och under 10 mV vid samtliga undersökningstillfällen.

Det högsta värdet för likspänning var drygt 500 mV. Detta bedömdes som oproblematiskt eftersom de instrument som användes hade automatisk kompensering för likströmskomponenter upp till 10 volt.

De störningar som diskuterats ovan undviks effektivt i laboratorieskala genom att proverna placeras i en Faradays bur. Någon motsvarande skärmning saknas för faten. De består emellertid av plast som är en mycket god elektrisk isolator. Faten kan därför förmodas få sin elektriska potential definierad genom instrumentet.

4.1.4 Mätinstrumenten

Vid alla mätningar i laboratoriet har en ”Solartron 1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer” använts. Mätcellen bestod av två cirkulära rostfria elektroder med fjäderbelastning. Mätcellen är monterad i ett kopparblock med möjlighet till termostatering, vilket inte utnyttjades vid mätningarna. Vid impedansspektroskopiska mätningar i laboratorieskala placeras en provtablett mellan de rostfria elektroderna.

För mätningar i fält har även använts ett instrument från Autolab med beteckningen PG 100.

4.1.5 Uppläggning och utförande av fatförsöken

Materialen för fatförsöken finns beskrivna i Avsnitt 4.1.1 (tätande material) och 4.1.2 (elektrodmateriäl). Härutöver användes även vanlig sand för betongtillverkning med kornstorlek < 8 mm.

Faten som användes i försöken hade ett rektangulärt tvärsnitt med avrundade hörn, se Figur 24 och 25. Största ytterdiametern var 35 cm och den minsta var 30 cm. Öppningens ytterdiameter var 28,0 och tunnans höjd var totalt 42,0 cm.

En principskiss över installationerna i tunnorna visas i Figur 26. Detaljer beträffande genomföringarna genom tunnan visas i Figur 24, och innerelektroden av 1 mm kopparplåt samt anslutningen till koaxialkabeln visas i Figur 25.

För att kompaktera materialet användes en träbit och hammare. Då tjockare skikt material skulle appliceras (såsom tätskikten av flygaska eller bentonit/flygaska) så tillfördes och kompakterades en liten del i taget. Detta för att få det så kompakt som möjligt. Stor noggrannhet lades ner på att få skikten så plana som möjligt för att även kopparplattorna samt lagren av hyttsot skulle hamna plant.

Detaljer kring fatutformningar och vattentillsatser redovisas i Tabell 5.



Figur 24. Fat för försöken i fatskala. Observera genomföringarna genom fatväggen, vilka utförts med samma armaturer och metodik som används i vattenledningssystem.

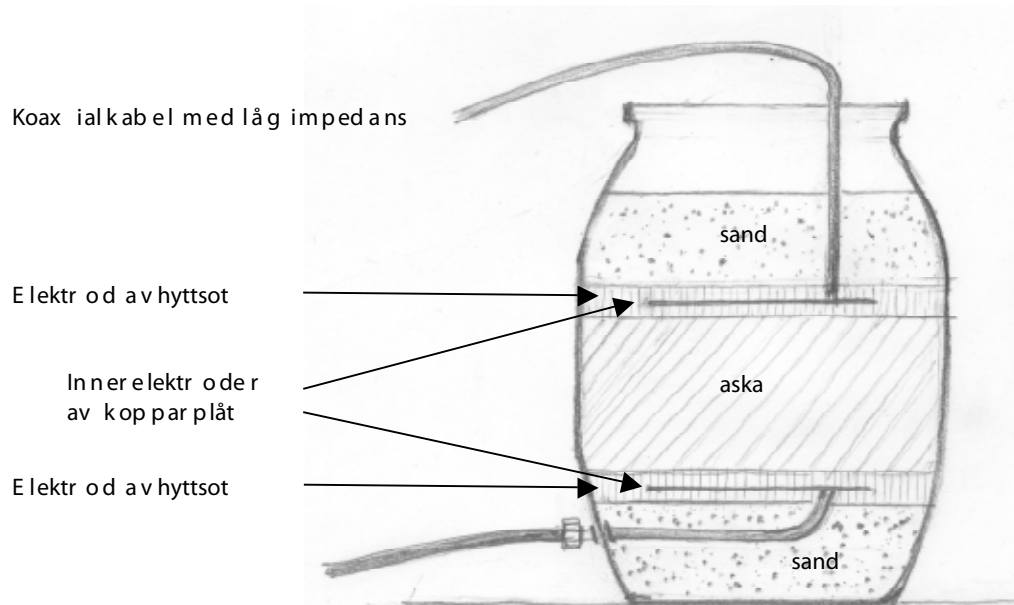


Figur 25. En av kopparelektroderna som anslutits med hårdlödningar till ledarna i signalkablar. Ledarna dubblerade för redundans. Lödskarvarna täcktes sedan med ytterrör av plast vilka fylldes med epoxi.

Tabell 5. Höjder och vikter[†] för de olika skikten i faten med tätskikt av flygaska respektive blandning av aska och bentonit.

Material	Fat med flygaska		Fat med aska / bentonit	
	Tjocklek cm	Vikt† kg	Tjocklek cm	Vikt† kg
Sand	8	9,8	9	12,1
Hyttstot	3	3,4	3	2,7
Flygaska	14	13,6	0	0
Aska / bentonit	0	0	6	8,6
Hyttstot	3	2,9	3	2,8
Sand (nederst)	13	3,8	20	8,0

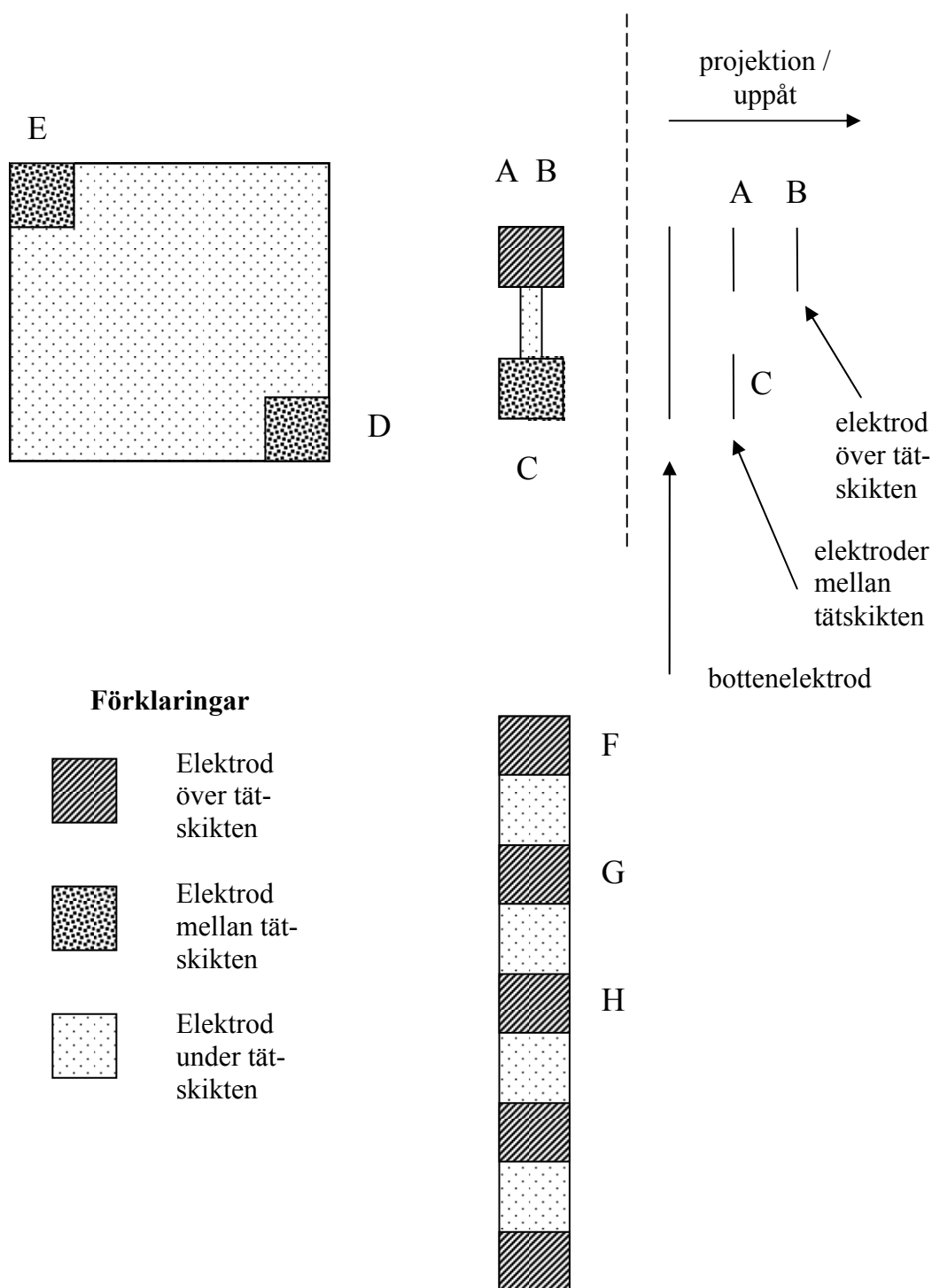
† Vatten ingick enligt följande (viktsprocent): sand 2,6 %, hyttstot 1,2 %, flygaska 28,4 % och aska/bentonit 32,7 %. Vatten har tillsatts till båda faten med vardera 500 ml dagarna 2005-06-07, 2005-06-16, 2006-07-04 och 2006-07-14.



Figur 26. Principskiss av installationerna i faten. Se Figur 24 för detaljer kring genomföring genom fatväggen samt Figur 25 beträffande anslutningen mellan koaxialkabel och innerelektrod. De olika skikten separerades med hjälp av geotextil (ej markerat i figuren). Hyttsotets tjocklek var 3 cm. Kablarnas längd var 1,4 meter.

4.1.6 Uppläggning och utförande av fältförsöken

En schematisk bild av installationerna för fältförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning visas i Figur 26. Detaljerade data över positioner återfinns i Appendix A. Installationerna av de undre elektroderna längst upp i Figur 27 visas i Figurerna 28, 29 och 30. De utfördes under perioden oktober – december 2004.



Figur 27. Ungefärliga positioner för installationerna för fältförsöken vid Tveta Återvinningsanläggning. Skissen till höger om den streckade linjen avser en projektion i yz-planet. Samtliga elektroder är utförda i ett 5 cm tjockt skikt av hyttsot. Elektroder märkta med bokstäver har dessutom en perforerad kopparplåt, 1 x 1 meter, 1 mm tjock, i mitten av elektroden samt förbindelse till markytan via koaxialkabel. Samtliga elektroder mellan och över tätskikten är 1 x 1 meter i storlek. Jämför med Figur 3 som visar den principiella utformningen samt Figurerna 28 och 29 som visar installationen.



Figur 28. Installation av den nedre elektroden i ytan längst upp till vänster i Figur 27.



Figur 29. Installation av den nedre elektroden i ytan längst upp till höger i Figur 27. Till höger i figuren ses en del av elektroden i Figur 28.



Figur 30. Installation av elektroderna på mellannivå. De skall förses med hyttsot från storsäcken samt kopparplatta med tillhörande koaxialkabel enligt Figur 31.



Figur 31. Kopparplatta med tillhörande koppling till koaxialkabel. Denna skyddas av ett vattenledningsrör, vilket framgår nertill till vänster på bilden. Detaljer kring hur kopplingen framgår av Figur 31. Anordningen är robust utformad med tanke på att den skall fungera även efter intensiva successiva kompakteringar av tätskiktet med en stor vibrationsväkt.



Figur 32. Armaturer för fogning av kopparelektroder och koaxialkabel. Förbandet varmlöddes och inneslöt i en bit kopparrör som fylldes med tätningsmassa.

Det principiella elektrodarrangemanget för fältförsöken visas i Figur 3 i Avsnitt 2.2.2. För detaljer, se Figurerna 27-32. Elektrodena utfördes med hyttsot. För att säkerställa god elektrisk kontakt mellan hyttsotet och ledaren i koaxialkabeln hårdlöddes den senare till en perforerad kopparplåt, se Figurerna 31 och 32, som installerades inuti elektrodena med hyttsot.

Avstånden mellan elektrodena har inte kunnat bestämmas exakt eftersom man inte velat riskera att skada tätskikten. Skiktet med flygaska uppskattas vara 0,7 meter tjockt och skiktet med en blandning av aska och bentonit uppskattas vara 0,3 meter tjockt.

Detta är ett överambitiöst arrangemang för rutinmässig kontroll, och installerat med syfte att kunna testa delarna i systemet var för sig. I rutinmässig drift kan man snarare anta att man helt enkelt slår ner ett rör från ytan till en överelektrod och sedan injekterar saltlösning via röret till omgivande hyttsot. Sådana förfaranden rekommenderas i litteraturen.[20-21]

Det visade sig att elektroder och ledningsmaterial klarade kompakteringen med vibrationsvält med undantag för en av elektrodena i det hantelformade arrangemanget längst upp till höger i Figur 27.

Förberedande montage samt karakterisering av störnivåer utfördes i maj 2005, och första mätningen ägde rum i juni 2005. Resultat från denna mätning redovisas nedan, se avsnitt 4.2.3.

Det visade sig att instrumentet inte blev stabilt. Ett stort antal variationer och hypoteser testades, men inget visade sig hjälpa. Först testades externa störningar, men utan resultat. De externa störningarna var små, se avsnitt 4.1.3. Därefter testades jordningen. Det visade sig att Tveta Återvinningsanläggning har ett utmärkt jordtag ett gott stycke från försöksplatsen, samt att störningarna i den elektriska jordledningen är små. Eftersom instrumentet har flytande jord för provet vid mätning i laboratorieskala försågs instrumentet med flytande jord via en skyddstransformator. Inte heller detta gav något resultat. Experter hos leverantörer kontaktades, och två specialister från företaget Metrohm deltog under en dag, men inte heller detta hjälpte.

Sammantaget har Uppsala Universitet utfört mätningar vid sex tillfällen jämfört med planerade två eller kanske tre.

Informationssökning och litteraturstudier som bedrevs parallellt gav som ett av resultaten att den klassiska boken om impedansspektroskopi, Referens [15], kommit ut i en ny upplaga år 2005[16]. I denna finns ett avsnitt som beskriver hur instrumenten vanligen är konstruerade och vad detta innebär med avseende på förutsättningarna för fältmätningar. Här kommer ett citat från Avsnitt 3.2.1.9 i Referens [16]:

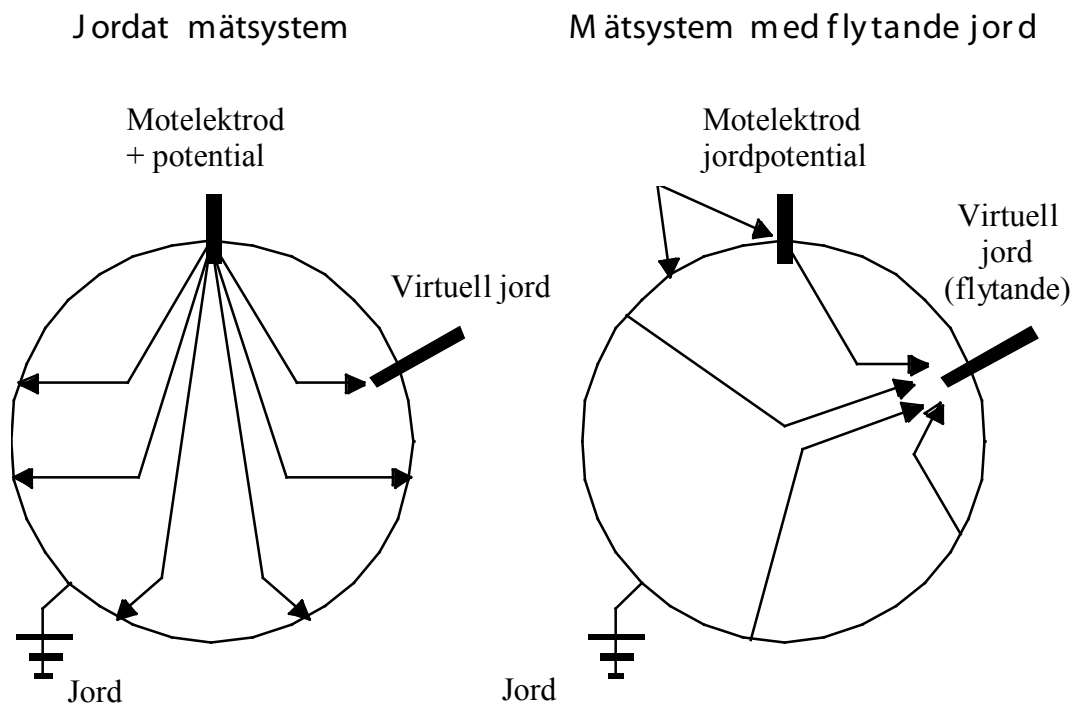
”3.2.1.9 Floating Measurement Techniques

Most modern potentiostats allow measurements on grounded devices such as pipelines, metal storage tanks, and even laboratory tests using grounded autoclaves or similar devices. For measurements to be properly made in these difficult conditions it is necessary for the instrumentation to have “floating” measurement capability. In this case, the internal circuitry in the potentiostat is referred to an internal floating ground rather than actual ground. For measurements on grounded structures (Figure 3.2.9) the instrument is set to “floating” measurement mode (usually by software control or by a manual switch on the unit) and the counter electrode (CE) is connected directly to the grounded structure while the working electrode (WE) that measures current flowing through the structure is allowed to “float” to the required voltage under the control of the potentiostat. In this case, the whole structure becomes a large counter electrode which supplies the required test current to the WE where it is accurately measured. The WE is controlled by the potentiostat and floats to an offset voltage relative to the grounded CE in order to supply the required current (if operating in current controlled mode) or offset potential (when operating in voltage controlled mode). In the case of a nonfloating measurement system, where CE is instead set to a particular voltage relative to ground while the WE is held close to ground potential (nonfloating), much of the current supplied by the CE goes directly to ground via the structure under test, completely avoiding (short-circuiting) the WE current measurement input and leading to very high current levels and overloads in the system. The floating measurement capability is therefore extremely important for some applications.

Floating measurements are also used to avoid ground loops where equipment and test cell are grounded at different points leading to noise and interference in the measurements. If the cell is grounded but the equipment is floating then this problem can be avoided.

It has been known for earth connections to be removed from nonfloating systems to convert them into floating systems. This is a very dangerous practice and is not recommended from the safety point of view since the whole equipment could become “live” which could lead to injury or fatalities.”

I Figur 33 visas skillnaden mellan ett jordat mätsystem och ett med flytande jord i mät delen, efter figur 3.2.9 i textcitatet ovan.



Figur 33. Skillnaden mellan ett jordat mätsystem och ett mätsystem med flytande jord.

Slutsatsen av denna och annan information är att de avancerade forskningsinstrument som använts inte är konstruerade för att klara mätningar i den verkliga jorden, i vart fall inte utan komplettering med särskild tilläggsutrustning.

En närmare genomgång av de data som upptagits visar emellertid att instabiliteten inte funnits hela tiden och att vissa mätningar eller stora delar av vissa mätningar varit stabila. Dessa stabila data är reproducerbara, vilket redovisas i Avsnitt 4.2.3.

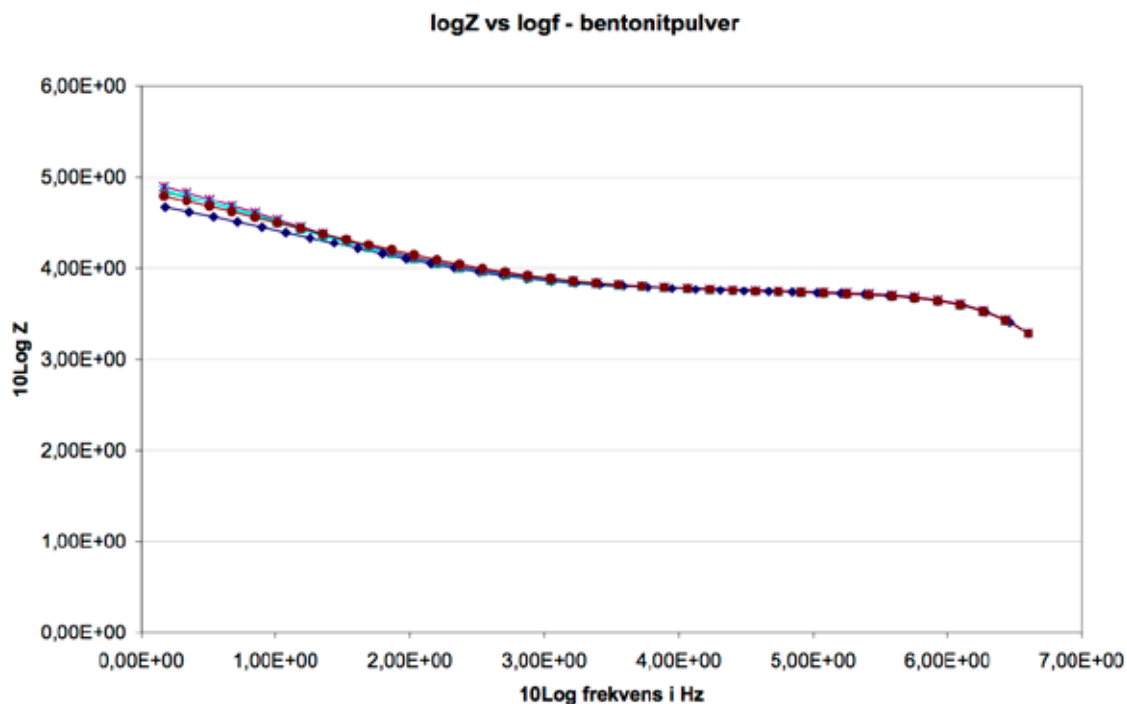
Det är troligt att dessa stabila data också är korrekta. Det är dock mindre lämpligt att dra några slutsatser av mätningar som man inte haft full kontroll över, varför fältdata inte tolkas i denna rapport.

4.2 Resultat från mätningarna

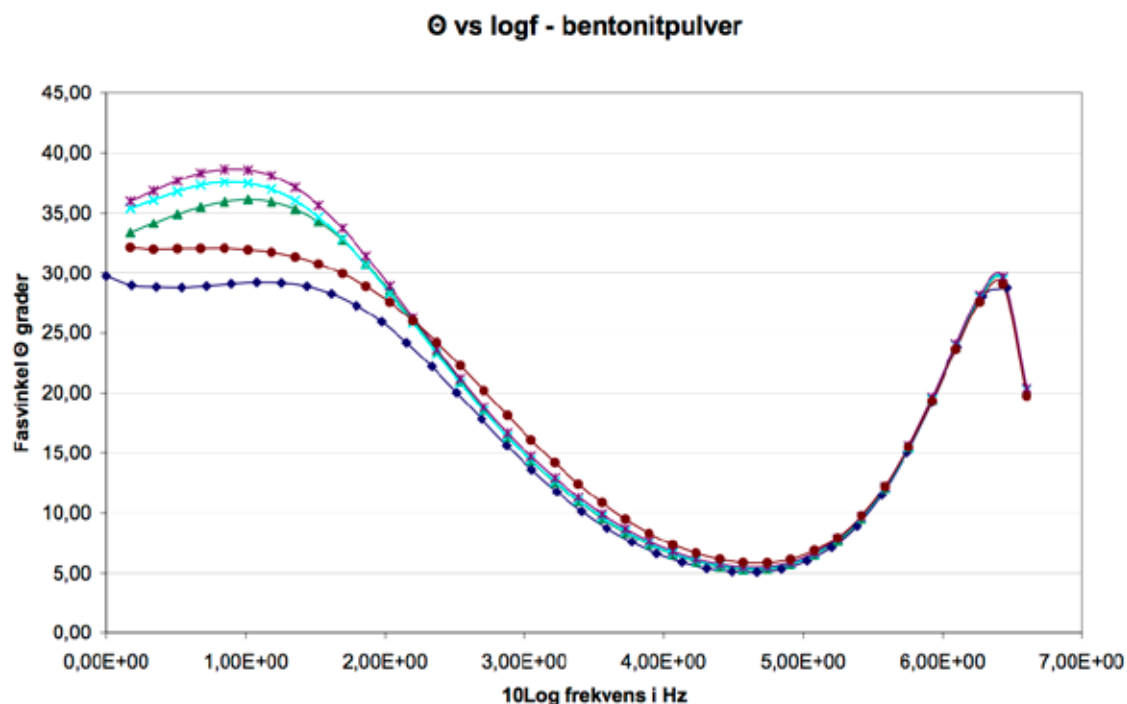
4.2.1 Resultat från försöken i laboratorieskala

Resultat från försöken i laboratorieskala redovisas i Figurerna 34-41.

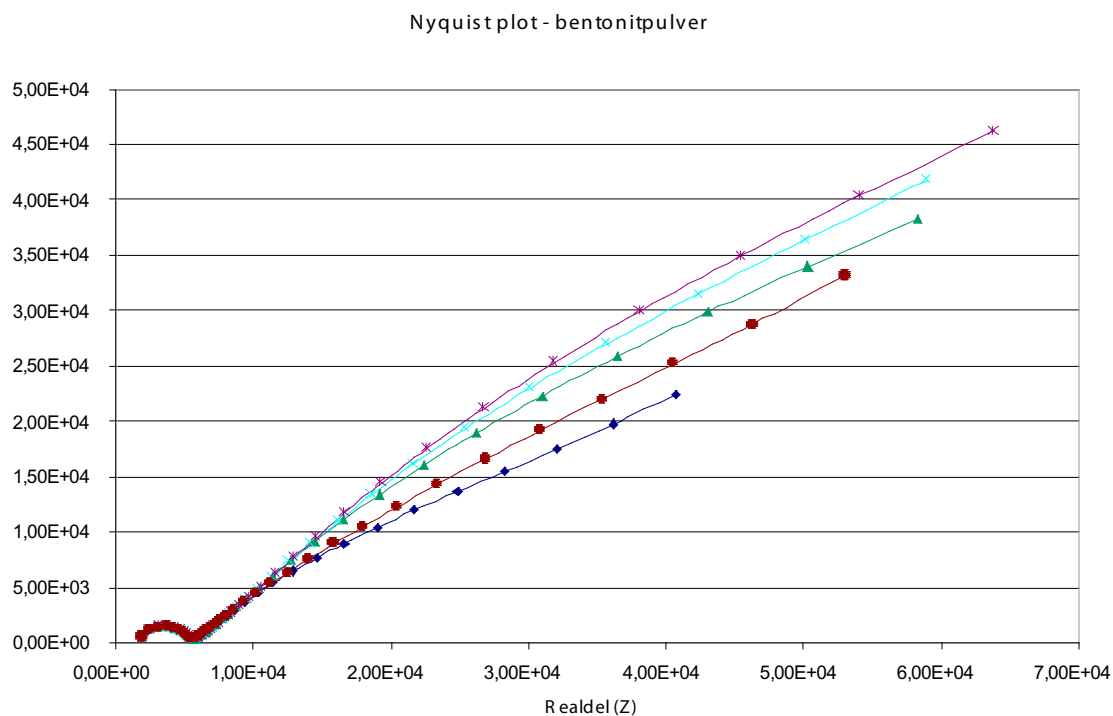
Pressverktygets diameter var 12,0 mm i samtliga fall utom för bentonitproverna i Figur 34 där diametern var 15,0 mm. Presscylinderns diameter var 34,8 mm för samtliga prover. Samtliga presstryck som anges i det följande avser ideala friktionslösa förhållanden i pressen.



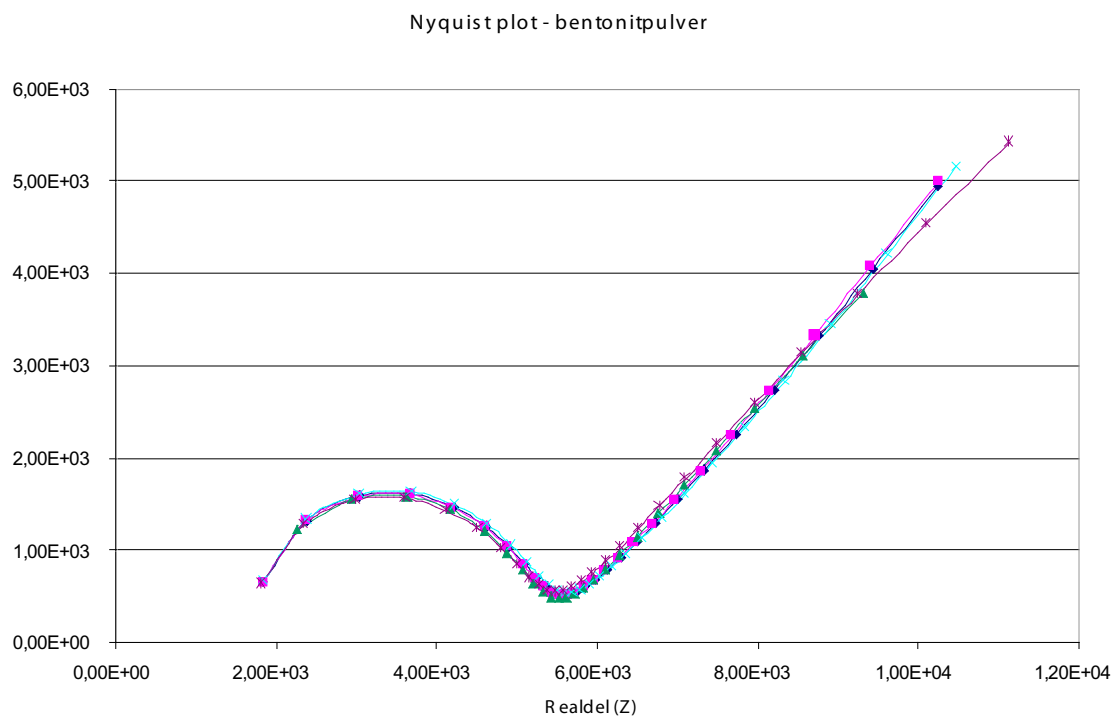
Figur 34a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för fem prover med bentonitpulver pressat till cylindriska pastiller med diameter 15,0 mm och tjocklek 5,0 mm.



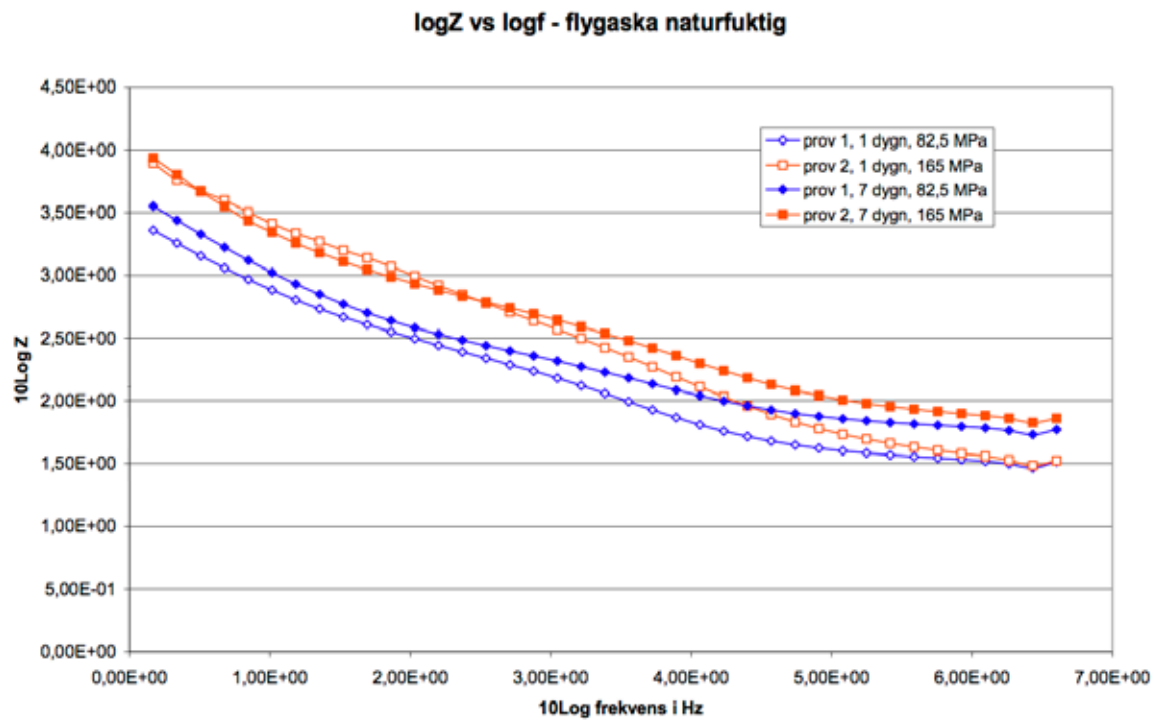
Figur 34b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för samma fem prover som i Figur 34a.



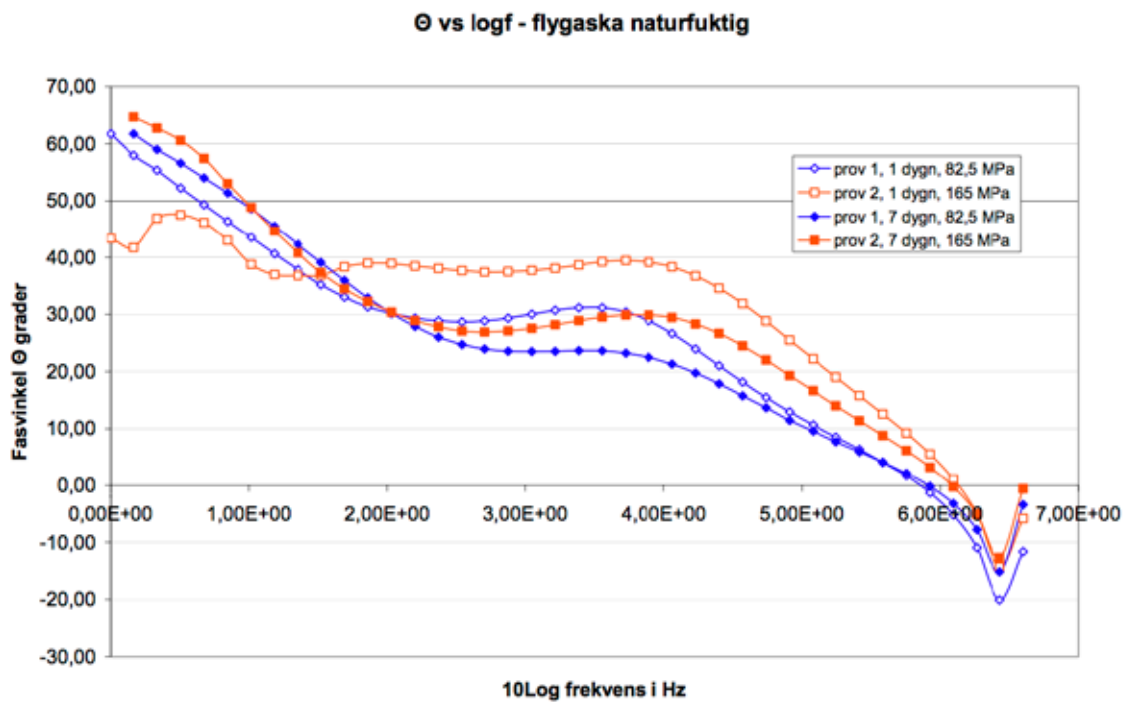
Figur 34c. Nyquistplot för samma fem prover som i Figur 34a, samtliga frekvenser.



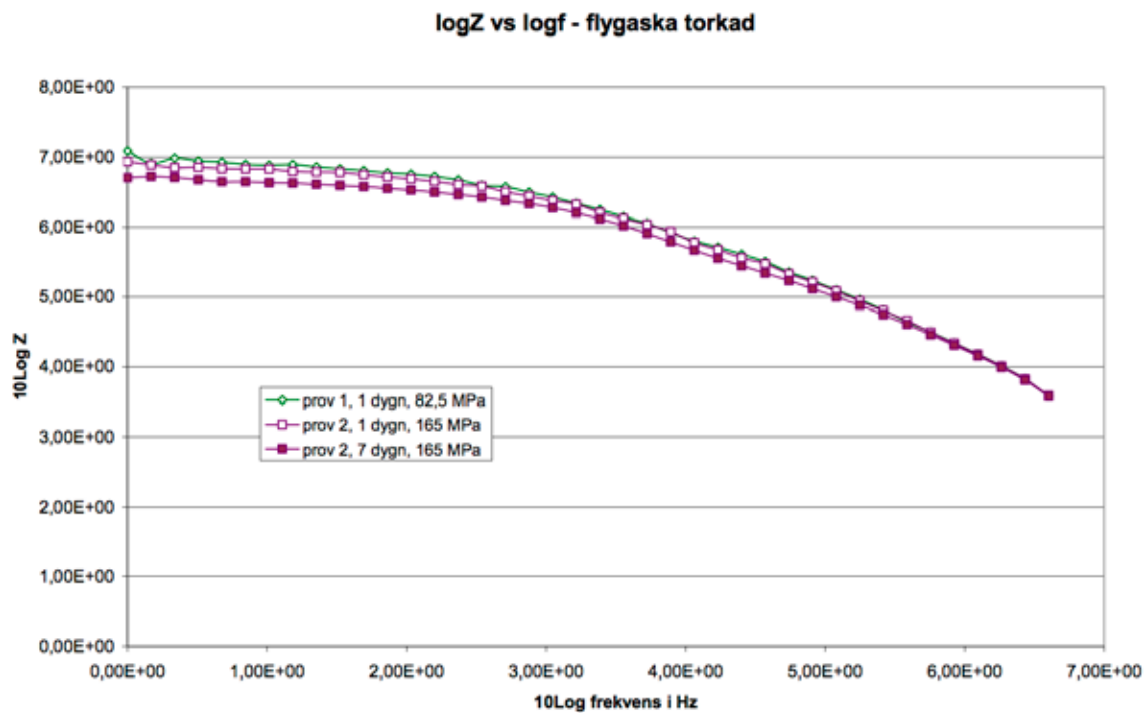
Figur 34d. Nyquistplot för samma fem prover som i Figur 34a, frekvenser från 160 Hz. Jämför med principillustrationen i Figur 12.



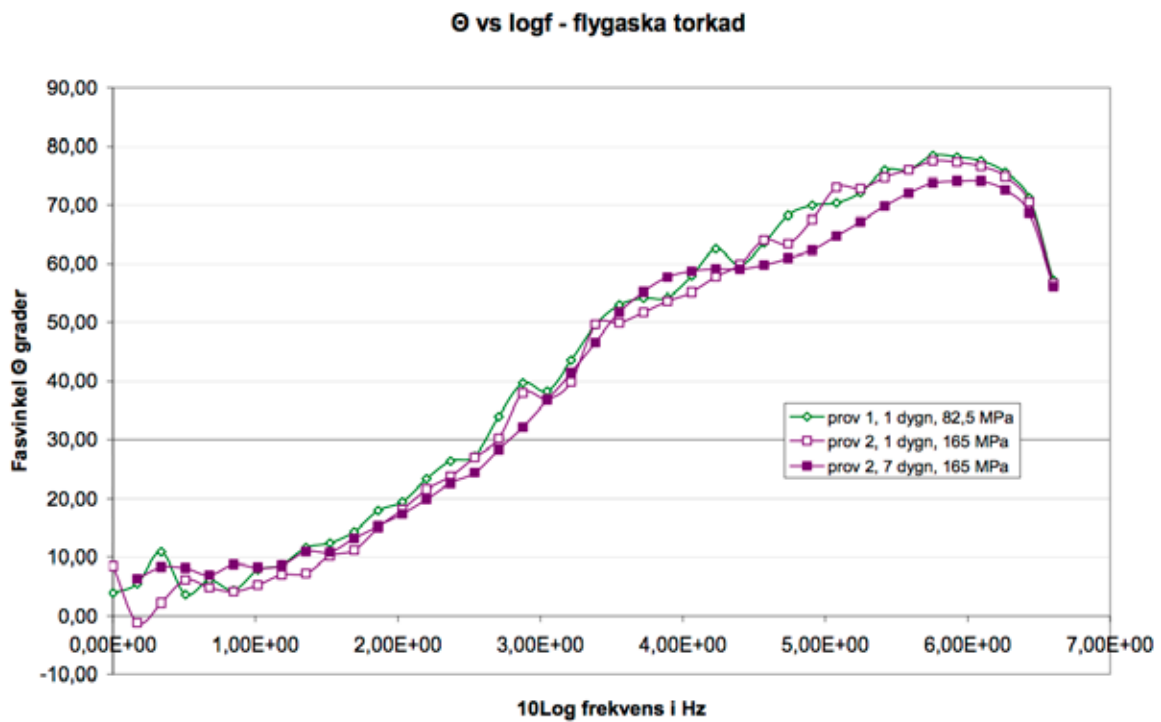
Figur 35a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för "naturfuktig" flygaska. Fukthalt 32,5 %. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 6,8 mm, prov 2: 5,3 mm.



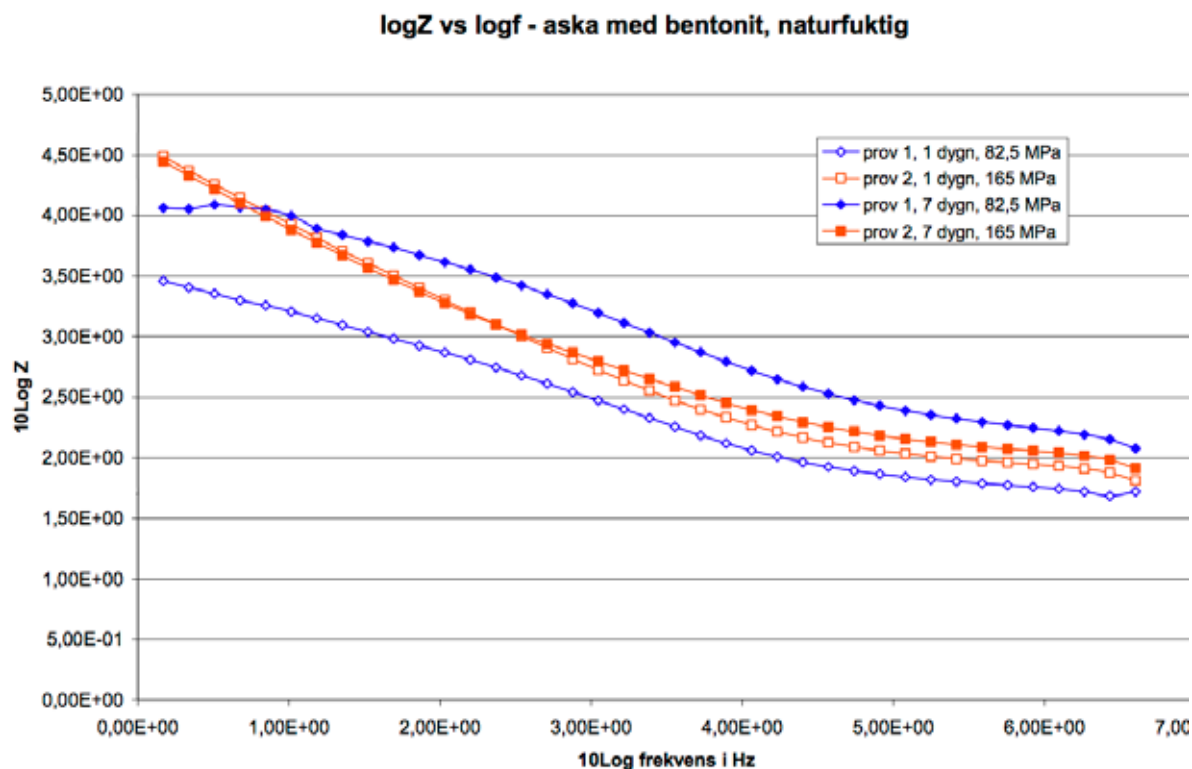
Figur 35b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för "naturfuktig" flygaska. Fukthalt 32,5 %.



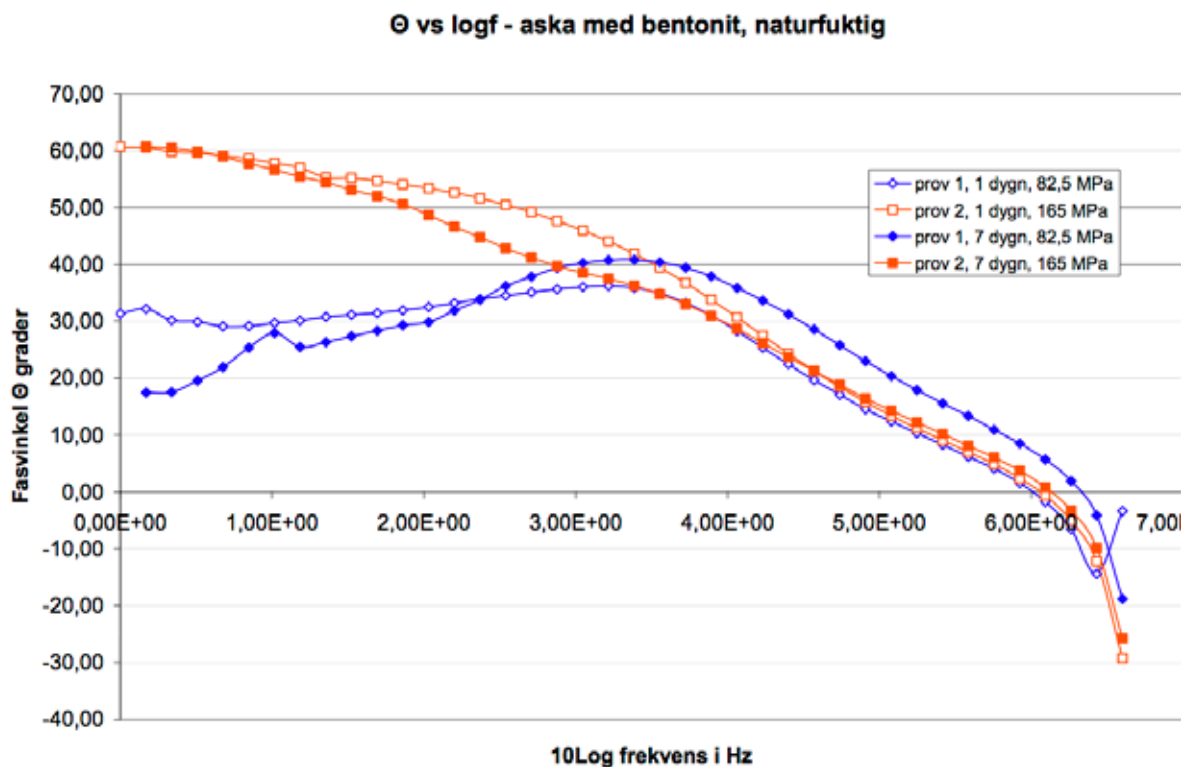
Figur 36a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för torkad flygaska. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 3,5 mm, prov 2: 3,3 mm.



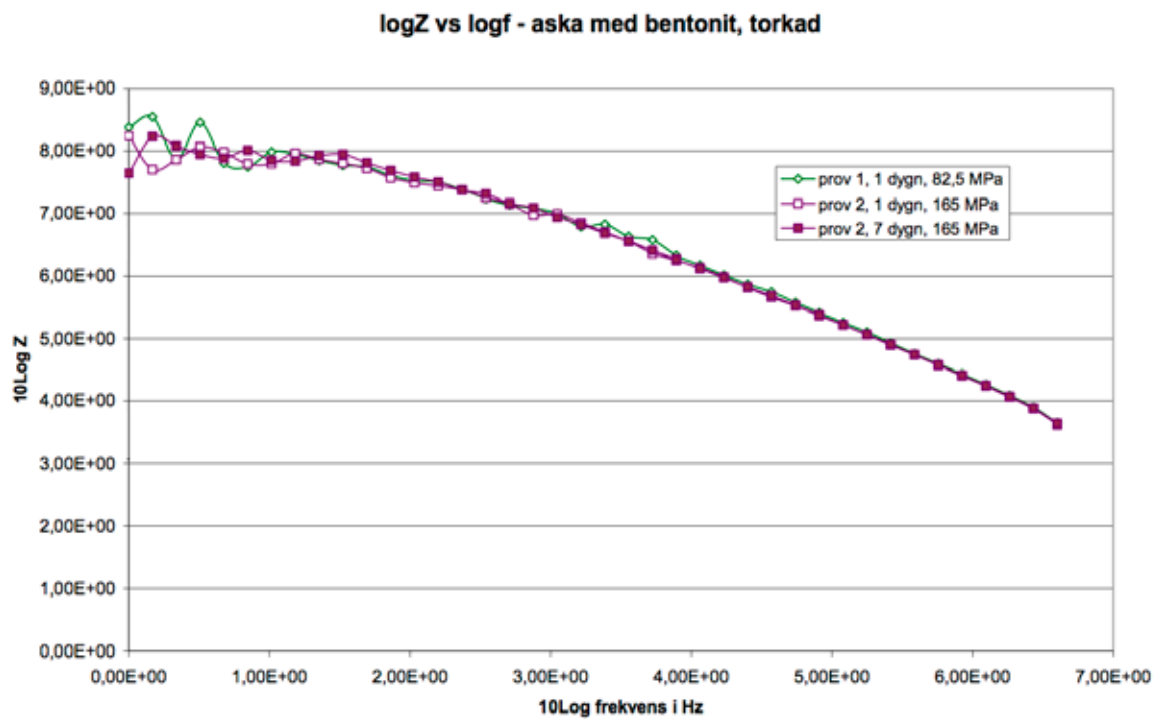
Figur 36b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för torkad flygaska.



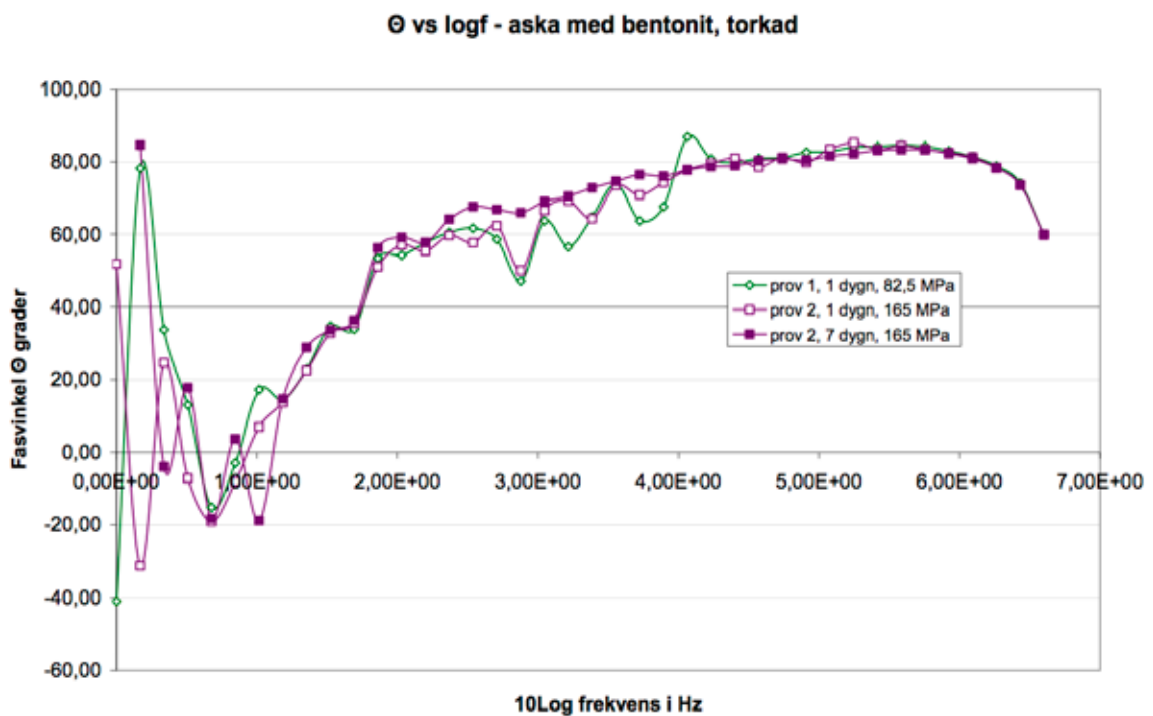
Figur 37a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för "naturfuktig" aska blandad med bentonit. Fukthalt 22,5 %. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 6,5 mm, prov 2: 5,9 mm. Skillnaderna mellan proverna 1 och 2 beror sannolikt på inhomogeniteter i materialet.



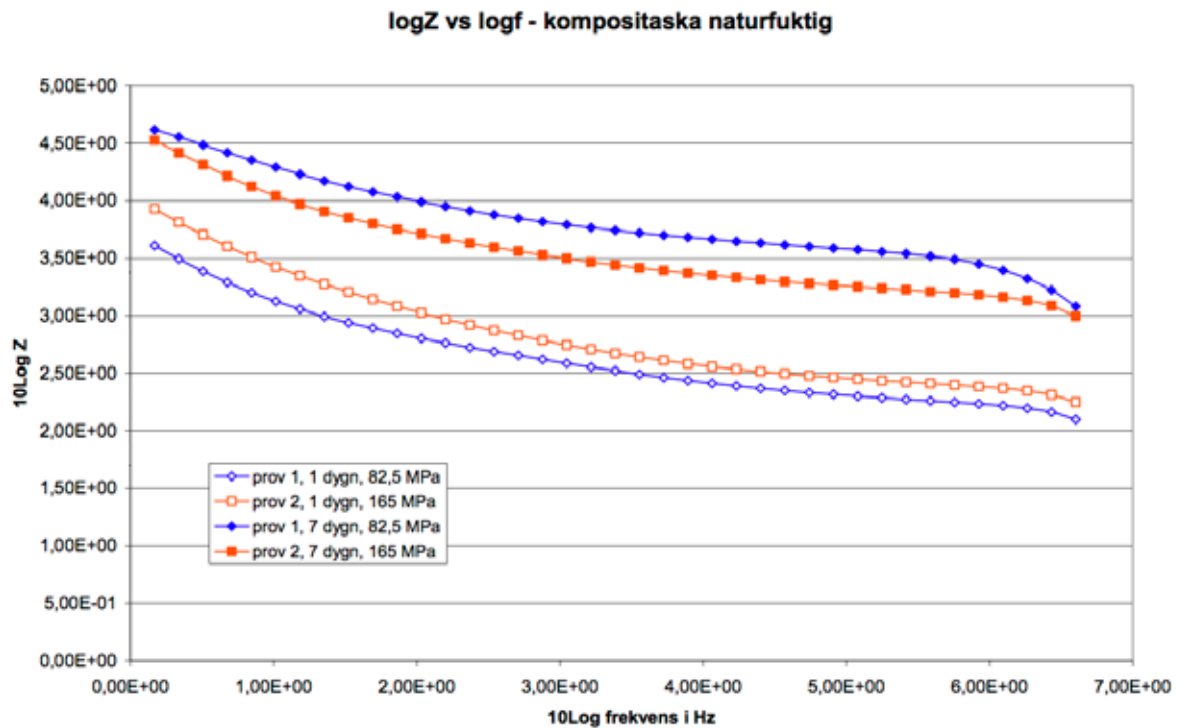
Figur 37b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för "naturfuktig" aska blandad med bentonit.



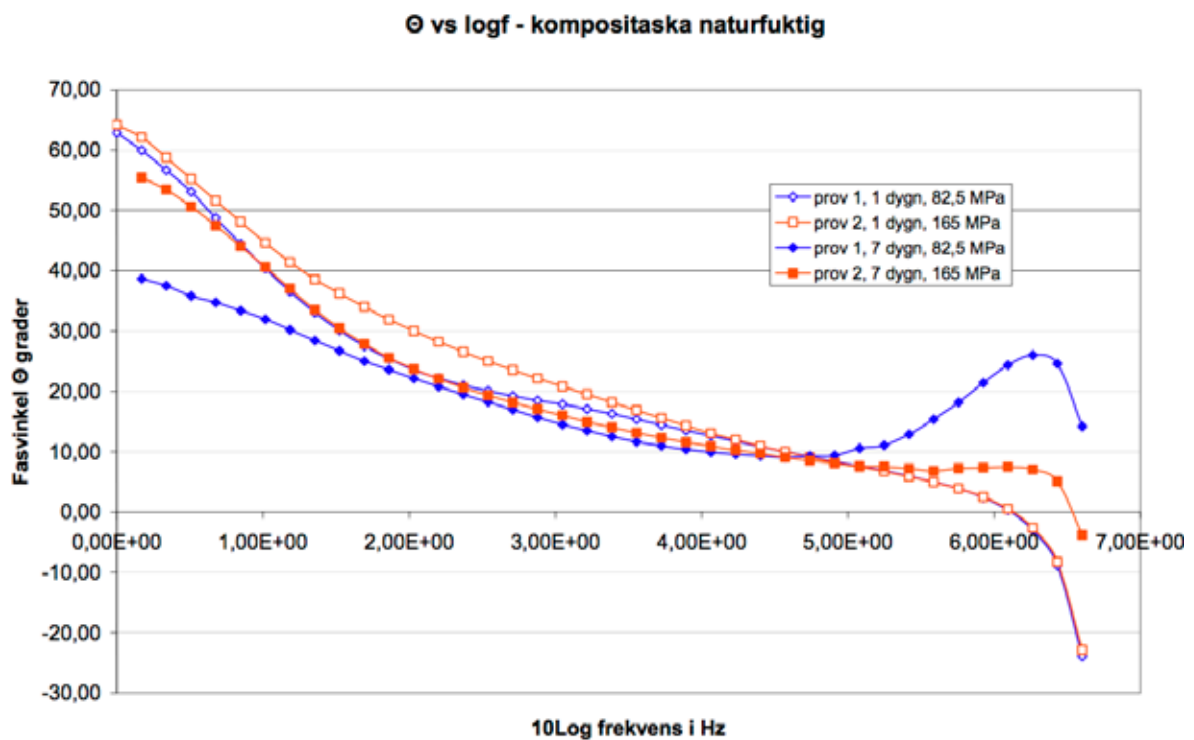
Figur 38a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för aska blandad med bentonit, torkad. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 3,8 mm, prov 2: 3,6 mm.



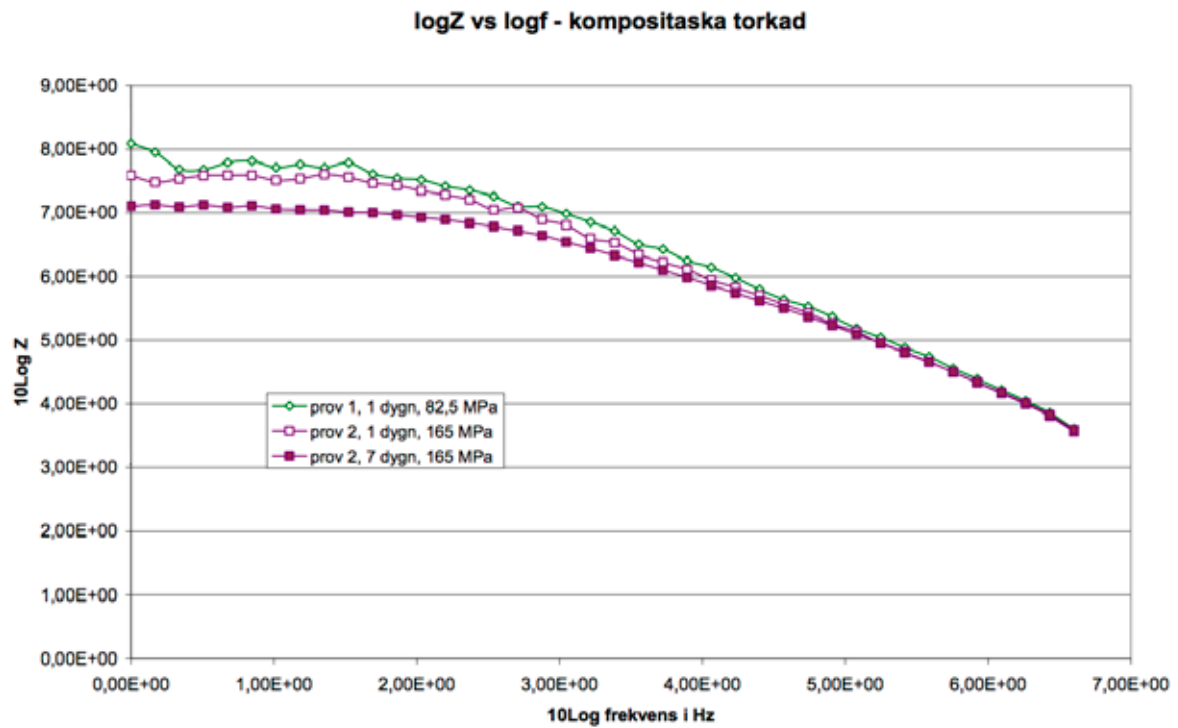
Figur 38b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för aska blandad med bentonit, torkad.



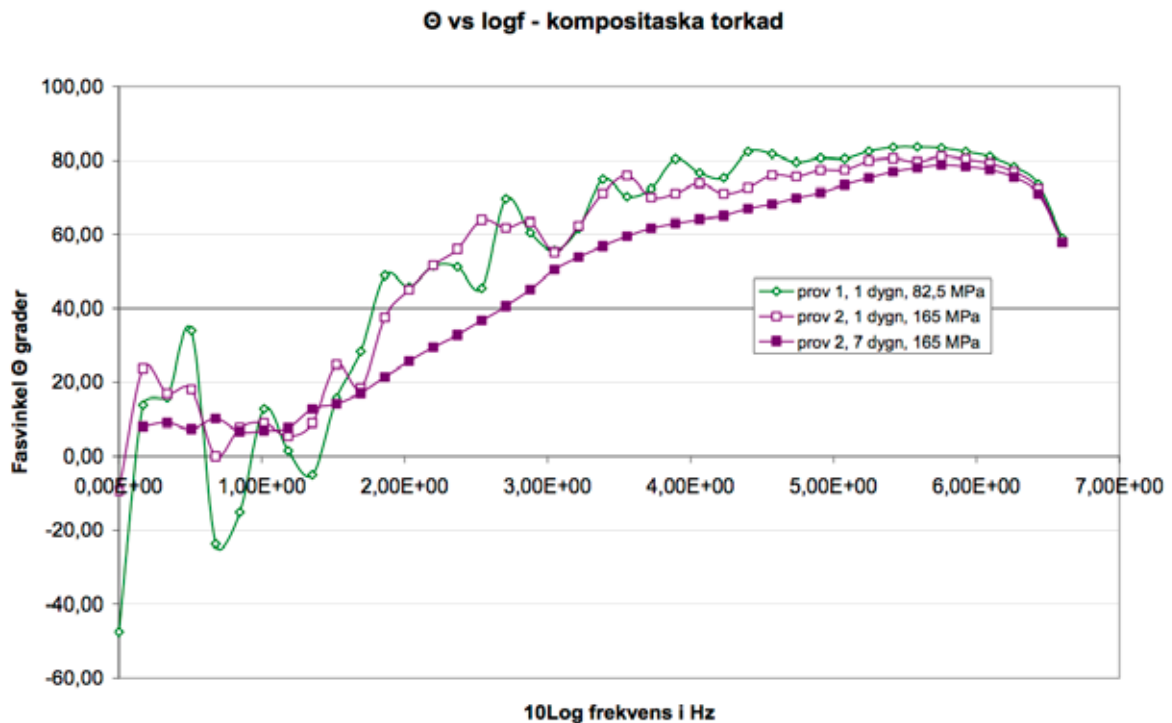
Figur 39a. Log(Z) som funktion av log(f) för "naturfuktig" kompositaska. Fukthalt 22,4 %. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 6,4 mm, prov 2: 7,5 mm.



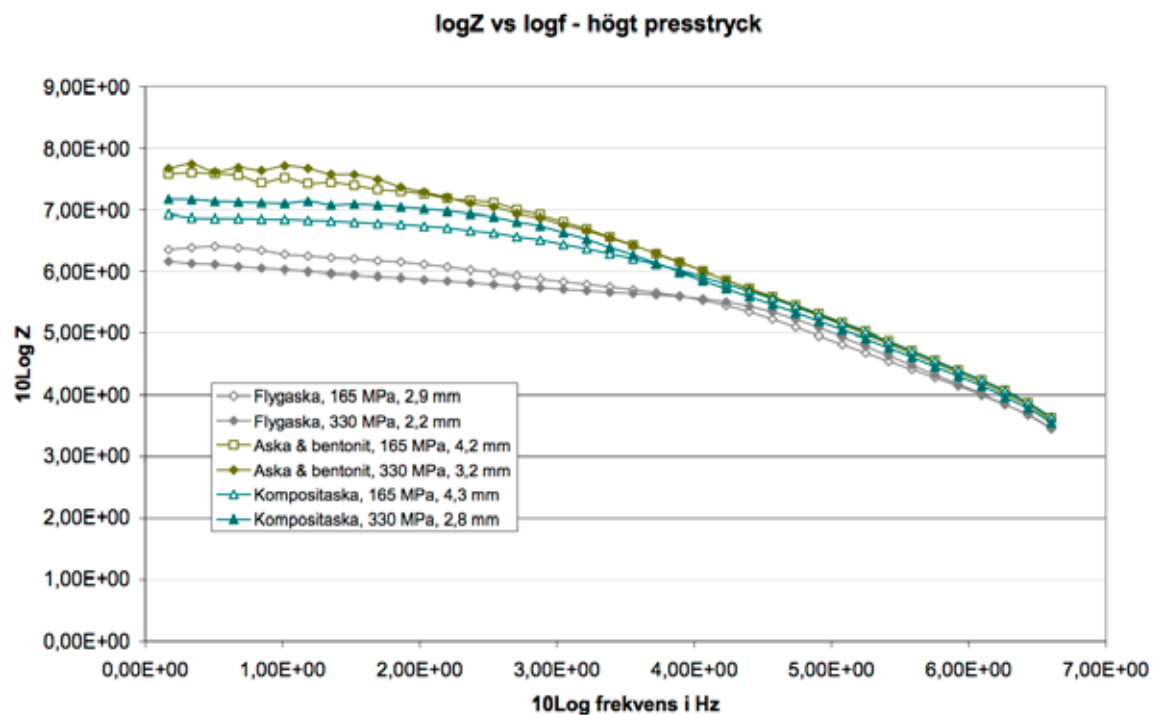
Figur 39b. Fasvinkeln som funktion av log(f) för "naturfuktig" kompositaska.



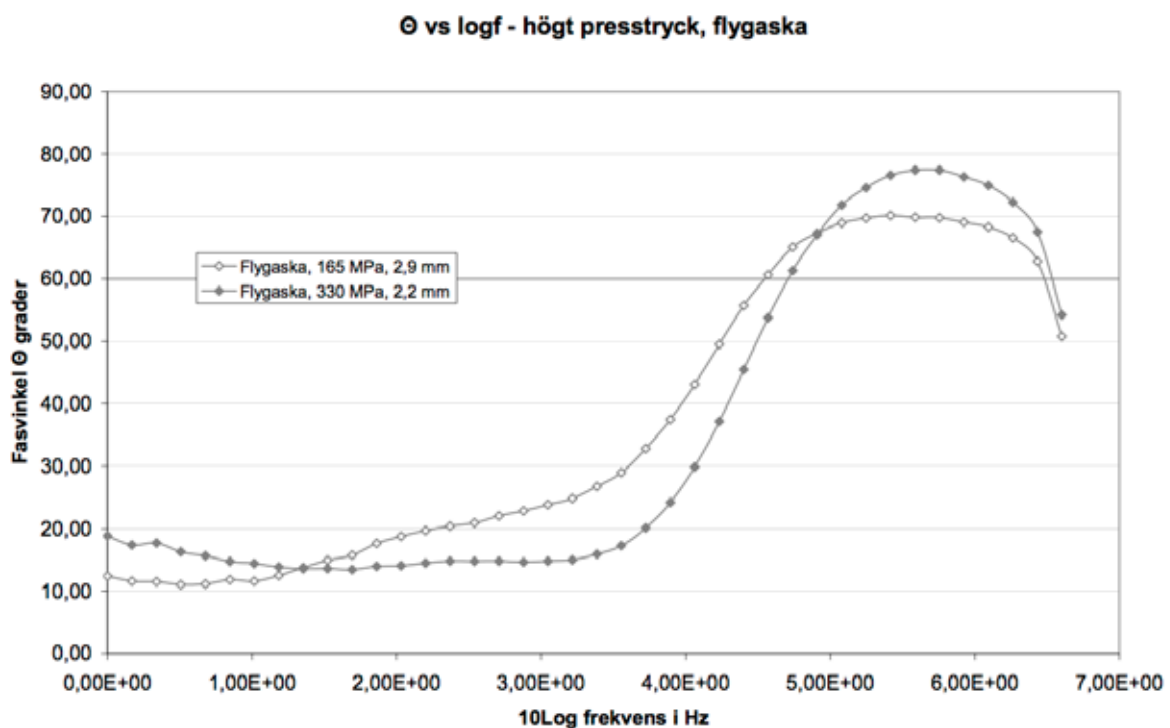
Figur 40a. Log(Z) som funktion av log(f) för torkad kompositaska. Diameter 11 mm; tjocklek prov 1: 3,1 mm, prov 2: 3,1 mm.



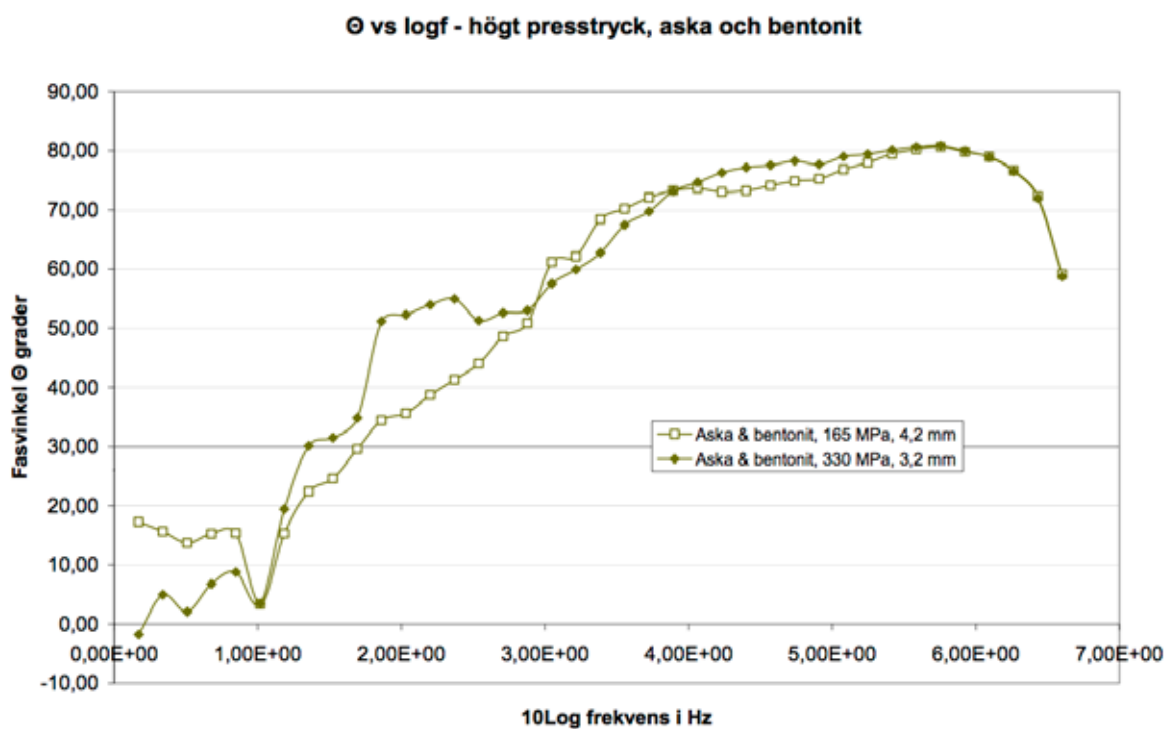
Figur 40b. Fasvinkeln som funktion av log(f) för torkad kompositaska.



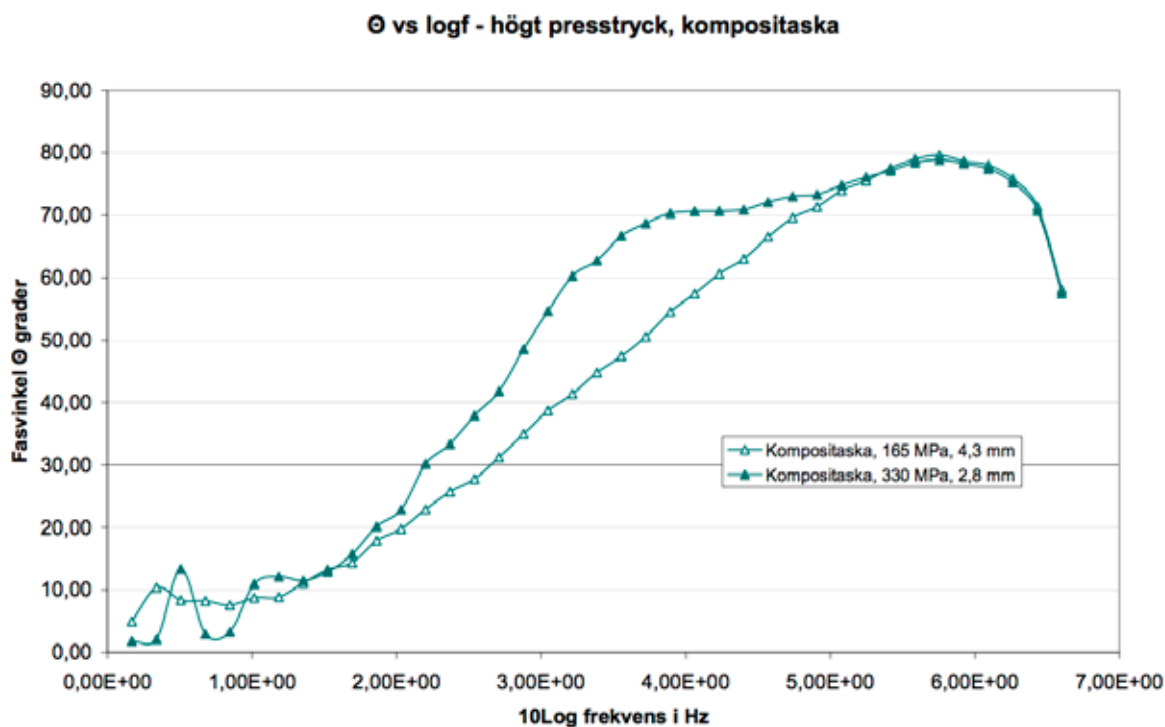
Figur 41a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för de tre askorna vid 165 och 330 MPa presstryck. Även provtjocklek anges i figuren. Provdiameter 11 mm.



Figur 41b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för flygaska.



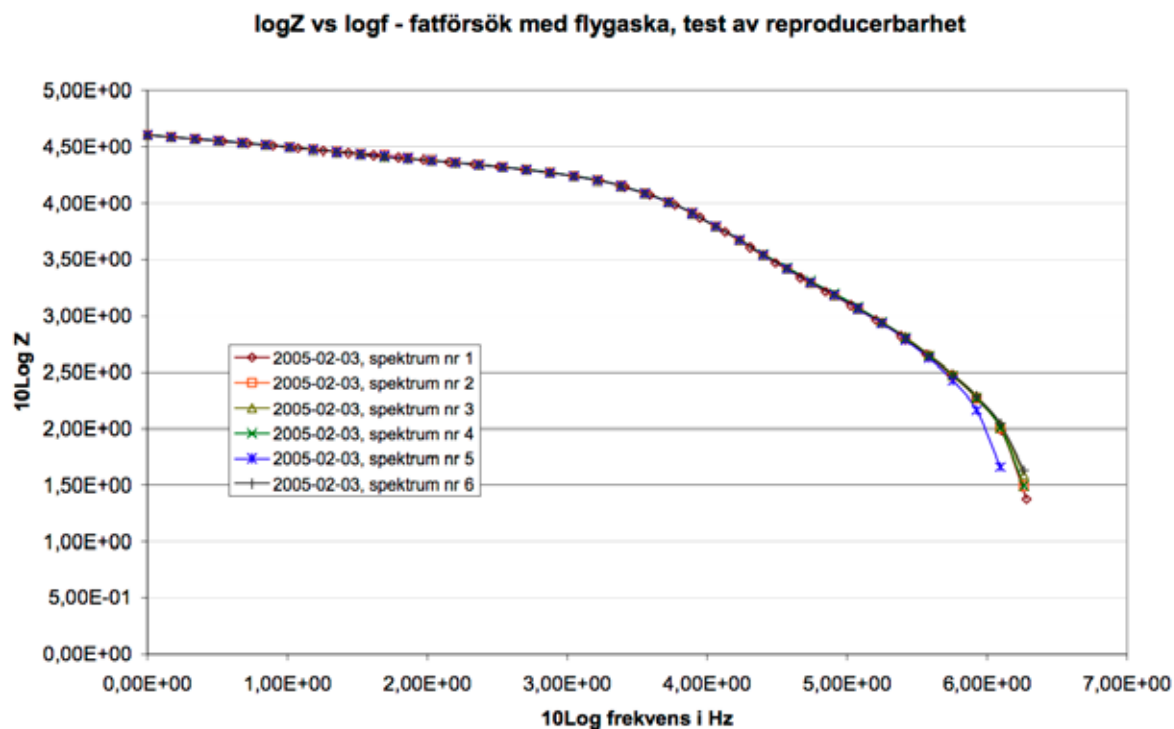
Figur 41c. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för aska blandad med bentonit.



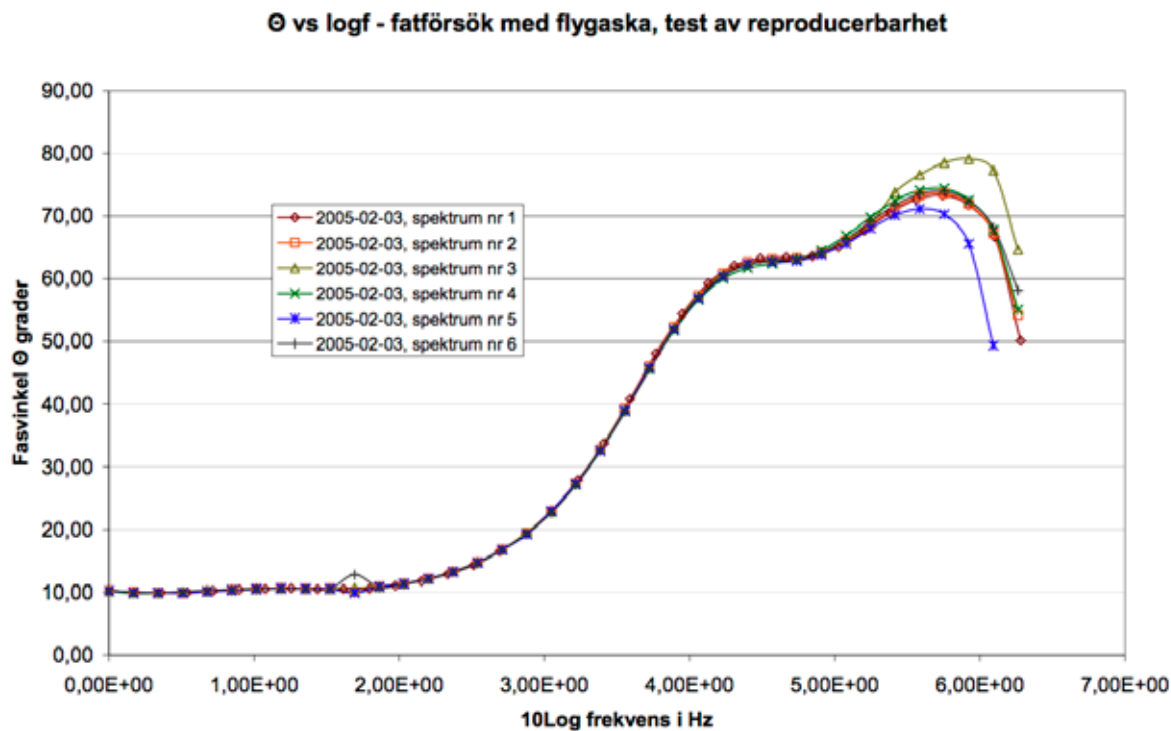
Figur 41d. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för kompositaska.

4.2.2 Resultat från fatförsöken

Test av reproducerbarhet för successiva upptagningar visas i Figur 42.

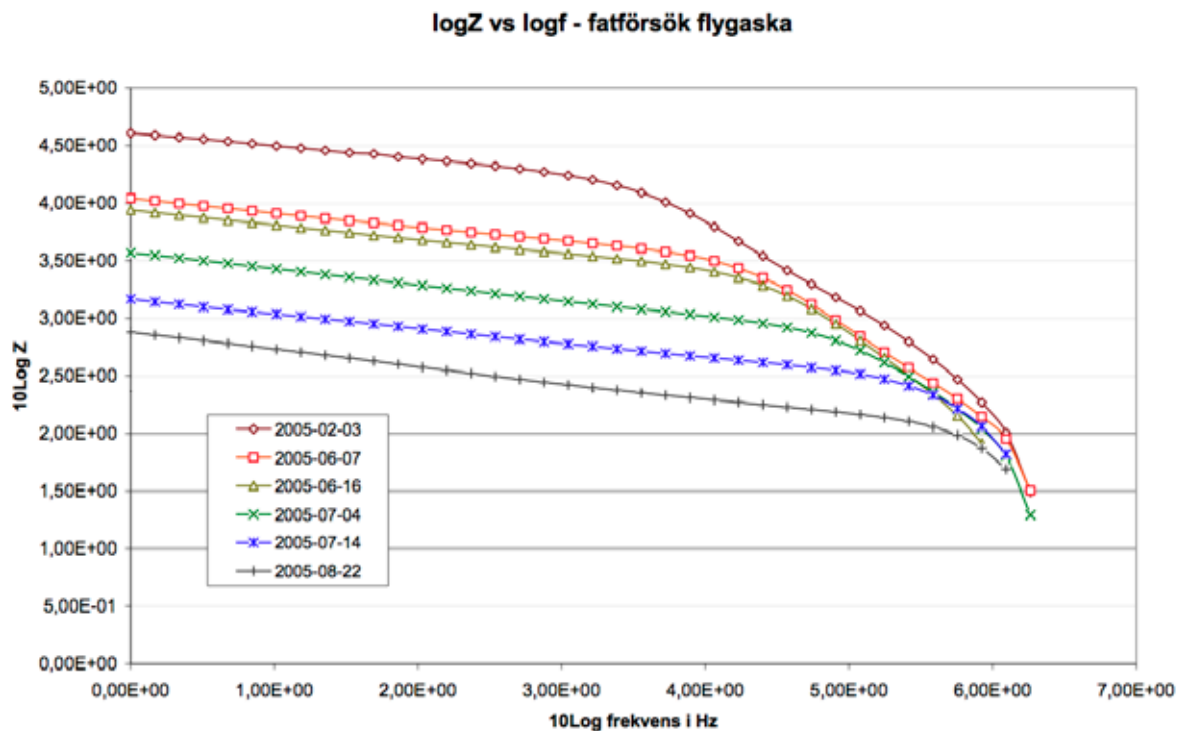


Figur 42a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för flygaska, test av reproducerbarhet.

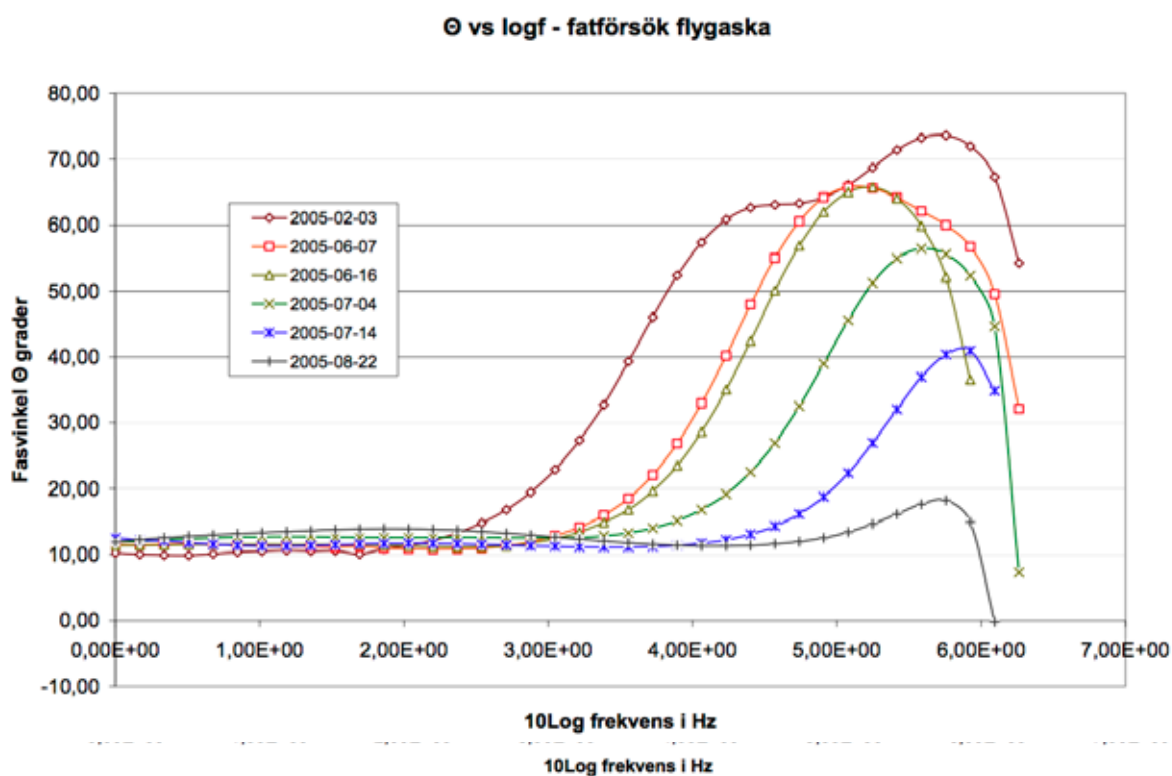


Figur 42b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för flygaska, test av reproducerbarhet.

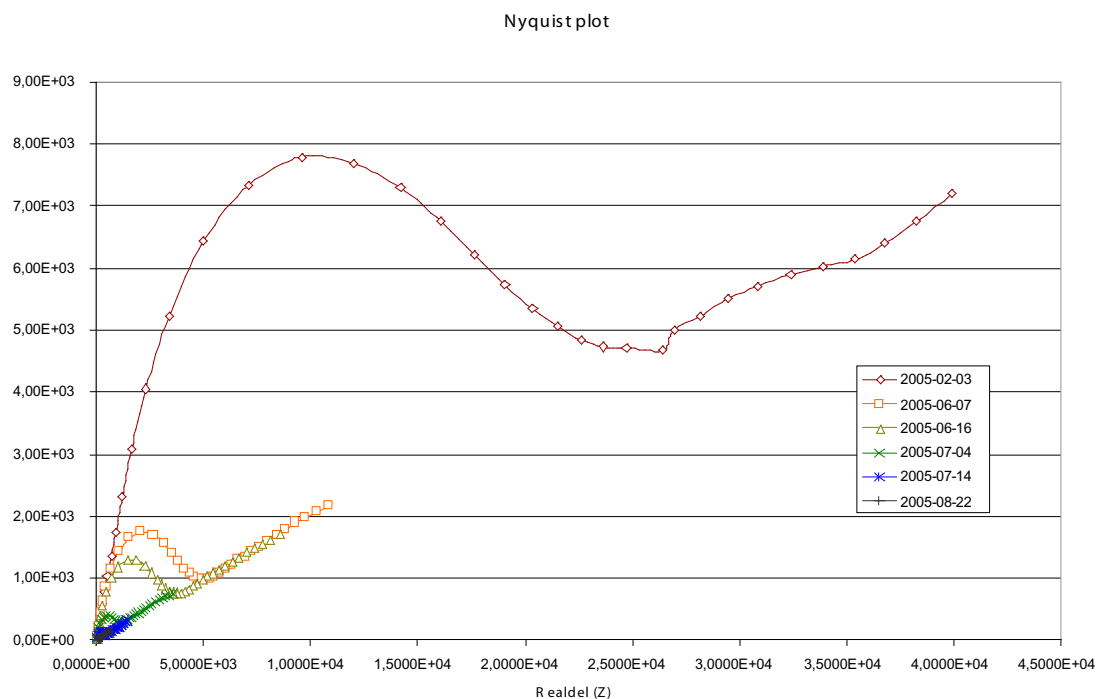
Resultat från fatförsöken redovisas i Figurerna 43 (flygaska) och 44 (blandning av aska och bentonit).



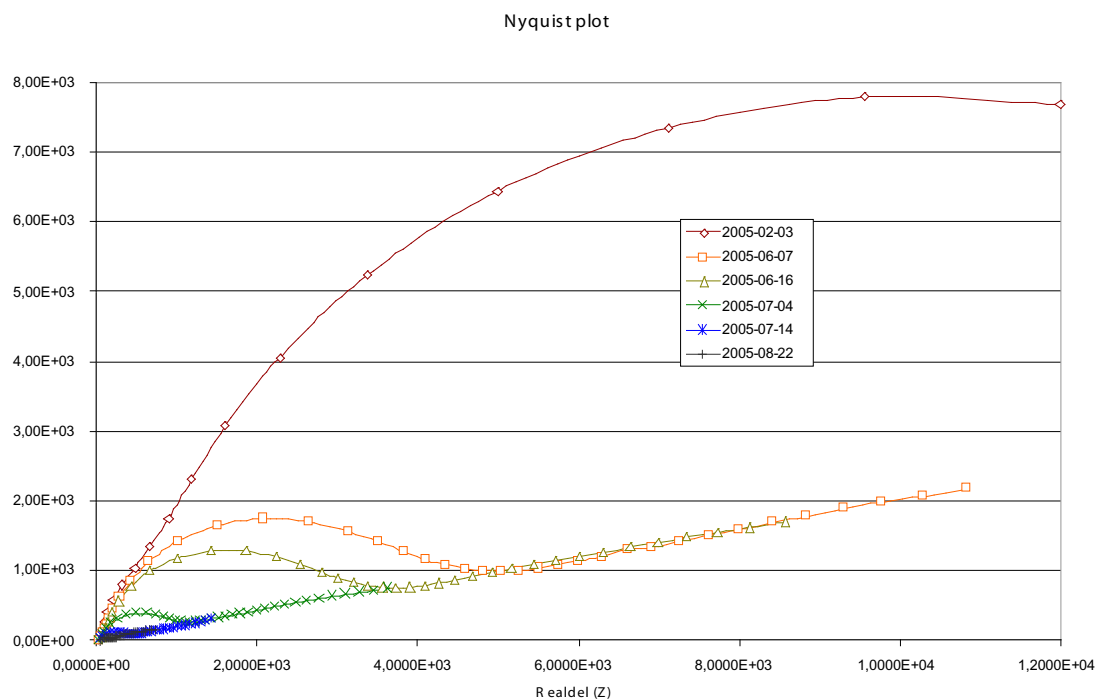
Figur 43a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$ för fatförsök med flygaska.



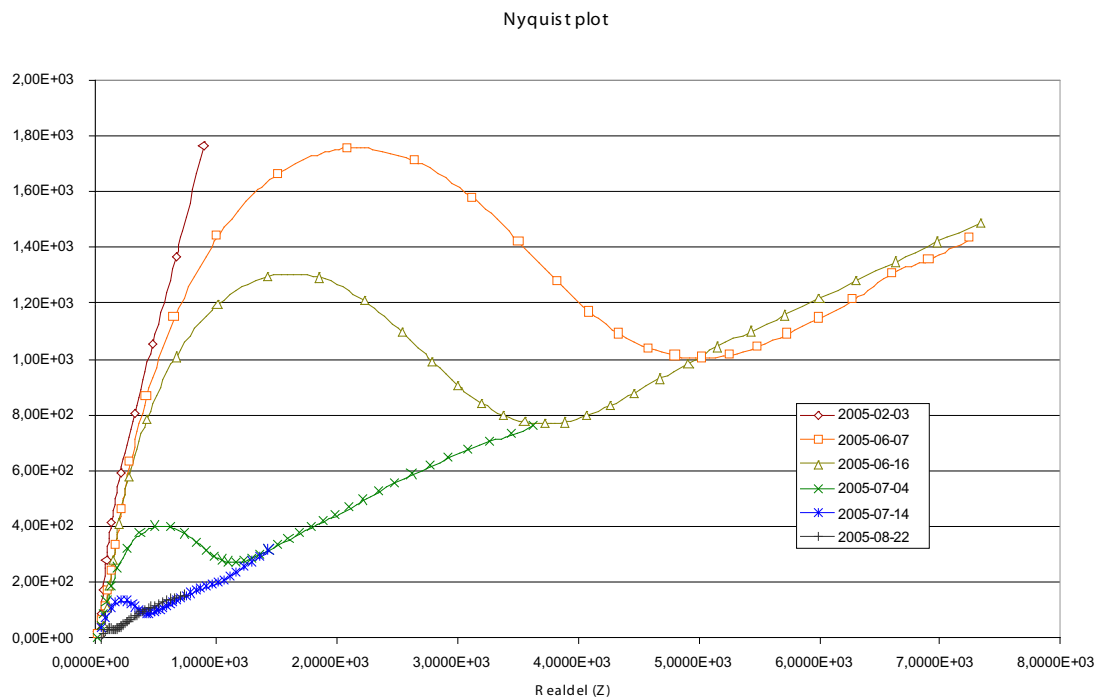
Figur 43b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$ för fatförsök med flygaska.



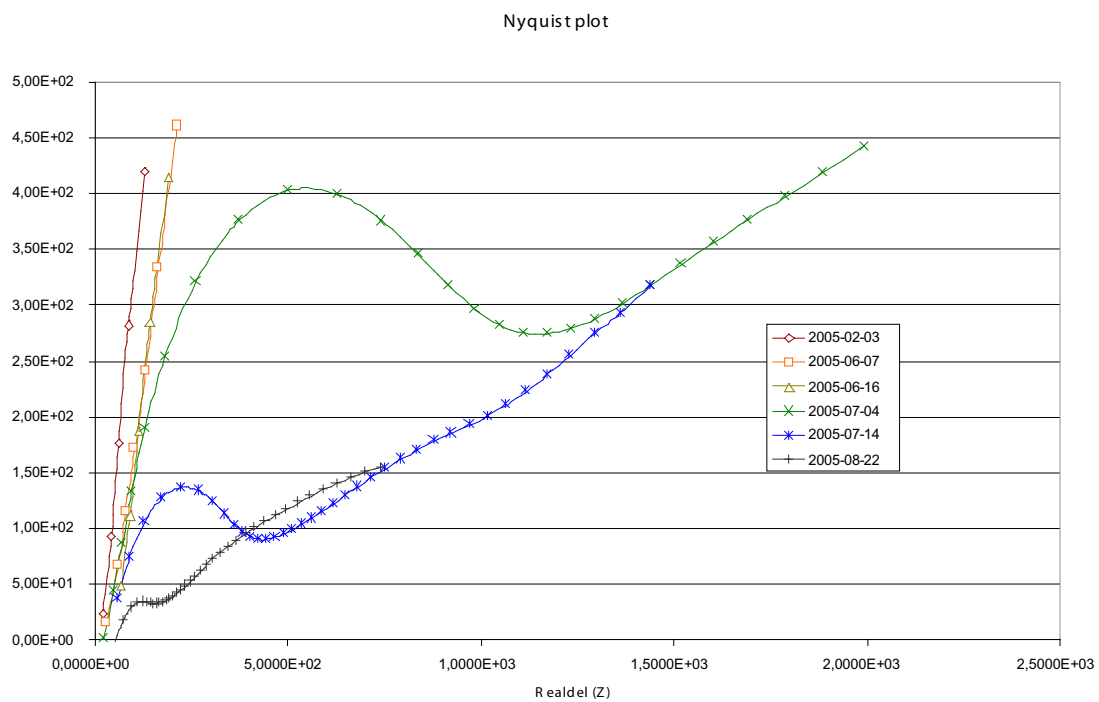
Figur 43c. Nyquistplot för fatförsök med flygaska, samtliga frekvenser.



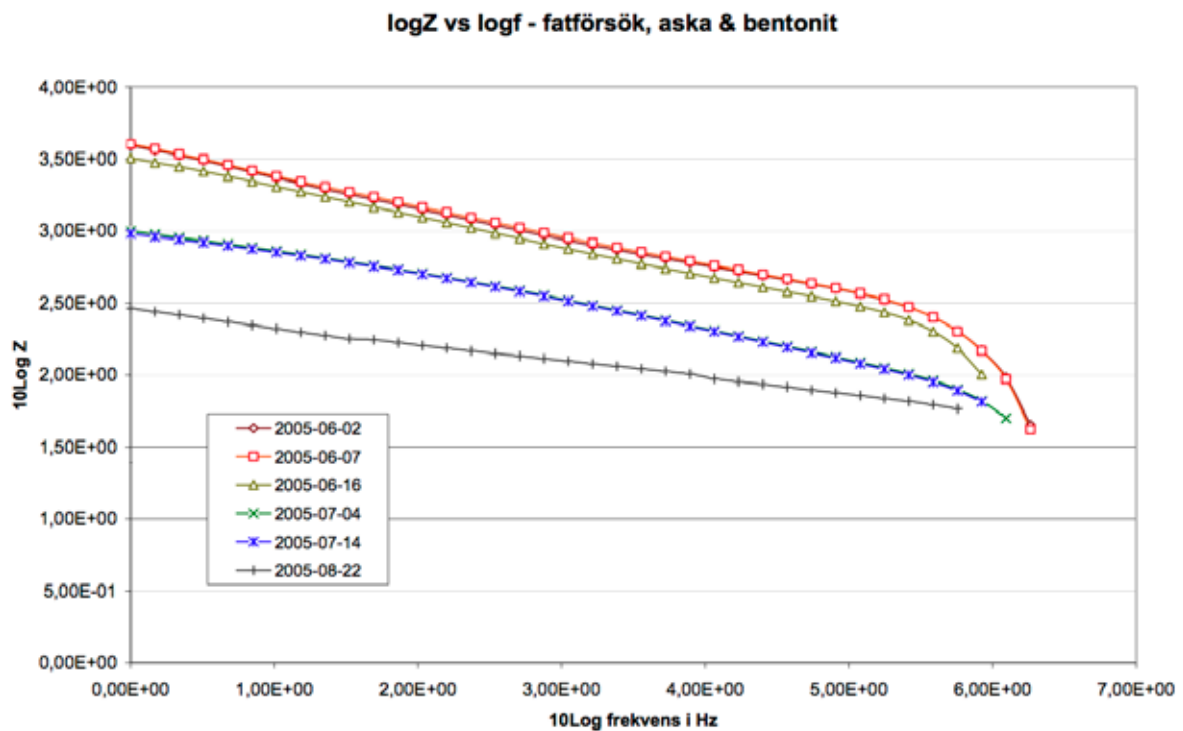
Figur 43d. Nyquistplot för fatförsök med flygaska, högre frekvenser jämfört med Figur 43c. Vatten har tillsatts till båda faten med vardera 500 ml dagarna 2005-06-07, 2005-06-16, 2006-07-04 och 2006-07-14 (se även Avsnitt 4.1.5).



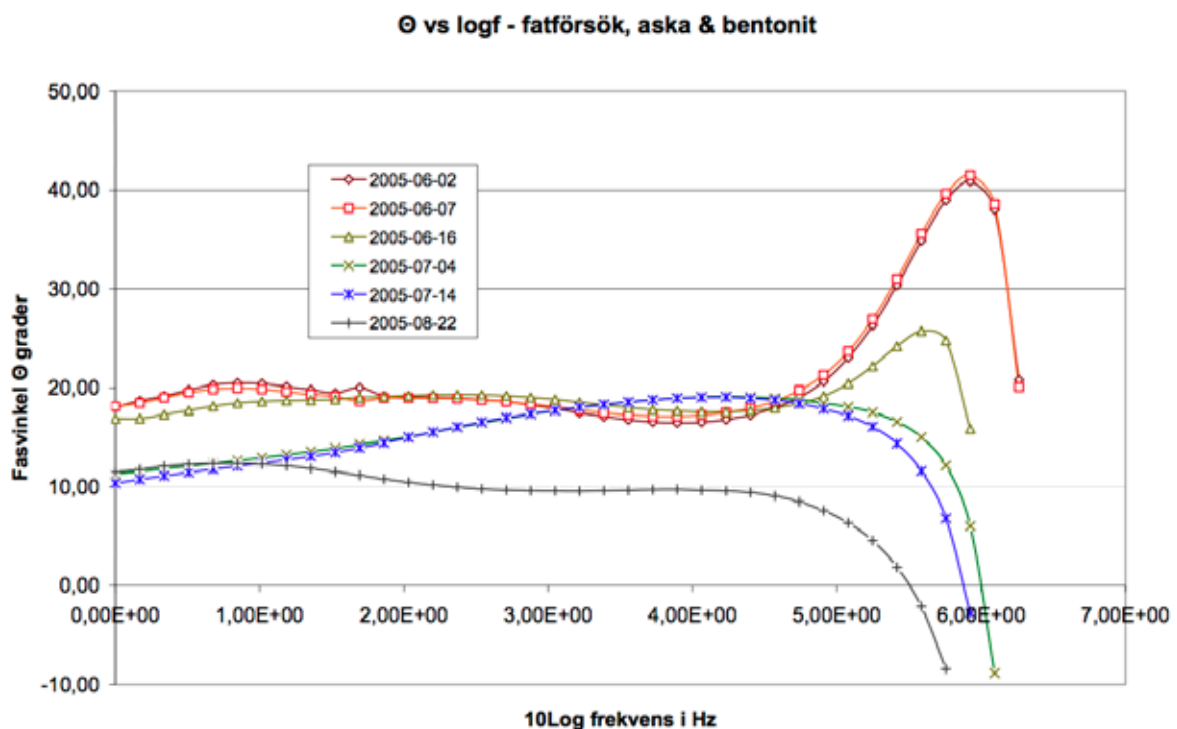
Figur 43e. Nyquistplot för fatförsök med flygaska, högre frekvenser jämfört med Figur 43d.



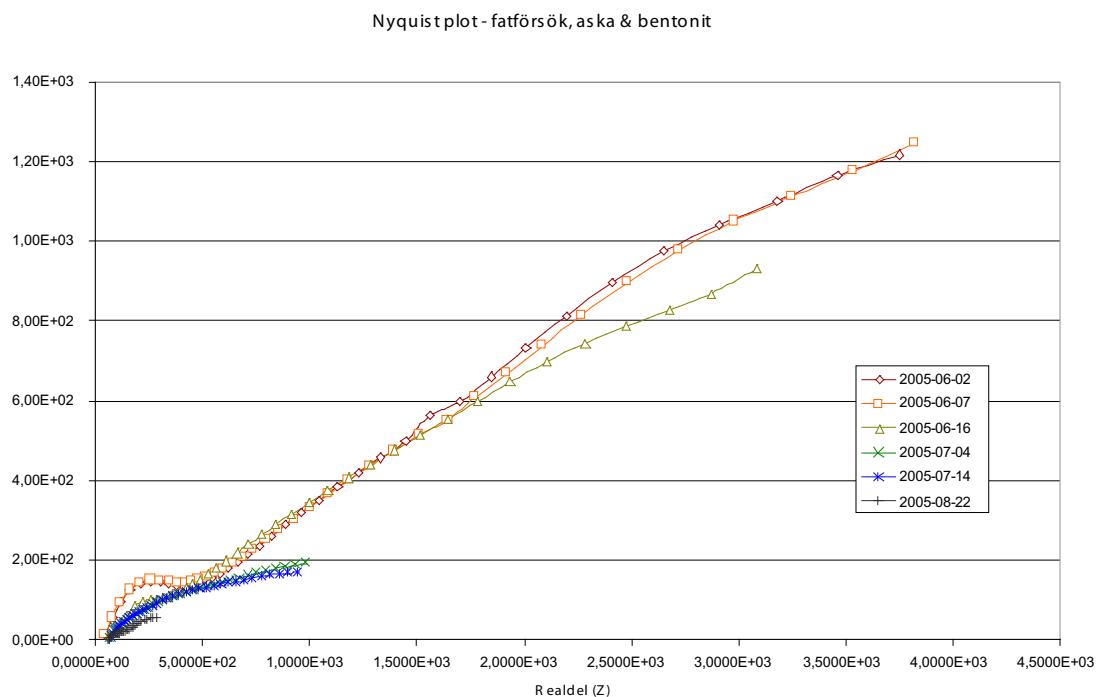
Figur 43f. Nyquistplot för fatförsök med flygaska, högre frekvenser jämfört med Figur 43e.



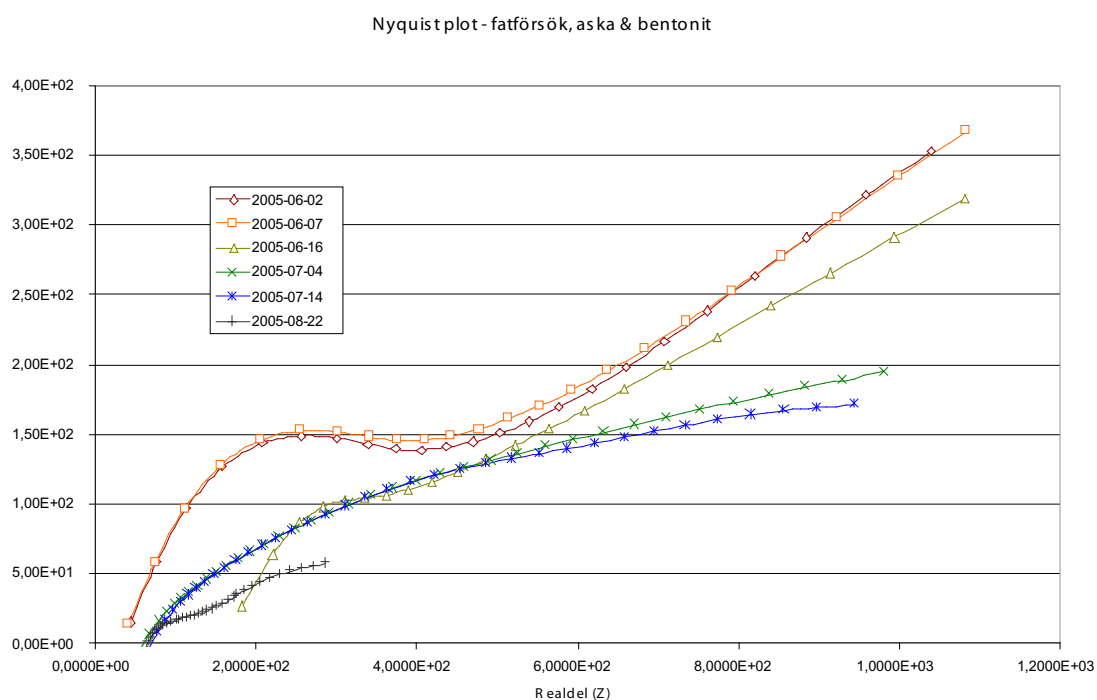
Figur 44a. Log(Z) som funktion av log(f) för fatförsök med blandning av aska och bentonit. Observera att kurvorna från 2006-06-02 och 2006-06-07 täcker varandra till stor del liksom kurvorna från 2005-07-04 och 2005-07-14.



Figur 44b. Fasvinkeln som funktion av log(f) för fatförsök med blandning av aska och bentonit.



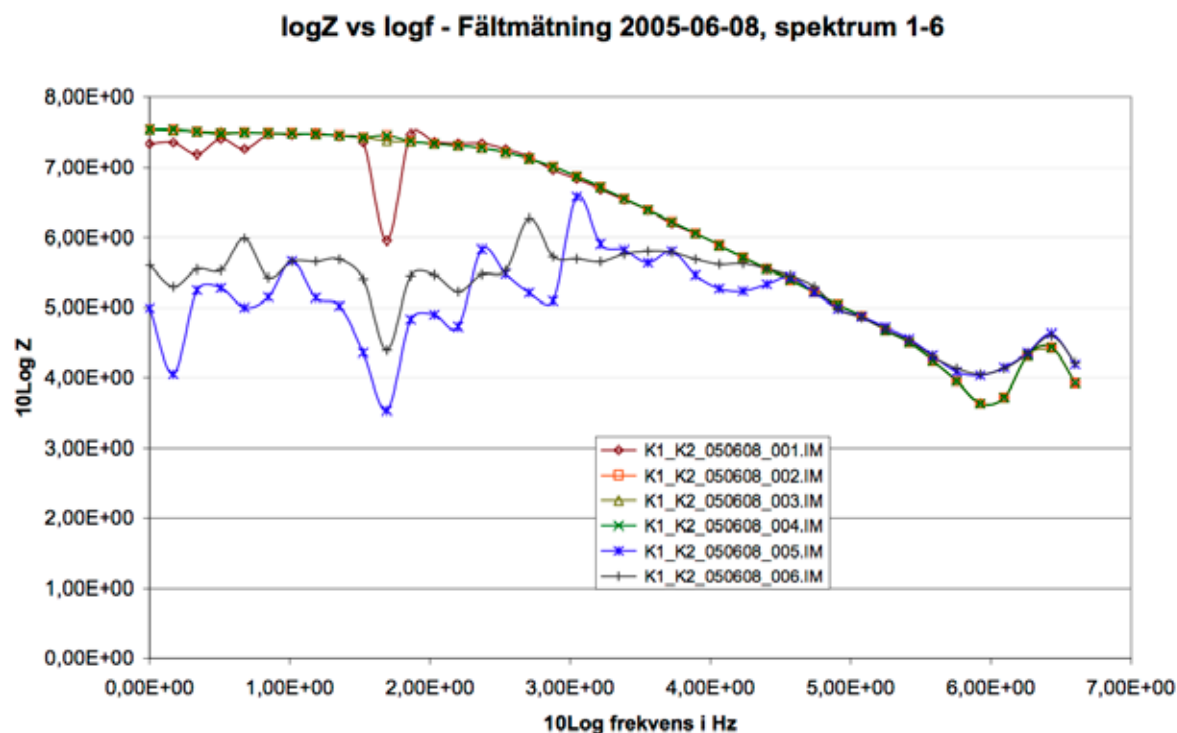
Figur 44c. Nyquistplot för fatförsök med med blandning av aska och bentonit, samtliga frekvenser.



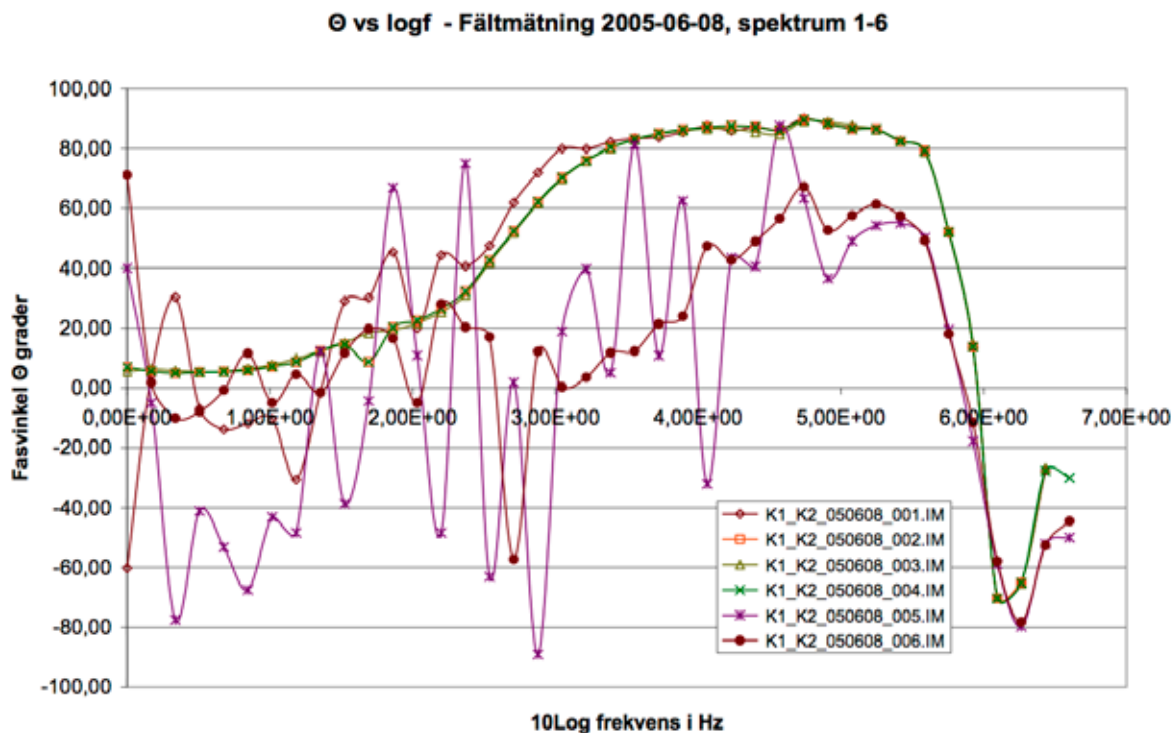
Figur 44d. Nyquistplot för fatförsök med blandning av aska och bentonit, högre frekvenser jämfört med Figur 44c.

4.2.3 Resultat från fältförsöken

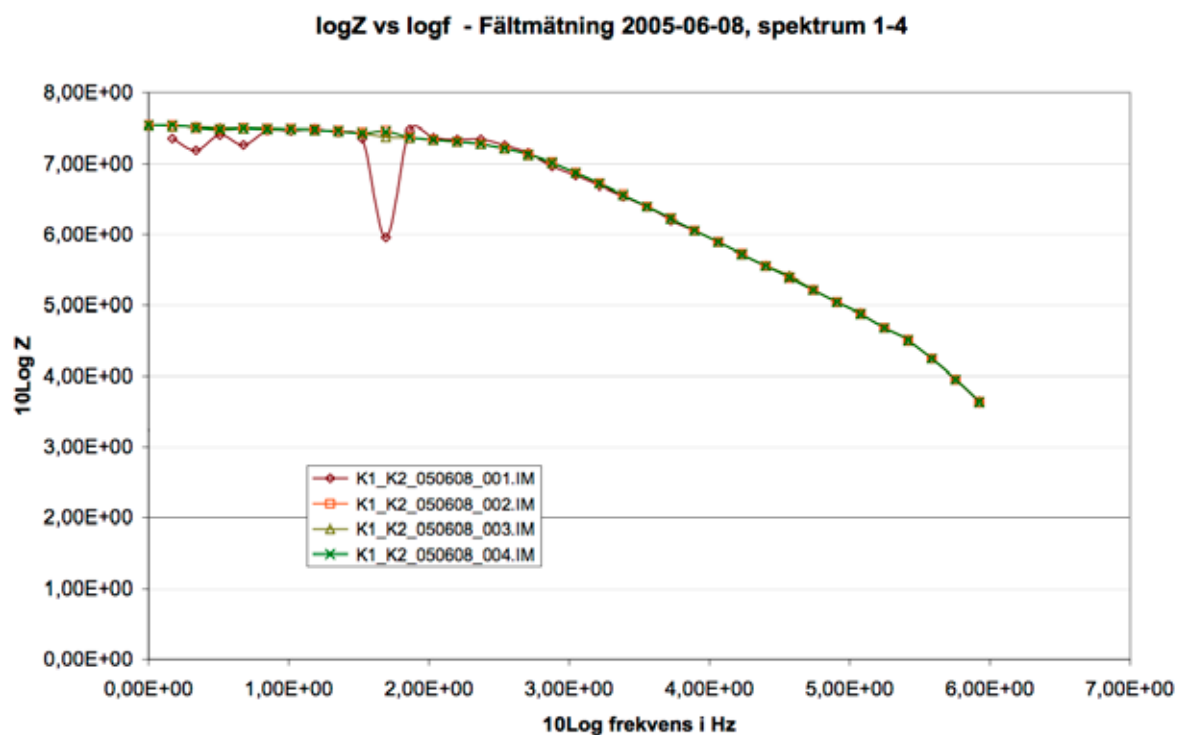
Resultat från fältförsöken visas i Figur 45 (oredigerade data) och 46 (redigerade data). Samtliga mätningar har utförts mellan elektroderna D och E i Figur 27.



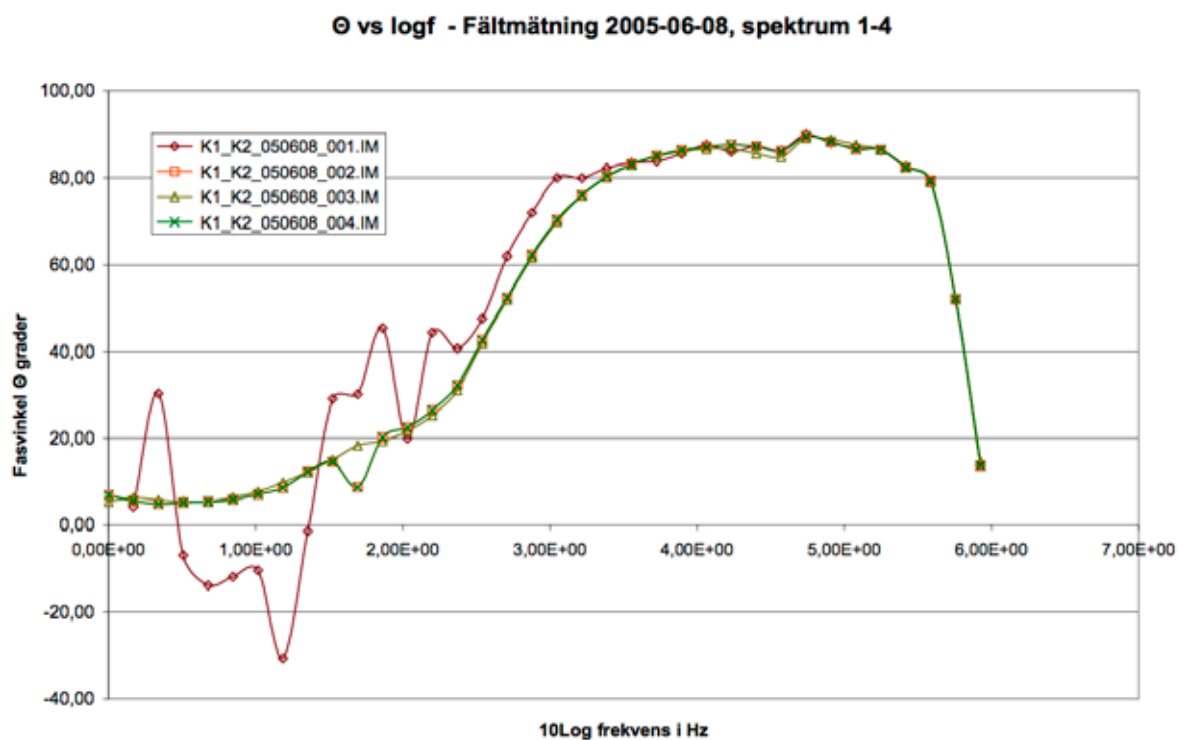
Figur 45a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$. Exempel på oredigerade data från fältförsöken.



Figur 45b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$. Exempel på oredigerade data.



Figur 46a. $\log(Z)$ som funktion av $\log(f)$. Data från Figur 45 efter redigering.



Figur 46b. Fasvinkeln som funktion av $\log(f)$. Data från Figur 45 efter redigering.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

5.1 Resultat från informationssökningen

Mätning av impedans i geotekniska installationer såsom tätskikt på deponier samt analys av vad mätdata representerar är teoretiskt och kunskapsmässigt krävande. Detta gäller även utveckling av tekniken för övervakningsändamål. En särskilt viktig aspekt i detta avseende är den tvärvetenskapliga och tvärtekniska kompetens som krävs, och det torde vara få personer som behärskar alla relevanta delar.

Informationssökningen och kunskapssammanställningen har resulterat i en sammanfattning av vad tekniken går ut på, d v s hur man mäter resistens och kapacitans över ett prov som funktion av frekvensen, samt hur dessa data beror av den interna strukturen i materialet. I det aktuella fallet har vattenhaltens och salthaltens betydelse särskilt beskrivits.

Resultatet av genomgången är att det är svårt att för ett flerfasigt material kunna härleda de precisa sambanden mellan struktur och impedansdata. En förståelse av de fenomen som avgör utseendet hos impedansspektra är ändå av stort värde i arbetet genom att man får ledning beträffande vilka samband som kan utnyttjas samt får underlag och förutsättningar för att bedöma vilka variationer som kan förväntas.

Resultatet av genomgången pekar också entydigt på att mätningar bör bli allt lättare att genomföra med tiden. Dels kan man förvänta sig att materialet i fråga tar upp vatten vilket ökar den elektriska ledningsförmågan, dels bedöms en ökad omvandling, och särskilt omvandling till lermineral, innebära en ökning av såväl den elektriska ledningsförmågan som polarisationen.

Ingenting har framkommit som skulle motsäga att användandet av en färdigutvecklad metod för övervakning kan tillämpas av reguljär personal utan några särskilda specialkunskaper.

Jämförelse har gjorts med andra geofysiska metoder men ingen av dessa har kunnat identifieras ha någon liknande god prognos att uppfylla funktionskraven som den metod som huvudsakligen studerats i denna rapport.

5.2 Resultat från försöken

Följande resultat har erhållits från försöken i laboratorieskala.

- Det instrument som använts har en mycket hög reproducerbarhet, d v s successiva spektra med samma prov blir nära identiska.
- Metodiken med pressning av tabletter ger reproducerbara resultat, dels vid jämförelse mellan dubbelprover, dels vid jämförelse mellan olika upptagningar vid olika tillfällen för samma prov.
- För prover som ej torkats kan vissa effekter av åldring efter pressning skönjas för högre frekvenser.
- De skillnader som observerats mellan dubbelprover med samma material kan i flertalet fall kopplas till inhomogeniteter i materialen.
- Signalen från askproverna är känslig för fukt på liknande sätt som för bentonitprover.
- Eftersom signaler för olika faser är överlagrade erhålls som väntat inte lika tydliga nyquistdiagram (samband mellan kapacitans och resistens)
- Det är mycket stora skillnader i utseende mellan spektra med respektive utan fukt. För vått material avtar fasvinkeln med ökad frekvens, men för torrt material är det tvärtom.

- Detta pekar på att man sannolikt kan särskilja effekten av saltinnehåll från den av närvaro av vatten. (Detta är emellertid inte visat i rapporten, vilket inte heller var syftet med arbetet).
- Eftersom mätdata varierar kraftigt med frekvensen har det bekräftats att ansatsen med att mäta inom ett stort frekvensområde var välmotiverad. De spektra som erhålls kan utnyttjas för att välja lämpliga betingelser för rutinmässig tillämpning.
- Dessa resultat har erhållits för samtliga provmaterial, d v s:
 - flygaska
 - åldrad blandning av flygaska och bentonitlera
 - kompositprov med åldrad aska
- För de torraste proverna observerades en viss spridning i data för de lägsta frekvenserna.

Följande resultat har erhållits från försöken i fatskala

- Uppskalningen till fatskala var helt oproblematiske. Inga svårigheter påträffades t ex beträffande störningar, minskad stabilitet eller ökat brus.
- Kurvformen var något avvikande i förhållande till laboratorieproverna, med ett jämförelsevis snabbt avtagande av den totala impedansen vid höga frekvenser (0,01 -0,1 MHz). Detta är inte oväntat m h t annan geometri, inklusive att fukthalten varierade vertikalt i provet, samt att fukthalterna också avvek från dem för laboratorieproverna.
- Uppställningen har fungerat utmärkt, och exempelvis har inte någon kanalbildning kunnat observeras. (Då hade resistensen plötsligt blivit lägre).
- Inga särskilda lärdomar kunde dras inför försök och mätningar i fält.

Följande resultat har erhållits från försöken i fullskala

- Störningarna från omgivningen var obetydliga, storleksordningen millivolt AC. Detta kontrollerades vid flera tillfällen.
- Likströmspotentialen mellan plattorna kunde uppgå till högst 0,5-1,0 volt.
- Elektromagnetisk koppling kan undvikas genom användning av skärmade kablar av den typ med mycket låg impedans (särskilt låg kapacitans) som används vid transmission av signal för kabel-TV. Detta förfarande ger ett obetydligt och välbestämt tillägg till den impedans som uppmäts, vilken också kan elimineras numeriskt.
- Impedansspektrometern var dock instabil, och detta gav sig till känna genom en starkt ökad brusighet hos signalen.
- En närmare analys visade att det bara var episodiskt som signalen var instabil och att den dess- emellan var mycket stabil och reproducerbar. Orsaken till detta är instrumentets konstruktion som innebär att det är olämpligt för mätningar på verklig jord. Det finns emellertid instrument som inte har denna svaghet, och slutsatsen är att användandet av ett sådant bör ge resultat som liknar dem som erhållits från försöken i fatskala.

5.3 Slutsatser från studien

Metodik för övervakning av tätskikt för deponier finns färdigutvecklat endast för sådana tätskikt som är elektriskt isolerande (plastfolier), och där förlorad integritet kan mätas i form av läckströmmar genom porvattnet i hålen.

Som närmare diskuterats i Avsnitt 3.4.3 är det lämpligaste alternativet resistens-mätningar. Dessa ger dock väsentligt mindre information till ungefär samma kostnad.

Prognosen för att den metod som studerats skall svara mot funktionskraven är god. Inga omständigheter har kunnat identifieras som skulle indikera att något av kraven inte uppfylls.

Informationssökningen har bekräftat det som vi kände till från början, nämligen att metodutvecklingen är krävande med avseende på teori och kunskap, men att detta sannolikt inte gäller för rutinmässig användning.

De försök som utförts har verifierat samtliga förhoppningar med följande undantag.

- Vi har fått tydliga indikationer på, men inte visat, att metoden kan mäta inte bara vattenhalt utan också salthalt.
- För mätning i fält krävs mätutrustning som är speciellt utformad för att klara att man använder verklig jord. Sådan utrustning finns emellertid kommersiellt tillgänglig.

Ytterligare kunskapsunderlag bör tas fram, och erfarenhet av tillämpning föreligga, innan metoden kan rekommenderas för rutinmässig användning av personer utan särskild utbildning. För sådana fortsatta studier krävs tillgång till ett instrument som är konstruerat för att kunna användas i mark. Man kan få tillgång till ett sådant instrument antingen genom att köpa ett eller genom att hyra in någon som kan utföra mättjänster med ett sådant instrument.

Studien har begränsats till tätskikt bestående av ren aska samt blandningar av aska och bentonit. Det finns inga principiella skäl varför studien inte också skulle kunna användas för andra material som uppvisar en varierande elektrisk ledningsförmåga beroende på tillståndet, t ex naturliga leror samt blandningar av aska och slam.

5.4 Diskussion och slutsatser beträffande kostnader

Det är viktigt att skilja på vad som erfordras för ett utvecklingsarbete, och hur en metod kommer att fungera i tilltänkt användning. Eftersom den aktuella metodiken är teoretiskt och informationsmässigt krävande finns det en påtaglig risk att den väljs bort till förmån för andra metoder som visserligen är lätta att kvalificera, men som kanske vare sig uppfyller funktionskraven eller blir tillräckligt enkla att använda i rutinmässig praktisk verksamhet.

Det som framkommit pekar på att kostnaderna inte bör bli prohibitiva. Naturligtvis är det svårt att göra några kostnadsuppskattningar i ett så här tidigt skede, men vissa gränssättningar går ändå att göra. Ett laboratorieinstrument av den typ som använts kostar uppemot en halv miljon. Att göra motsvarande för mätningar i fält ställer sig naturligtvis betydligt dyrare. Ett verkligt fältinstrument kan emellertid göras betydligt enklare, bl a genom att man bara använder sig av vissa fixa frekvenser (t ex 5 – 10 stycken). Dessutom kan en väsentligt lägre precision antagligen accepteras. Sammantaget innebär detta att ett specialiserat fältinstrument rimligen blir väsentligt billigare, kanske ett par hundra tusen kronor. Samtidigt bör det kunna bli väsentligt mindre i formatet och enkelt kunna bäras av en person.

Det är också svårt att förutse kostnaderna för installation av elektroden. Det har ju inte analyserats hur dessa ska installeras. Dock kan man för gränssättning jämföra med bentonitmattor. Det borde vara tekniskt möjligt att tillverka mattor med hyttsof på liknande sätt som bentonitmattor. Tillverkning och installation bör knappast bli dyrare, vilket ger ett tak på ca 100 SEK / kvadratmeter.

Det föreligger ytterligare större svårigheter att uppskatta kostnaderna för själva mätningarna. Dessa förutsätts kunna utföras vid gynnsam väderlek, d v s vid sommartemperatur och vackert väder. Om det finns ledningar dragna från elektroden och över markytan tar mätningarna högst några minuter per elektroddpar. Om i stället rör ska drivas ner, saltlösning injekteras och mätning utföras förutses en borrhämmare kunna användas som drivs med 220 V, 10 A från en bensindriven elgenerator. En sådan kan drivas för hand på en vanlig cykelkärra eller köras som släp bakom en trädgårdstraktor eller liknande. Tid för varje mätning, inklusive installation och borttagning av elektroder uppskattas uppgå till ca 10 minuter per elektroddpar. Rimligen märker man ganska enkelt när man penetrerat de mjuka växt- och skydds- och dräneringsskikten och kommit ner till tätskiktet. Arbetet utförs av en person.

Mätfrekvens är också svårt att närmare bedöma. Generellt kan sägas att om man utfört några mätningar vid olika tillfällen och hela tiden konstaterat att tätskiktet är intakt så bör frekvensen kunna minskas. Efter några decennier är frekvensen kanske inte ens en gång per decennium. Eventuellt avstår man från att mäta och har installationen bara som en möjlighet om fråga skulle uppstå beträffande integriteten och funktionen (t ex genom att man får ökade volymer dräneringsvatten).

Det viktigaste att konstatera är emellertid kanske att det är svårt att identifiera något alternativ som skulle kunna vara billigare.

REFERENSER

1. *Förordning om deponering av avfall*. SFS 2001:512.
2. *Avfallsförordningen*. SFS 2001:1063.
3. *Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall*. NFS 2004:10.
4. Bozkurt S, Moreno L and Neretnieks I. *Long-term processes in waste deposits*. The science of the Total Environment 250 (2000) 101-121.
5. *Deponering av avfall Handbok 2004:2 med allmänna råd till förordningen (2001:512) om deponering av avfall och till 15 kap. 34 § miljöbalken (1998:808)*. Naturvårdsverket, Handbok 2004, 2 maj 2004.
6. *Fud-program 2007. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall*. Svensk Kärnbränslehantering AB, September 2007.
7. Brundin H, Kihl A, Lagerkvist A, Pusch R, Rihm T, Sjöblom R och Tham G. *Långtidsegenskaper hos tätskikt innehållande bentonit*. Svenska Renhållningsverksföreningen (nu Avfall Sverige), RVF Rapport 01:12.
8. Koerner, R M. *The state of the art practice regarding in-situ monitoring of geosynthetics*. In: De Groot M B, Den Hoedt G and Termaat R J (Editors). *Geosynthetics: Application, Design and Construction*. Balkema, Rotterdam, pp 71-86.
9. *Survey of Technologies for Monitoring Containment Liners and Covers*. Solid Waste and Emergency Response Report EPA 542-R-04-013. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, DC June 2004
10. GRI Standard - GS3. *Standard Guide for Selecting In-Situ Monitoring Methods and Devices for the Evaluation of Geosynthetic Performance*. GRI standard developed by the Geosynthetic Research Institute through consultation and review by the member organizations. 2007.
11. Imhoff P T, et al. *Review of state of the art methods for measuring water in landfills*. Waste Management, Volume 27, Issue 6, 2007, Pages 729-745.
12. Arrevious A. *Elektrokinetisk monitoring av syntetiska lergeomembran*. Examensarbete TRITA_KET_IM 2001:16, Institutionen för Kemiteknik, Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm, 2001.
13. Tegenfeldt J, Sjöblom R och Arrevious A. *Electrokinetic monitoring of synthetic geoclay liners*. Applied Clay Science, Volume 23, Issues 1-4, August 2003, Pages 211-218. Clay Microstructure. Proceedings of a Workshop held in Lund, Sweden, 15-17 October 2002.
14. Tham G och Andreas L. *Utvärdering av fullskaleanvändning av askor och andra restprodukter vid sluttäckning av Tveta Återvinningsanläggning*. Värmeforsk, Miljöriktig användning av askor, rapport 1064, juni 2008.
15. Macdonald J R, Editor. *Impedance spectroscopy emphasizing solid materials and systems*. John Wiley & Sons, 1987. ISBN 0-471-83122-0.
16. Barsoukov E and Macdonald J R, Editors. *Impedance spectroscopy, theory, experiment and applications, 2nd edition*. Wiley-Interscience, 2005. ISBN 0-471-64749-7.
17. Bard A J and Faulkner L R. *Electrochemical methods, fundamentals and applications, 2nd edition*. John Wiley & Sons inc, 2001. ISBN 0-471-04372-9.
18. Gladkov S O. *Dielectric properties of porous media*. Springer Verlag, 2003. ISBN 5-540-00186-7.
19. Runt J P and Fitzgerald J J, Editors. *Dielectric spectroscopy of polymeric materials*. American Chemical Society, 1997. ISBN 0-8412-3335-7.

20. Sumner J S. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
21. Reynolds J M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, 1997. ISBN 0-471-96802-1
22. Schmitt R. *Electromagnetics explained. A handbook for wireless/RF, EMC, and high-speed electronics*. Newness (an imprint of Elsevier Science), 2002. ISBN 0-7506-7403-2.
23. Alberty R A. *Physical Chemistry*. John Wiley & Sons, 1987.
24. Steenari B-M. *Chemical properties of FBC ashes*. Doctoral thesis. Department of Environmental Inorganic Chemistry, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1998. ISBN 91-7197-618-3.
25. Noläng B och Sjöblom R. *Deponering av zink i beläggningar på pannrör - en termodynamisk studie*. Värmeforsk, Miljö- och förbränningsteknik, Arbetsrapport nummer 21. December 2004.
26. Berg M et al. *Förbränning av returträflis*. Etapp 2 av ramprojekt returträflis. Värmeforsk, Miljö- och förbränningsteknik, Rapport 820. Maj 2003.
27. Peter Adler, Jan-Erik Haglund, Rolf Sjöblom. *Vägledning för klassificering av förbränningsrester enligt Avfallsförordningen*. Värmeforsk, Miljöriktig användning av askor 866, Maj 2004.
28. Sjöblom R, Tham G, Haglund J-E and Sjöo C. *Environmental qualification of ash from wood-based recycled fuels for utilization in covers for landfills*. Kalmar ECO-TECH '05 and The Second Baltic Symposium of Environmental Chemistry, Kalmar, Sweden, November 28-29, 2005.
29. Sjöblom R. *Underlag för val av referenssubstans för zink inför klassning enligt Avfallsförordningen*. Avfall Sverige Rapport F2007:03.
30. Chandler A J, Eighmy T T, Hartlén J, Hjelm O, Kosson D S, Sawell S E, Van der Sloot H A and Vehlow J, 1997. *Municipal solid waste incinerator residues*. Elsevier Science B.V. 1997. ISBN 0-444-82563-0.
31. Sear L K A. *The properties and use of coal fly ash*. Thomas Telford Ltd, 2001. ISBN 0 7277 30150.
32. Sjöblom R. *Hypoteser och mekanismer för bildning av beläggningar innehållande zink och bly i samband med förbränning av returflis*. Värmeforsk, Miljö- och förbränningsteknik, Rapport 734, 2001.
33. Sjöblom R. *Properties, volumes and current disposal and re-use of residues from thermo-chemical energy production. A Case Study in Activity 7.1 in the NDC 2007-2008 Programme of Work "Radioactive Waste in Perspective"*. In press by OECD Nuclear Energy Agency.
34. Delville N. *Study of mineralogy and physical chemistry of residues from incineration of domestic waste with regard to utilization of a rotating furnace*. (In french: Étude minéralogique et physiochimique des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (M.I.O.M) en vue d'une utilisation en technique routière.) Université Blaise Pascal. École doctorale des sciences fondamentales No 375. Doctoral thesis, 2003.
35. Tham G, Sjöblom R och Andreas L. Opublicerade data.
36. Hewlett P C Editor. *Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition*. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0-340-56589-6.
37. Keller, W.D. *Processes of origin and alteration of clay minerals*, In: C.I. Rich and G.W. Kunze Editors, *Soil clay mineralogy*, pp 3-76, 1964. University of North Carolina Press, Chapel Hill, United States.
38. Keller, W.D. *The origin of high alumina clay minerals – a review*, *Clay and clay minerals*, Proceedings of the twelfth national conference, Monograph No. 19, Earth science series, Pergamon Press, New York, United States, pp 129-151, 1964.
39. Güven N. *Smectites*. I Bailey S W *Reviews in mineralogy, volume 19. Hydrous phyllosilicates*. Mineralogical society of America, 1991. ISBN 0-939950-23-5.
40. Zevenbergen C. *Clay formation during weathering of alkaline coal fly ash*. International ash utilisation symposium, Center for applied energy research, University of Kentucky, Paper 14.

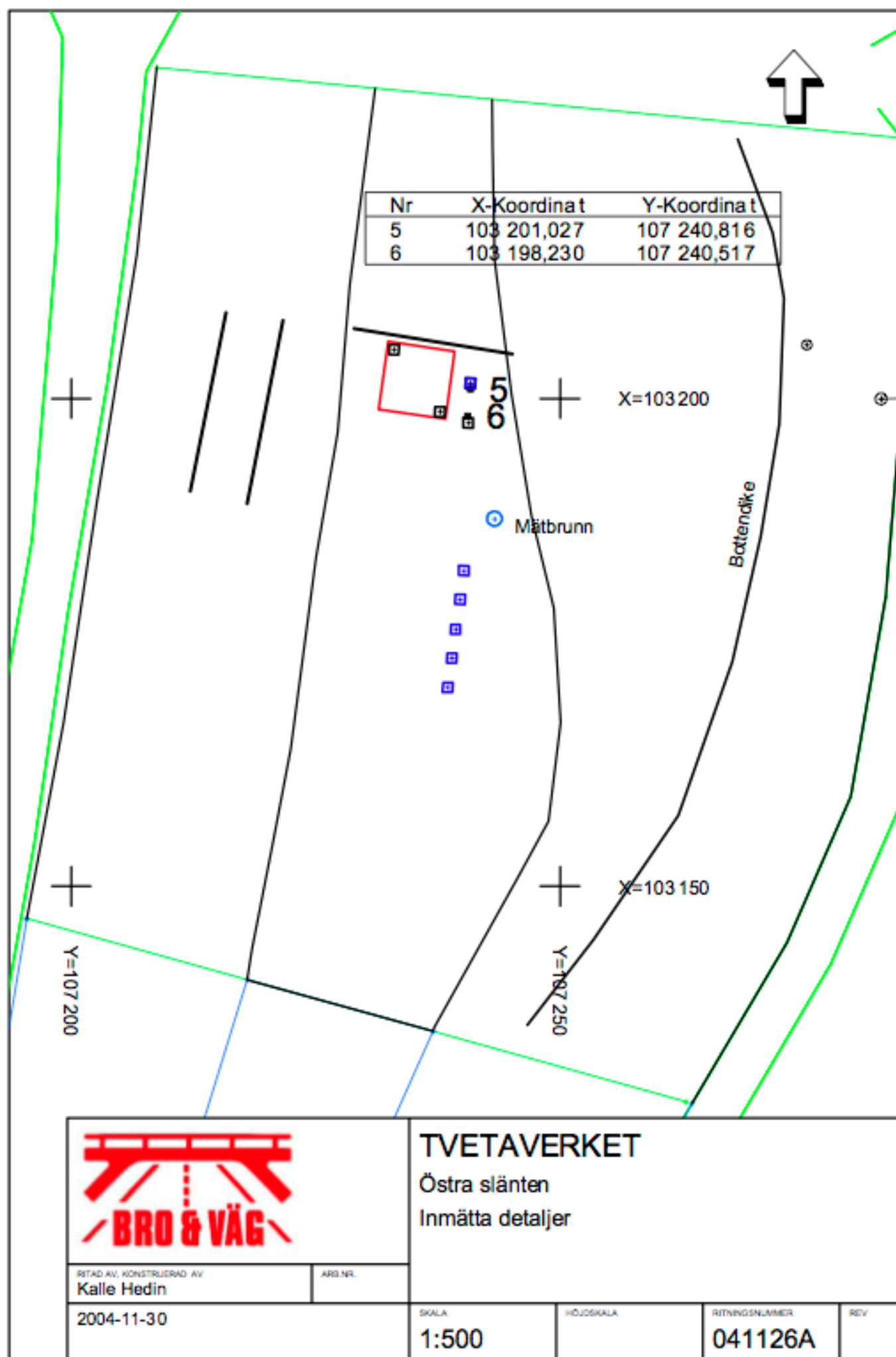
41. Dudley L M et al. *Low Frequency Impedance Behavior of Montmorillonite Suspensions Polarization Mechanisms in the Low Frequency Domain*. Soil Science Society of America Journal 67:518-526 (2003).
42. Wildenschild D et al. *Influence of Microstructural Properties on Geophysical Measurements in Sand-Clay Mixtures*. Paper prepared for submittal to Environmental & Engineering Geophysical Society Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Oakland, CA March 14-18,1999. UCRL-J0191557 Preprint.
43. Becker K et al. *On-line Monitoring von Tonabdichtungen in Deponien mit Hilfe der Impedanzspektroskopie*. Gefördert durch: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF). Laufzeit: 01.07.2002 - 30.06.2004.
44. Kaya A. *Electrical Spectroscopy of Kaolin and Bentonite Slurries*. Turk J Engin Environ Sci 25 (2001) , 345 { 354.
45. Sjöblom R, Bjurström H and Pusch R. *Feasibility of compacted bentonite barriers in geological disposal of mercury containing waste*. Presenterat muntligt vid Specialist Workshop on Clay Microstructure and its Importance to Soil Behaviour i Lund 15-17 oktober 2002. Även publicerat i Applied Clay Science 213 (2003) 287-293.
46. Sjöblom R, Kalbantner P, Bjurström H, Pusch R. *Application of the general microstructural model to erosion phenomena-mechanisms for the chemical – hydrodynamic conversion of bentonite to a pumpable slurry in conjunction with retrieval*. Engineering Geology 54 (1999) 109-116.
47. Popov V och Pusch R, editors. *Disposal of hazardous waste in underground mines*. WIT Press 2006. ISBN 1-85312-750-7.
48. Pusch R and Yong R. *Microstructure of smectic clays and engineering performance*. Taylor and Francis, 2006. ISBN 0-415-36863-4.
49. Kodaxis G. *Fuktmätning i bentonit, vattenkvotens inverkan på impedansen i fuktmätare*. Examensarbete. Luleå University of Technology, 1982:076E, 1982.
50. Polzer W L. *Dielectric properties and high frequency conductance of Wyoming bentonite*. Doctoral thesis. School of Advanced Graduate Studies of Michigan State University, 1960.
51. Fokkens E E. *Investigations of clays and clay minerals by means of impedance measurements*. Inauguraldissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2002.
52. Aaltonen J. *Ground monitoring using resistivity measurements in glaciated terrains*. Doctoral dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Land and Water Resources, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
53. Aaltonen J. *Geoelektriska Undersökningar för Övervakning av Grundvatten*. Tekniska Högskolan, 2001. Rapport till Stiftelsen Ragnar Sellberg.
54. Aaltonen, J. *Mapping and monitoring landfill leachate with DC resistivity and EM conductivity in glaciated till terrain*. Submitted²⁰ 2001 to Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 22 p.
55. Blomqvist G. *De-icing salt and the roadside environment: Air-borne exposure, damage to Norway spruce and system monitoring*. Doctoral thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
56. Brown S R principal investigator. *Complex Electrical Resistivity for Monitoring DNAPL Contamination, final report*. (DNAPL = Dense Non-Aqueous Phase Liquids) U.S. Department of Energy, Project Number: 70012, Grant Number: DE-FG07-99ER15005, Project Duration: September 15, 1999 to June 14, 2003.

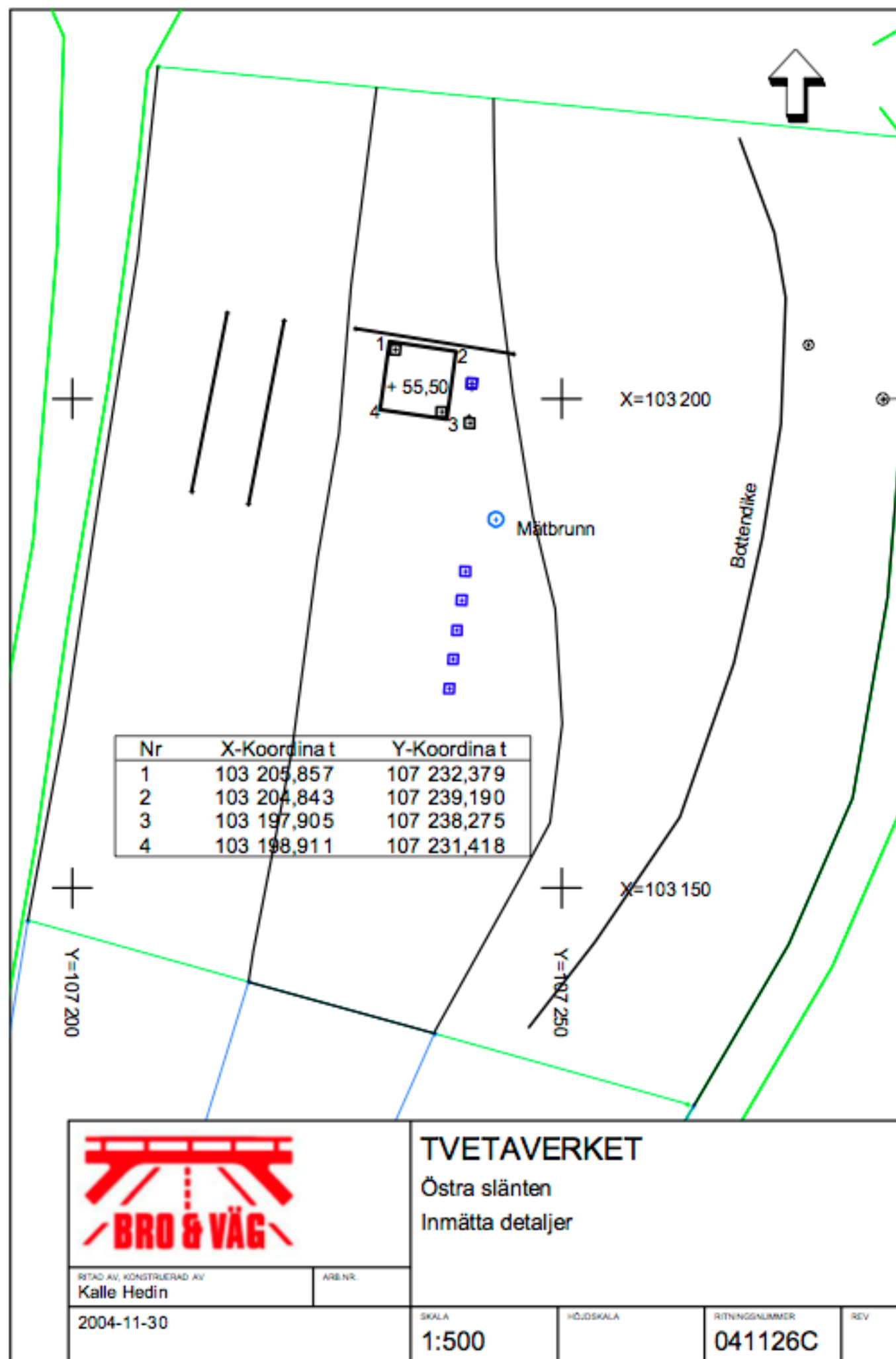
²⁰ Det har inte varit möjligt att ladda ner denna artikel digitalt från Internet. Innehållet antas dock vara relaterat till det i rapporteringen till Stiftelsen Ragnar Sellberg (föregående referens).

57. Morgan F D et al. *Noninvasive Contaminant Site Characterization Using Geophysical Induced Polarization*. 225th American Chemical Society Meeting, New Orleans, March, 2003.
58. Zonge K L and Hughes L J. *The complex resistivity method*. Zonge Engineering & Research Organization, Inc., 1980
59. Matthews P and Zonge K L. *50 years – state of the art in IP and complex resistivity*. Presented at KEGS 50th Anniversary Symposium Mining and Environmental Geophysics – Past, Present & Future Saturday, March 8, 2003, Toronto, Ontario, Canada.
60. Kelleners T J et al. *Frequency Dependence of the Complex Permittivity and Its Impact on Dielectric Sensor Calibration in Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:67–76 (2005).
61. Mauldin-Mayerle C et al. *Environmental applications of high resolution TEM methods*. The 4th Meeting on Environmental and Engineering Geophysics Barcelona, Spain, September 14-17, 1998
62. Strangl R et al. *Calibration of Electromagnetic Sensors for Water Content Monitoring in a Former Landslide*. In: Soil Physics and Rural Water Management – Progress, Needs and Challenges. Proceedings of the International Symposium SOPHYWA, September 28–29, 2006, Vienna, Austria.
63. Thunhed H. *Mapping and characterisation of Swedish bedrock by DC resistivity and transient-field electromagnetic measurement*. Doctoral thesis. Luleå University of Technology, 2000:17, 2000.
64. Witten A J. *Handbook of geophysics and archaeology*. Equinox Publishing Ltd., 2006. ISBN 1-904768-59-8.
65. Schmidt A. *Geophysical data in archaeology: A guide to good practice*. Oxbow Books, 2002. ISBN 1-900188-71-6.
66. Clark A. *Seeing beneath the soil, prospecting methods in archaeology*. B T Batsford Ltd, London, 1990. ISBN 0-7134-5858-5.
67. Vestin E och Wilén P. *Markradar fältförsök*. Svensk Fjärrvärme, Forskning och utveckling, Rapport 2004:113.
68. Blümlich B. *NMR imaging of materials*. Clarendon Press, Oxford, 2000. ISBN 0-19-852676-8.
69. *The proton magnetic resonance method for groundwater investigations*. IRIS Instruments, 1998.
70. Coates G R et al. *NMR logging, principles and applications*. Haliburton Energy Services, Houston, 1999. ISBN 0-9679026-0-6.
71. *Comparison of soil water measurement using the neutron scattering time, domain reflectometry and capacitance methods*. Results of a consultants meeting organized by the joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, held in Vienna 23-25 November, 1998. IAEA-TECDOC-1137. February, 2000.
72. Reedy, R C and Scanlon B R. *Long-term water balance monitoring of engineered covers for waste containment*, in 2001 International Containment and Remediation Technology Conference, Orlando, Florida, Institute for International Cooperative Environmental Research, Florida State University, Paper ID. No. 073. Published in 2002.
73. Svensson M, Leroux V and Dahlin T. *Geoelektriska metoder för karakterisering av befintligt täckmaterial på deponi inför avslutningsplan*. Procs. NGM 2004, Ystad, Sweden, 18-20 May 2004.
74. Carlson N R et al. *Buried landfill delineation with induced polarization: progress and problems*. In Proceedings of the 2001 Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Denver, Colorado, March 4-7, 2001.
75. Evett S R and Parkin G W. *Advances in Soil Water Content Sensing: The Continuing Maturation of Technology and Theory*. Vadose Zone Journal 4:986–991 (2005).
76. C. J. Murray C J, Last G v and Truex M J. *Review of Geophysical Techniques to Define the Spatial Distribution of Subsurface Properties or Contaminants*, U.S. Department of Energy, August 2005.

77. Murray C J et al. *Review of geophysical techniques to define the spatial distribution of subsurface properties of contaminants*. Prepared for the U S Department of Energy under the contract DE-AC05-76RL01830. August 2005.
78. Robinson D A et al. *A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry*. Vadose Zone Journal 2:444–475 (2003).
79. Dahlin T et al. *Geofysik i släntstabilitetsutredningar*. Statens Geotekniska Institut, Rapport 62, Linköping 2001.
80. Turney C S M et al. *Redating the onset of burning at Lynch's Crater (North Queensland): implications for human settlement in Australia*. Journal of Quaternary Science (2001) 16(8) 767–771.
81. Preston C M and Schmidt M V I. *Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions*. Biogeosciences, 3, 397–420, 2006.
82. Bird M I. *Dating close to the radiocarbon 'barrier'*. Invited paper prepared for: 1st Physics and Archaeology Meeting - discoveries and dated chronology, April 26 to 29, 2004, Capivara National Park, Brazil.

APPENDIX A
- POSITIONSDATA FÖR FÄLTINSTALLATIONERNA





RAPPORTER FRÅN AVFALL SVERIGE 2009

AVFALL SVERIGES UTVECKLINGSSATSNING

2009:01 Verktyg för bättre sortering på återvinningscentraler

AVFALL SVERIGES UTVECKLINGSSATSNING, BIOLOGISK BEHANDLING

B2009:01 Insamlade mängder matavfall i olika insamlingssystem i svenska kommuner

AVFALL SVERIGES UTVECKLINGSSATSNING, DEPONERING

D2009:01 Övervakning av tätskikt i deponier med impedansspektroskopi

“Vi är Sveriges största miljörelse. Det är Avfall Sveriges medlemmar som ser till att svensk avfallshantering fungerar - allt från renhållning till återvinning. Vi gör det på samhällets uppdrag: miljösäkert, hållbart och långsiktigt. Vi är 9 000 personer som arbetar tillsammans med Sveriges hushåll och företag.”



Avfall Sverige Utveckling D2009:01

ISSN 1103-4092

©Avfall Sverige AB

Adress	Prostgatan 2, 211 25 Malmö
Telefon	040-35 66 00
Fax	040-35 66 26
E-post	info@avfallsverige.se
Hemsida	www.avfallsverige.se