



Miljø- og Fødevarerministeriet  
Miljøstyrelsen

# Termisk oprensning på Knullen 8, Odense

Fysiske og kemiske konsekvenser af termisk  
behandling af jord

Miljøprojekt nr. 1841, 2016

**Titel:**

Termisk oprensning på Knullen 8, Odense  
oprensning på Knullen 8, Odense

**Redaktion:**

Termisk Henrik Engdal Steffensen, NIRAS; Henrik Aktor, Aktor Innovation;  
Hans Skou, Region Syddanmark; Niels Just, Region Syddanmark

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**År:**

2016

**ISBN nr.**

978-87-93435-47-6

**Ansvarsfraskrivelse:**

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Konklusion og sammenfatning</b> .....	<b>6</b>
<b>Summary and Conclusion</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Indledning</b> .....	<b>12</b>
1.1 Baggrund.....	12
1.2 Afværgeprojekt.....	12
<b>2. Teknologiprojekt – formål</b> .....	<b>14</b>
2.1 Formål med litteraturstudium .....	14
2.2 Formål med deformationsmålinger .....	14
2.3 Udvidet temperaturmonitoring.....	15
2.4 Formål med massebalance for geokemi.....	15
2.5 Læsevejledning.....	16
<b>3. Litteraturstudie</b> .....	<b>17</b>
3.1 Beskrivelse af udført litteraturstudie .....	17
3.1.1 Anvendte søgedatabaser og kilder.....	17
3.1.2 Fremgangsmåde ved søgning .....	17
3.1.3 Sortering af referencer .....	17
3.2 Termisk indvirkning på jords styrke og deformationsegenskaber .....	18
3.2.1 Klassifikationsparametre.....	19
3.2.2 Permeabilitet og temperatur .....	20
3.2.3 Deformationsegenskabers temperaturafhængighed .....	21
3.2.4 Styrkeegenskabers temperaturafhængighed .....	24
<b>4. Præcisionsnivelementer</b> .....	<b>26</b>
4.1 Etablering af målepunkter.....	26
4.2 Resultater og vurderinger.....	27
4.3 Fremtidig deformationsudvikling .....	30
<b>5. Temperaturmonitoring</b> .....	<b>31</b>
5.1 Terrænnær monitorering .....	31
5.1.1 Baggrund og etablering.....	31
5.1.2 Resultater og vurderinger .....	32
5.2 Monitorering i mættet zone .....	34
5.2.1 Baggrund og etablering.....	34
5.2.2 Resultater og vurderinger .....	35
<b>6. Massebalancer på Geokemi</b> .....	<b>37</b>
6.1 Diskussion af metoder .....	37
6.1.1 Massebalance for kulstof .....	37
6.1.2 Massebalance for klorid .....	38
6.1.3 Stabile isotoper.....	39
6.1.4 Feltmetoder og analyser .....	39
6.2 Resultater .....	39
6.2.1 Grundvand.....	39

6.2.2	Massebalance for pyrit og organisk kulstof .....	41
<b>Referencer .....</b>		<b>45</b>
<b>Bilag 1:</b>	<b>Søgeresultater fra litteratursøgning .....</b>	<b>47</b>
<b>Bilag 2:</b>	<b>Plan, temperaturmålepunkter.....</b>	<b>66</b>
<b>Bilag 3:</b>	<b>Plan, nivellements punkter .....</b>	<b>67</b>
<b>Bilag 4:</b>	<b>Nivellementsresultater: jord, gulv, vægge.....</b>	<b>68</b>
<b>Bilag 5:</b>	<b>Temperatur, 1 m's dybde .....</b>	<b>73</b>
<b>Bilag 6:</b>	<b>Opbygning, terrænnær og dybere temperaturmålepunkt.....</b>	<b>74</b>
<b>Bilag 7:</b>	<b>Temperaturprofil, terrænnære målinger.....</b>	<b>75</b>
<b>Bilag 8:</b>	<b>Temperaturprofil T2 .....</b>	<b>79</b>
<b>Bilag 9:</b>	<b>Temperaturprofil, dybere monitoring, T12 .....</b>	<b>80</b>
<b>Bilag 10:</b>	<b>Temperaturflader, d. 10. juli, 26. august, 7. oktober 208.....</b>	<b>81</b>
<b>Bilag 11:</b>	<b>Ekstrapolerede deformationer .....</b>	<b>84</b>
<b>Bilag 12:</b>	<b>Udvalgte referencer .....</b>	<b>87</b>

# Forord

Oprensning af jordforurening med termiske metoder i lavpermeable jordarter er ikke tidligere med held gennemført i Danmark, og kombinationen af oprensning i både et vandførende sandlag og overliggende lerlag med to forskellige termiske metoder er ikke tidligere gennemført i hverken Danmark eller på verdensplan.

Baggrunden for dette projekt er at opnå supplerende viden i forbindelse med gennemførelse af termisk oprensning ved injektion af damp i et vandførende sandlag og opvarmning af det overliggende lerlag ved termisk ledningsevne.

Denne rapport er en del af dokumentationsgrundlaget for den termiske oprensning, der er gennemført på Knullen 8; Odense. Nærværende rapport og de heri beskrevne undersøgelser har haft særlig fokus på forhold ved termisk oprensning, som kan have generel interesse for lignende fremtidige projekter. Dette omfatter f.eks. deformation af jorden som følge af opvarmningen, påvirkning af ledninger og i hvilken grad selve opvarmningen ville medvirke til destruktion af forureningskomponenter.

Projektet er udført i sammenhæng med afværgeprojektet på Knullen 8, Odense og projektoptimeringen er gennemført som et samarbejde mellem Miljøstyrelsen ved Ole Küllerich, Region Syddanmark ved Hans Skou og NIRAS ved Henrik Engdal Steffensen med Aktor Innovation som underrådgiver.

Rapporten er udarbejdet under Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening af Henrik Engdal Steffensen, NIRAS og Henrik Aktor, Aktor Innovation med Hans Skou og Niels Just, Region Syddanmark som sparringspartner.

# Konklusion og sammenfatning

Region Syddanmark har foretaget en termisk oprensning af jordforurening med chlorerede opløsningsmidler på adressen Knullen 8 i Odense. På ejendommen har der været erhvervsrenseri og –vaskeri, hvor vaskeriet fortsat er i drift. Den termiske oprensning er gennemført som en kombination af termisk ledningsevne i moræneler og injektion af damp i et vandførende sand-/gruslag.

Termisk ledningsevne eller termisk oprensning i det hele taget i moræneler har ikke i fuld skala tidligere været udført i Danmark. Der har især været bekymringer for store sætninger i forbindelse med opvarmningen og deraf følgende betydelige skader på overliggende ejendomme. Desuden er det i sig selv en udfordring at foretage termisk ledningsevne i et jordlag, der hviler på et lag af vandførende sand/grus, der har et vandtryk flere meter op i leret. Miljøstyrelsen har derfor i samarbejde med Region Syddanmark iværksat et projekt til nærmere belysning af kritiske punkter i den planlagte oprensning. Projektet er udført af NIRAS A/S. Overordnet omfatter projektet følgende aktiviteter:

- Litteraturstudie om hvilken betydning det har for en jords styrke- og deformationsegenskaber, hvis den varmes op til omtrent 100 °C.
- Udførelse af præcisionsnivelementer under og efter opvarmningsforløbet med henblik på i detaljer at følge udviklingen af deformationer i både jord og overliggende konstruktioner.
- Temperaturmåling i terrænnære jordlag nær kritiske installationer for at afdække i hvilken grad opvarmningen kunne udgøre en risiko for disse.
- Temperaturmåling i overgangszonen mellem moræneler og vandførende sand med henblik på at fastlægge i hvilken grad en damppude under moræneleret positivt kunne medvirke til effektiv opvarmning af lerlaget.
- Ved udførelse af geokemiske undersøgelser at vurdere om der sker en massejernelse ved in-situ destruktion, dvs. at de chlorerede forbindelser destrueres in-situ til bl.a. kulstof og chlorid og denne masse derfor aldrig bliver påvist i afværgeanlæggets behandlingsdel.

I hovedtræk kan følgende konkluderes på baggrund af det gennemførte litteraturstudie:

- Stort set alle i litteraturen undersøgte lere har væsentlig højere indhold af lerminerale end flertallet af lerforekomster i Danmark. Klassifikationsparametrene for de udenlandske lere viser, at de har højere naturligt vandindhold, højere plasticitets indeks m.m.
- Forsøgene viser også, at ved temperaturer over 250 °C skifter lerjorden karakter i form af f.eks. lavere plasticitetsindeks.
- Opvarmning af lerjorden med deraf følgende deformation og reduceret porøsitet synes ikke at påvirke den hydrauliske ledningsevne for jorden. Dette begrundes i at vands viskositet falder med stigende temperatur.
- Ved opvarmning af en lerjord er graden af overkonsolidering meget vigtig for hvilke sætninger opvarmningen giver anledning til. Jo større overkonsolideringsgrad jo mindre sætter jorden sig. Desuden ses ved store overkonsolideringsgrader at lerets kornskellet indledningsvis udvider sig, før der følger en sammentrækning ved 70 a 100 °C.
- De få forsøg der er udført tyder på, at lerjordenes styrkeegenskaber ikke forringes som følge af opvarmning. Forsøg dækker dog kun til temperaturer op til 100 °C.

Der er gennemført sætningsmålinger/deformationsmålinger i 18 punkter placeret hhv. i jord, på vægge og på et skorstensfundament. Målingerne er gennemført over en periode på 5 år med de hyppigste målinger mens opvarmningen stod på. Målinger tyder samstemmende på, at der ikke sker sætninger/deformationer, der hverken nu eller fremover vil udgøre en risiko for svigt (kollaps) af bygningskonstruktionen. Der er registreret sætninger på op til ca. 10 mm, og da disse forekommer ret ensartet har det tilsyneladende medført, at der ikke er sket skade på bygningen. Der er således ikke set en eneste revne i vægge eller gulv, der kan henføres til sætninger fra opvarmningen.

Deformationsmålingerne viser i øvrigt samme trend som set i de i litteraturstudiet refererede laboratorieforsøg med først en svag hævnning og derefter sætning. Dette er i god overensstemmelse med, at lerjorden på ejendommen må karakteriseres som en stærkt overkonsolideret ler endda med et forholdsvist lavt lerindhold og ret lavt naturligt vandindhold.

En fremskrivning af deformationerne viser, at der stadig henstår nogle mm sætninger, men ikke af en størrelsesorden, der får betydning for bygningens stabilitet.

Sammenholdes den viden der er indhentet fra litteraturstudiet med erfaringerne fra det gennemførte projekt med opvarmning af en moræneler vurderes der fremadrettet at kunne peges på følgende forhold som essentielle ved termiske projekter, der udføres i sedimenter, der udgøres af stærkt organisk holdige jorde og kohæsionsjord:

- I organisk holdige jorde, tørv, gytje o.l., må der påregnes betydelige sætninger ved opvarmning til 80 á 100 C eller derover. Dels i form af udtørring af jorden dels i form at sammenfald af kornskelet.
- I aflejringer af smeltevandsler er størrelsen af sætninger i forbindelse med opvarmning afhængig af lerens naturlige vandindhold og lerens konsolideringsgrad. Smeltevandsler er ofte kun svagt konsolideret (ikke isbelastet) og med et forholdsvist højt vandindhold, der betyder, at der ved opvarmning må forventes en ret betydelig deformation i jordskelettet og dermed risiko for sætninger i jordoverfladen.
- Typisk dansk moræneler har et lerindhold på 15 – 35 %, være stærkt overkonsolideret (isbelastet) og et forholdsvis lavt vandindhold, 10 – 12 %. I sådanne aflejringer har de til nu indhøstede erfaringer vist, at der kun sker en meget beskedent deformation i jordskelettet og dermed også sætning af jordoverfladen. Dette betyder igen, at risikoen for sætninger af overstående bygværker er beskedent, og for det meste uden betydning, hvad angår bygningens stabilitet.
- I aflejringer af ler med højt indhold af lerminerale (>35 %) kan der være risiko for ret store deformationer i forbindelse med opvarmning. Selvom der er tale om isbelastede aflejringer kan der især for tertiære lere forekomme svindeffekter, der kan have en størrelse, der vil udgøre en risiko uforholdsmæssige store sætninger i jordoverfladen. For at afklare omfang af sætninger bør der ved fremtidige termiske projekter, hvor denne type aflejringer forekommer gennemføres bestemmelse af jordens styrke- og deformationsegenskaber samt forsøg med bestemmelse af jordens svind- og krybningsegenskaber under opvarmning.

De terrænnære temperaturmålinger i nærværende projekt viser, at temperaturen mod terræn stiger under opvarmningen, men ikke drastisk. Dette formentlig som følge af at overfladen ikke er isoleret og at varmetilførslen skete i dybder større end ca. 4 m. Opvarmningen kunne være kritisk da f.eks. ledningsmateriale af PE, PVC og lignende styrkemæssigt svækkes allerede ved temperaturer på 60 °C. Desuden kan temperaturstigninger medføre udvidelse af materialet med deraf følgende mulighed for lækager.

Den dybe temperaturmonitoring viste, at etablering af en damppude under lerlaget på ejendommen havde en meget gunstig virkning på opvarmningen af den nedre ca. 1 meter af leret. Damp migrerede op i leret og opvarmede hurtigt den nedre del af leret til 100 °C. Dampen var desuden medvirkende til at optrængning af vand fra det vandførende sandlag til lerlaget har været begrænset. Vandbalancen for lerlaget viser overordnet set, at den fjernede vandmængde kan forklares som fjernelse af det oprindelige porevand i leret.

Ved de geokemiske undersøgelser er der ikke fundet bevis for, at der er sket in-situ destruktion af de chlorerede forbindelser under oprensningen. Derimod viser undersøgelserne, at der er sket en kraftig pyritoxidation med en deraf følgende udvikling af flere ton svovlsyre. Det vurderes, at jordens surhed (pH) ikke er sænket væsentlig, da leret indeholder kalk som buffer og da en stor del af svovlforbindelserne formentlig er ekstraheret sammen med de chlorerede stoffer. At der er sket en forsuring ses bl.a. af at kondensat fra især leret i perioder har haft pH på 4 á 4,5, hvor dette har kunnet kondensere og opkoncentreres i afværgeanlæggets rørsystemer.

Anbefalinger. Med baggrund i resultaterne af dette projekt må det anbefales, at der ved fremtidige termiske projekter foretages en nøje registrering af bygværkes sætninger, og især de vertikale deformationer bør måles ved et tæt net af målepunkter. Ved særlige sætningsfølsomme konstruktioner kan det desuden være hensigtsmæssigt at måle de horisontale bevægelser af en konstruktion for at sikre den ikke lider skade under opvarmningen.

Generelt anbefales, at der ved ethvert termisk projekt som minimum gennemføres bestemmelse af jordarternes geologiske dannelseshistorie, herunder graden af forkonsolidering, lerindholdet samt i særlige tilfælde bestemmelse af lermineralsammensætningen. Lermineralsammensætningen kan især være vigtig, hvis der er forventninger om at leren kan indeholde en betydelig del af f.eks. montmorillonit, der er særlig følsom for variationer i vandindhold.

Desuden anbefales, at der gennemføres geotekniske undersøgelser til bestemmelse af en jords styrke- og deformationsforhold, vandindhold og i særlige tilfælde bestemmelse af jordens konsolideringsgrad. Forkonsolideringsgraden er vigtig i forhold til forudsigelse af forventninger til størrelse af de sætninger der må forventes i forbindelse med opvarmningen.

Helt overordnet kan der ved opvarmning af jord til ca. 100 °C forventes sætninger af størrelsesordenen:

- 10 – 20 mm for overkonsolideret moræneler med lerindhold < 30 – 35 %
- cm størrelse for ikke isbelastet ler, dvs. Post- og senglaciale lere
- for meget fastlejret sand vil sætninger formentlig være af beskeden størrelse, som moræneler
- for øvrige aflejringer af sand skal der foretages detaljerede undersøgelser, idet størrelse og forløb af sætninger ikke kan forudsiges.

I forhold til verificering af effekten af opvarmningen anbefales, at der ved termiske projekter altid gennemføres en nøje monitoring af varmeudbredelsen før, under og efter opvarmningen er gennemført.



# Summary and Conclusion

Region of Southern Denmark has conducted a thermal treatment of soil pollution with chlorinated solvents on the Danish location, Knullen 8 in Odense. On the site there has been an industrial dry cleaner and laundrette, where the laundrette is still in operation. The thermal treatment has been implemented as a combination of thermal conductivity in moraine clay and steam injection in water bearing sand and gravel layer.

On the whole, thermal conductivity or thermal treatment in moraine clay has not been implemented in Denmark before. Especially serious subsidence due to the heating and consequent damage on above buildings has caused concerns.

Besides it is a challenge to perform thermal conductivity in a ground soil on top of water bearing sand/gravel with a hydraulic pressure several meters up through the clay. Thus the Danish EPA in collaboration with the Region of Southern Denmark has initiated a project for further explanation of critical issues in the planned treatment. The project is carried out by NIRAS A/S. In general the project includes the following activities:

- Literature survey of the impact on a soil's bearing capacity and deformation abilities, if it is warmed up to approx. 100 °C.
- Implementation of precision levelling during and after the heating process in order to follow the development of deformations in both soil and above standing constructions.
- Temperature measurement in the ground soil layer near critical installations to show to which degree the heating could cause a risk for the installations.
- Temperature measurement in the transition zone between moraine clay and water bearing sand in order to determine to which degree steam injection under the moraine clay could contribute positively to efficient heating of the clay soil.
- By implementation of geochemical examinations to evaluate whether there is a mass removal by in-situ destruction, i.e. that the chlorinated compounds are destructed in-situ to i. a. carbon and chloride, and this mass is thus never detected in the treatment section of the remediation.

In outline the following can be concluded based on the completed literature survey:

- Almost all examined clays have a significantly higher content of clay than the majority of clay deposits in Denmark. The classification parameters for the foreign clays show that they have a higher natural water content, higher plasticity index etc.
- Tests also show that by temperatures above 250 °C the clay soil changes character in the shape of e.g. lower plasticity index.
- Heating of the clay soil with succeeding deformation and reduced porosity does not seem to influence the hydraulic conductivity of the soil. That is explained by the fact that water viscosity decreases with the increasing temperature.
- By heating of the clay soil the degree of overconsolidation is very important to which kind of settlement the heating causes. The larger overconsolidation degree, the lesser the soil will settle. Furthermore it is observed by high degrees of overconsolidation that the soil matrix initially extends, before a contraction follows at 70 or 100 °C.
- The few implemented tests indicate that the strength capacity of clay soil is not weakened by the heating. However, tests only cover temperatures up to 100 °C.

Settlement measurements/deformation measurements have been made at 18 points placed in soil, respectively on walls and on a chimney foundation. The measurements are implemented over a period of 5 years with the most frequent measurements during the heating process. Measurements unanimously indicate that no settlements or deformations occur, which neither now nor in the future will pose a risk for collapse of the building construction. Subsidence up to app. 10 mm has been registered, and as it appears quite consistent, it has apparently not caused any damage to the building. Consequently not a single crack has been observed in the walls or the floor, which can be related to settlements from the heating.

Furthermore, the deformation measurements show the same trend as seen in the laboratory tests referred to in the literature survey, initially swelling and subsequently settlement. This corresponds very well with the fact that the clay soil on the location must be characterised as strongly overconsolidated clay, even with relatively low clay content and low natural water content.

An extrapolation of the deformations shows, that some millimetres of settlement still remain, but none of them of a size of any importance to the stability of the building.

Comparing the knowledge obtained from the literature study with the experience of the project carried out by heating a moraine assessed going forward to be able to point to the following conditions as essential for thermal projects carried out in sediments made up of highly organic soils and cohesive soil:

- In organic soils as peat, mud, etc., significant settlements must be expected when the soil is heated to 80 or 100 °C or above. This because the soil is drying and because the soil skeleton can collapse.
- In deposits of e.g. melt water clay the size of settlement while the soil is heated depending on the natural moisture content and the consolidation ratio. Melt water clay is often only slightly consolidated and has a relatively high water content. When the soil is heated, considerable deformations in the soil skeleton can occur, which might result in great settlements of the soil surface.
- Typical Danish boulder clay has a clay content of 15 - 35%, being highly overconsolidated and a relatively low water content, 10 - 12%. In such deposits to now, the experience has shown that there has only occurred very small deformation in the soil skeleton and thus also only small settlements of the soil surface. This in turn means that the risk of settlements of the above structures is modest and, for the most part irrelevant in terms of stability of the building.
- In deposits of clay with high clay content (> 35%) there can be a risk of quite large deformations during heating. Although the case of overconsolidated deposits, may there in particular for tertiary clay occur shrinkage effects, which can be of a size that will pose a risk of excessive settlements in the soil surface. In order to clarify the scope of the settlements for this kind of soil, investigations should be carried out to determine soil strength and deformation parameters, and experiments on the determination of soil shrinkage and creep properties during heating.

The ground temperature measurements in this project show that the temperature towards the ground increases during the heating, but not drastically. This is presumably due to the surface not being insulated, and that the heat supply took place in depths deeper than app. 4 m. The heating could be critical as e.g. pipe material of PE, PVC and similar weakens already at temperatures of 60 °C. Besides the temperature increases can cause extension of the material and consequently risk of leakages.

The deep temperature monitoring showed that establishment of a steam bobble beneath the clay soil on the site had a very favourable impact on the heating of the lower app. 1 meter of the clay.

Steam migrated up through the clay and heated the lower part of the clay to 100 °C. The steam also caused that water dammed up from the water bearing sand layer was kept at an acceptable level. The water balance of the clay layer generally shows that the removed water volume can be explained as removal of the original pore water in the clay.

The geochemical methods have shown that a measurable in-situ destruction of the chlorinated compounds has not occurred during the clean-up, but that they have been removed with the pore air. On the other hand the examinations show a heavy pyrite oxidation with a consequent development of several tons of sulphuric acid. It is estimated that the acidity (pH) has not decreased significantly, as the clay contains limestone as a buffer, and as a large part of the carbon compounds presumably are extracted together with the chlorinated substance. An acidification has occurred, this appears from condensate from the clay in particular, which periodically has had a pH of 4 to 4.5, where it has been able to condensate and concentrate in the pipe systems of the remediation.

Recommendations. Based on the results of this project, it is recommended that in the future, when thermal projects is carried out, a careful recording of deformations of buildings is carried out, and especially the vertical deformations should be measured by a dense network of measuring points. In particular in case of sensitive structures it may also be appropriate to measure the horizontal movements of a structure to ensure it does not suffer damage during heating.

Generally it is recommended that in any thermal project as a minimum investigations including geological formation history, degree of pre-consolidation, clay content and, in special cases determination of the individual clay minerals, e.g. montmorillonite, should be carried out. Determining the clay minerals can especially be important if there are expectations that the soil may contain a significant portion of such.

It is also recommended that geotechnical investigations for determining soil strength, water content and in some cases the determination of the consolidation ratio is carried out. The ratio of pre-consolidation is important in relation to the prediction of the expected size of settlements that can be expected in connection with the heating.

Generally when heating a soil to about 100 °C settlements can be expected on the order of:

- 10 - 20 mm for pre-consolidated clay with clay content <30-35%
- cm size for non pre-consolidated clay, e.g., postal and late glacial clay deposits
- heavy consolidated sand will probably be modest in size, as clay (boulder clay)
- for other deposits of sand detailed investigations must be carried out to predict settlements.

In relation to the verification of the effect of the heating it is recommended, that the variations in temperature in the soil always is carefully monitored before, through and after heating the soil.

# 1. Indledning

## 1.1 Baggrund

Region Syddanmark har ved brev af 27. november 2006 anmodet Miljøstyrelsens om midler fra Miljøstyrelsens Teknologipulje til gennemførelse af supplerende målinger i forbindelse med et termisk oprensningsprojekt på Knullen 8, Odense. Oprensningsprojektet er beskrevet i et skitseprojekt /NIRAS 2006/. Ejendommen var forurenet med chlorerede opløsningsmidler som følge af langt tids renseridrift. Forureningen fandtes dels i et morænelerslag fra 0-11 meters dybde, dels i toppen af det underliggende primære sandmagasin. Størstedelen af forureningen var beliggende under bygningen for et vaskeri, der var i drift. Vaskeriet skulle desuden være i drift i oprensningsperioden.

Ved brev af 19. december 2006 til Fyns Amt har Miljøstyrelsen givet tilsagn til projektstøtte til de ansøgte aktiviteter, suppleret med et litteraturstudie. Region Syddanmark videreførte opgaven og gennemførte i 2007 detaljerede modelsimuleringer og udarbejdede efterfølgende et detailprojekt for den termiske oprensning. På baggrund af modelsimuleringerne viste det sig nødvendigt at foretage mindre justeringer i den termiske afværgeløsning som var skitseret i skitseprojektet.

I skitseprojektet var det forudsat, at opvarmningen kunne gennemføres som en ren termisk ledningsevne opvarmning, - også kaldet In Situ Termisk Desorption (ISTD) i kombination med etablering af hydraulisk kontrol af grundvandsstrømmen i det stærkt vandførende sand/gruslag under moræneleret. Den hydrauliske kontrol skulle medvirke til at reducere kølingen af den nedre del af oprensningsområdet, som følge af indstrømmende koldt grundvand til et minimum. Såfremt varmetabet alligevel blev for stort ville enten en betydelig afsenkning af grundvandsspejlet i eller damptilførsel til det primære magasin være supplerende tiltag til ISTD oprensningen i magasinet.

Modelsimuleringerne viste, at en ren ISTD løsning ikke ville sikre en tilstrækkelig opvarmning ved de aktuelle jordbunds- og magasinforhold. Simuleringerne viste, at der for det første skete en alt for stor køling i grundvandsmagasinet, og for det andet at der skete en kraftig køling af nærområdet omkring varmelegemerne i den nederste del af moræneleret på grund af oprængning af vand fra det primære magasin. Modelsimuleringerne fremgår af /NIRAS 2007 a/.

Projektet er derfor udført som en termisk oprensning med ISTD i kombination med dampstripping og ikke udelukkende ved anvendelse af ISTD som forventet forud for detailprojekteringen af anlægget. Det er første gang på verdensplan at de to termiske metoder er benyttet i kombination. Udbudsmaterialet fremgår af /NIRAS 2007 b/.

## 1.2 Afværgeprojekt

Afværgeforanstaltningerne har omfattet in-situ behandling af den forurenede jord i kildeområdet samt i et område beliggende nord for kildeområdet. Afværgeforanstaltningerne har omfattet termisk behandling af den forurenede jord til en dybde af ca. 14 m under terræn. De øverste ca. 11 meter af oprensningsområdet er overordnet set moræneler, mens der fra 11 m u.t og nedefter findes et højtydende sand-/grusmagasin.

Afværgeforanstaltningerne er gennemført som termisk oprensning i det primære magasin ved damp og i moræneleret ved elektrisk opvarmning (ISTD-metoden). Samtidig er der etableret hydraulisk kontrol og trykafledning ved grundvandssenkning i det vandførende sand-/grusmagasin.

Afværgeprojekt har i hovedtræk omfattet følgende elementer:

- Etablering og drift af grundvandssænkingsanlæg
- Etablering og drift af kulfilteranlæg til rensning af oppumpet grundvand
- Etablering af 9 borer til injektion af damp og to borer til ekstraktion af vand/damp.
- Etablering af 45 borer til elektrisk opvarmning og vakuumventilation af moræneleret.
- Etablering af 21 borer til måling af temperatur i flere dybder.
- Etablering af anlæg til ventilation af et terrænnært fyldlag under gulvet i pakkeri og renseri.
- Etablering af dampanlæg for injektion af damp
- Etablering af ISTD-anlæg for opvarmning af moræneler
- Drift af dampanlæg i ca. 30 døgn med maksimal dampinjektion og efterfølgende lavere injektion i resterende 75 døgn
- Drift af ISTD-anlæg i ca. 105 døgn.

Hele oprensningsområdet var beliggende under en eksisterende bygning, hvori der stadig pågik vaskeriaktiviteter, mens renseridriften blev nedlagt i 2008 umiddelbart forud for iværksættelsen af afværgeprojektet. Projektet blev udformet således, at virksomheden kunne opretholde produktionen under hele projektføreløbet.

Projektering, tilsyn og monitorering er løst af NIRAS A/S i samarbejde med TerraTherm, mens afværgeprojektet entreprenørmæssigt er udført af Arkil Miljøteknik A/S som hovedentreprenør og med Krüger som underentreprenør til etablering og drift af ISTD anlæg og datamonitering.

## 2. Teknologiprojekt – formål

Teknologiprojektet før og under den termiske oprensning har været opdelt i følgende fire dele:

1. Litteraturstudie mhp. indsamling af allerede publiceret viden omkring opvarmning af jorden og en deraf eventuel afledt sætningsproblematik.
2. Detaljeret deformationsmåleprogram før, under og efter oprensningen.
3. Udvidet monitorering af såvel terrænnære temperaturer som temperaturer i den dybereliggende del af opvarmningsområdet.
4. Massebalanceberegninger på geokemi

Formålet med de fire dele er nærmere beskrevet herunder.

### 2.1 Formål med litteraturstudium

Forud for idriftsættelsen af afværgeanlægget i februar 2008 gennemføres et litteraturstudie med videns indsamling om teoretisk og praktisk erfaring med gennemførelse af termisk oprensning ved brug af ISTD-metoden. En lang række af de maskintekniske og procesmæssige forhold for metoden er velkendte og veldokumenterede, og blev ikke vurderet at påkræve yderligere afklaring ved litteraturstudier.

Der var dog andre forhold, som det var relevant at undersøge nærmere ved et litteraturstudie. Målet med oprensningen var at alle områder af oprensningsområdet opnåede en temperatur på eller omkring vands kogepunkt, men erfaringsvist ville en sådan behandling medføre, at dele af oprensningsområdet tæt på varmeboringerne potentielt ville udtørres og efterfølgende opnå temperaturer væsentligt over 100 °C.

Som følge af denne opvarmning kunne det ikke udelukkes, at jordens styrke- og deformationsegenskaber blev ændret, og at der dermed ville være ændrede forhold ved belastning af jorden. Vurderingen af eventuel påvirkning af styrke- og deformationsegenskaberne for den opvarmede jord skulle foretages med udgangspunkt i både danske og udenlandske erfaringer, hvor sidstnævnte i bedst muligt omfang blev overført til danske jordarter. Udover en forventning om, at der ved allerede gennemførte termiske oprensninger foreligger relevant viden om sætningsmæssige problemstillinger, var det en forventning forud for gennemførelsen af litteraturstudiet, at der ville foreligge vis mængde relevant viden opsamlet i forbindelse med forundersøgelser for og etablering af underjordiske varmelagre, varmegenindvinding og lignende.

Litteraturstudiet har således haft til formål at samle eksisterende viden om hvilken betydning opvarmning af jord har haft for jordens styrke- og især deformationsmæssige egenskaber. Der er en del erfaringer med opvarmning til under vands kogepunkt, dvs. dermed også under porevandets kogepunkt, og litteraturstudiet skal derfor søge også at afdække, hvilken betydning dette har.

### 2.2 Formål med deformationsmålinger

Et af de spørgsmål der typisk opstår ved termiske oprensninger og en af de bekymringer andre bygherrer også vil have er, om der sker sætninger som følge af ændret volumen, eller ændret

struktur i jorden, specielt i ler under en termisk oprensning. Sætninger mv. har ikke tidligere vist sig som et problem i de udførte oprensninger, men bekymrer stadig, og jo mere terrænnært, des mere aktuelt. Specielt ved termisk oprensning ved ISTD kan dette spørgsmål være relevant, da metoden medfører en delvis udtørring af jorden.

Det udtørrede areal under en ISTD-oprensning udgør typisk mindre end 5 % af det samlede areal der opvarmes. Derfor ændres den samlede bærekraft af formationen sandsynligvis ikke væsentligt. Dette er bl.a. analyseret i en endnu upubliceret artikel om oprensningen på Point Richmond, hvor blot 3 % af volumen blev tørret ud /LaChance et al 2006/.

Ved præcisionsnivelementer udført før, under og efter oprensningen undersøges direkte i hvilket omfang opvarmningen giver anledning til deformationer i jorden og dermed omfanget af risiko for utilsigtede sætningsskader på de overliggende bygninger.

### **2.3 Udvidet temperaturmonitoring**

I forbindelse med udvikling og implementering af nye termiske oprensningsteknikker og især kombination af teknikker er der særlige forhold det er vigtigt at belyse for at opnå den mest effektive tekniske-/økonomiske løsningsmetode. Da termiske oprensninger ofte sker i bebyggede områder er det en udfordring ikke at beskadige eksisterende installationer.

Et af formålene med dette teknologiprojekt har således været, at belyse temperaturudviklingen mod terræn og i hvor høj grad terrænnære installationer som ledninger og fundamenter blev påvirket af opvarmningen i oprensningsperioden.

Et andet formål var at belyse hvilken effekt dampopvarmningen i det underliggende vandførende sand-/gruslag havde på det overliggende lerlag og i hvilken grad dampuden, der medfører lav mætningsgrad i laget, ville reducere optrængningen af grundvand til lerlaget. Disse forhold er blevet belyst ved en intensiv monitoring af temperaturudviklingen i dampzonen og det overliggende lerlag.

### **2.4 Formål med massebalance for geokemi**

Målinger på flere gennemførte projekter med ISTD indikerer, at der ekstraheres væsentligt mere kulstof end det umiddelbart kan forklares ud fra afgangning af kuldioxid og metan ved vandets opvarmning. Dette indikerer, at in-situ oxidation og pyrolyse kan spille en væsentlig rolle for forureningsfjernelsen. Dette er af stor forståelsesmæssig betydning, og hvis fænomenet viser sig at være en markant fjernelsesvej for forureningen, kan det ligeledes pege i retning af anvendelse af termiske metoder overfor svært flygtige stoffer, hvor der så primært sigtes efter en in-situ destruktion.

Der er derfor behov for at kunne beskrive omfanget af disse processer kvantitativt gennem målinger før, under og efter oprensning med ISTD. Disse problemstillinger har indgået i evalueringen af det termiske oprensningsprojekt på lokaliteten på Knullen 8.

Formålet med at opstille massebalancer for udvalgte geokemiske parametre er at demonstrere hvorledes denne metodik kan kvantificere de væsentligste geokemiske processer som følge af anvendelse af ISTD alene eller sammen med f.eks. dampoprensning.

## **2.5 Læsevejledning**

I kapitel 3 beskrives indhold og resultater af det udførte litteraturstudie, som har til formål at opsamle erfaringer med hvilken betydning opvarmning af lerjord har for jordens styrke- og deformationsegenskaber.

Der er udført præcisionsnivelementer i det opvarmede område til undersøgelse af de faktiske deformationer, der måtte finde sted i jorden på lokaliteten såvel som i bygningsdele. Resultater af disse målinger er beskrevet i kapitel 4.

I kapitel 5 vurderes hvilken effekt opvarmning har haft på terrænnære installationer samt hvilken effekt damptilførslen har haft på opvarmningen af den nedre del af lerlaget på lokaliteten.

I kapitel 6 redegøres for ændringer i de geokemiske forhold som opvarmningen forventedes at have medført. Herunder er belyst om der er indikationer af at opvarmningen har medført oxidation og dermed destruktion af forureningen samt ændringer i den geokemiske forhold i jorden ved f.eks. dannelse af pyrit.



# 3. Litteraturstudie

## 3.1 Beskrivelse af udført litteraturstudie

Litteratursøgningen er gennemført på Statsbiblioteket i Århus den 22. til 28. januar 2008 og dækker således publiceret materiale i de anvendte søgedatabaser frem til dette tidspunkt. I forbindelse med litteratursøgningen har forskningsbibliotekar ved Statsbiblioteket, John Kruuse, bistået med hjælp til præcisering og målretning af søgningen samt til udpegnig af relevante søgedatabaser.

### 3.1.1 Anvendte søgedatabaser og kilder

Følgende søgedatabaser og kilder er benyttet i forbindelse med litteraturstudiet [Kruuse, 2008]:

- Web of Science. Søgedatabasen går tilbage til 1945 og dækker udelukkende de mest indflydelsesrige tidsskrifter. Web of Science er identisk med Science Citation Index Expanded. I alt er ca. 6.500 tidsskrifter dækket af søgedatabasen. I Web of Science er det muligt at lave søgninger ud fra særligt relevante referencer (Related records-søgninger).
- SCOPUS. Databasen er en forholdsvis ny søgedatabase og dækker referencer tilbage til 1996. I alt dækker søgedatabasen ca. 15.000 tidsskrifter inden for natur- og sundhedsvidenskab. I SCOPUS er kun artiklens titel og eget abstrakt søgbare.
- Google Scholar. Som supplement til søgninger i ovenstående søgedatabaser er søgemaskinen Google Scholar ligeledes benyttet i begrænset omfang. Google Scholar dækker videnskabelige artikler publiceret eller nævnt på Internettet, herunder bl.a. afhandlinger, specialer, bøger, uddrag og artikler anmeldt af fagfolk fra akademiske forlag, faglige sammenslutninger, dokumentdatabaser, universiteter og andre videnskabelige organisationer.

### 3.1.2 Fremgangsmåde ved søgning

I databaserne er der søgt på relevante søgeord som for eksempel

- Soil strength and deformation caused by heating
- Thermomechanical soil behaviour
- Heating of clay
- Temperature dependence of clay strength
- Subsidence of soils caused by heating
- Temperature related bearing strength of soils
- Temperature effects on behaviour of clays
- Thermomechanical analysis of soil samples
- Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of clay
- Consolidation of clays

Søgeresultaterne er efterfølgende overført elektronisk til det webbaserede referencehåndteringsprogram RefWorks, og alle referencer er herefter håndteret elektronisk for at minimere fejl.

### 3.1.3 Sortering af referencer

Ved søgningen forekommer dubletter af referencer, dvs. samme reference fundet under flere søgninger med forskellige søgeord eller i flere søgedatabaser. Frasorteringen af dubletter er

foretaget elektronisk i RefWorks. De resterende referencer er efterfølgende sorteret manuelt. Den manuelle sortering er foretaget med udgangspunkt i artiklens titel samt det tilhørende abstrakt. Der er i første omgang gennemført en grovsortering, som efterfølgende er fulgt op af en finsortering.

Ved grovsorteringen er artikler frasorteret, som umiddelbart ikke er relevante i forbindelse med den konkrete termiske oprensning på Knullen 8. Her er især artikler om opvarmning af kalk, fjeld, bløde lerlag og referencer som ikke direkte behandler termisk påvirkning af jord (f.eks. plastisk lers mulighed som depot for atomaffald og termisk opvarmning af porøse medier som sand og grus) frasorteret.

Ved finsorteringen er hvert enkelt abstrakt nærlæst af to personer, som har vurderet, om artiklen kan tilføre projektet ny viden eller ej.

I Bilag 1 er vedlagt en liste over samtlige søgeresultater fundet ved den gennemførte litteratursøgning. Resultatet af litteratursøgningen er angivet i tabel 3.1.

	Antal
<b>Samlet antal referencer</b>	403
<b>Referencer til manuel sortering</b>	73
<b>Referencer efter manuelle sortering</b>	23
<b>Artikler bestilt og hjemkommet</b>	24
<b>Artikler vurderet relevante for Knullen 8</b>	10

TABEL 3-1

UDVÆLGELSES PROCES FOR LITTERATUR VED DEN GENNEMFØRTE SØGNING

Der er således identificeret 23 artikler ved litteratursøgningen, som er vurderet relevante. De 23 artikler er efterfølgende forsøgt bestilt hjem.

Ud over de ved søgningen fundne artikler er der yderligere indsamlet 11 abstracts/artikler ved brevveksling med universiteter i bl.a. USA, Australien, Brasilien mf. Samtidig viste det sig, at dele af de 23 artikler lokaliseret ved litteraturstudiet ikke var tilgængelige. Samlet set er der hjemkommet og gennemgået 24 artikler, jf. bilag 12, hvoraf 10 er fundet relevante for dette projekt.

I det følgende er resultatet af litteratursøgningen præsenteret.

### **3.2 Termisk indvirkning på jords styrke og deformationsegenskaber**

I det følgende omtales resultater af forsøg med opvarmning af jord og hvilken betydning opvarmningen har med hensyn til forøgede deformationer. Hovedparten af de omtalte forsøg har omfattet opvarmning til 60 °C á 90° C, altså til en temperatur der er mindre end vands kogepunkt. Dertil kommer at forsøgs materialet væsentligst har omfattet en lertyper benævnt ”Soft Bangkok clay”, Boom clay eller bentonit, der er et industrielt produceret lerprodukt.

Potentielt medfører parametre som højt vandindhold, plasticitetsindeks m.m. stor risiko for svind ved fjernelse af porevand, f.eks. ved opvarmning.

En anden parameter der er vigtig ved forståelse af en lerjords fysiske egenskaber er graden af forkonsolidering, dvs. den forbelastning som jorden har været udsat for i historisk tid. I Danmark er forbelastningen typisk sket ved den belastning som de ca. 1,2 km gletsjer is har udøvet under de forskellige istider. For udenlandske lere kan noget tilsvarende være sket, hvor der har været tale om isdække af landskabet, eller jordprøver kan være udtaget i stor dybde og dermed forbelastet af overliggende jord.

Endelig sker det ofte, at der i forbindelse med laboratorieforsøg foretages en forbelastning af prøven inden egentlige forsøg udføres. I litteraturen er betegnelsen "overkonsolideringsgrad" OCR ofte anvendt. OCR er et udtryk for forholdet mellem den belastning en given jord har været udsat for i forhold til det spændingsniveau som jordprøven aktuelt befinder sig i.

Det særlige ved overkonsolideret jord er, at jorden "husker" den belastning den har været udsat for. Ses på danske forhold er jorden forbelastet af isen med et tryk på op til 1.200 MPa, hvorefter isen er smeltet og jorden aflastet. Genbelastning til 1.200 MPa vil kun medføre mindre deformationer, mens belastning ud over dette tryk giver noget større deformationer. Dette gælder for alle lerjorder uanset lokalitet.

Inden der gives en nærmere beskrivelse af resultaterne af de foreliggende forsøg skal det nævnes, at den nødvendige temperatur for oprensning af fri fase tetrachlorethylen (PCE) er ca. 90 °C, idet kogepunktet for et to-fase system mellem vand og PCE er 87 °C. Det er ønskeligt at varme højere for også at fjerne den sorberede fraktion af PCE, men værdien af de forsøg der er udført under opvarmning til 90 °C anses for væsentlig.

### 3.2.1 Klassifikationsparametre

I tabel 3.2 er givet en oversigt over typiske klassifikationsparametre for de lerarter, der er refereret til i efterfølgende afsnit. Til sammenligning er desuden medtaget samme parametre for dansk moræneler og smeltevandsler jf. /Bent Hansen 1978/.

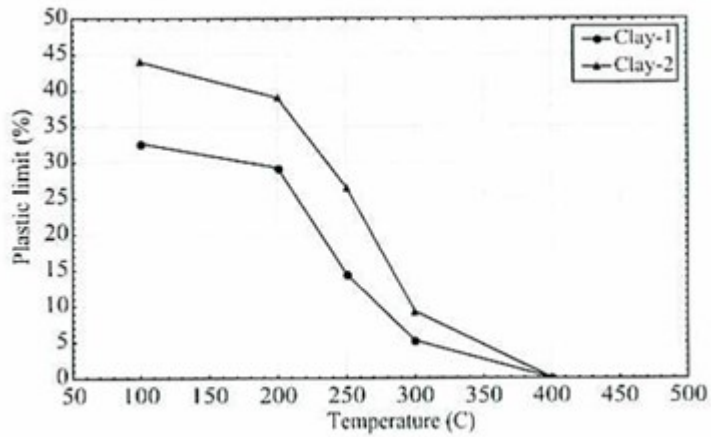
Lertype	Naturligt	Flyde- grænse	Plasticitets- index	Kornfordeling		
	vandindhold			Ler	Silt	Sand
Soft Bangkok Clay	90 - 95	103	60	69	28	3
Todi clay		52	30	45	53	2
Fiumicino clay		55	32	45	52	3
Bologna clay		63	38	54	46	0
Clay 1		53	20	51	36	13
Clay 2		71	27	54	39	7
Boom Clay, EU	26	70	44	55		
Smeltevandsler, DK	20	30	12	25		
Moræneler, DK	15	20	8	22		

TABEL 3-2  
KLASSIFIKATIONSEGENSKABER FOR FORSKELLIGE JORDARTER

Ovennævnte klassifikationsdata viser, at lerindholdet i de undersøgte jordarter generelt er højere end i dansk moræneler ligesom plasticitetsindekset også er større end i moræneler hhv. smeltevandsler. Der foreligger kun få oplysninger om det naturlige vandindhold i de undersøgte lere. Det naturlige vandindhold er en indikator for lerets porevolumen og dermed også i hvilket omfang leret kan svinde (sætte sig) ved afdræning/udtørring.

Potentielt medfører parametre som højt vandindhold, højt plasticitetsindeks m.m. stor risiko for svind ved fjernelse af porevand, f.eks. ved opvarmning.

Tan et al. (2004) har undersøgt i hvilken grad en lerjord ændrer karakter ved opvarmning over 100 °C. Forsøget omfattede opvarmning i step af 100 °C op til 1.000 °C. Efter opvarmningen er jorden opfugtet, og optimalt vandindhold, flydegrænse (wL) og plasticitetsindeks m.m. er bestemt. Fælles for stort set alle forsøg er, at leret skifter karakter for de prøver, der har været varmet op til over 200 °C á 400 °C, se figur 3.1 for plasticitetsindeks. For prøver der har været opvarmet til over 400 °C tyder forsøgene på, at de ikke genvinder lerets kohæsionsevne, og måske mere bliver et friktionsmateriale. Allerede fra 250 °C begynder lerets kohæsive egenskaber at forsvinde betydeligt.



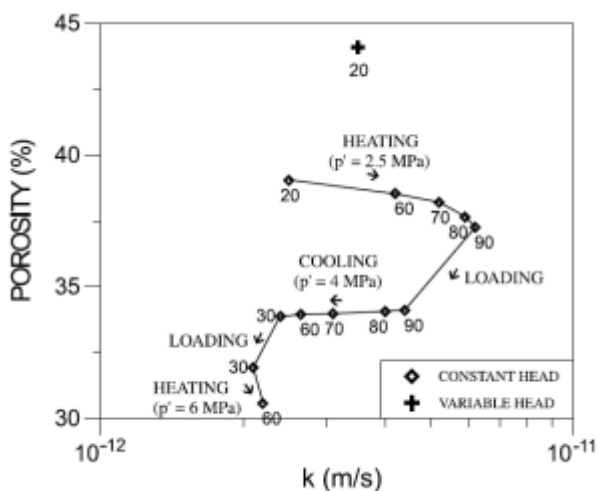
FIGUR 3-1  
PLACITICITETSINDEKSETS AFHÆNGIGHED AF TEMPERATUR /TAN ET AL 2004/.

Under oprensningen på Knullen har måltemperaturen været 100 °C, men i visse områder er leret udtørret og er efterfølgende blevet opvarmet til temperaturer over kogepunktet for vand. I en zone umiddelbart omkring varmelegemerne kan det ikke udelukkes, at jorden på Knullen 8 har haft en højere temperatur (> 200 °C) da varmelegemernes temperatur har været over 400 °C i perioder under oprensningen. Det vurderes dog, at kun moræneleret lige omkring varmelegemerne har været varmet op til kritisk høje temperaturer, dvs. over 300 °C, hvor det ikke kan udelukkes at leret ændrer egenskaber.

### 3.2.2 Permeabilitet og temperatur

For lertypen Boom Clay er der i /Delage et al. 2000/ foretaget forsøg med undersøgelse af om jordens permeabilitet ændrer sig med temperaturen. Forsøget er udført dels under konstant tryk dels ved øgning af trykket som jorden er udsat for under forsøget. Indledningsvis blev lerprøven mættet og belastet med i isotrop spænding på 2,5 MPa ved 20 °C. Herefter blev temperaturen øget i step af 10 °C indtil 90 °C. Belastningen øgedes til 4 MPa og prøven afkøles til 30 °C før spændingen øges til 6 MPa, hvorefter temperaturen igen hævedes til 60 °C.

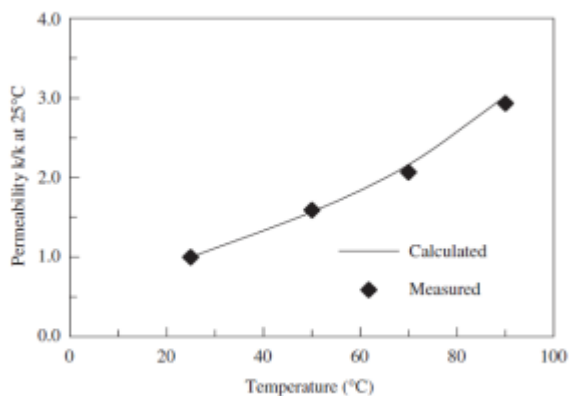
Undervejs i forsøget blev permeabilitet og ændringer i porøsitet målt. Resultaterne fremgår af figur 3.2.



FIGUR 3-2  
PERMEABILITETSFORSØG MED BOOM CLAY VED FORSKELLIG TEMPERATUR /DELAGE ET AL. 2000/.  
TEMPERATURER ANGIVET I °C VED HVERT PUNKT. P' AKTUELT ISOTROP TRYK PÅ PRØVEN.

Ved den første opvarmning sker der en mindre komprimering af prøven (permeabiliteten falder), mens permeabiliteten forøges svagt, fra  $2,5 \times 10^{-12}$  m/s til  $6,2 \times 10^{-12}$  m/s. Ved efterfølgende at øge spændingen med 4 MPa sker der en mere markant sætning af prøven, hvor porøsiteten falder med 3,2 % ligesom permeabiliteten også falder. I afkølingsfasen falder permeabiliteten yderligere, mens porøsiteten stort set ikke ændres. Ved belastning op til 6 MPa og øgning af temperatur fra 30 °C til 60 °C sker der stort set ikke nogen ændring i permeabiliteten mens porevoluminet (porøsiteten) mindskes ret kraftigt fra ca. 34 % til 31 %.

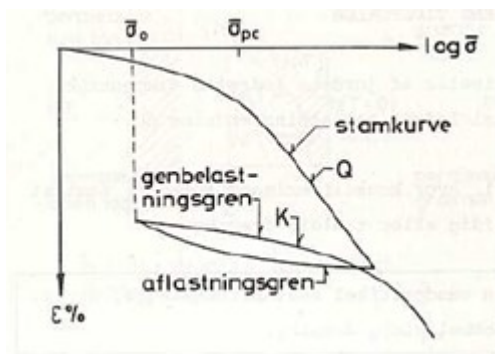
For dette forsøg og forsøg refereret med andre lere er der generelt observeret en god lineær sammenhæng mellem porøsitet og logaritmen af permeabiliteten, samt at permeabiliteten forøges under stigende temperaturer selvom porøsiteten falder. Den stigende permeabilitet skal formodentlig og i et vist omfang henføres til at vands viskositet falder med stigende temperatur jf. /Abuel-Naga et al. 2006/, se figur 3.3.



FIGUR 3-3  
TEMPERATUR EFFEKT PÅ PERMEABILITET /ABUEL-NAGA ET AL. 2006/.

### 3.2.3 Deformationsegenskaberens temperaturafhængighed

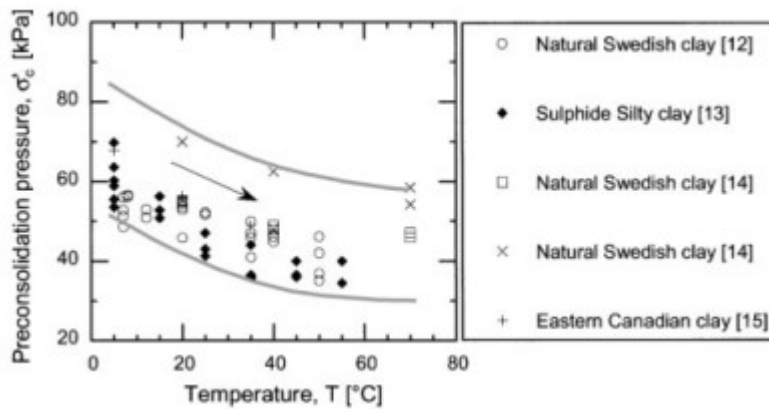
Den forbelastning en jord har været udsat for har stor betydning for, hvilke deformationer efterfølgende belastninger vil give anledning til. Så længe det samlede trykniveau, dvs. in-situ trykket samt tillægstrykket fra f.eks. en bygning, er mindre end forbelastningen vil dette sædvanligvis kun medføre små deformationer, også over tid. Belastning ud over forbelastningen kan derimod give anledning til væsentlige deformationer. På nedenstående figur 3.4 er vist en typisk konsolideringskurve med forbelastning, aflastning, genbelastning og belastning ud over forbelastningen.



FIGUR 3-4  
KONSOLIDERINGSFORSØG.  
σ: Spænding/belastning. ε: Deformation, relativ

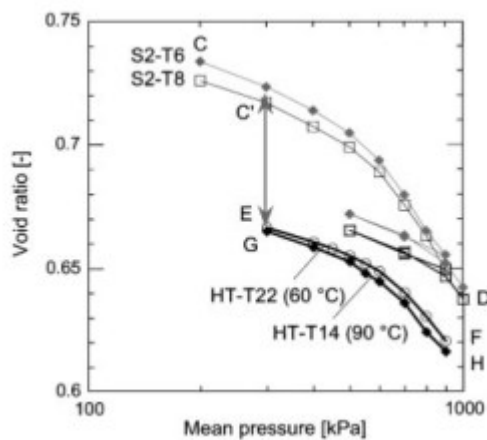
Cekerevac et al. 2004 har samlet resultater fra litteraturen vedrørende sammenhæng mellem forbelastning og temperatur i jorden. Som det ses af figur 3.5 falder det forbelastningstryk en jord

kan modstå med stigende temperatur. Og det er tilsyneladende gældende for et bredt udvalg af jordtyper. Det vil sige at jord, der har været udsat for høje temperaturer, hurtigere når forbelastningstrykket, og ved belastninger/tryk ud over dette vil den opføre sig som normalt konsolideret jord. Dermed vil der initieres større sætninger ved øget belastning.



FIGUR 3-5  
TEMPERATURENS BETYDNING FOR FORBELASTNINGSSPÆNDINGEN /CEKEREVAC ET AL. 2004/.

Detaljerede forsøg med en CM-ler (kaolin) med et plasticitetsindex på 24 % viser, at alene det at øge temperaturen medfører en sammentrykning af jordskelettet, mens en øgning af belastningen af jordprøven under forskellige temperaturer kun i beskedent omfang giver anledning til øget deformation. Deformationen som følge af øget temperatur virker faktisk som en form for forbelastning, idet hældningen af kurverne HT-T22 og HT-T14 er mindre end for prøverne S2-T6 og S2-T8, se figur 3.6.

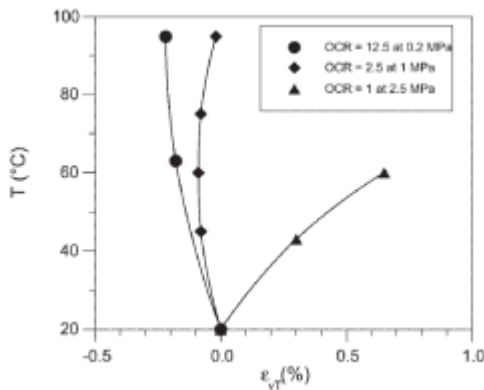


FIGUR 3-6  
KONSOLIDERINGSFORSØG VED FORSKELLIGE TEMPERATURER.

Endvidere ses af figurs 3.6, at i genbelastningsforløbet ved 60 °C hhv. 90 °C forekommer der større deformationer, større hældning af kurven, ved tryk over 600 kPa, der svarer til forbelastningstrykket. Dette er i overensstemmelse med øvrige refererede forsøg.

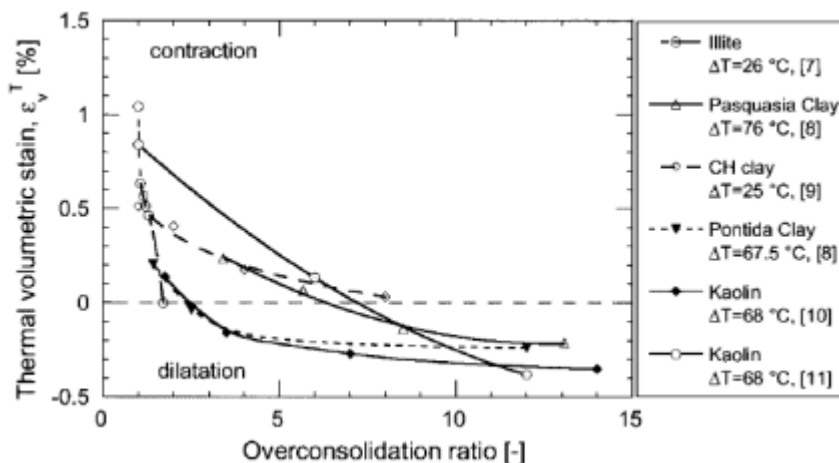
/Cui et al. 2000/ nævner, at der er adskillige referencer på at næsten uanset lerjordenes plasticitetsindex ( $I_p$  11 % á 84 %) så er volumenforandringen for en given lerjord i forbindelse med opvarmning stærkt afhængig af OCR værdien. Således ses ved lave OCR (~1) en vis volumenforandring (sætning) mens for OCR større end 1,7 ses næsten ingen deformationsændringer inden for det undersøgte temperaturinterval, op til 90 °C. I nedenstående figur 3.7 ses resultaterne af et opvarmningsforsøg med en omrørt (ikke intakt) Pontida clay. Prøven belastes indledningsvis til 2,5 MPa som førstegangsbelastning, dvs. OCR =1.

Opvarmes denne prøve ses, at der med det samme sker sætninger af prøven. Ved højere OCR værdier sker der derimod det, at prøven faktisk udvider sig. Dvs. opvarmningen giver anledning til at kornskelettet udvider sig, mens jordmatrix på grund af forbelastningen ikke ændrer struktur og dermed ikke trækker sig sammen (sætter sig). Ved middelforbelastningen,  $OCE = 2,5$ , ses, at der er et vendepunkt omkring  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hvor jordskelettet begynder at trække sig sammen. Graden af forbelastning er således afgørende for hvornår en jord sætter sig under opvarmning og/eller hvor meget den faktisk vil udvide sig.



FIGUR 3-7  
BETYDNING AF OCR I FORHOLD TIL TEMPERATURINDUCEREDE VOLUMENFORANDRINGER /CUI ET AL. 2000/.  $\epsilon_{vT}$  (%) ER RELATIV VOLUMENÆNDRING. NEGATIVE VÆRDIER INDIKERER EN UDVIDELSE AF PRØVEN MENS POSITIVE VÆRDIER INDIKERER EN SAMMENTRÆKNING (SÆTNING) AF PRØVEN.

Samme konklusion når Abuel-Naga et al. 2005 og Cekerevac et al. 2004 frem til for en Bangkok clay, der er en jord med forholdsvis højt  $I_p$  (60 %) og højt naturligt vandindhold (90 %). I figur 3.8 er vist sammenhængen mellem OCR og deformationer som følge af opvarmning af forskellige lere og lermineraller.



FIGUR 3-8  
FORHOLD MELLEMLER OVERKONSOLIDERINGSGRAD OG TERMISK VOLUMENÆNDRING /CEKEREVAC ET AL. 2004/.

Dette er i god overensstemmelse med resultaterne for Pontida clay og andre, og samlet må konklusionen være, at den temperatur hvor jordskelettet skifter fra udvidelse til sammentrækning (sætning) øges med øget værdi af OCR.

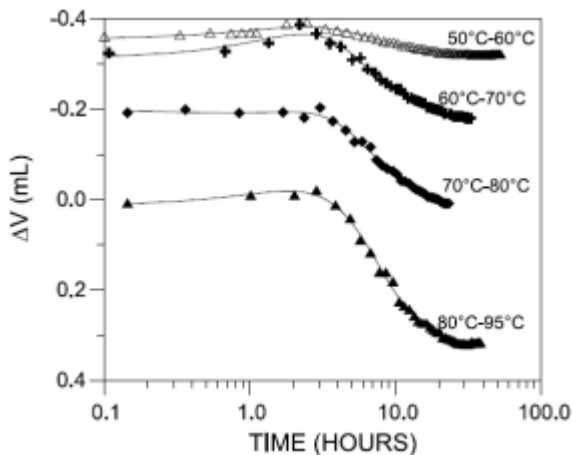
Flere forfattere nævner, bl.a. Cui et al. 2000, at det er vigtigt at afkølingsfasen kontrolleres og at afkølingen sker så tilpas langsomt, at både jord og porevand kan nå at stabilisere sig under de givne temperaturer. Faktorer som varmekapacitet og udvidelseskoefficient er således en faktor 2 hhv. 15 større for vand end for våd jord. Cui nævner desuden, at der i litteraturen ses eksempler på at der

sker en udvidelse af matrix under afkølingsfasen. Dette kan være forårsaget af en øjeblikkelig afkøling, hvorfor resultaterne bør granskes nærmere med hensyn til den efterfølgende tidlige udvikling af deformationerne.

Når en jordmatrix bliver udsat for øgede spændinger giver det i et eller andet omfang anledning til deformationer. Den øgede spænding kan være forårsaget af f.eks. belastning fra en konstruktion eller termisk påvirkning. Ved aflastning herunder afkøling sker der en reversibel proces hvad både spændinger og deformationer angår. Spændingen er selvsagt fuldt reversibel, men dette gælder ikke altid for deformationerne, idet der under den øgede spænding er sket enten en plastisk forandring af kornskelettet eller omfordeling af kornene således, at den samlede masse fylder lidt mindre. Forholdet nævnes bl.a. af Cui et al. 2000 i forbindelse med opvarmningsforsøg på jord.

Sekundær konsolidering eller krybning ses oftest i forbindelse med øgede spændinger, hvor deformationen som følge af et øget spændingsniveau klassisk efter en tid aftager når primærdeformationen er overstået. Herefter indtræder en langvarig men beskedent deformation, hvor tilvæksten i deformationer er konstant over en tidsmæssig dekade. Dvs. tillægsdeformationen er den samme for intervallet 1 – 10 år som 10 – 100 år.

Den tidsmæssige udvikling af deformationerne er beskrevet i /Delage et al 2000/ for et prøveemne, der sekventielt er opvarmet til forskellige temperaturer. Afkølingsfasen er dog ikke fulgt. Resultaterne fremgår af nedenstående figur 3.9, der dog ikke omfatter de første opvarmningstrin op til 50 °C. Prøven er indledningsvis belastet til 4 MPa, og efterfølgende aflastet til 2 MPa under laboratorietemperatur, ca. 20 °C. Forsøget er således udført med en OCR værdi for prøven på 2. Prøvematerialet er Boom clay.



FIGUR 3-9  
TERMISK KONSOLIDERING. FIGUREN VISER VOLUMENÆNDRINGER AF EN JORDPRØVE UNDER KONSTANT TRYK MENS DEN OPVARMES. NEGATIVE TAL SVARER TIL AT PRØVEN UDVIDER SIG /DELAGE ET AL./.

Som det ses af figuren sker der en mindre hævnning af prøveemnet ved opvarmning til ca. 50 °C, hvorefter hvert øget temperaturstep medfører en sammentrækning af prøven (sætning). Og opvarmet til 95 °C er der således tale om en netto sammentrækning af prøvelegemet, dvs. positiv sætning.

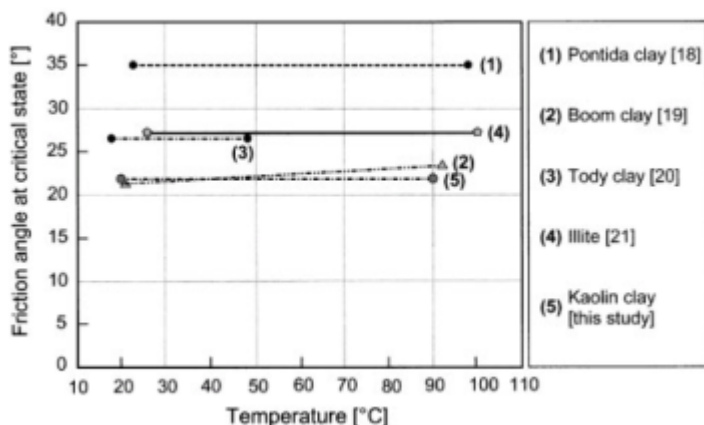
#### 3.2.4 Styrkeegenskabers temperaturafhængighed

Jordens styrkeegenskaber beskrives typisk ved forskydningsstyrke og friktionsvinkel for kohæsionsjorde (lerjorde) og friktionsvinkel friktionsjorde (typisk sand/grus).

I /Cekerevac et al. 2004/ er lavet en opsamling på hvilken betydning opvarmning har for friktionsvinklen for forskellige lerjorde. Resultatet fremgår af figur 3.10. Det ses heraf, at hvad



angår styrkeparameteren friktionsvinkel, så betyder det ikke noget om jordens temperatur er 22 °C eller 90 °C á 100 °C.



FIGUR 3-10

FRIKTIONSVINKLENS AFHÆNGIGHED AF TEMPERATUR /CEKEREVAC ET AL.2004/.

For Boom clay er der dog en tendens til at friktionsvinklen øges lidt med stigende temperatur, hvilket der ikke er nogen nærmere forklaring på.

Forsøg udført af /Cekerevac 2004/ viser, at forskydningsstyrken bestemt ved drænedede triaxialforsøg viser tegn på en lidt højere styrke ved lave deformationer, mens forskydningsstyrken ved høje deformationer (flydning) udviser samme værdier uanset temperatur.

Konklusionen på de resultater der er opnået ved forsøg med opvarmning af jord er, at en lerjords styrke ikke forringes ved opvarmning til omkring 100 °C. Der er ikke udført forsøg med opvarmning til højere temperaturer, men drages paralleller til klassifikationsforsøgene, afsnit 3.2.2 figur 3.1 vurderes en lers egenskaber ikke at ændre sig væsentligt, så længe temperaturerne ikke overstiger 200 á 250 °C. Ved højere temperaturer sker der tilsyneladende ændringer i lerstrukturen, idet f.eks. Ip er faldende ved temperaturer højere end 250 °C. Tilsvarende kan det forventes, at der vil ske en reduktion i lerets styrkeparametre, som bl.a. indikeret ved fald i forbelastningsspændingen med stigende temperaturer, jf. figur 3.5.

# 4. Præcisionsnivelementer

## 4.1 Etablering af målepunkter

Med henblik på at registrere eventuelle bevægelser af bygningen og jordmatricen under og efter opvarmningen er der installeret en række målepunkter til observation af bevægelser i hhv. jord, gulv, vægge og skorsten på bygningen Knullen 8. Der er målt i følgende punkter:

Punkt nr.	Bygningsdel
N1	Gulv i fyrrum
N2	Væg fyrrum/pakkeri
N3	Fundament til skorsten
N4	Fundament til skorsten
N5	Væg pakkeri/reneri
N6	Punkt i jord, 1 m u. gulv i pakkeri
N7	Punkt i jord 1 m u. gulv i pakkeri
N8	Væg pakkeri/sortering
N9	Væg pakkeri/sortering
N10	Gulv, renseri
N11	Punkt i jord i renseri
N12	Væg renseri/vaskeri
N13	Væg renseri/vaskeri
N14	Punkt i jord, 1 m u. gulv i renseri
N15	Gulv renseri
N16	Væg renseri/sortering
N17	Punkt i jord, 1 m u. gulv i sortering (ref.)
N18	Søjle i nordvæg i vaskeri
Top skorsten	X og Y koordinat

**TABEL 4.1.**  
PLACERING AF NIVELLELEMENTSPUNKTER PÅ KNULLEN 8.

Placeringen af nivellementspunkterne er vist i planen bilag 3. Punkter i jord er etableret ved boring af et hul til ca. 1 m's dybde og herefter faststøbe en jernstang i bunden af hullet. Hullerne og dermed målestængerne er beskyttede af dæksler faststøbt i betongulvet.

Første nivellement er foretaget i 21. februar 2008, dvs. før etableringsarbejdet med selve afværgeforanstaltningen blev påbegyndt. Herefter er der udført 13 nivellementsrunder med sidste runde i den 18. februar 2014.

#### **4.2 Resultater og vurderinger**

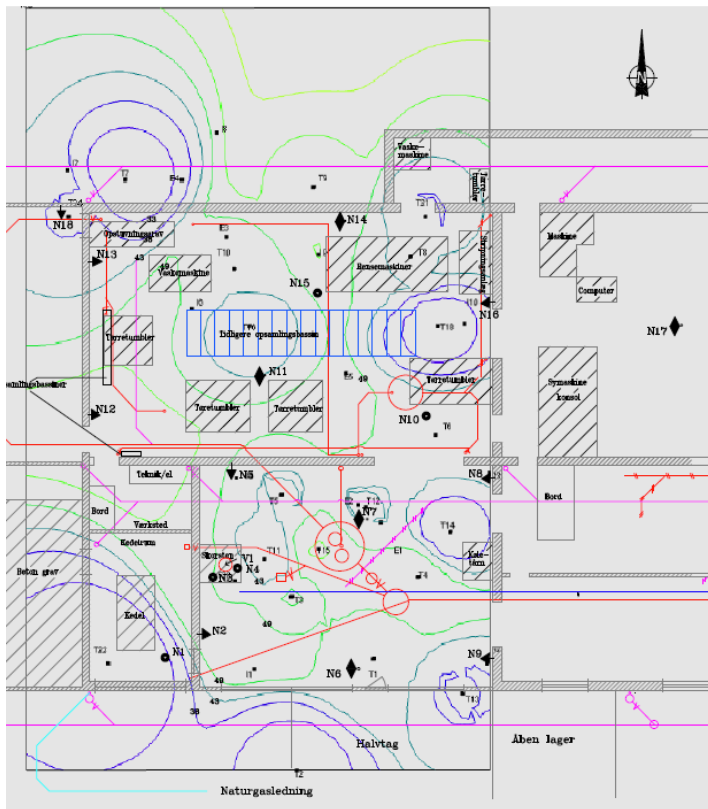
Deformationsmålingerne er gennemført som præcisionsnivellementer med en målenøjagtighed på  $\pm 1$  mm. Som referencepunkter er valgt et punkt på villaen Knullen 8's sydvesthjørne, et nyetableret punkt ud for indgang til vaskeriet samt et punkt på betonrampe til container mod vest. Ud over disse målinger er også toppen af virksomhedens skorsten fulgt ved måling af horisontale udsving. Målingerne er udført af Landinspektørfirmaet LIFA i Odense.

Resultaterne af samtlige målinger er angivet i bilag 4\_1, mens bilag 4\_2 til 4\_4 viser resultater for hhv. jord, gulv og vægge.

Det samlede billede af deformationsmålingerne viser, at opvarmningen giver anledning til en mindre hævnning i alle punkter på op til 7 mm og at der i den efterfølgende afkølingsfase sker sætninger på op til ca. 10 mm i forhold til udgangspunktet. Fælles for alle punkter er, at der ses en mindre sætning lige før opvarmningen påbegyndes på op til 3 mm. Der er ikke nogen umiddelbar forklaring på dette, idet der kun er foretaget installationsarbejder og borearbejde. Udførelsen af boringer udgør så lille et indgreb, at dette ikke burde kunne medføre de registrerede sætninger.

*Jord.* Opvarmningsfasen giver anledning til en mindre hævnning i jorden på 3 – 4 mm. For jordmålingerne er N17 valgt som et referencepunkt, hvor opvarmningen ikke forventedes at have indflydelse på jordens deformationer, idet dette punkt er etableret en væsentlig afstand fra det opvarmede område. Punktet hæver sig ca. 2 mm ifb. med opvarmningen og er ved at være tilbage på udgangsniveauet i 2010 mens der i 2014 måles en mindre sætning, som måske kan være krybning. Punkt N6 var placeret i kanten af opvarmningsområdet, og her ses en lidt større sætning, 2 – 4 mm. Punkterne N7 og N11 var placeret midt i opvarmningsområdet, og her ses sætninger op til 11 mm, men også at sætningerne starter allerede under opvarmningen, dvs. efter målingen d. 5. august 2008. Dette er formentlig en konsekvens af at jordens mætningsgrad falder. Der er dog stadig tale om meget små deformationer.

Målepunkterne i jorden er etableret ned til 1 m's dybde. Temperaturen i denne dybde ved opvarmningens afslutning fremgår af figur 4.1 og bilag 5. Som det fremgår af figur og bilag har temperaturen i jorden i 1 m's dybde højest været 50 °C. For en én meter stålstang vil en temperaturøgning på ca. 30 °C højest betyde en udvidelse af stålet på 0,4 mm, hvilket ikke influerer afgørende på de faktiske målte deformationsændringer i jorden.

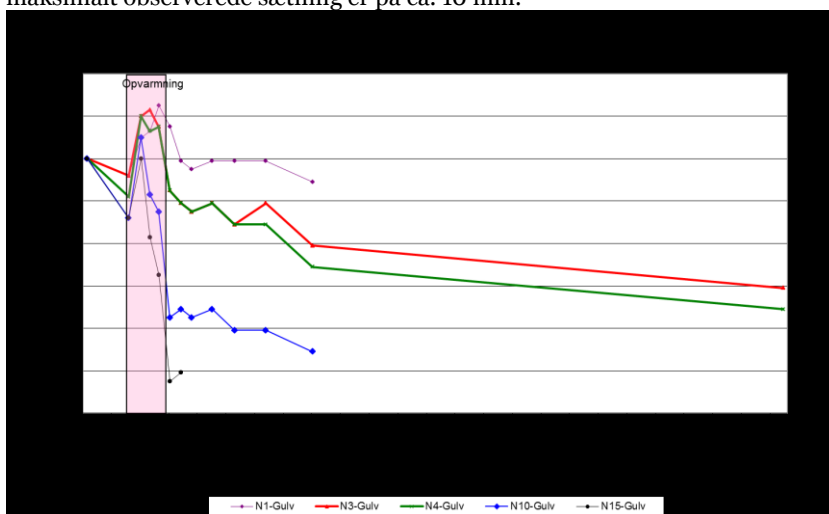


N: Nivellementspunkt. T: Temperaturmålepunkt. Temperatur i °C i 1 m's dybde.

**FIGUR 4-1**  
PLACERING AF NIVELLEMENTS- OG TEMPERATURMÅLEPUNKTER.

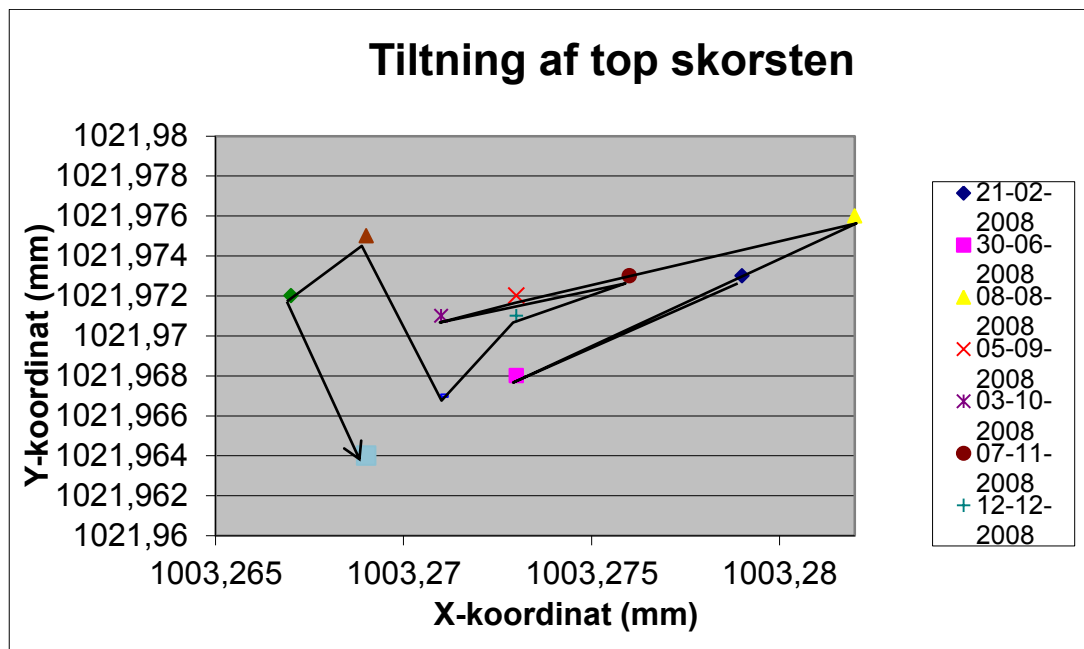
*Gulv.* For målepunkter placeret på gulvet ses et tilsvarende mønster, se figur 4.2. De største deformationer ses at ske under opvarmningsforløbet, mens deformationerne stort set klinger ud så snart varmetilførslen ophører. Punkterne N10 og N15 er placeret midt i opvarmningsområdet, og det er også her de største deformationer ses. Punkt N1 er i fyrrummet, og dermed 2 – 3 m fra nærmeste heaterboring. Her ses også at ske de mindste deformationer.

For målepunkterne placeret på gulvet er der maksimalt set en hæving på op til ca. 2 mm, mens den maksimalt observerede sætning er på ca. 10 mm.



**FIGUR 4-1**  
DEFORMATIONS MÅLINGER AF BETONGULV FØR, UNDER OG EFTER OPVARMNING I OPVARMNINGSOMRÅDET.

*Skorsten.* Punkterne N3 og N4 er placeret på bolte i skorstensfundamentet, der er funderet mere end 2 m u.t. Selvom fundamentet på 3 sider er omkranset af opvarmningen ses her ikke så store deformationer som for gulv i øvrigt eller for de punkter der er placeret i jorden i den centrale del af opvarmningsområdet, N7 og N14. Desuden er der tale om en meget ensartet bevægelse, hvor en tiltning kunne ske, da jorden under fundamentet opvarmes uens.



**FIGUR 4-3**  
HORISONTALE BEVÆGELSER AF SKORSTENSTOP

På toppen af skorstenen er placeret et målepunkt, hvor de horisontale bevægelser af skorstenstoppen er fulgt gennem opvarmningsperioden og efterfølgende afkøling, se figur 4.3 og bilag 4\_5. Den samlede bevægelse er under 1 mm, og ikke i ensidig retning, hvorfor skorstenens fundering må vurderes ikke at være uacceptabelt påvirket opvarmningen.

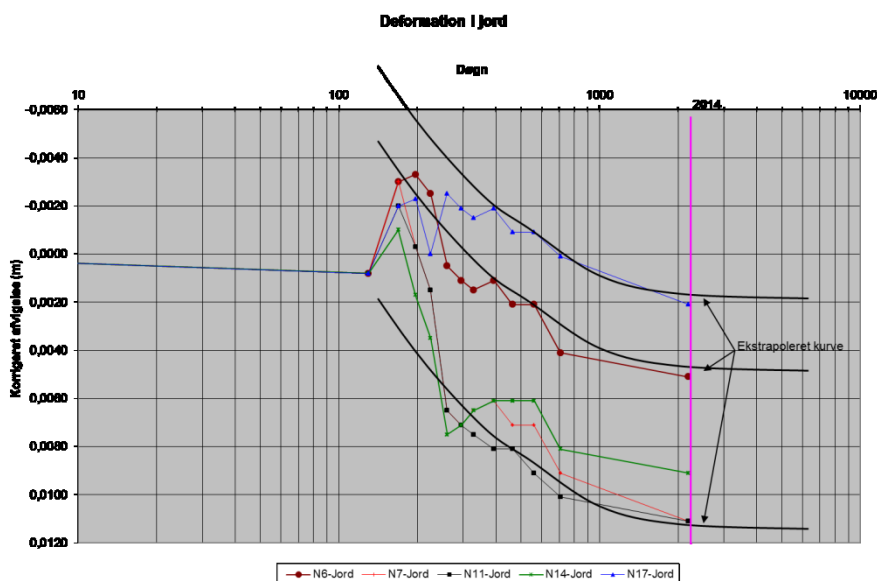
*Vægge.* Deformationerne i væggene synes lidt forsinkede i forhold til jord og gulv. Men som for jord og gulv sker de største deformationer under opvarmningen, mens de aftager ret kraftigt da opvarmningen ophører. Punkterne N5, N8, N13 og N16 er alle placeret indenfor opvarmningsområdet og er de punkter der udviser de største deformationer, op til 10 mm's sætning i forhold til udgangssituationen. N2, N9, N12 og N18 er placeret i periferien af opvarmningsområdet, og i disse punkter ses ikke helt så store sætninger, 5 mm til 9 mm med største værdi i N12. som for gulv og jord ses en aftagende tilvækst i sætningerne, og for væggene vurderes der også i fremtiden kun at ske en beskedne tilvækst i sætninger.

*Samlet vurdering.* Ses på det samlede deformationsforløb for alle punkter forekommer de største deformationer i de punkter der er placeret inden for opvarmningsområdet. Der er sammenhørende monitoringsforløb for punkter placeret i hhv. jord, på gulve og i vægge. De største sætninger er på 11 mm, hvilket konstruktionsmæssigt for en sund bygning ikke udgør en stabilitetsrisiko. De målte sætninger, eller totale bevægelser, har visuelt ikke givet anledning til revnedannelser i bygværket, hverken i gulve eller vægge. Opvarmningen vurderes ikke at have givet anledning til skader på bygningskonstruktionerne ligesom der ikke er konstateret skader på andre installationer, der kan relateres til opvarmningen.

### 4.3 Fremtidig deformationsudvikling

Deformationerne i de etablerede punkter er ved udarbejdelsen af denne rapport fulgt i 5 år. Et skøn over hvorledes sætningsforløbet vil se fremover er givet i bilag 11-1-11-3 for hhv. jord, gulv og vægge. Belastningsændringer i jorden udvikler sig typisk logaritmisk med de største ændringer i den første tidsperiode, hvorefter deformationerne aftager, men principielt aldrig ophører.

For vægge og gulv vurderes en dekadehædning på 4 – 6 mm, se bilag 11-2 og 11-3, mens den for jord synes at være lidt større, 2 – 4 mm, figur 4.4 og bilag 11-1. Det vil sige, at der inden for de næste 25 år kan forventes yderligere sætninger på op til et 2 - 4 mm. Men selv med denne ekstra tilvækst i sætningerne er det inden for rammerne af, hvad en bygning må kunne forventes at modstå, og i hvert fald er der ikke tale om deformationer der vurderes at give anledning til konstruktionssvigt. Det kan dog ikke udelukkes, at der på sigt vil opstå mindre revnedannelser.



FIGUR 4-4  
TIDSMÆSSIG UDVIKLING AF SÆTNING I JORD – SKØN

# 5. Temperaturmonitoring

Generelt er alle temperaturmålinger foretaget elektronisk ved automatisk opsamling i dataloggere og samling af alle data i en fælles database. Oprindeligt var det planlagt at temperaturerne skulle aflæses manuelt, men dette blev ændret under projekteringen.

Temperaturmålingerne er foretaget med 1 times mellemrum fra d. 30. juni 2008 og frem til d. 11. september 2008, hvor målefrekvensen blev ændret til måling 4 gange i døgnet.

## 5.1 Terrænnær monitoring

### 5.1.1 Baggrund og etablering

Det er ofte en stor og reel bekymring - og i nogle tilfælde af afgørende betydning for om et projekt gennemføres eller ej - hvis der er usikkerhed om, hvorvidt kritisk opvarmning af nærliggende installationer som forsyningsledninger, elinstallationer, gasledninger o.l. kan undgås/styres.

På Knullen 8 blev opvarmning af terrænnære installationer søgt imødegået ved etablering af en separat vakuumventilering af det mest terrænnære jordlag (et fyldlag bestående af sand og grus). Hovedformålet med den terrænnære vakuumventilering var dog at sikre effektiv fjernelse af mobiliseret forurening mod terræn, og at forhindre eventuel kondensering af forurening i de terrænnære jordlag.

Oprensningsprojektets behandlingszone er beliggende fra 4 m u.t. og nedefter, hvorfor projektet hovedsagelig omfattede temperaturmonitoring i jordlag der skulle opvarmes. Med henblik på at monitorere temperaturforholdene ved nedgravede ledninger i eller tæt på opvarmningsområdet blev der som en del af teknologiprojektet gennemført en udvidet terrænnær temperaturmonitoring.

Den udvidede terrænnære temperaturmonitoring har omfattet etablering af 3 temperaturmoniteringsboringer ved særligt følsomme installationer på virksomheden. Dette omfatter en gasledning til dampkedlen, (T22), fundamentet til skorstenen på kanten af oprensingsområdet (T23) samt en afløbsledning fra en vaskerimaskine (T24). Der er i disse punkter etableret temperaturfølere i niveauerne 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 og 4 m's dybde. Derudover er der etableret temperaturfølere i 9 boringer (T7 – T10, T13, T14, T16, T18, T21) i niveauerne 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 og 4 m's dybde som en del af monitoringen af oprensningen. Placeringen af målepunkterne er vist på bilag 2, mens opbygningen af det enkelte målepunkt er vist på bilag 6.

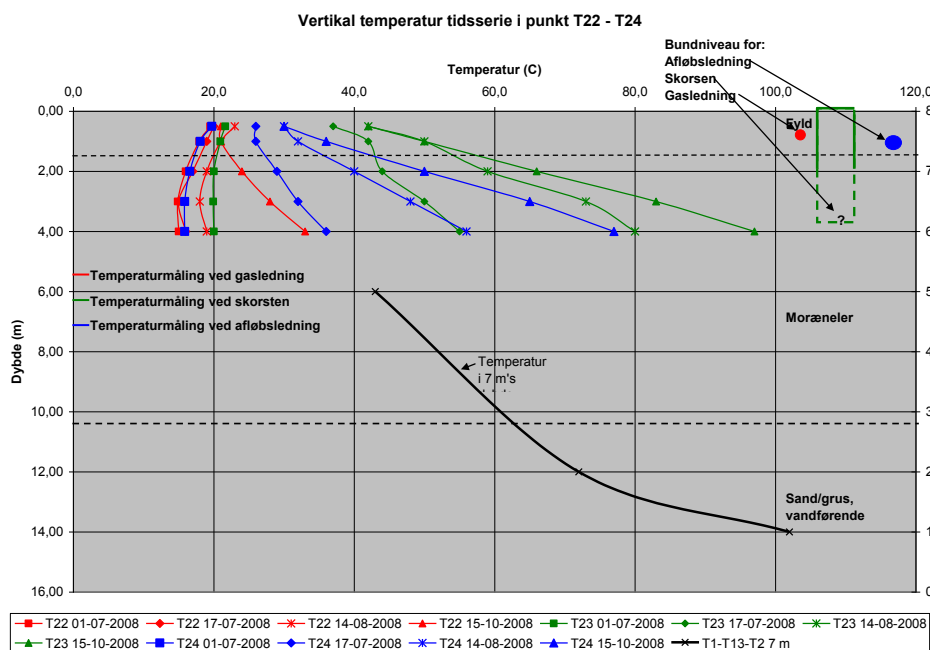
Oprindeligt var det planlagt at temperaturerne skulle aflæses manuelt. Men under projekteringen blev dette dog ændret til, at alle temperaturdata blev opsamlet elektronisk og overført til en database for efterfølgende databehandling/-formidling.

Årsagen til den særlige observans på ledninger i jord er, at der i de seneste mange år er lagt ledninger af PVC, PE og lignende kunststofmaterialer. For disse materialer gælder, at opvarmningen påvirker styrke- og deformationsegenskaberne således, at rørene bliver svagere i takt med at temperaturen øges. Dette er især gældende for ældre rør, mens der i dag er større krav til rørenes temperaturbestandighed.

Der blev derfor udført måling af temperaturen i jorden nær ledninger (gasledning og spildevandsledning), hvor der var risiko for, at en forøget temperatur kunne medføre skade på ledningen.

### 5.1.2 Resultater og vurderinger

Resultaterne af den terrænnære monitoring præsenteres i det følgende ved hhv. iso-kurver for dybderne 0,5 m 1 m, 2 m og 4 m, se bilag 7\_1, samt vertikale temperaturprofiler for de 3 kritiske punkter, T22 – T23, se bilag 7\_2 og figur 5.1. Endvidere er temperaturudviklingen i et punkt i virksomhedens betongulv og i indeluften monitoreret. Resultaterne heraf fremgår af bilag 7-3.



FIGUR 5-1

TEMPERATURPROFILER MED DYBDEN VED GASLEDNING, SKORSTEN OG AFLØBSLEDNING (PRIMÆR Y-AKSE) SAMT TEMPERATURFALD 7 M U.T. MED AFSTANDEN TIL DEN NÆRMESTE VARMEBORING (SEKUNDÆR Y-AKSE).

**Udgangspunkt.** Gasledningen er lagt i ca. 1 m's dybde, og forløber ikke direkte gennem opvarmningsområdet, men er beliggende i en afstand af ca. 5 m fra den nærmeste varmeboring. Målepunktet er etableret i fyrrummet, hvor der konstant er en ret høj temperatur. Dette ses også af at baggrundstemperaturen i 0,5 m's dybde er ca. 20 °C, se røde grafer i figur 5.1. I 1 m's dybde er temperaturen lidt lavere, ca. 19 °C, mens den i 4 m's dybde er ca. 15 °C. Samme baggrundstemperaturer ses for punkt T23 ved skorstenen (grønne grafer). Derimod er baggrundstemperaturerne ved afløbsledningen, T24, ca. 5 °C højere (blå grafer). Dette er formentlig forårsaget af udsivende varmt spildevand eller termisk ledningsevne som følge af langvarig opvarmning via varmt vand i ledningen. T24 er beliggende i kanten af opvarmningsområdet, hvilket også er tilfældet for skorstenen, se bilag 7\_2.

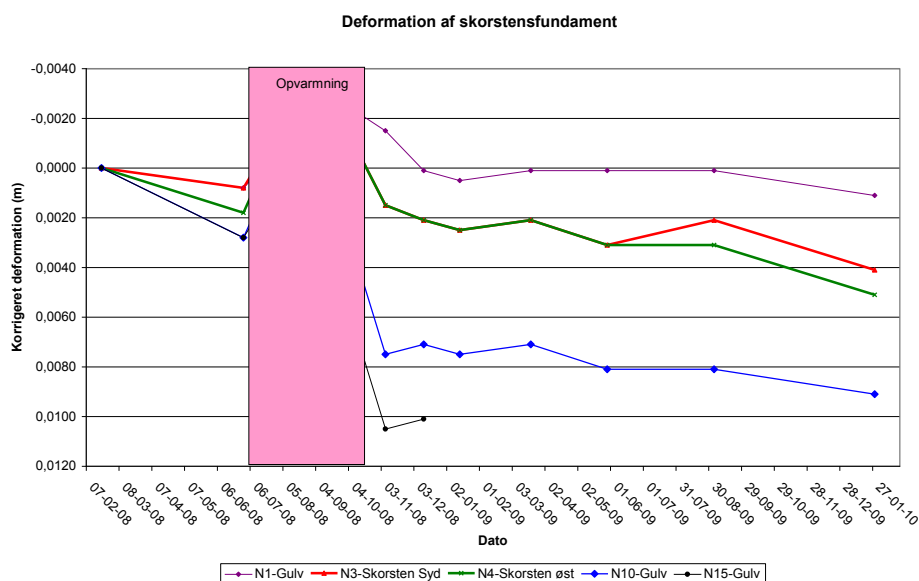
**Gasledning.** Temperaturudviklingen ved gasledningen, se bilag 7\_2, viser, at der i 1 m's dybde stort set ikke sker en temperaturøgning. Højeste temperatur i 1 m's dybde er 21 °C, og i 4 m's dybde er temperaturen kun øget til ca. 33 °C d. 15. oktober 2008 og stigende til 37 °C d. 9. november 2008. I en afstand af ca. 5 m fra opvarmningsområdet, viser disse resultater, at der ikke sker temperaturstigninger, der kan eller vil give en risikofyldt svækkelse af ledningsmaterialet eller temperaturer, der vil påvirke selv ret vandfyldte jordarters deformationsegenskaber.

Med det her undersøgte opvarmningskoncept vurderes der således ikke at være risiko for utilsigtede skader på ledninger o.l. i en afstand af 5 m eller mere. Ligeledes er opvarmningen af de helt terrænnære jordlag så beskeden, at selve opvarmningen ikke vurderes at give anledning til temperaturbestemte deformationer (sætninger) af jorden.



*Skorsten.* Ved skorstenen viser de terrænnære temperaturmålinger fra T23, at temperaturen stiger med dybden fra 66 °C i 2 m's dybde til 97 °C i 4 m's dybde. Det faktiske niveau for skorstensfundamentet kendes ikke, men fundamentet er ført mere end 1,5 m u.t. Nivellement af skorstensfundamentet viser, at der ikke er sket betydende sætninger under eller efter opvarmningen. Ligeledes viser kontrolmålinger af et punkt på skorstenstoppen, at toppen ikke har bevæget sig ensidigt horisontalt, se bilag 4\_5.

Skorstensfundamentet er formentlig den konstruktion i oprensingsområdet, der har den største belastning. Øvrige fundamenter er randfundamenter for en bygning af let konstruktion. Skorstensfundamentet er støbt sammen med betongulvet, hvilket betyder at vandrette bevægelser næppe ville forekomme. Selvom betongulvet ville medvirke til optagelse af vertikale kræfter vurderes, at hvis der skete en sætning af den underliggende jord ville dette kunne måles på fundamentet.



FIGUR 5-2  
DEFORMATIONS MÅLING PÅ SKORSTENS FUNDAMENT.

Som det ses af ovenstående figur 5.2 er der kun observeret meget små blivende deformationer af skorstensfundamentet (punkt N3 og N4) selvom jorden under fundamentet har været ret kraftigt opvarmet. Under opvarmningen skete en hævnning på ca. 2 mm, mens der efterfølgende er målt sætninger på op til 5 mm.

*Afløbsledning.* Temperaturmålingerne omkring afløbsledningen viser, at der op til 1 m's dybde, svarende til lægningsdybde for ledningen, sker en temperaturstigning på op mod 35 á 40 °C. Certificerede afløbsledninger af PVC kan modstå en vedvarende temperaturpåvirkning på 60 °C uden fatale deformationer eller ændringer i ledningens form og længde. Kortvarigt skal ledninger kunne modstå 90 °C (skyl på nogle få l).

Med baggrund i dette har ledningen aktuelt på denne grund ikke været opvarmet over den kritiske temperatur, men var der eksempelvis valgt et koncept med isoleret overflade eller havde ledningen været beliggende i større dybde, kan det ikke udelukkes, at ledningen ville have været udsat for temperaturer over 60 °C og dermed med risiko for svækkelse af materialet, der kunne medføre uønskede deformationer, brud eller utætte samlinger. Målingerne omkring denne ledning viser således, at selvom opvarmningszonen er beliggende fra 4 m u.t. og nedefter kan der altså ske terrænnær opvarmning, der kan være kritisk for eksempelvis afløbsledninger, men også andre ledninger af kunststofmaterialer.

*Terrænnær temperaturudvikling.* De foretagne temperaturmålinger (T23 og T24) viser, at inden for opvarmningsområdet er temperaturgradienten kraftigt faldende over den aktivt opvarmede zone. I fyldlaget umiddelbart under betongulvet, hvor der er opretholdt ventilation dels med henblik på at fjerne opstigende dampe dels – om muligt – for at afkøle gulvet, ses stort set samme gradient som i den underliggende moræneler, se bilag 7\_2. Ventilationen giver således ikke anledning til en ændring i temperaturgradienten.

Sammenholdes temperaturgradienten for de øverste 4 m ved skorsten og afløbsledning med temperaturgradienten væk fra opvarmningsområdet i f.eks. 7 m's dybde (sort graf i figur 5.1. baseret på monitoringsboringerne T1, T13 og T2 – bemærk sekundær y-akse), ses ikke den store forskel. Dette indikerer, at ventilationen ikke har afkølet de underliggende jordlag af betydning, og måske heller ikke betongulvet. Ekstrapoleres kurverne i bilag 7\_2 til terræn ses gultemperaturer på 25 °C – 30 °C svarende til de målte.

Ud fra de foreliggende målinger har det således ikke været muligt at verificere om ventilationen i fyldlaget har medvirket til at reducere opvarmning af betongulvet.

## **5.2 Monitering i mættet zone**

### **5.2.1 Baggrund og etablering**

Under skitseprojekteringen af den termiske oprensning på Knullen 8 var det hensigten, at ISTD skulle være den gennemgående varmekilde i både det øvre lag af moræneler og i det underliggende lag af vandførende sand/grus. Resultater af efterfølgende detaljerede modelsimuleringer viste dog, at et oprensningkoncept med ISTD alene ikke vil kunne garantere en succesfuld oprensning. Dette skyldtes fortrinsvist, at grundvandsstrømmen i det vandførende sand-/gruslag var så stor, at ISTD-varmeboringerne alene ikke ville kunne tilføre den nødvendige effekt i takt med, at kølende grundvand ville afkøle oprensningsområdet. Samtidig er trykniveauet i sandmagasinet beliggende ca. 5 meter oppe i lerlaget, hvilket øgede risikoen for, at kølende grundvand ville stige op i lerlaget under oprensningen.

Afværgekonceptet blev derfor ændret til at omfatte ISTD i moræneleret i kombination med dampopvarmning til oprensning af det underliggende vandførende sand-/grusmagasin. Dampopvarmningen ville endvidere medføre, at en dampboble blev dannet lige under moræneleret, og dermed bevirke at opstrømmende grundvand fra sandmagasin til moræneler mindskes samtidig med at en eventuel vandmængde, der alligevel ville strømme op, blev forvarmet af dampen. Dampboblen skulle derfor opretholdes under kildeområdet i hele ISTD opvarmningsperioden.

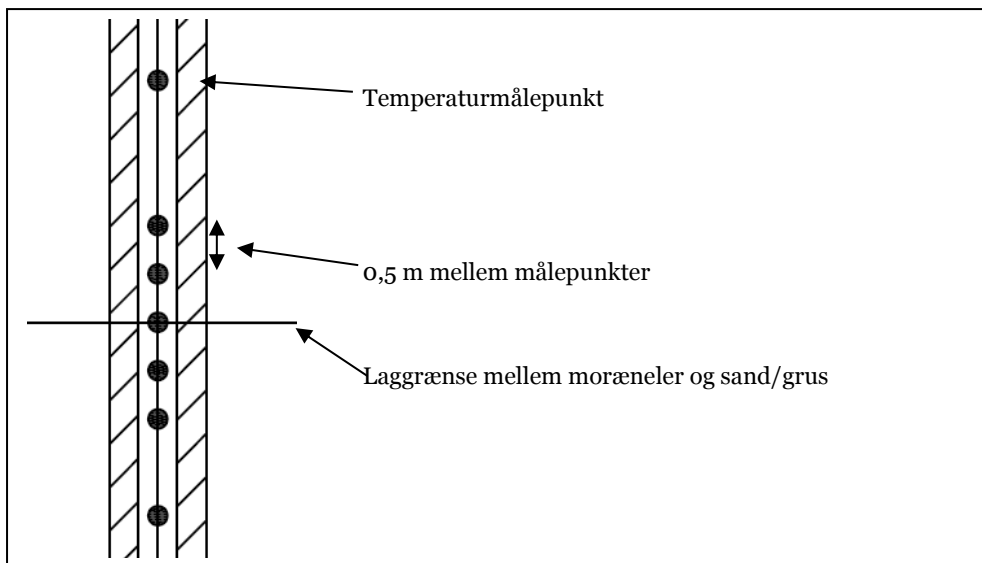
For i størst mulig omfang at sikre, at der ikke blev skabt hydraulisk kontakt fra moræneleret til det underliggende vandførende sand-/gruslag blev ISTD-varmelegemerne afsluttet en meter oppe i moræneleret, dvs. 1 m over laggrænsen mellem moræneler og sand-/gruslag. Dette medførte, at den nederste meter af moræneleret ikke effektivt kunne forventes opvarmet af ISTD-varmelegemerne, hvorfor det var vigtigt, at den underliggende damppeude samtidig bidrog til opvarmningen af den nedre meter af lerlaget i væsentlig omfang.

For at dokumentere om dette var tilfældet, og dermed også om der kunne opnås den ønskede oprensningseffekt, blev monitering af den mættede zone - og ikke mindst overgangszonen mellem moræneler og sandmagasin - udvidet som en del af teknologiprojektet. Teknologiprojektet fik dermed fokus på temperaturmonitoring i overgangszonen på 2 m omfattende den nederste meter af moræneleret og øverste meter af det underliggende sand-/gruslag

Dampoprensningen var projekteret til at dække ca. halvdelen af det samlede oprensningsområde (sydlig del) som vist på bilag 2. I den nordlige del skulle der udelukkende have været opvarmet ved ISTD moræneleret. Ved monitering af temperaturen i de to delområder ville det således have været muligt at se effekten af dampopvarmningen og dampens mulighed for at nedsætte optrængning af

kølede grundvand. Under udførelsen af afværgeforanstaltningerne viste det sig dog, at der i grundvandsmagasinet forekom en væsentlig større forurening, hvorfor dampoprensningen blev udvidet til at omfatte det samlede oprensningsareal.

Oprensningsprojektet omfattede i alt 12 dybe temperaturmoniteringsboringer, hvoraf 6 stk. blev etableret som en del af teknologiprojektet og 6 stk. som en del af oprensningsprojektet. Der er i alt etableret 60 temperaturmålepunkter i den 2 m's zone som vedrører teknologiprojektet. Vertikalt er punkterne placeret pr. 0,5 m således, at der er et punkt i selve laggrænsen/tæt på laggrænsen og to punkter hhv. 0,5 m og 1 m over/under laggrænsen, i alt 5 målepunkter pr. målested. Placering af målepunkter i overgangszonen er vist på figur 5.3, mens den vertikale fordeling af temperaturmålepunkter i målesteder udenfor overgangszonen fremgår af bilag 6.



FIGUR 5-3.  
PLACERING AF TEMPERATURMÅLEPUNKTER I JORDEN.

Selve målingen af temperaturer er sket ved automatisk dataopsamling med en frekvens på 1 gang pr. time fra start d. 30. juni 2008 og frem til 11. september 2008, hvor frekvensen blev nedsat til måling for hver 6. time.

Alle måleresultater foreligger digitalt hos Region Syddanmark og hos NIRAS. I det følgende præsenteres måleresultater, der belyser temperaturforholdene i overgangszonen mellem moræneler og vandførende sand og grus under opvarmningen.

### 5.2.2 Resultater og vurderinger

Resultaterne fra opvarmningen af hhv. nedre del af lerlag og øvre del af sand-/gruslag fremgår af bilag 10 i form af plot – iso-kurver – for dybderne 10 og 10,5 m u.t., hvilket dækker det lag der forventedes at skulle opvarmes af primært damp og sekundært ISTD. Desuden er medtaget niveauet 7,5 som er det niveau som er i midten af opvarmningszonen for ISTD opvarmningen. Der er præsenteret temperaturer for tidspunkterne 10. juli, dvs. ca. 1 uge efter start af dampinjektion, 26. august svarende til ca. 2 måneders drift og dermed i perioden med "hot-plate" fase, dvs. damp pude under hele oprensningsområdet samt temperaturer fra d. 7. oktober, hvilket er få dage før varmetilførslen standses.

På bilag 9 er der endvidere for målepunktet T12 vist et vertikalt snit gennem opvarmningsområdet med temperaturudtræk til forskellige tidspunkter.

Som det ses af bilag 9 og 10 sker der allerede efter 1 uges damptilførsel en ret betydelig opvarmning af den nederste del af lerlaget, således er der opnået temperaturer på 55 – 70 °C. En tilsvarende begyndende opvarmning ses ikke i ISTD zonen (7,5 m). Temperaturkurverne fra 26. august og fremefter viser, at stort set hele oprensingsområdet er varmet op til mellem 90 og 100 °C i både ISTD opvarmningszone (7,5 m) og overgangszone mellem ler og sand (10 – 11 m).

Af bilag 9 ses samtidig, at reduktionen i tilførslen af damp til sand-/gruslaget betyder, at de høje temperaturer i sandlaget aftager nedefra - men mest af alt vigtigt i denne sammenhæng - de høje temperaturer i top sandlag/bund lerlag opretholdes

Samlet set viser målingerne, at det ved at lægge en damppude under lerlaget (hot-plate) faktisk har været muligt at opvarme den nederste meter af moræneleret til 98 á 109 °C, og dermed noget over det eutektiske kogepunkt for vand/PCE blandingen på 87 °C. Dermed vurderes det godtgjort, at opvarmningen har medført den ønskede oprensning, og efterfølgende målinger og analyse af hhv. jordprøver og grundvandsprøver har ikke vist tegn på uacceptabel restforurening i overgangszonen mellem ler og sand.

Opvarmningen af hele oprensingsområdet har været foretaget ved kombinationen af ISTD og damp. Der er således ikke noget referenceområde med ISTD alene i ler. Derimod er der et målepunkt som har været omfattet af damppuden, men ikke ISTD opvarmningen. Temperaturudviklingen her viser som i bilag 8, at dampen ret hurtigt siver op i porer og sprækker i leret og opvarmer denne, og at dampen alene er i stand til at opretholde en temperatur på over 100 °C i den nederste del af lerlaget.

Det har således været af afgørende betydning for den succesfulde oprensning, at konceptet har omfattet begge metoder. Damppudens effekt på nedsættelse af optrængning af vand fra sand-/gruslag til moræneler ses også ved, at der stort set kun er fjernet den vandmængde fra moræneleret, som porevandet beregningsmæssigt udgør i leret.

# 6. Massebalancer på Geokemi

Målinger på flere projekter i udlandet med ISTD har indikeret, at der ekstraheres væsentligt mere kulstof end det umiddelbart kan forklares ud fra afgasning af kuldioxid og metan ved vandets opvarmning. Dette indikerer, at in-situ oxidation og pyrolyse kan spille en væsentlig rolle for forureningsfjernelsen. Dette er af stor forståelsesmæssig betydning, og hvis fænomenet kan påvises at være en markant fjernelsesvej for forureningen, kan det ligeledes pege i retning af anvendelse af termiske metoder, hvor der så primært sigtes efter en in-situ destruktion.

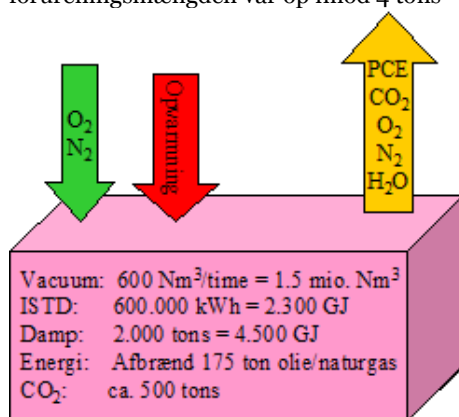
Der er derfor behov for at kunne beskrive omfanget af disse processer kvantitativt gennem målinger før, under og efter oprensning med ISTD. Disse problemstillinger har indgået i evalueringen af det termiske oprensningsprojekt på lokaliteten Knullen 8.

Formålet med at opstille massebalancer for udvalgte geokemiske parametre er at demonstrere hvorledes denne metodik kan kvantificere de væsentligste geokemiske processer som følge af anvendelse af ISTD alene eller sammen med f.eks. dampoprensning.

## 6.1 Diskussion af metoder

For at dimensionere de målemetoder der skulle anvendes i "massebalanceprojektet" var det nødvendigt indledningsvist at vurdere stofmængderne på lokaliteten på baggrund af den tilgængelige viden før oprensningen. I nedenstående figur 6.1 er der vurderet nøgletal for situationen ved lokaliteten på Knullen 8. Sedimentets egenskaber er baseret generelle erfarings tal for moræneler og der er i beregningerne forudsat en vandmættet porøsitet på ca. 35 % og et indhold af organisk kulstof på ca. 0,15 % w/w).

Figur 6.1. Overordnet massebalance og "før-vi-går-i-gang-gæt" på forekomsten af relevante stoffer på lokaliteten. Ved afværgemetoden tilføres store mængder af termisk energi. Samtidigt tilføres ilt i forbindelse med vakuum-ventileringen. I forbindelse med oprensning viste det sig at forureningsmængden var op imod 4 tons



### 6.1.1 Massebalance for kulstof

En beskrivelse af massestrømmen for kulstof ved oxidation og pyrolyse af PCE bliver besværliggjort af tilstedeværelsen af betydelige mængder af organisk og uorganisk kulstof i moræneler matricen. Som følge af vakuumelekstraktionen vil der blive trukket atmosfærisk ilt ned gennem de udtørrede sprækker, hvorfra det ved diffusion kan bevæge sig ind i matrix.

- Ved opvarmning vil opløst uorganisk kulstof i vandet afgasse pga. faldende opløselighed af CO<sub>2</sub> og CaCO<sub>3</sub> - en proces der vil bidrage med 2 – 4 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> porevand:
- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 \text{ (g)}$
- Under tilstedeværelse af ilt i poreluften vil organisk kulstof blive delvist oxideret i sedimentet ved temperaturer over 100 oC og ved temperaturer omkring 550 oC er processen stort set fuldstændig (udglødning). Det må forventes at 5 – 50 % af det naturlige organiske kulstof vil blive oxideret afhængigt af tilstedeværelsen af ilt. Indhold af naturligt organisk kulstof er ca. 0,15 % w/w.
- Ved høj temperatur og tilstedeværelse af ilt i poreluften vil pyrit oxidation blive kraftigt accelereret og den producerede svovldioxid vil blive delvist adsorberet på CaCO<sub>3</sub> i sedimentet som calciumsulfit (tør adsorption). Det vurderes, at mellem 5 og 50 % af det naturlige pyrit indhold kan omdannes (0,005 – 0,05 % w/w):
- $5\frac{1}{2}\text{O}_2 \text{ (g)} + 2\text{FeS}_2 \Rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2 \text{ (g)}$
- $\text{SO}_2 \text{ (g)} + \text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)} + \text{CaSO}_3$
- Masseestimatet for lokaliteten forud for oprensningen var i størrelsesordenen 500 kg PCE forurening. Som forudsætning og udgangspunkt for vurderingerne forudsættes 20 % af PCE forureningen (svarende til 100 kg) omdannet til kuldioxid og saltsyre:
- $\text{C}_2\text{Cl}_4 \text{ (g)} + \text{O}_2 \text{ (g)} + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{CO}_2 \text{ (g)} + 4\text{HCl(g)}$

Disse fire processer bidrager sammen med CO<sub>2</sub> i poreluften i umættet zone alle med et tab af kulstof i form af kuldioxiden hvilket er samlet i nedenstående summering.

Det skal bemærkes at den faktisk oprensede mængde baseret på prøver udtaget i driftsfasen indikerer, at det samlede masse estimat snarere har været i størrelsesordenen 4.000 kg i stedet for 500 kg. Dette afspejles ikke i nedenstående beregninger.

Beregning af bidrag til en massebalance for uorganisk kulstof

<u>Proces for 2300 m<sup>3</sup> moræneler</u>	<u>C-CO<sub>2</sub> (kg)</u>
CO <sub>2</sub> i poreluft	< 1
Fordampning af uorganisk kulstof – Opløst	20 – 40
Oxidation af naturligt organisk kulstof	250 – 2500
Udsyring af uorganisk kulstof – Fast fase	140 – 1400
<u>PCE (20 % oxideret = 100 kg)</u>	<u>15</u>

Det fremgår af ovenstående, at en kulstof massebalance på den konkrete lokalitet kan beskrive væsentlige geokemiske processer. Imidlertid vil pyrolyse og oxidation af PCE kun påvirke massebalancen marginalt.

### 6.1.2 Massebalance for klorid

En tilsvarende massebalance for klor/klorid er baseret på tilstedeværelse af naturligt opløst klorid, samt klorid frigivet ved pyrolyse eller oxidation af PCE. For opløst klorid kan der antages 100 mg/l som en typisk værdi for recent grundvand under befæstede arealer – til indholdet skal også medregnes løst adsorberet klorid i lermineralernes elektriske dobbeltlag. Ved beregningen af massestrømmen for klorid er frigivelse fra lermineralernes krystalstruktur ignoreret, da dette primært vurderes at være væsentligt ved temperaturer over 600 oC, se nedenstående.

Beregning af bidrag til en massebalance for klorid

<u>Proces for 2300 m<sup>3</sup> moræneler</u>	<u>Cl (kg)</u>
PCE (20 % oxideret = 100 kg)	85
Klorid opløst i porevand og elektrisk dobbeltlag	80
<u>Klorid i ler mineraler</u>	<u>0 – 1</u>

Det fremgår af denne massebalance, at kloridfrigivelse fra en evt. oxidation eller pyrolyse af PCE vil kunne give en markant forøgelse af klorid, som kan udvaskes med destilleret vand fra jordprøver efter afværge på lokaliteten.

### **6.1.3 Stabile isotoper**

Det blev på forhånd vurderet ikke at være muligt at anvende analysen af stabile isotoper ( $\square^{13}\text{C}$  eller  $\square^{37}\text{Cl}$ ) til en kvantificering af in-situ omdannet PCE. Det skyldes at transport processer (diffusion) og omdannelses processer (oxidation/pyrolyse) i dette tilfælde vil give modsat rettede isotopeffekter. Desuden vil omdannelsen af naturligt kulstof og tilstedeværelsen af klorid give væsentlige baggrundseffekter der kan være vanskelige at kvantificere.

### **6.1.4 Feltmetoder og analyser**

Før igangsættelsen af ISTD og dampoprensningen blev der etableret filtre til vandprøvetagning for bestemmelse af grundvandets baggrundsværdi for indhold af klorid (DS/EN 10304-1), kationer (ISP-MS) samt klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter.

Der blev i samme boringer udtaget sedimentprøver til analyse for indhold af pyrit (modifieret SM 3120; jern bestemmelse i sediment fraktion oplukket med salpetersyre efter udvaskning af sulfider med saltsyre) og organisk kulstof (TOC; DS/EN 13137) for at bestemme baggrundsniveauerne i "før" – situationen.

Sedimentprøverne blev primært udtaget i reduceret moræneler fra ca. 6 meter under terrænoverfladen - dog blev dog af hensyn til reference til naturligt oxiderede forhold udtaget enkelte sedimentprøver i oxideret zone (moræneler med rødt farvede sandslirer).

I forbindelse med gennemførelsen af afværgeprojektet blev der monitoreret for poreluftens sammensætning i observationsboringer og ekstraheret poreluft (ilt, kuldioxid, metan, klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter). Efter afslutning af afværgen blev der udtaget sedimentprøver til dokumentation af oprensningsniveau og geokemiske parametre.

## **6.2 Resultater**

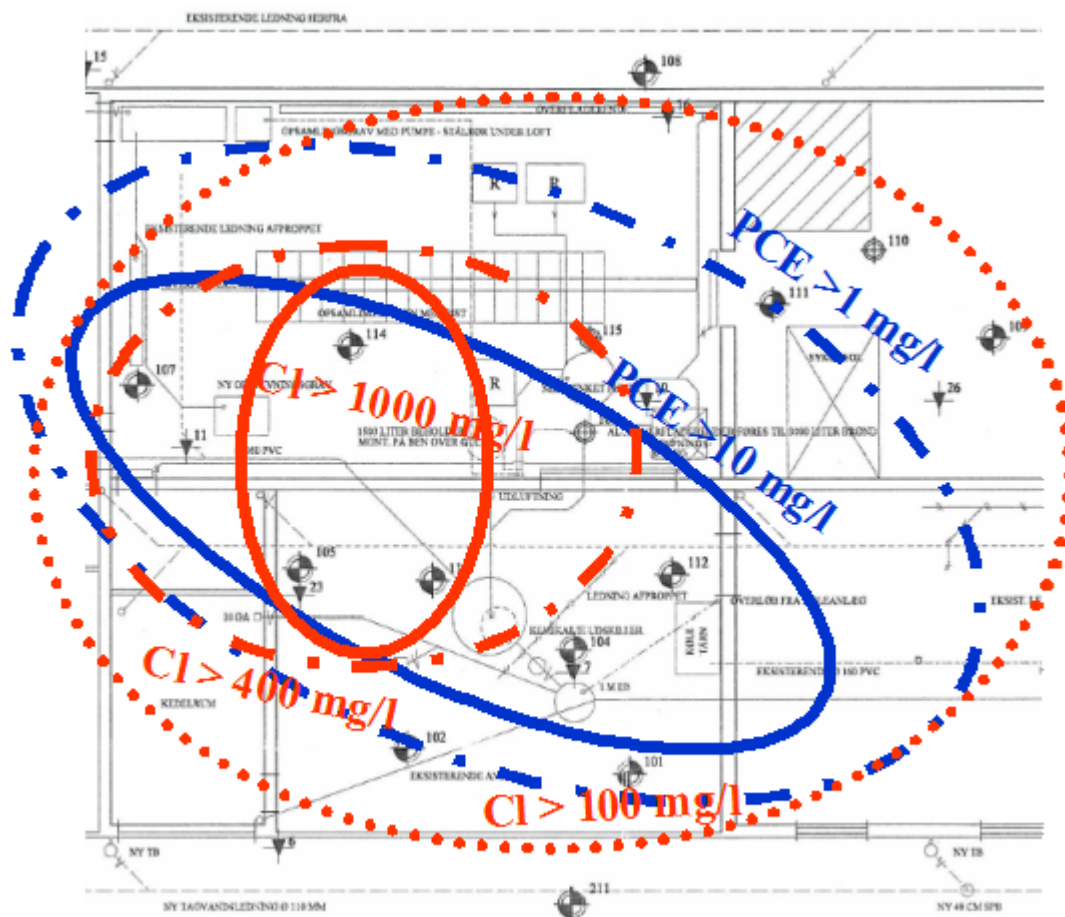
### **6.2.1 Grundvand**

Som reference grundlag for situationen før start af afværgeprojektet blev der indsamlet vandprøver fra boringer indenfor og udenfor det forurenede område på lokaliteten. En del af disse vandprøver er indsamlet fra filtre i (sandet) moræneler og det har derfor været vanskeligt at få tilstrækkeligt med prøvemateriale. Udvalgte resultater for klorid, calcium, natrium, klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter er vist nedenfor, tabel 6.1.

Disse resultater trækker en del af tæppet væk under den planlagte beregning af en massebalance for klorid. De viser, at de forventede lave baggrundsværdier kun er opnået i referenceboringer placeret udenfor det værst forurenede område (B211 og B108, se også figur 6.2 nedenfor).

TABEL 6.1. UDVALGTE RESULTATER FRA ANALYSE AF GRUNDEVANDS PRØVER FØR START AF OPVARMNINGEN. BORING B211 OG B108 ER REFERENCE MÅLINGER UDEFOR DET MEST FORURENEDE OMRÅDE (ALLE TAL MG/L, I.M. = IKKE MÅLT).

Boring	Klorid	Calcium	Natrium	Vynylklorid	1,2cisDCE	TCE	PCE
B211	78	120	15	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
B108	6,1	57	5,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
B107	440	i.m.	i.m.	0,043	5,3	0,92	12
B114	1200	520	200	0,0042	5,2	0,78	17
B109	330	i.m.	i.m.	<0,001	0,022	0,023	0,39
B111	360	190	160	0,19	1,6	0,37	2,7
B112	660	240	210	0,49	1,2	0,17	8,9
B104	250	210	130	9,9	50	1,7	250
B105	2300	680	630	0,018	0,085	0,012	2,7
B113	1400	540	280	6,6	49	2,5	87



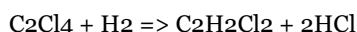
FIGUR 4-1

FILTERSATTE BORINGER DER INDGÅR I PRØVETAGNINGSPROGRAMMET. KONTURERINGEN VISER DEN OMTRENTLIGE PLACERING AF OMRÅDER MED KRAFTIG GRUNDEVANDSFORURENING OG HØJT INDHOLD AF KLORID. B108 OG B211 DER LIGGER UDEFOR DET FORURENEDE OMRÅDE (UNDER SELVE BYGNINGEN), ER DE ENESTE BORINGER MED KLORID PÅ BAGGRUNDSNIVEAU.

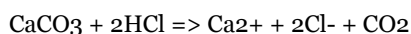


De meget høje klorid indhold kan stamme fra spildevandsstrømme fra blødgøring, som er en almindeligt anvendt proces på vaskerier. Man fjerner typisk calcium og magnesium ved en ionbytning på et harpiks der regenereres med en kraftig opløsning af NaCl (jf. processen i en almindelig husholdningsopvaskemaskine). Analyserne viser imidlertid at indholdet af calcium er væsentlig større end man ville forvente i en sådan saltopløsning.

En anden mulighed er at de høje klorid indhold er genereret af reduktiv deklorering. Det fremgår af tabel 6.1, at der i nogle vandprøver er endog meget høje indhold af typiske nedbrydningsprodukter fra reduktiv deklorering – specielt cisDCE. Denne proces er også syredannende f.eks. med omdannelse af PCE til cisDCE vha. brint som eksempel:



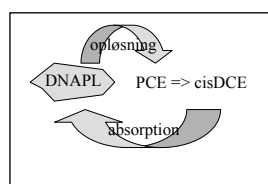
Den syredannende proces kan neutraliseres af sedimentets naturlige kalk indhold:



Imidlertid vil omdannelsen af en næsten mættet opløsning af PCE til cis DCE ikke kunne føre til særligt store indhold af klorid – f.eks. vil omdannelse af 166 mg PCE mg/l kun bidrage med 71 mg klorid pr. liter, hvilket er ca. en faktor 10 mindre end de typiske indhold jf. tabel 6.1.

Hvis denne proces skal have betydning må der kontinuert fjernes opløst PCE og nedbrydningsprodukter som vist nedenfor i princip på figur 6.3. Under de lokalitetsspecifikke forhold er dette faktisk meget sandsynligt. De mest forurenede områder ligger under en bygning, hvor der er praktisk taget ikke er grundvandsdannelse og dermed lang opholdstid for vandfasen. Vandprøvernes høje indhold af PCE viser at der er en aktiv transport fra fri fase til vandfase formentlig til dels styret af koncentrationsgradienter.

Som det ses af tabel 6.1 udgøres hovedparten af de chlorede opløsningsmidler af PCE, men der forekommer også betydelige indhold af nedbrydningsprodukter herunder især cis-1,2-dichlorethylen. Rækken af nedbrydningsprodukter når helt til vinylchlorid, og med udgangspunkt i de ret høje indhold af chlorid, der er målt i porevandet, kan det ikke udelukkes, at der i et vist omfang sker en komplet dechlorering af PCE med dannelse af netop chlorid. Således vil de målte indhold af chlorid både kunne repræsentere udsivning af spildevand fra virksomheden og restprodukt fra nedbrydning af PCE.



FIGUR 6.3. PRINCIPTEGNING AF SEKVENTIEL OPLØSNING AF PCE, DEKLORERING OG ABSORPTION AF NEDBRYDNINGSPRODUKTER

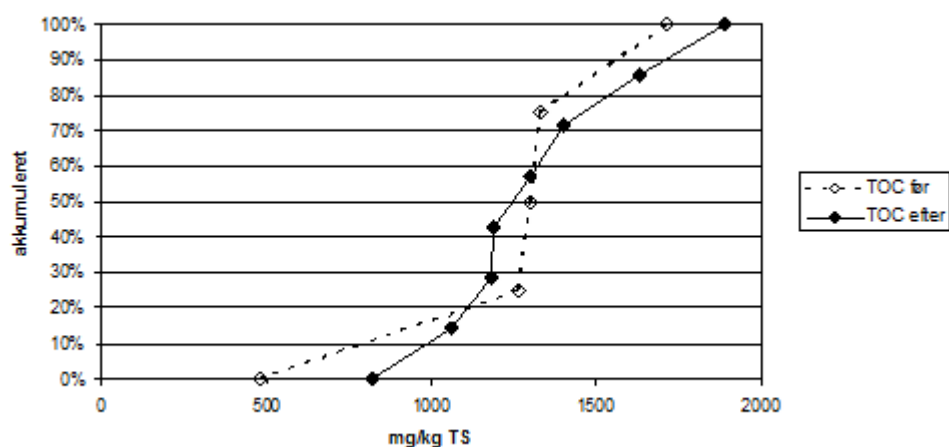
### 6.2.2 Massebalance for pyrit og organisk kulstof

Nedenfor i 6.2 er resultaterne af undersøgelsen af sedimentprøvernes indhold af organisk kulstof og pyrit hhv. før og efter den termiske oprensning vist. Prøven mærket "Før 1" er udtaget i oxideret zone mens de øvrige prøver er udtaget i naturligt reducerede sedimentter.

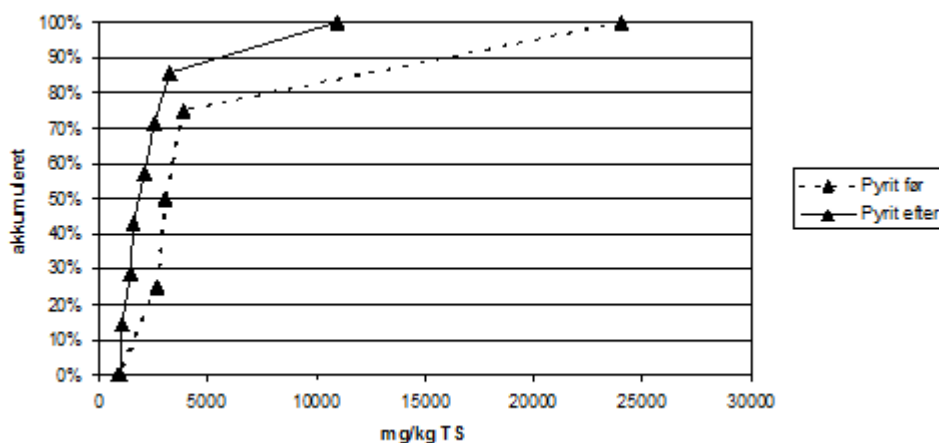
TABEL 6.2. INDHOLD AF PYRIT I SEDIMENTPRØVER UDTAGET FØR OG EFTER DEN TERMISKE OPRENSNING.

Tidspunkt	Boring	Dybde	Tørstof	TOC	Pyrit
<b>Ifht. afværge</b>		m	%	mg/kgTS	mg/kgTS
<b>Før 1</b>	HV30	4 - 5	85,8	479	900
<b>Før 2</b>	HV30	9 - 10	87,2	1710	3900
<b>Før 3</b>	HV46	7,5	89,7	1300	3100
<b>Før 4</b>	HV48	8	89,4	1260	2700
<b>Før 5</b>	HV57	9	89,3	1330	24000
<b>Efter 1a</b>	GJ10	6,9	90	1400	11000
<b>Efter 1b</b>	GJ10	6,9	89	1190	2100
<b>Efter 2</b>	GJ10	7,1	89	1180	1500
<b>Efter 3</b>	GJ10	8 - 9	84	1060	1600
<b>Efter 4</b>	GJ1	8,0 + 9,7	91	1890	3300
<b>Efter 5</b>	GJ2	6,0+6,2	90	1300	1100
<b>Efter 6</b>	GJ2	7,6+8,0	93	1630	2600
<b>Efter 7</b>	GJ5	6,1+6,4	99	821	1000

På figur 6.4 og 6.5 er resultaterne af sedimentanalyserne samlet opdelt efter prøvetagningstidspunktet før og efter den termiske oprensning. Resultaterne er præsenteret som akkumulerede kurver, hvilket ofte er en velegnet metode til geokemiske data pga. den store naturlige variation.



FIGUR 6.4. AKKUMULEREDE FORDELINGSKURVER FOR SEDIMENTPRØVERNES INDHOLD AF TOTAL ORGANISK KULSTOF (TOC) FØR OG EFTER TERMISK OPRENSNING.



FIGUR 6.5. AKKUMULEREDE FORDELINGSKURVER FOR SEDIMENTPRØVERNES INDHOLD AF PYRIT (FES<sub>2</sub>) FØR OG EFTER DEN TERMISKE OPRENSNING

Det fremgår af figur 6.4 at der ikke er nogen signifikant ændring i sedimenternes indhold af organisk kulstof som følge af den termiske oprensning. Resultaterne er i øvrigt i god overensstemmelse med de ca. 0,15 % som er forudsat i beregningerne i afsnittet om massebalance for kulstof.

Derimod viser figur 6.5, at der er en signifikant formindskelse af indholdet af pyrit på over 1.000 mg/kg TS, hvilket er noget højere end forudsat i beregningerne i afsnittet om massebalance for kulstof.

Den målte forskel svarer til forbrænding af 3 – 4 tons pyrit for hele det forurenede volumen (2.300 m<sup>3</sup>). Dette er en ganske betydelig mængde der har ført til dannelse af 5 – 7 tons koncentreret svovlsyre. Den væsentligste del af dette er formentlig blevet adsorberet i magasinet på CaCO<sub>3</sub>, men en betydelig del kan være blevet ekstraheret, som de korrosive gasarter svovldioxid (SO<sub>2</sub>) og svovltrioxid (SO<sub>3</sub>).

Disse gasarter kan have bidraget til de betydelige korrosionsproblemer man har observeret i vakuumventilation systemet.

### 6.3 Diskussion

De udførte målinger viser, at de geokemiske konsekvenser af ISTD kan være ganske betydelige og specielt bør der tages hensyn til betydningen af pyritoxidation som har optimale forhold ved den kraftige opvarmning og kontinuert tilførsel af ilt.

Den intensive oxidation af pyrit fører til forurening og giver høj risiko for betydelig korrosion i vakuumventilation systemerne. Pyrit er samtidigt en kilde til tungmetaller som nikkel og arsen der kan udgøre et vandkvalitetsmæssigt problem hvis de mobiliseres. I moræneler er mobiliseringsrisikoen ikke så stor pga. adsorptionskapaciteten i lerminerallerne. Derimod kan den kombinerede effekt af forurening og tungmetalfrigivelse udgøre en høj forureningsrisiko i sand/grus grundvandsmagasiner.

På den aktuelle lokalitet kunne der ikke påvises in-situ nedbrydning af PCE i grundvandsmagasinet som en følge af de termiske metoder. De lokalitetsspecifikke forhold med meget høje indhold af klorid i grundvandet forhindrede også en anvendelse af klorid som målestok for in-situ oxidation og pyrolyse.

Dette forhold vurderes at være en samlet effekt af på den ene side lokal forurening med regenereringsvæske fra blødgøring (ionbytning) og på den anden side reduktiv deklorering kombineret med absorption af de dannede nedbrydningsprodukter i den fri fase.

Det vurderes at der kan være et stort potentiale i en grundig karakterisering af den naturlige geokemi i forbindelse med gennemførelsen af forundersøgelser såvel som intensive og ekstensive afværgemetoder (f.eks. stimuleret nedbrydning og reaktive vægge). Resultater fra karakteriseringen af geokemien kan anvendes til at vurdere omfanget af nedbrydning og omdannelse af forureningskomponenterne.

Specielt er en analyse for klorid en oplagt parameter i kildeområder, hvor der er tilstedeværelse af fri fase. Klorid er en billig analyseparameter og kan altså anvendes til en vurdering af den reduktive deklorering af de klorerede opløsningsmidler. Undersøgelsen af grundvandets sammensætning bør udover forureningskomponenterne omfatte grundvandets hovedbestanddele samt pH, ledningsevne og opløst ilt. Disse parametre kan anvendes til en vurdering af de mulige geokemiske processer herunder reduktiv deklorering. Disse processer har alle et givet fingeraftryk på grundvandets indhold af klorid og fører til ændringer i sammensætning af kationer og størrelsen af alkalinitet og pH.

Sedimentets naturlige indhold af pyrit er en mulig elektrondonor som kan påvirke nedbrydning af klorerede opløsningsmidler under reducerede forhold (reduktiv deklorering). Denne parameter er derfor også af interesse sammen med indholdet af organisk kulstof (TOC).

# Referencer

/Abuel-Naga et al. 2005/ H.M. Abuel-Naga, D.T. Bergado, S. Soralump and P. Rujivipat. Thermal Consolidation of Soft Bangkok clay. Lowland Technology International Vol. 7, No1, pp 13 – 21. June 2005.

/Abuel-Naga et al. 2006/ H.M. Abuel-Naga, D. T. Bergado, S. Chaiprakaikeow. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. Geotextiles and Geomembranes no. 24 (2006) pp 359 - 370

/Abuel-Naga et al. 2007/ H.M. Abuel-Naga, D.T. Bergado, S. Soralump and P. Rujivipat. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay. Engineering Geology, 89 (2007), pp. 144 – 154.

/Cekerevac et al. 2004/ Cane Cekerevac and Lyesse Laloui. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 2004 nr. 28, pp 209 – 228.

/Cui et al. 2000/ Yu Jun Cui, Nabil Sultan, and Pierre Delage. A thermomechanical model for saturated clays. Can. Geotech. J. vol. 37. (2000), pp 607 – 620.

/Delage et al 2000/ Pierre Delage, Nabil Sultan, and Jun Cui. On the thermal consolidation of Boom clay. Can. Geotech. J. vol 37. 2000. Pp 343 – 354.

/Graham et al. 2001/ J. Graham, N. Tanaka, T. Crilly, and M Alfaro. Modified Cam-Clay modelling for temperature effects in clays. Can. Geotech. J. vol. 38, pp 608 – 621. (2001).

/Hansen 1978/ Bent Hansen, Geoteknik og Fundering, del 1. 1978. Laboratoriet for Fundering, Danmarks Tekniske Højskole.

/Kruuse 2008/ Personlig kontakt til forskningsbibliotekar John Kruuse ved Statsbiblioteket i Århus.

/LaChance et al. 2006/ John LaChance, Gorm Heron, Ralph Baker. Restoration of a DNAPL Brownfields Site using In-Situ Thermal Desorption. In preparation for Ground Water Monitoring and Remediation. 2006.

/Laloui et al. 2008/ L. Laloui, C. Cekerevac. Numerical simulation of the non-isothermal mechanical behaviour of soils. Computers and Geotechnics. (2008). in press.

/NIRAS 2006/ NIRAS og Fyns Amt. Afværgeforanstaltninger på Knullen 8, Odense. Skitseoplæg. Termisk behandling af jordforurening. Oktober 2006.

/NIRAS 2007 a/ NIRAS og Region Syddanmark. STARS simuleringer. Termisk oprensning. Karma Arbejdstøjservice, Knullen 8, Odense. Juni 2007.

/NIRAS 2007 b/ NIRAS og Region Syddanmark. Afværgeforanstaltninger på Knullen 8, Odense.  
Projekt: Termisk behandling af jordforurening. Særlige Betingelser (SB) og Særlig  
Arbejdsbeskrivelse (SAB). August 2007.

/Romeo et al. 2005/ E. Romeo, M. V. Villar, A. Lloret. Thermo-hydro-mechanical behaviour of two  
heavily overconsolidated clays. *Engineering Geology*, 81 (2005), pp 255 – 268.

/Tan et al. 2004/ Özcan Tan, Lale Yilmaz, A. Sahin Zaimoglu. Variation of some engineering  
properties of clays with heat treatment. *Materials Letters*, 58 (2004) pp 1176 – 1179.

## Bilag 1: Søgeresultater fra litteratursøgning

### References

[http://www.refworks.com/Refworks/FormatOut.asp?file=\\_95,92,92,82,87,92,85,112,...](http://www.refworks.com/Refworks/FormatOut.asp?file=_95,92,92,82,87,92,85,112,...)

- Abdullah, W. S., Al-Zou'bi, M. S., & Alshibli, K. A. (1997). On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 551-559.
- Abe, N. (2001). Thermo-viscoplastic model for soft clays. , 2 417-424.
- Abelev, A. V., Gutta, S. K., Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (2007). Modeling cross anisotropy in granular materials. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(8), 919-932.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., & Bouazza, A. (2007). Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft bangkok clay. *Engineering Geology*, 89(1-2), 144-154.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., & Ramana, G. V. (2007). Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: Experimental results and constitutive modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(8), 942-956.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., & Chaiprakaikeow, S. (2006). Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), 359-370.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Chaiprakaikeow, S., Baldi, G., Hueckel, T., Pellegrini, R., et al. (1995). *Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process; thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils; viscous behaviour of natural clays; influence of temperature variations on soil behavior; "thermal effects on the mechanical behaviour of saturated clays: An experimental and constitutive study"; experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay; on the use of the kozeny-carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils; A thermomechanical model for saturated clays; on the thermal consolidation of boom clay; thermomechanical properties of deep argillaceous formations; soil volume changes induced by temperature cycling; temperature effects on consolidation properties of sulphide clays; modified cam-clay modelling of temperature effects in clays; THERMO-MECHANICAL BEHAVIOR OF SEAFLOOR SEDIMENTS; thermoplasticity of saturated clays. experimental constitutive study; thermoplasticity of saturated soils and shales. constitutive equations; reactive plasticity for clays: Application to a natural analog of longterm geomechanical effects of nuclear waste disposal; on a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems; mode?lisation du comportement thermo-hydro-me?canique des milieux poreux anelastiques; thermo-mechanical behaviour of soils; thermo-plasticity of clays: An isotropic yield mechanism; isothermal modeling of sand-bentonite mixtures at elevated temperatures; A cyclic thermoviscoplastic constitutive model for clays; geotechnical properties of clay at elevated temperatures; mineralogy and chemistry, and their correlation with the geotechnical index properties of bangkok clay: Comparison with ariake clay; A constitutive thermomechanical model for saturated clays; suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions; temperature effects on the volume change behaviour of boom clay; stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures; volume change of clays induced by heating as observed in*
- [http://www.refworks.com/Refworks/FormatOut.asp?file=\\_95,92,92,82,87,92,85,112,...](http://www.refworks.com/Refworks/FormatOut.asp?file=_95,92,92,82,87,92,85,112,...)  
*consolidation tests; discussion on volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests (towhata and al. 1993)*
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Ramana, G. V., Grino, L., Rujivipat, P., & Thet, Y. (2006). Experimental evaluation of engineering behavior of soft bangkok clay under elevated temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7), 902-910.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Soralump, S., & Rujivipat, P. (2005). Thermal consolidation of soft bangkok clay. *Lowland Technology International*, 7(1), 13-21.

- Ahmadi, H. R., & Muhr, A. H. (1997). Modelling dynamic properties of filled rubber. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 26(10), 451-461.
- Ahn, J., Biscontin, G., & Roesset, J. M. (2007). Wave propagation due to sinusoidal excitation in nonlinear one-dimensional soil column. *Geotechnical Special Publication*, (160)
- Al-Bender, F., & Symens, W. (2005). Dynamic characterization of hysteresis elements in mechanical systems. I. theoretical analysis. *Chaos*, 15(1), 1-11.
- Al-Bender, F., Symens, W., Swevers, J., & Van Brussel, H. (2004). Theoretical analysis of the dynamic behavior of hysteresis elements in mechanical systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39(10), 1721-1735.
- Alshawabkeh, A. N., Sheahan, T. C., & Wu, X. (2004). Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields. *Mechanics of Materials*, 36(5-6), 453-465.
- Amde, A. M., & Mirmiran, A. (1999). A new hysteresis model for steel members. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45(8), 1007-1023.
- As?ik, M. Z., & Is?bug?a, V. (2007). Non-linear response of a layered medium. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 13(9-10), 1313-1320.
- Asgarian, B., Tavana, M. A. R., & Soltani, R. H. (2007). Bedrock depth effect investigation in seismic response of offshore platforms considering soil- pile- structure interaction. ,2 315-322
- Ashrafi, S. A., & Smyth, A. W. (2007). Generalized masing approach to modeling hysteretic deteriorating behavior. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(5), 495-505.
- Assimaki, D., & Kausel, E. (2007). Modified topographic amplification factors for a single-faced slope due to kinematic soil-structure interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11), 1414-1431.
- Assimaki, D., Pecker, A., Popescu, R., & Prevost, J. (2003). Effects of spatial variability of soil properties on surface ground motion. *Journal of Earthquake Engineering*, 7, 1-44.
- Atmaoui, N., Kukowski, N., Sto?ckhert, B., & Ko?nig, D. (2006). Initiation and development of pull-apart basins with riedel shear mechanism: Insights from scaled clay experiments. *International Journal of Earth Sciences*, 95(2), 225-238.
- Attard, T., & Fafitis, A. (2005). Plastic hinge development of frame members using a nonlinear hardening rule. *Journal of Structural Engineering*, 131(8), 1286-1293.
- Aubertin, M., Chapuis, R. P., Mbonimpa, M., & Barr, D. W. (2005). "Goodbye, hazen; hello, kozeny-carman," by W. david carrier III. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(8), 1054-1058.
- Aydin, M., Yano, T., & Kilic, S. (2004). Dependence of zeta potential and soil hydraulic conductivity on adsorbed cation and aqueous phase properties. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 450 - 459.
- Bai, B. (2004). Thermo mechanical coupling analysis of nuclear waste repository. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 25(12), 1989-1993.
- Bai, B. (2005). Approximate solution of thermal consolidation of cylindrical heat source with infinite length for saturated soils. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(6), 1004-1009.
- Bai, B. (2005). One-dimensional thermal consolidation characteristics of geotechnical media under non-isothermal condition. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 22(5), 186-191.
- Bai, B. (2006). Effects of coupling schemes of thermo-hydro-mechanical governing equations for saturated porous medium. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 27(4)
- Bai, B. (2006). Response of saturated porous media subjected to local thermal loading on the surface of semi-infinite space. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 22(1), 54-61.
- Bai, B. (2006). Thermal consolidation of layered porous half-space to variable thermal loading. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 27(11), 1531-1539.
- Bai, B. (2007). Thermo-hydro-mechanical responses of saturated porous media under cyclic thermal loading. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 24(5), 87-92.
- Bai, B., & Liu, D. (2006). Study on moisture transfer rule in unsaturated soils due to heat source



- with variable intensity. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25, 4153-4159 .
- Bai, B., & Liu, D. -. (2006). Numerical integral solutions of heat transfer and moisture transport in unsaturated porous media. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 27(12), 2085-2089.
- Bai, B., & Zhao, C. -. (2003). Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 24(4), 533-537.
- Baldi, G., Hueckel, T., & Pellegrini, R. (1988). Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 807-825.
- Bardet, J. P. (1996). Scaled memory description of hysteretic material behavior. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 63(3), 750-757.
- Barnichon, J. -, & Volckaert, G. (2003). Observations and predictions of hydromechanical coupling effects in the boom clay, mol underground research laboratory, belgium. *Hydrogeology Journal*, 11(1), 193 - 202.
- Bauchau, O. A., & Ju, C. (2006). Modeling friction phenomena in flexible multibody dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(50-51), 6909-6924 .
- Benallal, A., & Bigoni, D. (2004). Effects of temperature and thermo-mechanical couplings on material instabilities and strain localization of inelastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52(3), 725-753.
- Benedetti, D., & Limongelli, M. P. (1996). A model to estimate the virgin and ultimate effective stiffnesses from the response of a damaged structure to a single earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(10), 1095-1108.
- Beresnev, I. A., & Wen, K. -. (1996). Nonlinear soil response - A reality? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1964-1978.
- Bergado, D. T., Abuel-Naga, H. M., & Chairakaikeow, S. (2006). Effect of temperature on the consolidation of soft bangkok clay with PVD. 536-539.
- Berger, E. J. (2002). Friction modeling for dynamic system simulation. *Applied Mechanics Reviews*, 55(6), 535-577.
- Berger, E. J., & Krougrill, C. M. (2002). On friction damping modeling using bilinear hysteresis elements. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 124(3), 367-375.
- Berre, T., Lunne, T., Andersen, K. H., Strandvik, S., & Sjursen, M. (2007). Potential improvements of design parameters by taking block samples of soft marine norwegian clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(6), 698-716.
- Beyen, K., & Erdik, M. (2004). Two-dimensional nonlinear site response analysis of adapazar? plain and predictions inferred from aftershocks of the kocaeli earthquake of 17 august 1999. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(3), 261-279.
- Biscontin, G., & Pestana, J. M. (2003). Seismic response of submarine slopes. , 3 867-874.
- Biscontin, G., Pestana, J. M., & Nadim, F. (2004). Seismic triggering of submarine slides in soft cohesive soil deposits. *Marine Geology*, 203(3-4), 341-354.
- Boivin, P., Scha?ffer, B., Temgoua, E., Gratier, M., & Steinman, G. (2006). Assessment of soil compaction using soil shrinkage modelling: Experimental data and perspectives. *Soil and Tillage Research*, 88(12), 65-79.
- Bolzon, G., & Schrefler, B. A. (2005). Thermal effects in partially saturated soils: A constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(9), 861-877.
- Bonilla, L. F., Archuleta, R. J., & Lavalle?e, D. (2005). Hysteretic and dilatant behavior of cohesionless soils and their effects on nonlinear site response: Field data observations and modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2373-2395 .
- Boone, S. J., & Lutenegeger, A. J. (1997). Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in new York state and southern Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 534-550.
- Borja, R. I., Lin, C. -, & Monta?ns, F. J. (2001). Cam-clay plasticity, part IV: Implicit integration of anisotropic bounding surface model with nonlinear hyperelasticity and ellipsoidal loading function. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(26-27), 3293-3323 .

- Bozzano, F., Marcoccia, S., & Barbieri, M. (1999). The role of calcium carbonate in the compressibility of pliocene lacustrine deposits. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 32(3), 271 - 289.
- Burghignoli, A., Desideri, A., & Miliziano, S. (2000). A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 764-780.
- Burnotte, F., Lefebvre, G., & Grondin, G. (2004). A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1038-1053.
- Cai, Y. -, Liu, W., Xu, C. -, & Huang, H. -. (2007). Study on dynamic stress-strain relationship of soft clay based on modified iwan's model under undrained cyclic loading. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(9), 1314-1319.
- Callari, C., Auricchio, F., & Sacco, E. (1998). A finite-strain cam-clay model in the framework of multiplicative elasto-plasticity. *International Journal of Plasticity*, 14(12), 1155-1187.
- Callisto, L., & Calabresi, G. (1998). Mechanical behaviour of a natural soft clay. *Geotechnique*, 48(4), 495 - 513.
- Camirero, M. A., & Montañés, F. J. (2006). An enhanced algorithm for nested surfaces plasticity using the implicit mroz translation rule. *Computers and Structures*, 84(26-27), 1684-1695.
- Cekerevac, C., Girardin, S., Klubertanz, G., & Laloui, L. (2006). Calibration of an elasto-plastic constitutive model by a constrained optimisation procedure. *Computers and Geotechnics*, 33(8), 432-443.
- Cekerevac, C., & Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(3), 209-228.
- Cekerevac, C., Laloui, L., & Vulliet, L. (2005). A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils. *Geotechnical Testing Journal*, 28(2), 161-170.
- Chandler, R. J. (2000). Clay sediments in depositional basins: The geotechnical cycle. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 33(1), 7-39.
- Chapuis, R. P., Dallaire, V., Marcotte, D., Chouteau, M., Acevedo, N., & Gagnon, F. (2005). Evaluating the hydraulic conductivity at three different scales within an unconfined sand aquifer at lachenaie, quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 1212-1220.
- Chapuis, R. P., Marcotte, D., & Aubertin, M. (2006). Discussion of "network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures". *Canadian Geotechnical Journal*, 43(1), 110-114.
- Chapuis, R. P., Masse, I., Madinier, B., & Aubertin, M. (2007). A drainage column test for determining unsaturated properties of coarse materials. *Geotechnical Testing Journal*, 30(2), 83-89.
- Chaudhary, S. K., & Kuwano, J. (2003). Anisotropic multiple yielding of dense toyoura sand in p?-constant shear plane. *Soils and Foundations*, 43(4), 59-69.
- Chen, W. -, Shao, J. -, Duveau, G., Li, F., & Yang, C. -. (2005). Constitutive model of saturated-unsaturated clay and its numerical simulation. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17), 3011-3016 .
- Chen, X., Jin, X., Tao, X., & Kang, L. (2006). Analysis and evaluation of one dimensional dynamic nonlinear constitutive relation of soil. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 26(6), 147 - 157.
- Chen, Z. -, Fang, X. -, Sun, S. -, Li, G., Xie, Y., & Lu, Z. -. (2006). Test research on structure-damage evolution and thermal-mechanical characteristics of unsaturated expansive soil. (147) 1731-1740.
- Chiang, D. -. (1997). Modeling and identification of elastic-plastic systems using the distributed-element model. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 119(4), 332-336.

- Chiang, D. -. (2008). Modeling and characterization of cyclic relaxation and ratcheting using the distributed-element model. *Applied Mathematical Modelling*, 32(4), 501-513.
- Chiou, Y. -, & Hsiao, P. -. (2005). Large displacement analysis of cyclically loaded inelastic structures. *Journal of Structural Engineering*, 131(12), 1803-1810.
- Cho, W. J., Lee, J. O., & Chun, K. S. (1999). The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 14(1-3), 47-58.
- Claesson, P. (2003). Long term settlements in soft clays. *Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Hogskola*, (1945).
- Coelho, L. C., Soares, A. C., Ebecken, N. F. F., Alves, J. L. D., & Landau, L. (2006). Modelling mechanical behaviour of limestone under reservoir conditions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(14), 1477-1500.
- Collins, I. F. (2005). The concept of stored plastic work or frozen elastic energy in soil mechanics. *Geotechnique*, 55(5), 373-382.
- Cotecchia, F., & Chandler, R. J. (2000). A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Geotechnique*, 50(4), 431-447.
- Coveney, V. A., & Johnson, D. E. (1999). Modeling of carbon black filled natural rubber vulcanizates by the standard triboelastic solid. *Rubber Chemistry and Technology*, 72(4), 673-683.
- Csaba, G. (1998). Forced response analysis in time and frequency domains of a tuned bladed disk with friction dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 214(3), 395-412.
- Cubrinovski, M., & Ishihara, K. (1998). State concept and modified elastoplasticity for sand modelling. *Soils and Foundations*, 38(4), 213-225.
- Cui, Y., & Chen, B. (2006). Recent advances in research on engineered barrier for geological disposal of high-level radioactive nuclear waste. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(4), 842-847.
- Cui, Y. J., & Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Geotechnique*, 46(2), 291-311.
- Cui, Y. J., Sultan, N., & Delage, P. (2000). A thermomechanical model for saturated clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 607-620.
- Cui, Y. -, Tang, A. -, Marcial, D., Terpereau, J. -, Marchadier, G., & Boulay, X. (2007). Use of a differential pressure transducer for the monitoring of soil volume change in cyclic triaxial test on unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 30(3), 227-233.
- Cui, Y. -, & Ye, W. -. (2005). Modeling of thermo-mechanical volume change behavior of saturated clays. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(21), 3903-3910 .
- Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2003). Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil under very high suctions. *Comptes Rendus – Mecanique*, 331,(3), 203 – 210.
- Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2005). Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil over a wide suction range. *Engineering Geology*, 81(3), 204-212.
- Dai, F., Lee, C. F., Wang, S., & Feng, Y. (1999). Stress-strain behaviour of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures. *Engineering Geology*, 53(3-4), 359-370.
- Das, S. K., & Basudhar, P. K. (2007). Prediction of hydraulic conductivity of clay liners using artificial neural network. *Lowland Technology International*, 9(1), 50-58.
- De Bruyn, D., & Thimus, J. -. (1996). The influence of temperature on mechanical characteristics of boom clay: The results of an initial laboratory programme. *Engineering Geology*, 41(1-4), 117-126.
- Del Olmo, C., Fioravante, V., Gera, F., Hueckel, T., Mayor, J. C., & Pellegrini, R. (1996). Thermomechanical properties of deep argillaceous formations. *Engineering Geology*, 41(1-4), 87-102.
- Delage, P., Le, T. -, Tang, A. -, Gui, Y. -, & Li, X. -. (2007). Suction effects in deep boom clay block samples. *Geotechnique*, 57(2), 239-244.
- Delage, P., Sultan, N., & Cui, Y. J. (2000). On the thermal consolidation of boom clay.

- Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 343-354.
- Demars, K. R., & Charles, R. D. (1982). Soil volume changes induced by temperature cycling. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(2), 188-194.
- Deniau, I., Behar, F., Largeau, C., De Cannie?re, P., Beaucaire, C., & Pitsch, H. (2005). Determination of kinetic parameters and simulation of early CO<sub>2</sub> production from the boom clay kerogen under low thermal stress. *Applied Geochemistry*, 20(11), 2097-2107 .
- Deniau, I., Derenne, S., Beaucaire, C., Pitsch, H., & Largeau, C. (2001). Morphological and chemical features of a kerogen from the underground mol laboratory (boom clay formation, oligocene, belgium): Structure, source organisms and formation pathways. *Organic Geochemistry*, 32(11), 1343-1356.
- Deniau, I., Derenne, S., Beaucaire, C., Pitsch, H., & Largeau, C. (2004). Occurrence and nature of thermolabile compounds in the boom clay kerogen (oligocene, underground mol laboratory, belgium). *Organic Geochemistry*, 35(2), 91-107.
- Deniau, I., Derenne, S., Beaucaire, C., Pitsch, H., & Largeau, C. (2005). Simulation of thermal stress influence on the boom clay kerogen (oligocene, belgium) in relation to long-term storage of high activity nuclear waste: I. study of generated soluble compounds. *Applied Geochemistry*, 20(3), 587 - 597.
- Deshmukh, D., & Berger, E. J. (2003). Convergence behaviors of reduced-order models for frictional contacts. , 5 B 1081-1089.
- Deshmukh, D. V., Berger, E. J., Mackin, T. J., & Inglis, H. (2005). Convergence behaviors of reduced-order models for frictional contacts. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 127(4), 370-381.
- Devillers, P., Saix, C., & El Youssoufi, M. S. (1996). Loi de comportement thermohydrome?canique pour les sols non sature?s : Identification in situ des indices de compression thermique. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 250-259.
- Dewhurst, D. N., Brown, K. M., Clennell, M. B., & Westbrook, G. K. (1996). A comparison of the fabric and permeability anisotropy of consolidated and sheared silty clay. *Engineering Geology*, 42(4), 253-267.
- Dewhurst, D. N., Yang, Y., & Aplin, A. C. (1999). Permeability and fluid flow in natural mudstones. *Geological Society Special Publication*, (158), 23-43.
- Dixon, D., Chandler, N., Graham, J., & Gray, M. N. (2002). Two large-scale sealing tests conducted at atomic energy of canada's underground research laboratory: The buffer-container experiment and the isothermal test. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 503-518.
- Dixon, D. A., Graham, J., & Gray, M. N. (1999). Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(5), 815-825.
- Djeran-Maigre, I., & Gasc-Barbier, M. (2000). Hydromechanical modelling of experimentally compacted saturated argillaceous porous media. *Transport in Porous Media*, 41(1), 81-103.
- Do, N. B., Ferri, A. A., & Bauchau, O. A. (2007). Efficient simulation of a dynamic system with LuGre friction. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2(4), 281-289.
- Dobry, R., Pecker, A., Mavroeidis, G., Zeghal, M., Gohl, B., & Yang, D. (2003). Damping/global energy balance in FE model of bridge foundation lateral response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(6), 483-495.
- Einav, I. (2004). Thermomechanical relations between stress-space and strain-space models. *Geotechnique*, 54(5), 315-318.
- Einav, I., & Cassidy, M. J. (2005). A framework for modelling rigid footing behaviour based on energy principles. *Computers and Geotechnics*, 32(7), 491-504.
- El Kammar, A. M., & El Kammar Jr., M.M. (1996). Potentiality of chemical weathering under arid conditions of black shales from egypt. *Journal of Arid Environments*, 33(2), 179-199.
- El Naggat, M. H., Shayanfar, M. A., Kimiaei, M., & Aghakouchak, A. A. (2005). Simplified BNWF model for nonlinear seismic response analysis of offshore piles with nonlinear input ground motion analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 365-380.

- Elgamal, A., Parra, E., Yang, Z., & Adalier, K. (2002). Numerical analysis of embankment foundation liquefaction countermeasures. *Journal of Earthquake Engineering*, 6(4), 447-471.
- Elgamal, A., Yang, Z., & Parra, E. (2002). Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(4), 259-271.
- Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., & Ragheb, A. (2003). Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils. *International Journal of Plasticity*, 19(6), 883-905.
- Emmett, K. (2005). Pile disturbance in layered ground. *Ground Engineering*, 38(12), 30-32.
- Eriksson, L. G. (1989). Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays. , 3 2087-2090.
- Eslami, M. R., & Mahbadi, H. (2001). Cyclic loading of thermal stresses. *Journal of Thermal Stresses*, 24 (6), 577-603.
- Fairhurst, C. (2002). Geomechanics issues related to long-term isolation of nuclear waste. *Comptes Rendus Physique*, 3(7-8), 961-974.
- Fang, Y., & Xiong, Y. (2006). A multi-surface model considering shear and compression damages. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25, 3501-3506 .
- Fang, Z., & Yin, J. -. (2006). Physical modelling of consolidation of hong kong marine clay with prefabricated vertical drains. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(6), 638 – 652.
- Ferguson, W. J., & Kaddouri, A. (2004). A mass conservative non-isothermal subsurface three-phase flow model: Formulation and application. *Water, air, and soil pollution*, 153(1-4), 269-291.
- Finno, R. J., Holman, T. P., Jung, Y., Cho, W. J., & Katkhuda, I. (2006). Small strain responses of a freshwater glacial clay. (156) 1-15.
- Formato, A. (2005). Simplified triaxial apparatus to test agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 81(1), 121-129.
- Fowler, A. C., & Noon, C. G. (1999). Mathematical models of compaction, consolidation and regional groundwater flow. *Geophysical Journal International*, 136(1), 251-260.
- Fox, P. J., & Edil, T. B. (1996). Effects of stress and temperature on secondary compression of peat. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 405-415.
- Franc?ois, B., Salager, S., El Yousoufi, M. S., Picanyol, D. U., Laloui, L., & Saix, C. (2007). Compression tests on a sandy silt at different suction and temperature levels. *Geotechnical Special Publication*, (157)
- Gan, Y., & Kamlah, M. (2007). Identification of material parameters of a thermo-mechanical model for pebble beds in fusion blankets. *Fusion Engineering and Design*, 82(2), 189-206.
- Gareau, L. F., Molenkamp, F., & Sharma, J. (2006). An improved oedometer apparatus to measure lateral stress during testing. *Geotechnical Testing Journal*, 29(3), 200-206.
- Gasc-Barbier, M., Cosenza, P., Ghoreychi, M., Chanchole, S., & Tessier, D. (2000). Design of triaxial test with controlled suction: Measure of strain. *Comptes Rendus de l'Academie de Sciences - Serie Ila: Sciences de la Terre et des Planetes*, 330(2), 97-103.
- Gasparre, A., & Coop, M. (2006). Techniques for performing small-strain probes in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, 56(7), 491-495.
- Gatmiri, B., & Delage, P. (1997). A formulation of fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of saturated porous media - numerical approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(3), 199-225.
- Gens, A., Sa?nchez, M., & Sheng, D. (2006). On constitutive modelling of unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 1(3), 137 – 147.
- Gens, A., Vaunat, J., Garitte, B., & Wileveau, Y. (2007). In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading: Observations and interpretation. *Geotechnique*, 57(2), 207-228.
- Gera, F., Hueckel, T., & Peano, A. (1996). Critical issues in modelling the long-term hydro-thermomechanical performance of natural clay barriers. *Engineering Geology*, 41(1-4), 17-33.
- Giraud, A., Homand, F., & Rousset, G. (1998). Thermoelastic and thermoplastic response of a

- double-layer porous space containing a decaying heat source. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(2), 133-149.
- Gnanendran, C. T., Manivannan, G., & Lo, S. - R. (2006). Influence of using a creep, rate, or an elastoplastic model for predicting the behaviour of embankments on soft soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(2), 134-154.
- Goto, Y., Jiang, K., & Obata, M. (2006). Stability and ductility of thin-walled circular steel columns under cyclic bidirectional loading. *Journal of Structural Engineering*, 132(10), 1621-1631.
- Goto, Y., Wang, Q., & Obata, M. (1998). FEM analysis for hysteretic behavior of thin-walled columns. *Journal of Structural Engineering*, 124(11), 1290-1301.
- Graham, J. (2006). The 2003 R.M. hardy lecture: Soil parameters for numerical analysis in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(2), 187-209.
- Graham, J., Alfaro, M., & Ferris, G. (2004). Compression and strength of dense sand at high pressures and elevated temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1206-1212.
- Graham, J., Halayko, K. G., Hume, H., Kirkham, T., Gray, M., & Oscarson, D. (2002). A capillarity-advective model for gas break-through in clays. *Engineering Geology*, 64(2-3), 273-286.
- Graham, J., Tanaka, N., Crilly, T., & Alfaro, M. (2001). Modified cam-clay modelling of temperature effects in clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 608-621.
- Griffiths, D. V., & Lu, N. (2005). Unsaturated slope stability analysis with steady infiltration or evaporation using elasto-plastic finite elements. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(3), 249-267.
- Guo, R., & Dixon, D. (2006). Simulated hydraulic response of AECL's isothermal test and comparison with measured data. (147), 2500 – 2511.
- Haciefendiog?lu, K., Bas?ag?a, H. B., Bayraktar, A., & Ates?, S. (2007). Nonlinear analysis of rock-fill dams to non-stationary excitation by the stochastic wilson-? method. *Applied Mathematics and Computation*, 194(2), 333-345.
- Hanson, J. L., Edil, T. B., & Fox, P. J. (2001). Stress-temperature effects on peat compression. *Geotechnical Special Publication*, 112, 331-345.
- Hartwigsen, C. J., McFarland, D. M., Song, Y., Bergman, L., & Vakakis, A. F. (2003). Experimental study of nonlinear effects in a typical shear lap joint configuration. , 5 B 1109-1116.
- Hartwigsen, C. J., Song, Y., McFarland, D. M., Bergman, L. A., & Vakakis, A. F. (2004). Experimental study of non-linear effects in a typical shear lap joint configuration. *Journal of Sound and Vibration*, 277(12), 327-351.
- Hartzell, S., Bonilla, L. F., & Williams, R. A. (2004). Prediction of nonlinear soil effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5), 1609-1629.
- Hartzell, S., Guatteri, M., Mai, P. M., Liu, P. -, & Fisk, M. (2005). Calculation of broadband time histories of ground motion, part II: Kinematic and dynamic modeling using theoretical green's functions and comparison with the 1994 northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (2), 614-645.
- Hartzell, S., Leeds, A., Frankel, A., Williams, R. A., Odum, J., Stephenson, W., et al. (2002). Simulation of broadband ground motion including nonlinear soil effects for a magnitude 6.5 earthquake on the seattle fault, seattle, washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), 831-853.
- Hashiguchi, K. (2000). Fundamentals in constitutive equation: Continuity and smoothness conditions and loading criterion. *Soils and Foundations*, 40(4), 155-161.
- Hashiguchi, K., & Chen, Z. -. (1998). Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(3), 197-227.
- Hashiguchi, K., & Mase, T. (2007). Extended yield condition of soils with tensile yield strength and rotational hardening. *International Journal of Plasticity*, 23(12), 1939-1956.
- Hashiguchi, K., & Okayasu, T. (2000). Time-dependent elastoplastic constitutive equation based on

- the subloading surface model and its application to soils. *Soils and Foundations*, 40(4), 19 – 36.
- Hashiguchi, K., Saitoh, K., Okayasu, T., & Tsutsumi, S. (2002). Evaluation of typical conventional and unconventional plasticity models for prediction of softening behaviour of soils. *Geotechnique*, 52(8), 561-578.
- Hashiguchi, K., & Tsutsumi, S. (2001). Elastoplastic constitutive equation with tangential stress rate effect. *International Journal of Plasticity*, 17(1), 117-145.
- Hau, K. W., McDowell, G. R., Zhang, G. P., & Brown, S. F. (2005). The application of a three-surface kinematic hardening model to repeated loading of thinly surfaced pavements. *Granular Matter*, 7(23), 145-156.
- Heath, A. C., Pestana, J. M., Harvey, J. T., & Bejerano, M. O. (2004). Normalizing behavior of unsaturated granular pavement materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(9), 896-904.
- Heister, K., Kleingeld, P. J., & Gustav Loch, J. P. (2006). Induced membrane potentials in chemical osmosis across clay membranes. *Geoderma*, 136(1-2), 1-10.
- Hira, M., Hashiguchi, K., Okayasu, T., & Miwa, K. (2002). Deformation behavior of "shirasu" and its prediction by the subloading surface model. *Soils and Foundations*, 42(5), 37-46.
- Høgsberg, J., & Krenk, S. (2007). Adaptive tuning of elasto-plastic damper. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 42(7), 928-940.
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K., & Katkan, W. (2007). Assessment of engineering properties of bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(2), 173-187.
- Horseman, S. T., & McEwen, T. J. (1996). Thermal constraints on disposal of heat-emitting waste in argillaceous rocks. *Engineering Geology*, 41(1-4), 5-16.
- Horsrud, P., Sønsteb Ø, E. F., & Bøe, R. (1998). Mechanical and petrophysical properties of north sea shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(8), 1009-1020.
- Houston, S. L., Houston, W. N., & Williams, N. D. (1985). THERMO-MECHANICAL BEHAVIOR OF SEAFLOOR SEDIMENTS. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(11), 1249-1263.
- Hu, C. M., Guo, N., Du, H., & Jian, X. M. (2006). A microslip model of the bonding process in ultrasonic wire bonders part II: Steady state response. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(11-12), 1134-1142.
- Hu, L. B., & Hueckel, T. (2007). Coupled chemo-mechanics of intergranular contact: Toward a three-scale model. *Computers and Geotechnics*, 34(4), 306-327.
- Hu, L. B., & Hueckel, T. (2007). Creep of saturated materials as a chemically enhanced rate-dependent damage process. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31 (14), 1537-1565.
- Hueckel, T. (1997). Chemo-plasticity of clays subjected to stress and flow of a single contaminant. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(1), 43-72.
- Hueckel, T., & Borsetto, M. (1990). Thermoplasticity of saturated soils and shales. constitutive equations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12), 1765-1777.
- Hueckel, T., Cassiani, G., Tao, F., Pellegrino, A., & Fioravante, V. (2001). Aging of oil/gas-bearing sediments, their compressibility, and subsidence. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11), 926-938.
- Hueckel, T., & Pellegrini, R. (1996). A note on thermomechanical anisotropy of clays. *Engineering Geology*, 41(1-4), 171-180.
- Hueckel, T., & Pellegrini, R. (2002). Reactive plasticity for clays: Application to a natural analog of longterm geomechanical effects of nuclear waste disposal. *Engineering Geology*, 64(2-3), 195-215.
- Hueckel, T., Pellegrini, R., & Del Olmo, C. (1998). A constitutive study of thermo-elasto-plasticity of deep carbonatic clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(7), 549-574.
- Hueckel, T., & Pellegrini, R. (1991). Thermoplastic modeling of undrained failure of saturated clay

- due to heating. *Soils and Foundations*, 31(3), 1-16.
- Ibrahim, R. A., & Pettit, C. L. (2005). Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*, 279(3-5), 857-936.
- Ivanov, V. A., & Chudakov, P. D. (1996). Structure-phenomenological theory of shape memory of metals. *Russian Metallurgy (Metally)*, (2), 123-130.
- Izotov, I. N., Kuznetsov, N. P., Melnikov, B. E., Mityukov, A. G., Musienko, A. Y., & Semenov, A. S. (2001). Modification of the multisurface theory of plasticity with one surface. comparison with experimental data. , 4348 390-397.
- Jamin, F., Youssoufi, M. S. E., & Saix, C. (2004). On the thermo-extensive nature of the yield surface for an unsaturated soil. *Comptes Rendus - Mecanique*, 332(2), 153-159.
- Janicki, M., De Mey, G., & Napieralski, A. (2002). Application of green's functions for analysis of transient thermal states in electronic circuits. *Microelectronics Journal*, 33(9), 733-738.
- Janicki, M., De Mey, G., & Napieralski, A. (2002). Transient thermal analysis of multilayered structures using green's functions. *Microelectronics Reliability*, 42(7), 1059-1064.
- Jardine, R. J., Gens, A., Hight, D. W., & Coop, M. R. (2004). Developments in understanding soil behaviour. 103-206.
- Jefferies, M., & Been, K. (2000). Implications for critical state theory from isotropic compression of sand. *Geotechnique*, 50(4), 419-429.
- Jefferson, I., & Rogers, C. D. F. (1998). Liquid limit and the temperature sensitivity of clays. *Engineering Geology*, 49(2), 95-109.
- Jiang, W. (1999). General kinematic-isotropic hardening model. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(4), 487-490.
- Jiang, Y., & Kurath, P. (1996). A theoretical evaluation of plasticity hardening algorithms for nonproportional loadings. *Acta Mechanica*, 118, 213-234.
- Jiang, Y., & Sehitoglu, H. (1996). Comments on the mroz multiple surface type plasticity models. *International Journal of Solids and Structures*, 33(7), 1053-1068.
- Jiang, Y., & Sehitoglu, H. (1996). Modeling of cyclic ratchetting plasticity, part I: Development of constitutive relations. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 63(3), 720-725.
- Jiang, Z., Hoxha, D., & Homand, F. (2007). Numerical simulation of 3D coupled thermo-hydro-mechanical anisotropy of argillite rock for radioactive waste disposal. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3), 493-500.
- Jianzhong, L., Fangle, P., Lisheng, X., & Fumio, T. (2006). Viscous properties of clay with deferent water content. (150) 55 – 61.
- Jing, L., & Feng, X. (2003). Numerical modeling for coupled thermo-hydro-mechanical and chemical processes (THMC) of geological media - international and chinese experiences. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(10), 1704-1715.
- Jullien, M., Raynal, J., Kohler, E., & Bildstein, O. (2005). Physicochemical reactivity in clay-rich materials: Tools for safety assessment. *Oil and Gas Science and Technology*, 60(1), 107-120.
- Kaliske, M., & Rothert, H. (1998). Constitutive approach to rate-independent properties of filled elastomers. *International Journal of Solids and Structures*, 35(17), 2057-2071.
- Kausel, E., & Assimaki, D. (2002). Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(1), 34-47.
- Kemp, S. J., Rochelle, C. A., & Merriman, R. J. (2005). Back-reacted saponite in jurassic mudstones and limestones intruded by a tertiary sill, isle of skye. *Clay Minerals*, 40(3), 263-282.
- Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A. F., & Golinval, J. -. (2006). Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(3), 505 - 592.
- Khalili, N., & Loret, B. (2001). An elasto-plastic model for non-isothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media: Formulation. *International Journal of Solids and*



- Structures*, 38(46-47), 8305-8330 .
- Khoei, A. R., & Jamali, N. (2005). On the implementation of a multi-surface kinematic hardening plasticity and its applications. *International Journal of Plasticity*, 21(9), 1741-1770.
- Kimiaei, M., Naggar, H. E., Shayanfar, M. A., & Aghakouchak, A. A. (2005). The effects of free field ground motion analysis on seismic response of offshore piles. , 1 B 681-688.
- Kimiaei, M., Shayanfar, M. A., Aghakouchak, A. A., & Naggar, H. E. (2006). A practical model for nonlinear seismic response analysis of jacket type fixed offshore platforms. , 2006
- Kimoto, S., Oka, F., Kim, Y., Takada, N., & Higo, Y. (2007). A finite element analysis of the thermo-hydronechanically coupled problem of a cohesive deposit using a thermo-elasto-viscoplastic model. *Key Engineering Materials*, 340-341 II, 1291-1296.
- Krishnaiah, S., & Singh, D. N. (2003). A methodology to determine soil moisture movement due to thermal gradients. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27(6), 715 – 721.
- Kurpaska, S., S?lipek, Z., Bozek, B., & Fraczek, J. (2005). Simulation of heat and moisture transfer in the greenhouse substrate due to a heating system by buried pipes. *Biosystems Engineering*, 90(1), 63 - 74.
- Kuwano, J., Chaudhary, S. K., & Ohba, H. (2005). Change in multiple yield surfaces of dense toyoura sand with shearing in p?-constant plane. (143) 319-340.
- Lade, P. V. (2005). Overview of constitutive models for soils. (130-142) 2493-2526.
- Lade, P. V., & Inel, S. (1997). Rotational kinematic hardening model for sand. part I concept of rotating yield and plastic potential surfaces. *Computers and Geotechnics*, 21(3), 183-216.
- Laloui, L., & Cekerevac, C. (2003). Thermo-plasticity of clays: An isotropic yield mechanism. *Computers and Geotechnics*, 30(8), 649-660.
- Laloui, L., Moreni, M., & Vulliet, L. (2003). Behavior of a bi-functional pile, foundation and heat exchanger. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 388-402.
- Laloui, L., & Nuth, M. (2006). Numerical modeling of some features of heat exchanger pile. (153) 189 - 194.
- Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30 (8), 763-781.
- Lee, I. -, Sung, S. -, & Cho, G. -. (2005). Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 624-631.
- Lenart, S. (2006). Deformation characteristics of lacustrine carbonate silt in the julian alps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4), 131-142.
- Leroueil, S. (1996). Compressibility of clays: Fundamental and practical aspects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122(7), 534-543.
- Leroueil, S., & Marques, M. E. S. (1996). Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering. *Geotechnical Special Publication*, (61), 1-59.
- Li, C., & Ellyin, F. (1999). A mesomechanical approach to inhomogeneous particulate composites undergoing localized damage: Part I – A mesodomain simulation. *International Journal of Solids and Structures*, 36(36), 5529 – 5544.
- Li, L., & Aubertin, M. (2003). A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4), 644-658.
- Li, N. (2000). Coupled model of heat-seepage-deformation FEM for jointed rock masses. *Progress in Natural Science*, 10(12), 917-918.
- Li, X., Liu, Z., & Lewis, R. W. (2005). Mixed finite element method for coupled thermo-hydro-mechanical process in poro-elasto-plastic media at large strains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 64(5), 667-708.
- Likitlersuang, S., & Houlby, G. T. (2006). Development of hyperplasticity models for soil mechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(3), 229-254.
- Lingnau, B. E., Graham, J., & Tanaka, N. (1995). Isothermal modeling of sand-bentonite mixtures at elevated temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1), 78-88.
- Lingnau, B. E., Graham, J., Yarechewski, D., Tanaka, N., & Gray, M. N. (1996). Effects of

- temperature on strength and compressibility of sand-bentonite buffer. *Engineering Geology*, 41(1-4), 103-115.
- Liu, C. -. (2003). Smoothing elastoplastic stress-strain curves obtained by a critical modification of conventional models. *International Journal of Solids and Structures*, 40(9), 2121-2145 .
- Liu, C. -. (2006). Reconcile the perfectly elastoplastic model to simulate the cyclic behavior and ratcheting. *International Journal of Solids and Structures*, 43(2), 222-253.
- Liu, G. -, & Zheng, R. -. (2006). Review on study of dynamic response and wave motion theory in coupling thermo-hydro-mechanical porous medium. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 27, 218 - 221.
- Liu, M. D., & Carter, J. P. (2000). On the volumetric deformation of reconstituted soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(2), 101-133.
- Liu, M. D., & Carter, J. P. (2004). Evaluation of the sydney soil model. 498-509.
- Liu, P., Archuleta, R. J., & Hartzell, S. H. (2006). Prediction of broadband ground-motion time histories: Hybrid low/high-frequency method with correlated random source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 2118-2130 .
- Lloret, A., & Villar, M. V. (2007). Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted "FEBEX" bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(8-14), 701-715.
- Lloret, A., Villar, M. V., Sañchez, M., Gens, A., Pintado, X., & Alonso, E. E. (2003). Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Geotechnique*, 53(1), 27-40.
- Lo Presti, D. C. F., Lai, C. G., & Puci, I. (2006). ONDA: Computer code for nonlinear seismic response analyses of soil deposits. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 223 - 236.
- Lu, X. B. (2001). Thermo-visco-plastic instability analysis of saturated soil. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 36(4), 687-692.
- Lu, X. -, Jiao, B. -, Zhang, J. -, Wang, S. -, & Cui, P. (2005). Thermo-effect on high-speed landslide. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(3), 424 - 429.
- Madland, M. V., Korsnes, R. I., & Risnes, R. (2002). Temperature effects in brazilian, uniaxial and triaxial compressive tests with high porosity chalk. 3683-3693 .
- Maier, H. J., & Christ, H. -. (1996). Modelling of cyclic stress-strain behavior under thermomechanical fatigue conditions -A new approach based upon a multi-component model. *Scripta Materialia*, 34(4), 609-615.
- Maier, H. J., & Christ, H. -. (1997). Modeling of cyclic stress-strain behavior and damage mechanisms under thermomechanical fatigue conditions. *International Journal of Fatigue*, 19
- Maltman, A. J., & Bolton, A. (2003). How sediments become mobilized. *Geological Society Special Publication*, (216), 9-20.
- Marques, M. E. S., Leroueil, S., & de Almeida, M. d. S. (2004). Viscous behaviour of st-roch-de-l'achigan clay, quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 25-38.
- Maugis, P., & Imbert, C. (2007). Confined wetting of FoCa clay powder/pellet mixtures: Experimentation and numerical modeling. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(8-14), 795-808.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussie?re, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified kova?cs model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8), 773 - 787.
- McDowell, G. R., & Bolton, M. D. (1999). A micro mechanical model for isotropic cyclic loading of isotropically clastically compressed soil. *Granular Matter*, 1(4), 183-193.
- Medjo Eko, R. (2002). Validation of an extended critical state model using the mechanical behaviour of an agricultural soil. *Soil and Tillage Research*, 68(1), 1-16.
- Merckelbach, L. (2000). Consolidation and strength evolution of soft mud layers.

*Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, 100(2), 1-151.

- Mertens, J., Vandenberghe, N., Wouters, L., & Sintubin, M. (2003). The origin and development of joints in the boom clay formation (rupelian) in belgium. *Geological Society Special Publication*, (216), 309 - 321.
- Miller, J. D., & Dane Quinn, D. (2005). An iwan model for dissipation in structural systems with frictional joints. , *I C* 1883-1889.
- Modaressi, H., & Laloui, L. (1997). A thermo-viscoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(5), 313-335.
- Mohamed, A. M. O., & Shooshpasha, I. (2004). Hydro-thermal performance of multilayer capillary barriers in arid lands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22(1), 19-42.
- Monta?ns, F. J., & Borja, R. I. (2002). Implicit J2-bounding surface plasticity using prager's translation rule. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(10), 1129-1166.
- Monta?ns, F. J., & Caminero, M. A. (2007). On the consistency of nested surfaces models and their kinematic hardening rules. *International Journal of Solids and Structures*, 44(14-15), 5027-5042 .
- Moosbrugger, J. C., Morrison, D. J., & Jia, Y. (2000). Nonlinear kinematic hardening rule parameters - relationship to substructure evolution in polycrystalline nickel. *International Journal of Plasticity*, 16 (3), 439-467.
- Mosalamy, F. H. (1983). THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF SOME EGYPTIAN CLAYS AND CLAY/SAND MIXTURES. 12-17.
- Murad, M. A. (1999). Thermomechanical model of hydration swelling in smectitic clays: I two-scale mixture-theory approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23(7), 673 - 696.
- Murad, M. A., & Cushman, J. H. (2000). Thermomechanical theories for swelling porous media with microstructure. *International Journal of Engineering Science*, 38(5), 517-564.
- Muravskii, G. (2005). On description of hysteretic behaviour of materials. *International Journal of Solids and Structures*, 42(9-10), 2625-2644 .
- Muravskii, G. B. (2001). Application of experimental results on cyclic deforming of soils to seismic response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(8), 661-669.
- Narasimha Rao, S., & Panda, A. P. (1998). Non-linear analysis of undrained cyclic strength of soft marine clay. *Ocean Engineering*, 26(3), 241-253.
- Navarro, V., Candel, M., Barenca, A., Yustres, A., & Garcí?a, B. (2007). Optimisation procedure for choosing cam clay parameters. *Computers and Geotechnics*, 34(6), 524-531.
- Neaupane, K. M., & Nanakorn, P. (2006). Coupled heat-deformation-flow analysis for clayey soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(4), 521-525.
- Neaupane, K. M., & Yamabe, T. (2001). A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium. *Computers and Geotechnics*, 28(8), 613-637.
- Neaupane, K. M., Yamabe, T., & Yoshinaka, R. (1999). Simulation of a fully coupled thermo-hydro mechanical system in freezing and thawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(5), 563-580.
- Nova, R., Castellanza, R., & Tamagnini, C. (2003). A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(9), 705-732.
- Ohtsubo, M., Egashira, K., Tanaka, H., & Mishima, O. (2002). Clay minerals and geotechnical index properties of marine clays in east asia. *Marine Georesources and Geotechnology*, 20(4), 223-235.
- Oka, F., Kimoto, S., & Adachi, T. (2005). Calibration of elasto-viscoplastic models for cohesive soils. (128) 400-414.
- Oldecop, L. A., & Alonso, E. E. (2004). Testing rockfill under relative humidity control. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 269-278.

- Osinov, V. A. (2003) for the dynamic earthquake-induced deformation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 535-548.
- Paez, T. L., Urbina, A., Gregory, D. L., & Resor, B. R. (2003). Sensitivity analysis of a microslip friction model. 307-316.
- Paez, T. L., Urbina, A., Gregory, D. L., & Resor, B. R. (2004). Sensitivity analysis of a microslip friction model. *Journal of the IEST*, 47, 74-79.
- Papamichos, E. (2004). Plasticity model for stress-release induced damage. *International Journal of Geomechanics*, 4(1), 13-18.
- Pappin, J., Ramsey, J., Booth, E., & Lubkowski, Z. (1998). Seismic response of piles: Some recent design studies. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 131(1), 23-33.
- Peng, X., Han, Y., & Huang, S. (2000). Mixture theory based constitutive model for SMA. *Mechanics Research Communications*, 27(1), 21-28.
- Peng, X., Yang, Y., & Huang, S. (2000). Two-phase mixture model for SMAs and application to the analysis for pseudoelasticity of a SMA polycrystal. *Smart Materials and Structures*, 9(5), 604-612.
- Peng, X., Yang, Y., & Huang, S. (2001). A comprehensive description for shape memory alloys with a two-phase constitutive model. *International Journal of Solids and Structures*, 38(38-39), 6925-6940 .
- Peng, X., Zeng, X., & Fan, J. (1998). A physically based description for coupled plasticity and creep deformation. *International Journal of Solids and Structures*, 35(21),2733-2747 .
- Pestana, J. M., Biscontin, G., Nadim, F., & Andersen, K. (2000). Modeling cyclic behavior of lightly overconsolidated clays in simple shear. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(7), 501-519.
- Peterson, L. D., & Hinkle, J. D. (2003). Microdynamic design requirements for large space structures. , 1 489-499.
- Pettit, C. L., Shirayayev, O. V., Page, S. M., & Slater, J. C. (2004). Measurements and modeling of variability in the dynamics of a bolted joint. , 2 1196-1206.
- Pettit, C. L., Shirayayev, O. V., Page, S. M., & Slater, J. C. (2005). Parameter identification and investigation of a bolted joint model. , 10 7007-7025.
- Poodt, M. P., Koolen, A. J., & Van Der Linden, J.P. (2003). FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 67-76.
- Popp, K., Panning, L., & Sextro, W. (2003). Vibration damping by friction forces: Theory and applications. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 9(3-4), 419-448.
- Pouya, A., Dje?ran-Maigre, I., Lamoureaux-Var, V., & Grunberger, D. (1998). Mechanical behaviour of fine grained sediments: Experimental compaction and three-dimensional constitutive model. *Marine and Petroleum Geology*, 15(2), 129-143.
- Preecha, P., Dejvises, J., Chusanapiputt, S., & Phoomvuthisarn, S. (2004). A temperature calculation and prediction of a three-phase induction motor with non sinusoidal voltage supply. , 1 608-612.
- Prevost, J. H., & Popescu, R. (1996). Constitutive relations for soil materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1
- Puzrin, A., Frydman, S., & Talesnick, M. (1997). Effect of degradation on seismic response of israeli continental slope. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 85-93.
- Puzrin, A. M. (1999). Application of hyperplasticity to modeling of small strain behaviour of soils. 13771383.
- Puzrin, A. M., & Burland, J. B. (1998). Non-linear model of small-strain behaviour of soils. *Geotechnique*, 48(2), 217-233.
- Puzrin, A. M., & Burland, J. B. (2000). Kinematic hardening plasticity formulation of small strain behaviour of soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in*

- Geomechanics*, 24(9), 753-781.
- Puzrin, A. M., & Houlsby, G. T. (2001). Fundamentals of kinematic hardening hyperplasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 38(21), 3771-3794 .
- Puzrin, A. M., & Houlsby, G. T. (2001). On the non-intersection dilemma in multiple surface plasticity. *Geotechnique*, 51(4), 369-372.
- Puzrin, A. M., & Houlsby, G. T. (2003). Rate-dependent hyperplasticity with internal functions. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(3), 252-263.
- Puzrin, A. M., Houlsby, G. T., & Burland, J. B. (2001). Thermomechanical formulation of a small-strain model for overconsolidated clays. *Proceedings of the Royal Society - Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*, 457(2006), 425-440.
- Puzrin, A. M., & Shiran, A. (2000). Effects of the constitutive relationship on seismic response of soils. part II. the site amplification study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(5), 319-331.
- Qi, Y., Al-Mukhtar, M., Alcover, J. -, & Bergaya, F. (1996). Coupling analysis of macroscopic and microscopic behaviour in highly consolidated na-laponite clays. *Applied Clay Science*, 11(2-4), 185 - 197.
- Quinn, D. D. (2001). Distributed friction and microslip in mechanical joints with varying degrees-offreedom. , 6 B 1815-1821.
- Quinn, D. D., & Segalman, D. J. (2005). Using series-series iwan-type models for understanding joint dynamics. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 72(5), 666-673.
- Reeves, G. M., Sims, I., & Cripps, J. C. (2006). *Clay materials used in construction*
- RL, P., & MI, E. (1969). SOME TEMPERATURE EFFECTS ON SOIL COMPRESSIBILITY AND PORE WATER PRESSURE. *Nat Acad Sciences-Nat Research Council-Highway Research Board-Special Report 103*, , 231-242.
- Robinet, J. -, Rahbaoui, A., Plas, F., & Lebon, P. (1996). A constitutive thermomechanical model for saturated clays. *Engineering Geology*, 41(1-4), 145-169.
- Robinson, D., Dhu, T., & Schneider, J. (2006). SUA: A computer program to compute regolith site-response and estimate uncertainty for probabilistic seismic hazard analyses. *Computers and Geosciences*, 32(1), 109-123.
- Rocchi, G., Fontana, M., & Da Prat, M. (2003). Modelling of natural soft clay destruction processes using viscoplasticity theory. *Geotechnique*, 53(8), 729-745.
- Rodriguez, R. (2006). Hydrogeotechnical characterization of a metallurgical waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(10), 1042-1060.
- Romero, E., Gens, A., & Lloret, A. (2001). Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3-4), 311-332.
- Romero, E., & Li, X. (2006). Thermo-hydro-mechanical characterization of OPHELIE backfill mixture. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(4), 733 - 740.
- Romero, E., Villar, M. V., & Lloret, A. (2005). Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays. *Engineering Geology*, 81(3), 255-268.
- Rossi, L., Inyang, H. I., Graham-Eagle, J., & Pennell, S. (2004). A model of coupled heat and moisture transport in an annular clay barrier. *Journal of Environmental Engineering*, 130(8), 855-862.
- Rotta, G. V., Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., Coop, M. R., & Graham, J. (2003). Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress. *Geotechnique*, 53(5), 493-501.
- Rowe, R. K., Gnanendran, C. T., Landva, A. O., & Valsangkar, A. J. (1996). Calculated and observed behaviour of a reinforced embankment over soft compressible soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (2), 324-338.
- Rutqvist, J., Boergesson, L., Chijimatsu, M., Kobayashi, A., Jing, L., Nguyen, T. S., et al. (2001). Thermohydromechanics of partially saturated geological media: Governing equations and formulation of four finite element models. *International Journal of Rock Mechanics and*

*Mining Sciences*, 38(1), 105-127.

- Sa?nchez, M., Gens, A., do Nascimento Guimara?es, L., & Olivella, S. (2005). A double structure generalized plasticity model for expansive materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(8), 751-787.
- Sa?nchez, M., Gens, A., Guimara?es, L., & Olivella, S. (2006). Response of an unsaturated expansive clay under high temperature changes. (147) 2488-2499.
- Saix, C., Devillers, P., & El Youssoufi, M. S. (2000). Thermomechanical coupling in the consolidation of unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 308-317.
- Sanliturk, K. Y., & Ewins, D. J. (1996). Modelling two-dimensional friction contact and its application using harmonic balance method. *Journal of Sound and Vibration*, 193(2), 511-523.
- Sanliturk, K. Y., Ewins, D. J., Elliott, R., & Green, J. S. (2001). Friction damper optimization: Simulation of rainbow tests. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(4), 930 – 939.
- Sanliturk, K. Y., Ewins, D. J., & Stanbridge, A. B. (2001). Underplatform dampers for turbine blades: Theoretical modeling, analysis, and comparison with experimental data. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(4), 919-929.
- Sawicki, A. (2003). Cam-clay approach to modelling pre-failure behaviour of sand against experimental data. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, 50(3), 229-249.
- Scholes, O. N., Clayton, S. A., Hoadley, A. F. A., & Tiu, C. (2007). Permeability anisotropy due to consolidation of compressible porous media. *Transport in Porous Media*, 68(3), 365-387.
- Segal, F., & Val, D. V. (2006). Energy evaluation for ramberg-osgood hysteretic model. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(9), 907-913.
- Segalman, D. J. (2006). Modelling joint friction in structural dynamics. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(1), 430-453.
- Segalman, D. J. (2007). Model reduction of systems with localized nonlinearities. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2(3), 249-266.
- Selvadurai, A. P. S. (1996). Heat-induced moisture movement in a clay barrier II. computational modelling and comparison with experimental results. *Engineering Geology*, 41(1-4), 219-238.
- Seneviratne, H. N., Carter, J. P., Airey, D. W., & Booker, J. R. (1992). *Review of models for predicting the thermo-mechanical behaviour of soft clays*
- Seneviratne, H. N., Carter, J. P., Airey, D. W., & Booker, J. R. (1993). A review of models for predicting the thermomechanical behaviour of soft clays. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 17(10), 715-733.
- Seneviratne, H. N., Carter, J. P., & Booker, J. R. (1993). *Analysis of fully coupled thermo-mechanical behaviour around a rigid cylindrical heat source buried in clay*
- Seneviratne, H. N., Carter, J. P., & Booker, J. R. (1994). Analysis of fully coupled thermomechanical behaviour around a rigid cylindrical heat source buried in clay. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 18(3), 177-203.
- Shamsai, A., Pak, A., Bateni, S. M., & Ayatollahi, S. A. H. (2007). Geotechnical characteristics of copper mine tailings: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(5), 591 – 602.
- Shao, C., & Desai, C. S. (2000). Implementation of DSC model and application for analysis of field pile tests under cyclic loading. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(6), 601-624.
- Sharma, R. S. (2000). Recent advances on constitutive modelling of unsaturated soils. 25-34.
- Sheldon, H. A., Barnicoat, A. C., & Ord, A. (2006). Numerical modelling of faulting and fluid flow in porous rocks: An approach based on critical state soil mechanics. *Journal of Structural Geology*, 28(8), 1468-1482.
- Shi, J. Q., & Durucan, S. (2004). Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: A new interpretation of the reservoir response to primary recovery. *Transport in Porous Media*,

56(1), 1-16.

- Shiryayev, O. V., Page, S. M., Pettit, C. L., & Slater, J. C. (2007). Parameter estimation and investigation of a bolted joint model. *Journal of Sound and Vibration*, 307(3-5), 680-697.
- Shooshpasha, I., Mohammed, A. M. O., & Yong, R. N. (2000). Coupled heat and moisture flow in unsaturated soils under opposing thermal and hydraulic gradients. 291-297.
- Sinha, A. K., Havanagi, V. G., & Mathur, S. (2007). Inflection point method for predicting settlement of PVD improved soft clay under embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(6), 336-345.
- Sivakumar, V., Tan, W. C., Murray, E. J., & McKinley, J. D. (2006). Wetting, drying and compression characteristics of compacted clay. *Geotechnique*, 56(1), 57-62.
- Soliva, R., Benedicto, A., Verge?ly, P., & Rives, T. (2005). Mechanical control of a lithological alternation on normal fault morphology, growth and reactivation. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 176(4), 329-342.
- Song, Y., Hartwigsen, C. J., Bergman, L. A., & Vakakis, A. F. (2003). Dynamical response analysis of jointed structures by 2-D/3-D adjusted iwan beam elements. , 3 1867-1877.
- Song, Y., Hartwigsen, C. J., Bergman, L. A., & Vakakis, A. F. (2003). A three-dimensional nonlinear reduced-order predictive joint model. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2(1), 59-73.
- Song, Y., Hartwigsen, C. J., McFarland, D. M., Vakakis, A. F., & Bergman, L. A. (2004). Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted iwan beam elements. *Journal of Sound and Vibration*, 273(1-2), 249 – 276.
- Song, Y., McFarland, D. M., Bergman, L. A., Hartwigsen, C. J., & Vakakis, A. F. (2003). Modeling of the dynamics of jointed beam structures. , 5 B 1091-1100.
- Song, Y., McFarland, D. M., Bergman, L. A., & Vakakis, A. F. (2005). Effect of pressure distribution on energy dissipation in a mechanical lap joint. *AIAA Journal*, 43(2), 420-425.
- Sulem, J., Lazar, P., & Vardoulakis, I. (2007). Thermo-poro-mechanical properties of clayey gouge and application to rapid fault shearing. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(3), 523-540.
- Sultan, N., Delage, P., & Cui, Y. J. (2000). Thermomechanical behaviour of boom clay. *Comptes Rendus de l'Academie de Sciences -Serie IIB: Mecanique*, 328(6), 457-463.
- Sultan, N., Delage, P., & Cui, Y. J. (2002). Temperature effects on the volume change behaviour of boom clay. *Engineering Geology*, 64(2-3), 135-145.
- Sun, J., Gao, Q., Wang, H., & Li, Y. (2006). Numerical simulation of coupled rainfall and temperature of unsaturated soils. *Key Engineering Materials*, 306-308 II, 1433-1438.
- Sutterer, K. G., Frost, J. D., & Chameau, J. -. A. (1996). Polymer impregnation to assist undisturbed sampling of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122(3), 209-215.
- Tan, O., Yilmaz, L., & Zaimog?lu, A. S. (2004). Variation of some engineering properties of clays with heat treatment. *Materials Letters*, 58(7-8), 1176-1179.
- Tan, R. Y., & Huang, M. C. (2000). System identification of a bridge with lead-rubber bearings. *Computers and Structures*, 74(3), 267-280.
- Tan, R. Y., & Weng, I. W. (1996). Identification of dynamic properties of isolated structures. *Engineering Structures*, 18(3), 240-246.
- Tanaka, N., Graham, J., & Crilly, T. (1997). Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures. *Engineering Geology*, 47(4), 339-350.
- Tang, A. M., & Cui, Y. J. (2007). Experimental evidences on thermo-hydro-mechanical coupling in engineered clay barrier for deep nuclear waste disposal. *Geotechnical Special Publication*, (157)
- Tang, A. -, & Cui, Y. -. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 287-296.

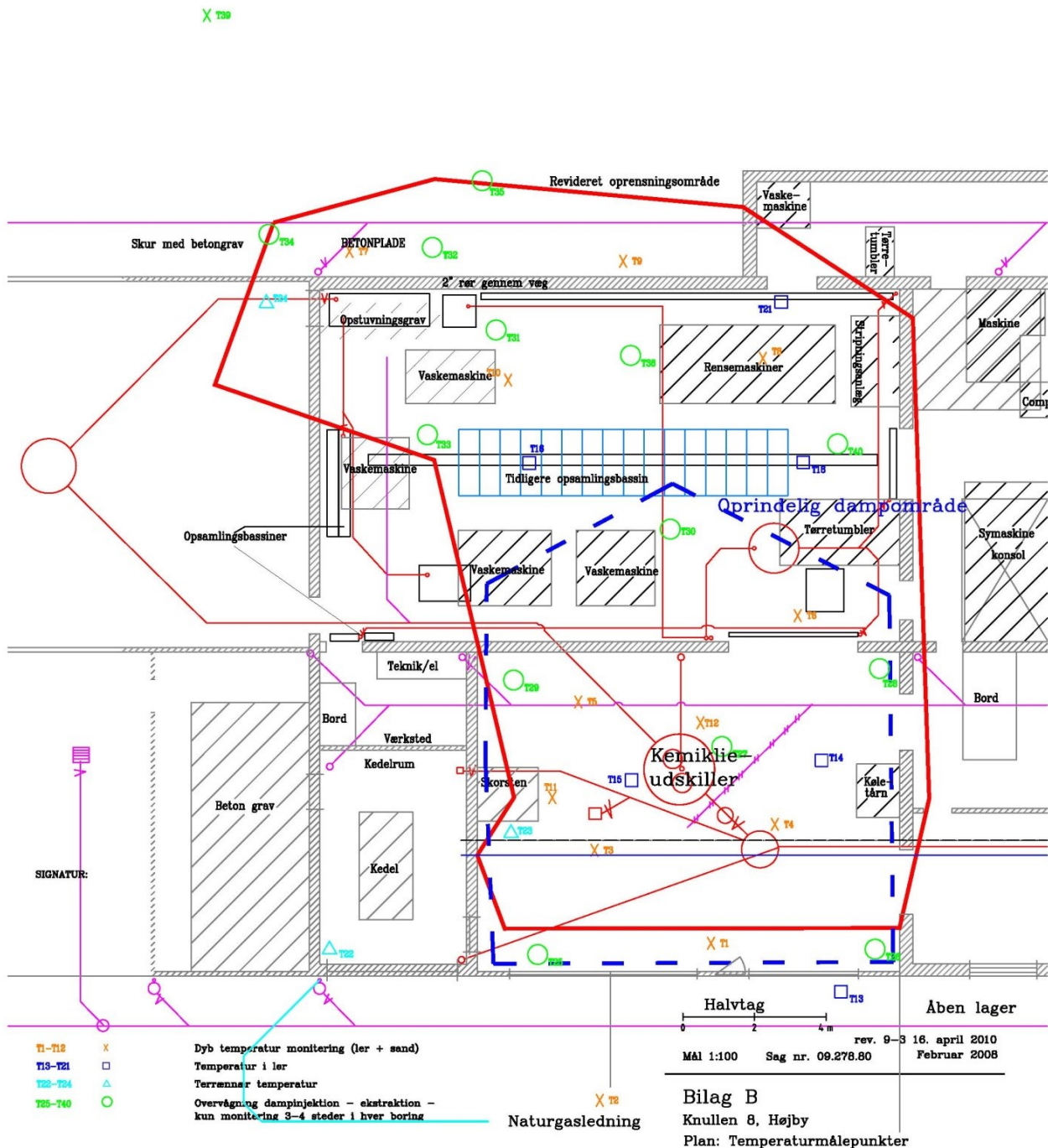
- Tang, A. M., Cui, Y. J., De Laure, E., & Lassabate?re, T. (2006). Developing a new suction and temperature controlled isotropic cell for studying the thermo-mechanical behaviour of compacted MX80 clay. (147) 1799-1810.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (3), 194-202.
- Tang, G. X., & Graham, J. (2002). A possible elastic-plastic framework for unsaturated soils with high-plasticity. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 894-907.
- Thom, R., Sivakumar, R., Sivakumar, V., Murray, E. J., & Mackinnon, P. (2007). Pore size distribution of unsaturated compacted kaolin: The initial states and final states following saturation. *Geotechnique*, 57(5), 469-474.
- Thomas, H. R., Cleall, P. J., Chandler, N., Dixon, D., & Mitchell, H. P. (2003). Water infiltration into a large-scale in-situ experiment in an underground research laboratory. *Geotechnique*, 53(2), 207-224.
- Thomas, H. R., & Li, C. L. W. (1997). An assessment of a model of heat and moisture transfer in unsaturated soil. *Geotechnique*, 47(1), 113-131.
- Tigheelaar, J., De Feijter, J. W., & Den Haan', E. J. (2001). Shear tests on "reconstituted oostvaardersplassen clay. *Geotechnical Special Publication*, 112, 67-81.
- Tika, T. E., Vaughan, P. R., & Lemos, L. J. L. J. (1996). Fast shearing of pre-existing shear zones in soil. *Geotechnique*, 46(2), 197-233.
- Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I., & Ohishi, K. (1993). Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. *Soils and Foundations*, 33(4), 170-183.
- Trzebiatowski, B. D., & Benson, C. H. (2005). Saturated hydraulic conductivity of compacted recycled asphalt pavement. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 514-519.
- Tsutsumi, S., Toyosada, M., Yajima, D., Murakami, K., & Gotoh, K. (2007). Cyclic plasticity under macroscopically elastic stress condition. 3818-3824 .
- Urbina, A., Paez, T. L., Hasselman, T. K., Wathugala, G. W., & Yap, K. (2003). Assessment of model accuracy relative to stochastic system behavior. , 3 1939-1949.
- Vardoulakis, I. (2002). Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides. *Geotechnique*, 52(3), 157-171.
- Vardoulakis, I. (2002). Steady shear and thermal run-away in clayey gouges. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14),3831-3844 .
- Vaziri, H. H. (1996). Theory and application of a fully coupled thermo-hydro-mechanical finite element model. *Computers and Structures*, 61(1), 131-146.
- Veveakis, E., Vardoulakis, I., & Di Toro, G. (2007). Thermoporomechanics of creeping landslides: The 1963 vaiont slide, northern italy. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 112(3)
- Villar, M. V., Cuevas, J., & Marti?n, P. L. (1996). Effects of heat/water flow interaction on compacted bentonite: Preliminary results. *Engineering Geology*, 41(1-4), 257-267.
- Villar, M. V., & Lloret, A. (2004). Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 26(1-4), 337-350.
- Villar, M. V., & Lloret, A. (2006). Experimental investigation on the mechanical behaviour of unsaturated bentonite at high temperature. (147) 1719-1730.
- Vlahos, G., Cassidy, M. J., & Byrne, B. W. (2006). The behaviour of spudcan footings on clay subjected to combined cyclic loading. *Applied Ocean Research*, 28(3), 209-221.
- Wang, B., Popescu, R., & Prevost, J. H. (2004). Effects of boundary conditions and partial drainage on cyclic simple shear test results-a numerical study. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(10), 1057-1082.
- Wettergren, H. L. (1997). On the behavior of material damping due to multi-frequency excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 206(5), 725-735.
- Wettergren, H. L. (2001). Material and microslip damping in a rotor taking gravity and anisotropic bearings into account. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*,



123(1), 30-35.

- Wiebe, B., Graham, J., Tang, G. X., & Dixon, D. (1998). Influence of pressure, saturation, and temperature on the behaviour of unsaturated sand-bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), 194-205.
- Wood, D. M. (2004). Experimental inspiration for kinematic hardening soil models. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 656-664.
- Worden, R. H., Mayall, M. J., & Evans, I. J. (1997). Predicting reservoir quality during exploration: Lithic grains, porosity and permeability in tertiary clastic rocks of the south china sea basin. *Geological Society Special Publication*, (126), 107-115.
- Wu, W., Li, X., Charlier, R., & Collin, F. (2004). A thermo-hydro-mechanical constitutive model and its numerical modelling for unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, 31(2), 155-167.
- Xie, Y., Chen, Z. -, & Li, G. (2007). Thermo-nonlinear model for unsaturated expansive soils. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 28(9), 1937-1942.
- Xiong, Y., Fang, Y., & Xu, G. (2006). Dynamic damage model and its application to soft clay. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25, 3152-3156 .
- Xu, H., Zhu, Y. -, Cai, Y. -, & Zhu, F. -. (2005). Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 26(12), 1957-1962.
- Xu, L. -, & Li, J. -. (2006). Viscous property of dried clay. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 13(2), 204-207.
- Yang, D. Q., Rahardjo, H., Leong, E. C., & Choa, V. (1998). Coupled model for heat, moisture, air flow, and deformation problems in unsaturated soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(12), 1331-1338.
- Yang, Z., & Elgamal, A. (2002). Influence of permeability on liquefaction-induced shear deformation. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(7), 720-729.
- Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119-1127.
- Yashima, A., Leroueil, S., Oka, F., & Guntoro, I. (1998). Modelling temperature and strain rate dependent behavior of clays: One dimensional consolidation. *Soils and Foundations*, 38(2), 63 – 73.
- Yassir, N. (2003). The role of shear stress in mobilizing deep-seated mud volcanoes: Geological and geomechanical evidence from trinidad and taiwan. *Geological Society Special Publication*, (216), 461 - 474.
- Yilmaz, G., Koyuncu, H., Guney, Y., Ural, N., & Bakis, R. (2004). Mechanical and microstructural properties of heated and polluted kaolinite and bentonite. *Key Engineering Materials*, 264-268, 1657-1660.
- Yin, J. -, & Graham, J. (1999). Elastic viscoplastic modelling of the time-dependent stress-strain behaviour of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 736-745.
- Yu, H. -, Khong, C., & Wang, J. (2007). A unified plasticity model for cyclic behaviour of clay and sand. *Mechanics Research Communications*, 34(2), 97-114.
- Yu, M. -. (2002). Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century. *Applied Mechanics Reviews*, 55(3), 169-218.
- Yun Tae Kim, & Leroueil, S. (2001). Modeling the viscoplastic behaviour of clays during consolidation: Application to berthierville clay in both laboratory and field conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 484-497.
- Zamankhan, P., Zamankhan, P., Polashenski Jr., W., & Ghazanfari, M. H. (2004). Transitional granular flow in a spinning bucket at high frequencies. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 188(1-2), 40-64.
- Zhou, Y., Rajapakse, R. K. N. D., & Graham, J. (1998). A coupled thermoporoelastic model with thermo osmosis and thermal-filtration. *International Journal of Solids and Structures*, 35(34-35), 4659-4683 .

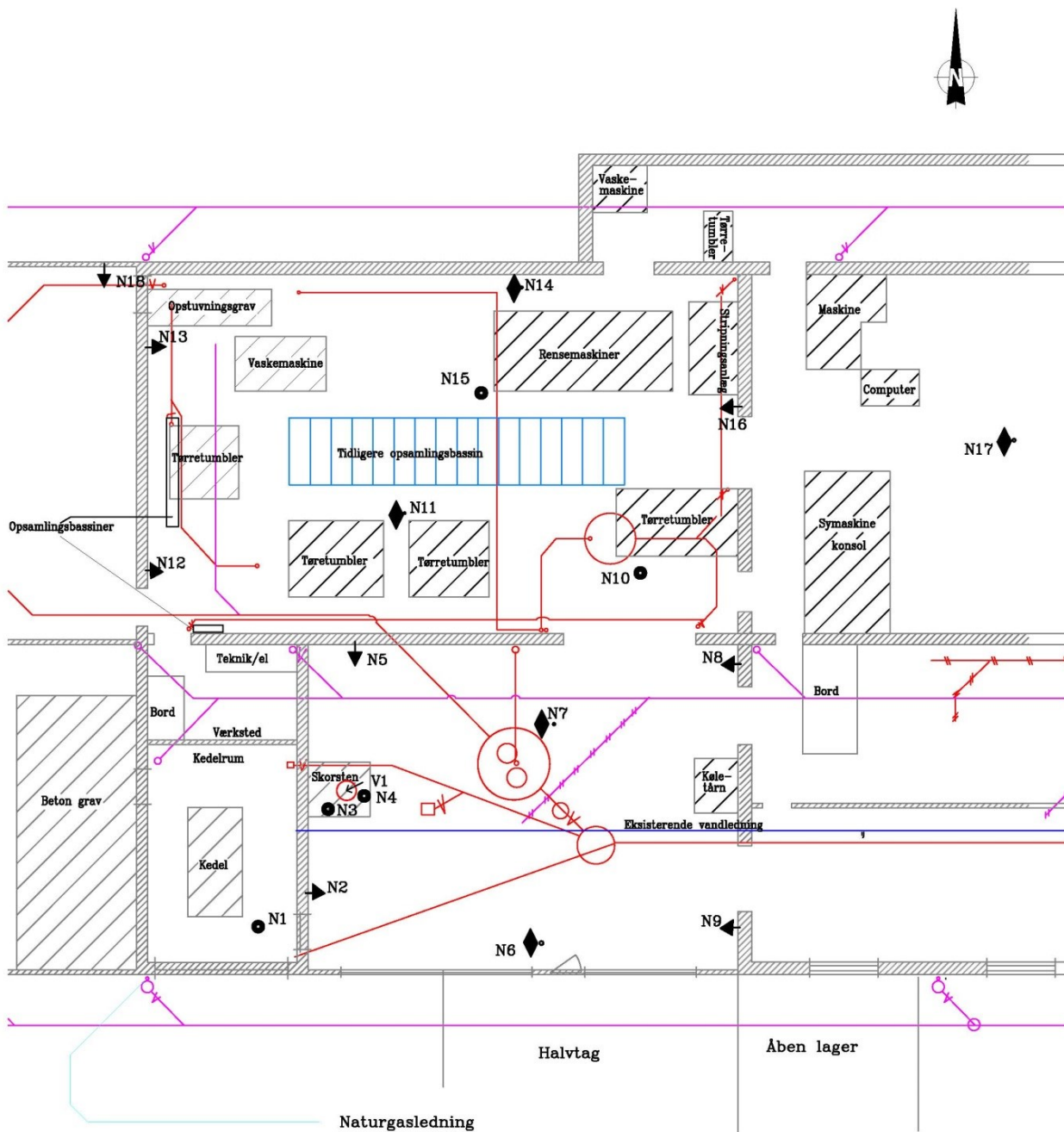
## Bilag 2: Plan, temperaturmålepunkter



**NIRAS** Rådgivende Ingeniører og planlæggere A/S  
Buchholmsgade 35, 3. sal, DK-5000 Odense C, Telefon 6312 1518

D:\SAG\09\278.80\TEC\T28-110807.DWG

### Bilag 3: Plan, nivellementsplanter



SIGNATUR:

- Nivellementsbolt i gulv
- ▼ Nivellementsbolt i væg eller på maskine
- ← Fixpunkt på skorstenstop
- ◆ Nivellementsplade placeret i jord, ca. 1 m u.t.

0 2 4 m

MÅL 1:100 Sag nr. 09.278.80 Rev. 2 30-06-2010

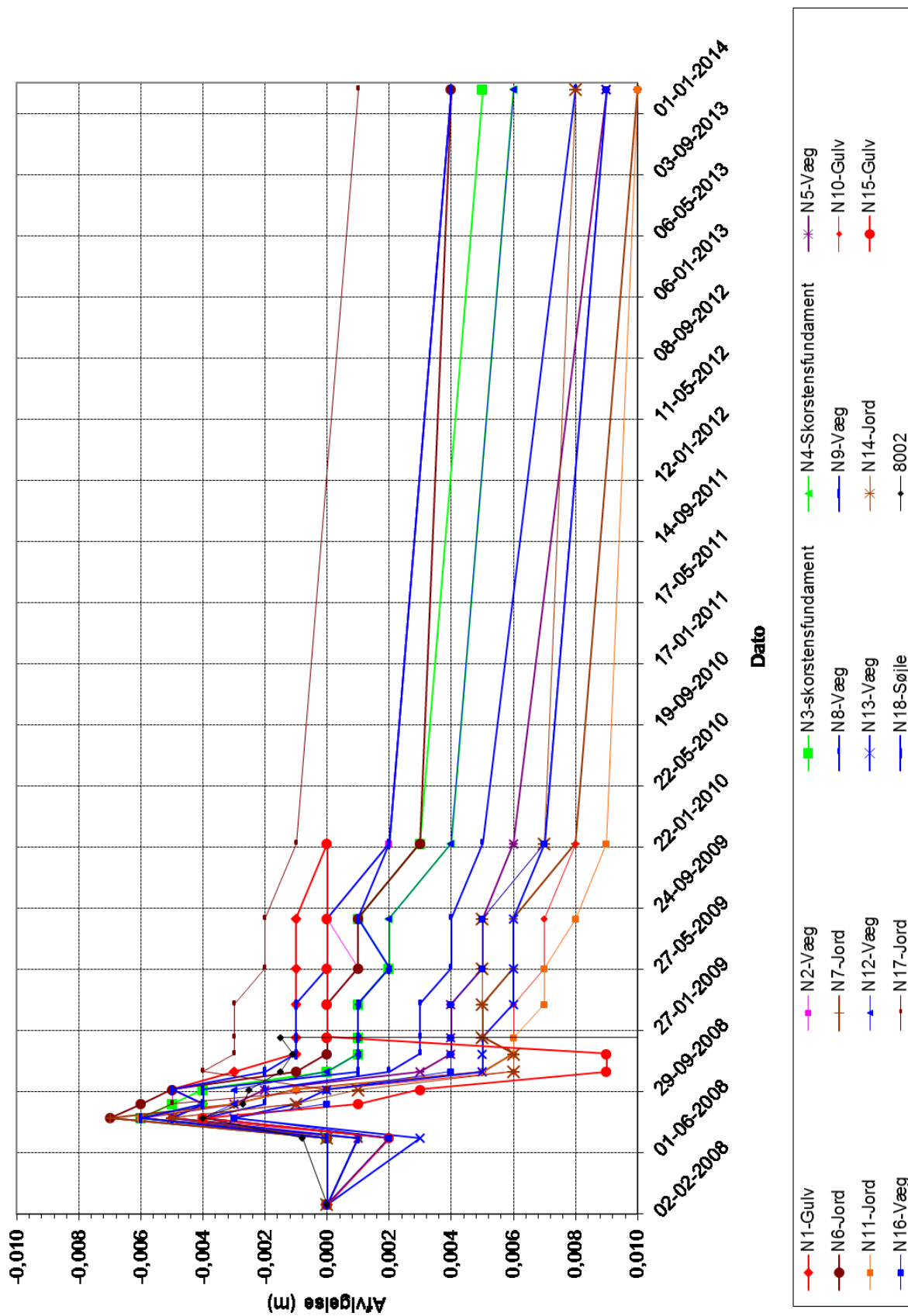
Bilag C  
Knullen 8, Højby  
Plan: Placering af nivellementsplanter

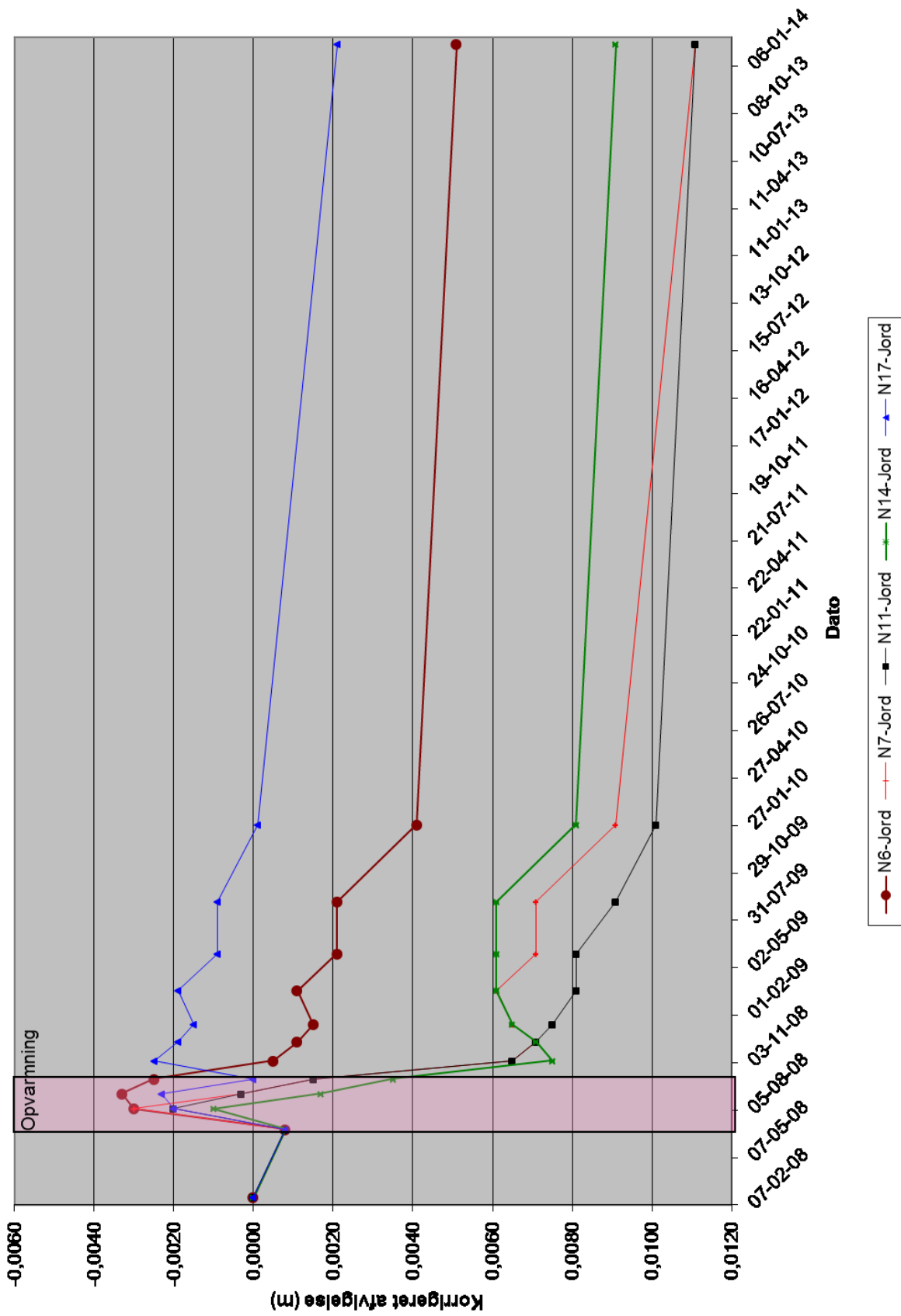
**NIRAS** Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S  
Bachmøllevej 35, 3. sal, DK-5000 Odense C, Telefon 6312 1518

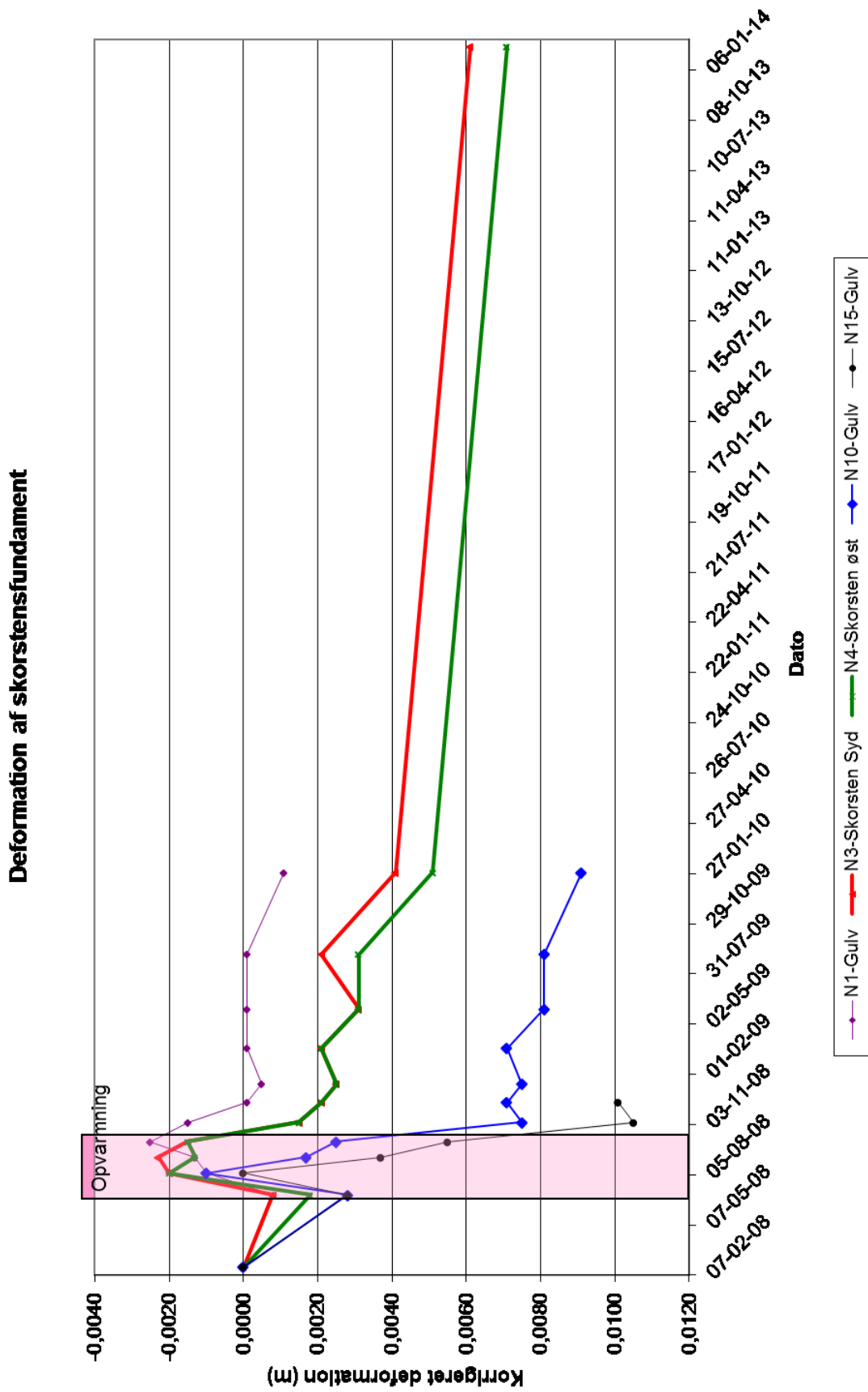
C:\SAG\09\278.80\TEG\100-030807.DWG

# Bilag 4: Nivellementsresultater: jord, gulv, vægge

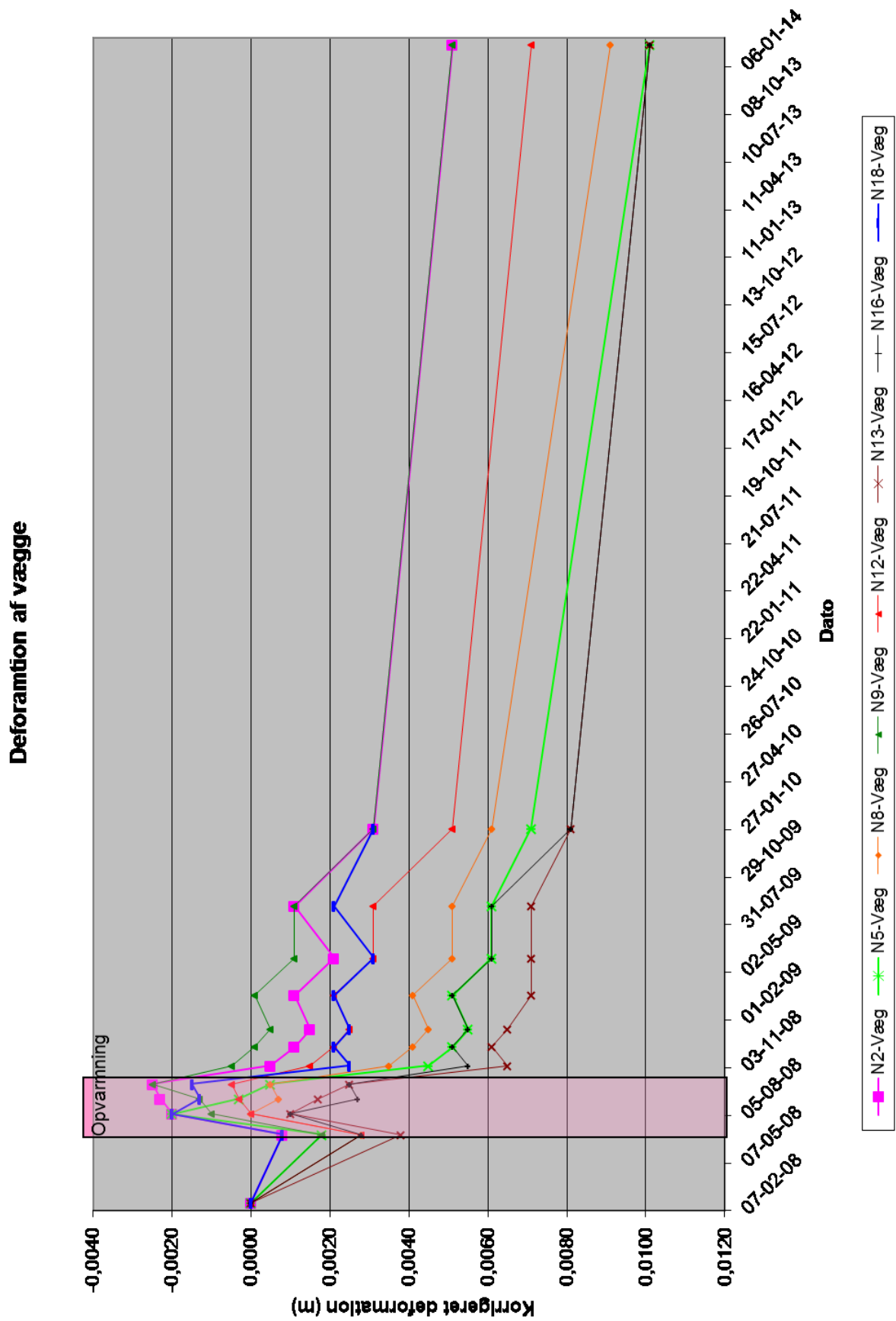
Bilag 4-1: Resultater af alle punkter.

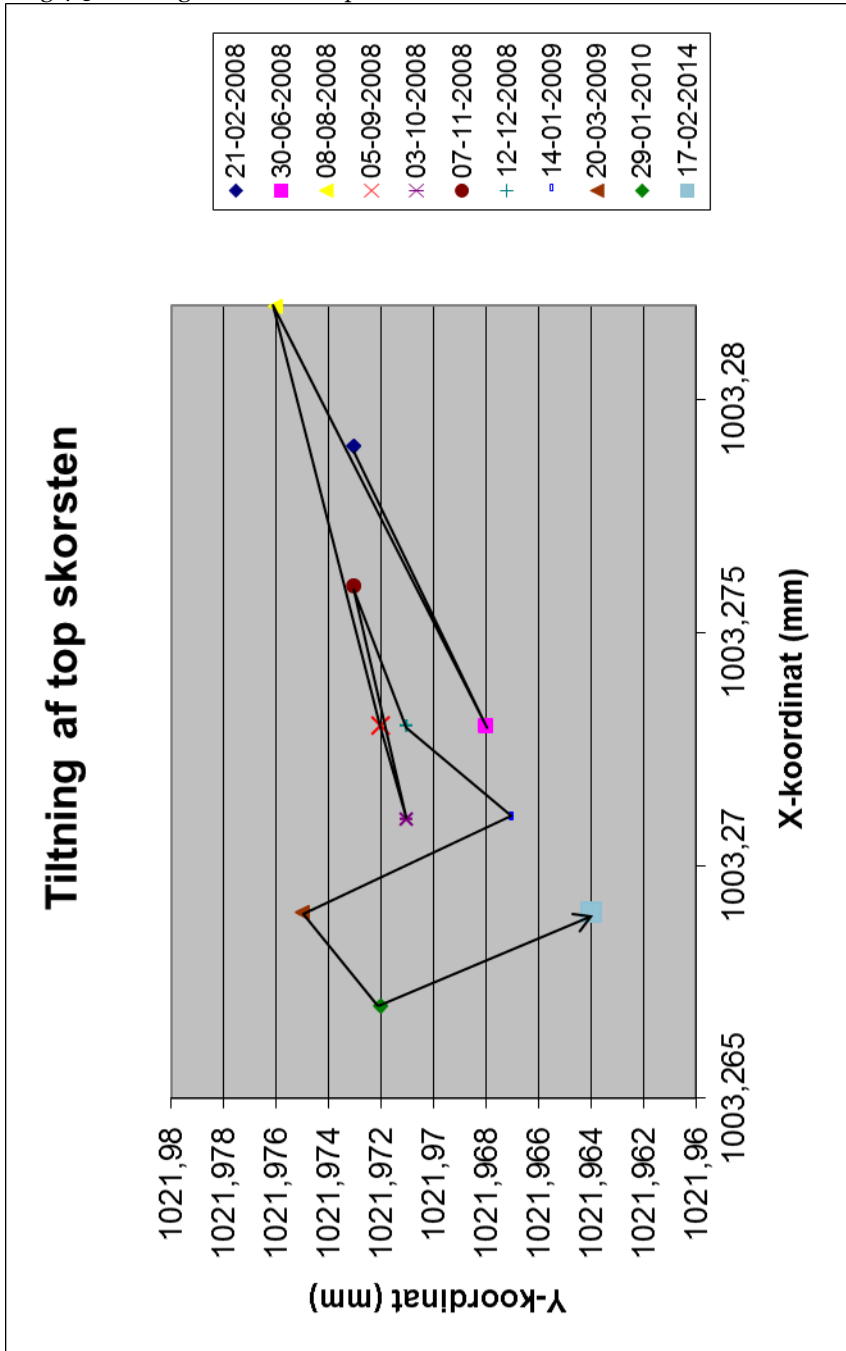






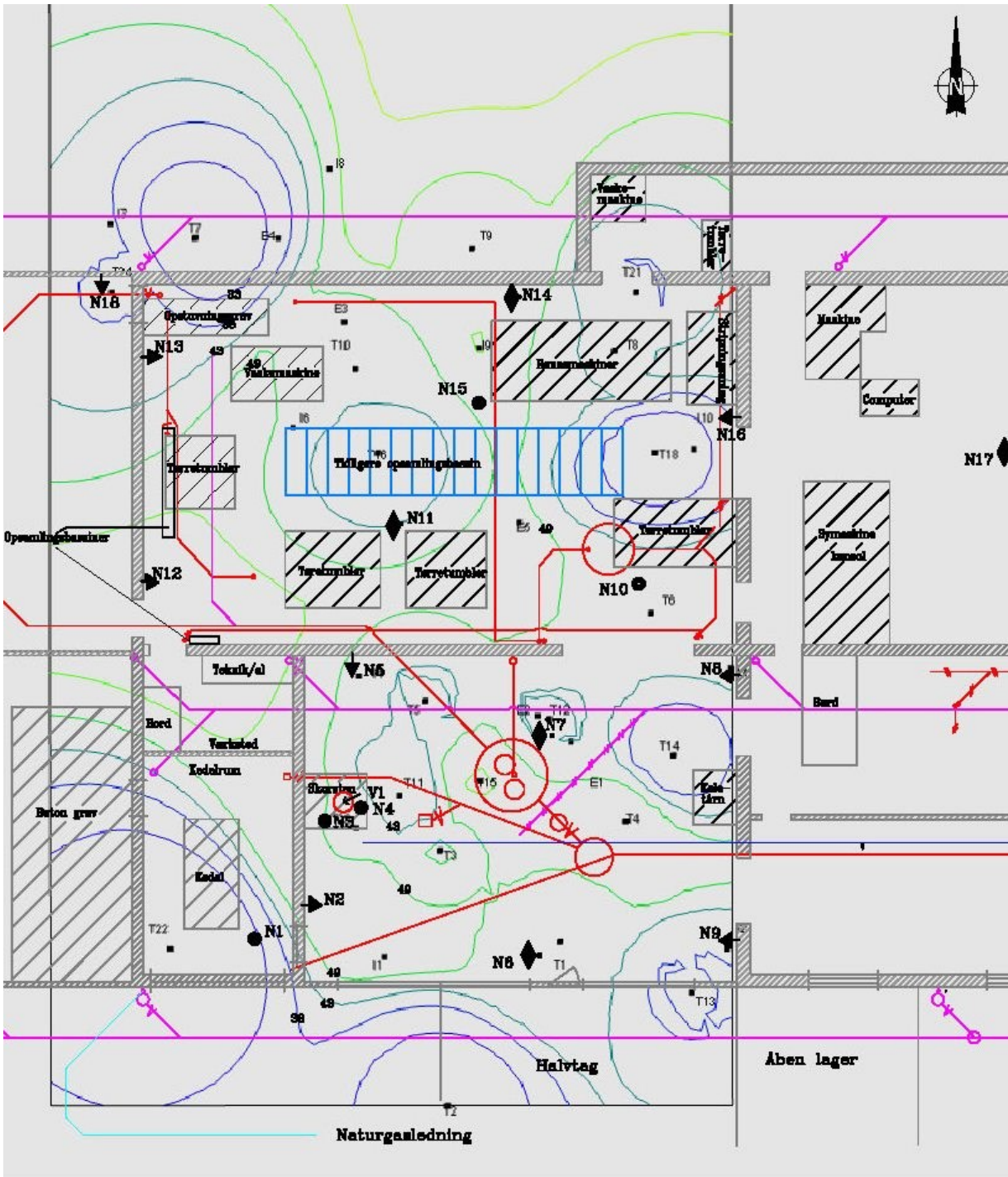
Bilag 4-4. Deformationer i gulv.







Bilag 5: Temperatur, 1 m's dybde



- LEGENDE:**
- Nivellementsbolt i gulv
  - ▼ Nivellementsbolt i væg eller på maskine
  - ← Fixpunkt på skorstenstop
  - ◆ Nivellementsplade placeret i jord, ca. 1 m u.t.
  - 49 Temperatur, °C, i 1 m's dybde

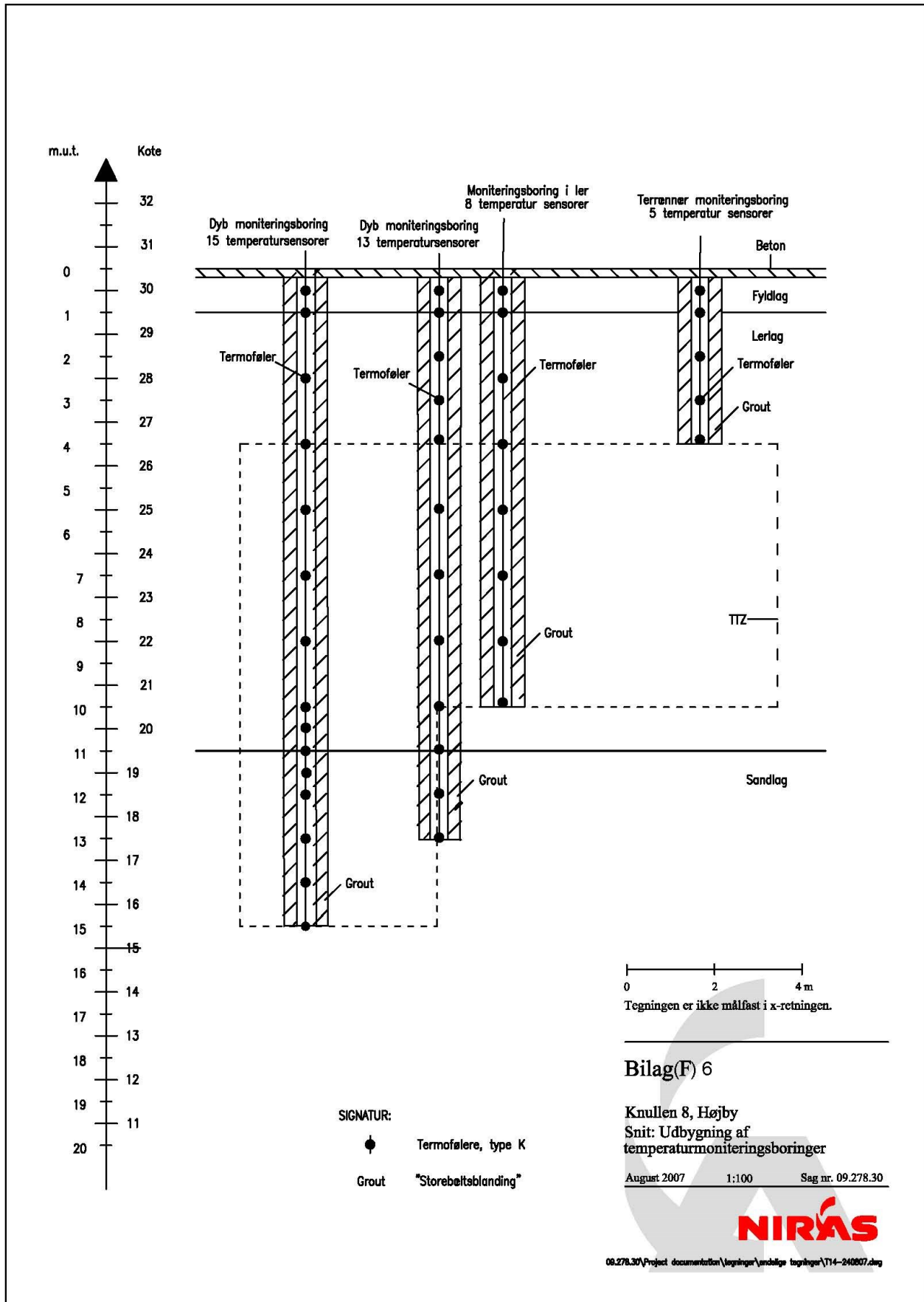
0 2 4 m  
 Mål 1:100 Sag nr. 00.298.80 Rev. 2 22-09-2010

**Bilag (E) 5**  
 Knullen 8, Højby  
 Plan: Temperatur i 1 m's dybde

**NIRAS** Redegørende ingeniører og planlæggere A/S  
 Rødtågsvej 3, 2. et, DK-5200 Odense C, Tlf: 6712 1574

01/2010/01/02/03/04/05/06/07/08/09/10/11/12/13/14/15/16/17/18/19/20/21/22/23/24/25/26/27/28/29/30/31/32/33/34/35/36/37/38/39/40/41/42/43/44/45/46/47/48/49/50/51/52/53/54/55/56/57/58/59/60/61/62/63/64/65/66/67/68/69/70/71/72/73/74/75/76/77/78/79/80/81/82/83/84/85/86/87/88/89/90/91/92/93/94/95/96/97/98/99/100

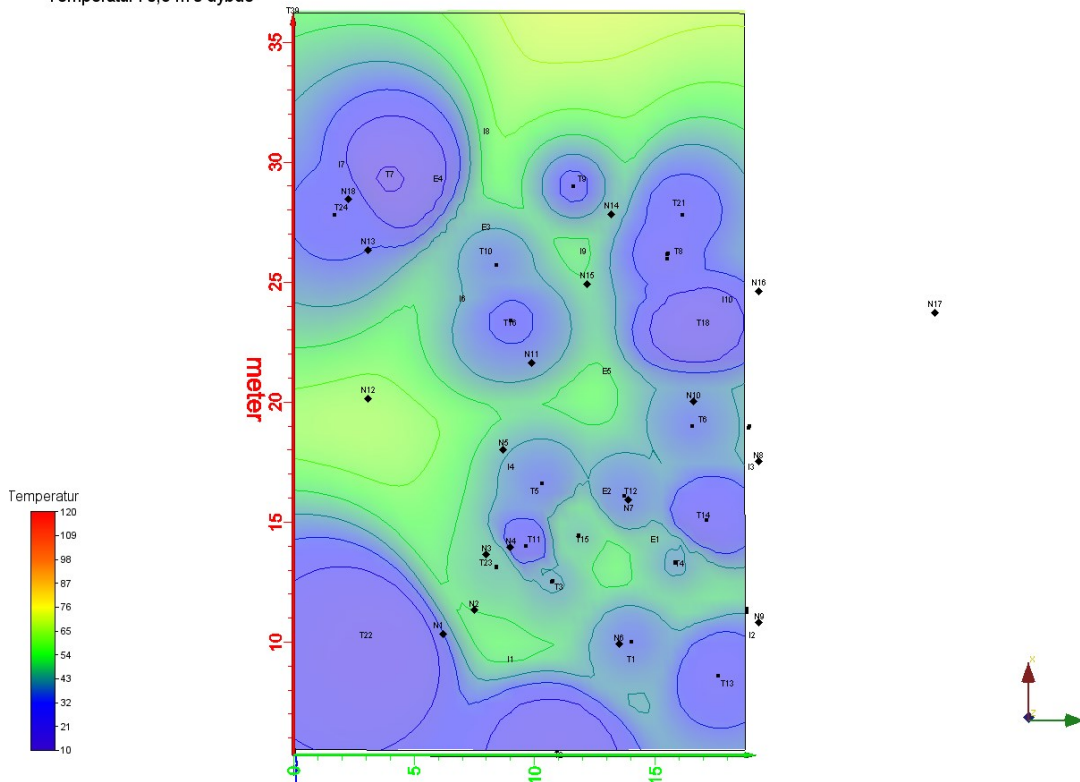
**Bilag 6: Opbygning, terrænnær og dybere temperaturmålepunkt**



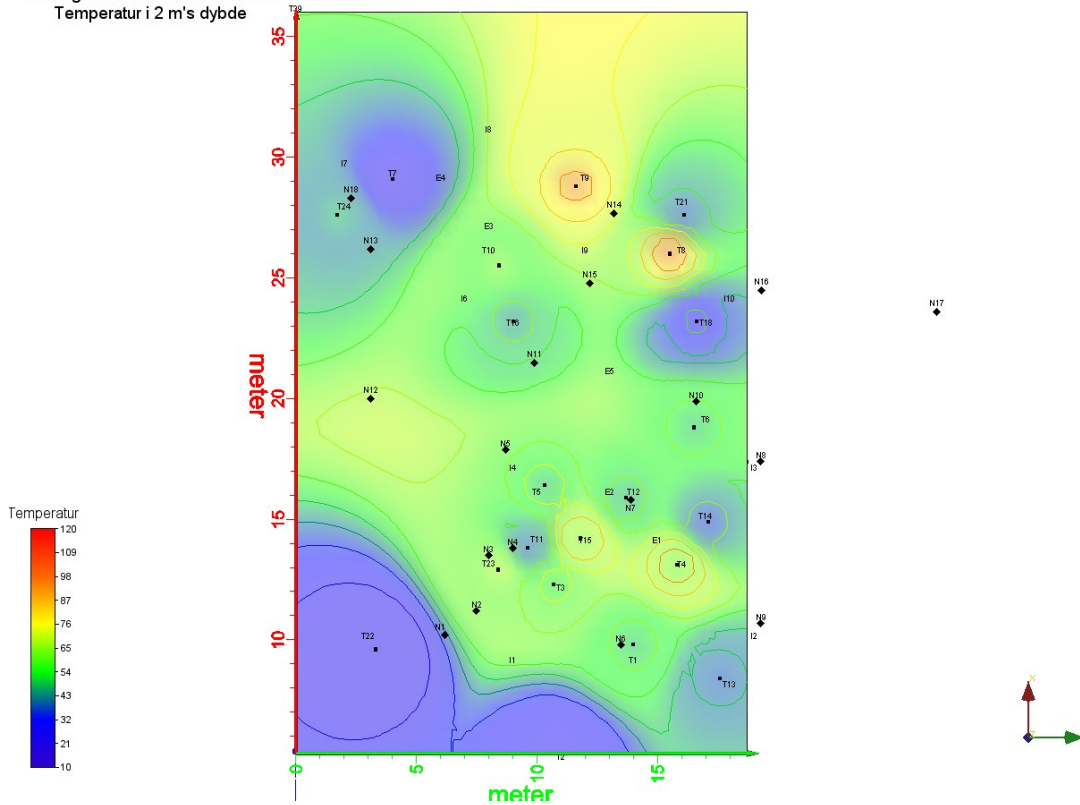
# Bilag 7: Temperaturprofil, terrænnære målinger

Bilag 7-1. Temperatur 7. oktober 2008 i 0,5; 2,0 og 4,0 m's dybde

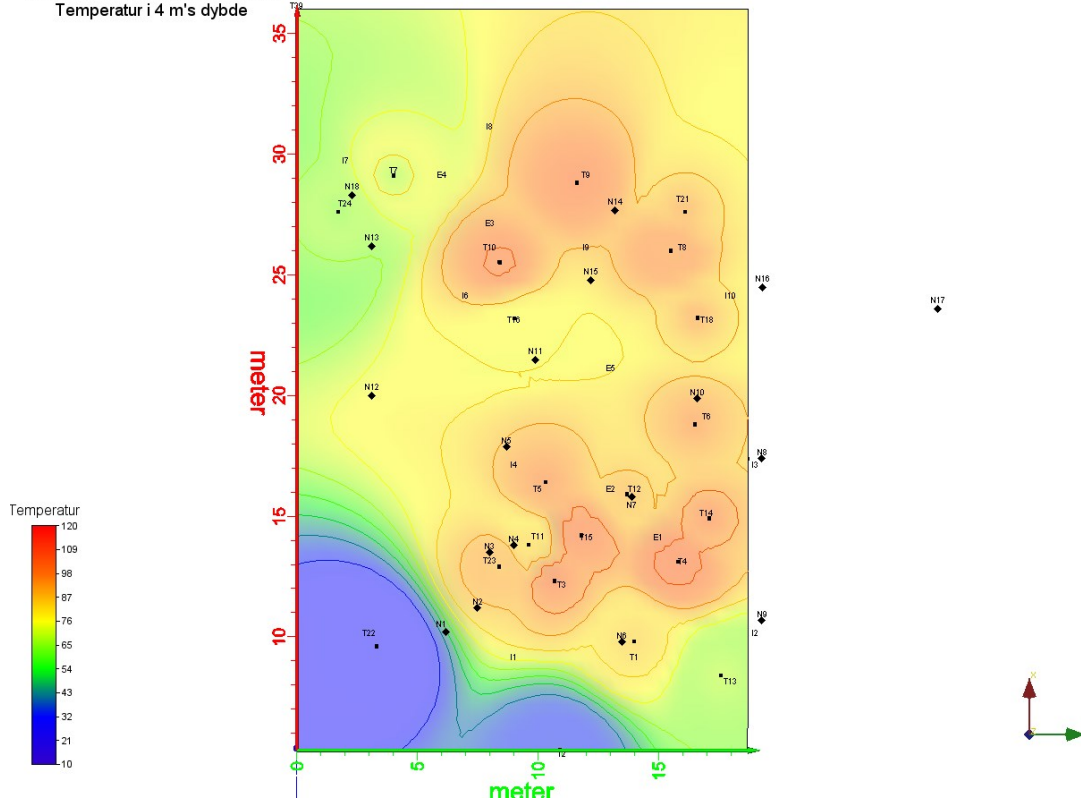
Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 0,5 m's dybde

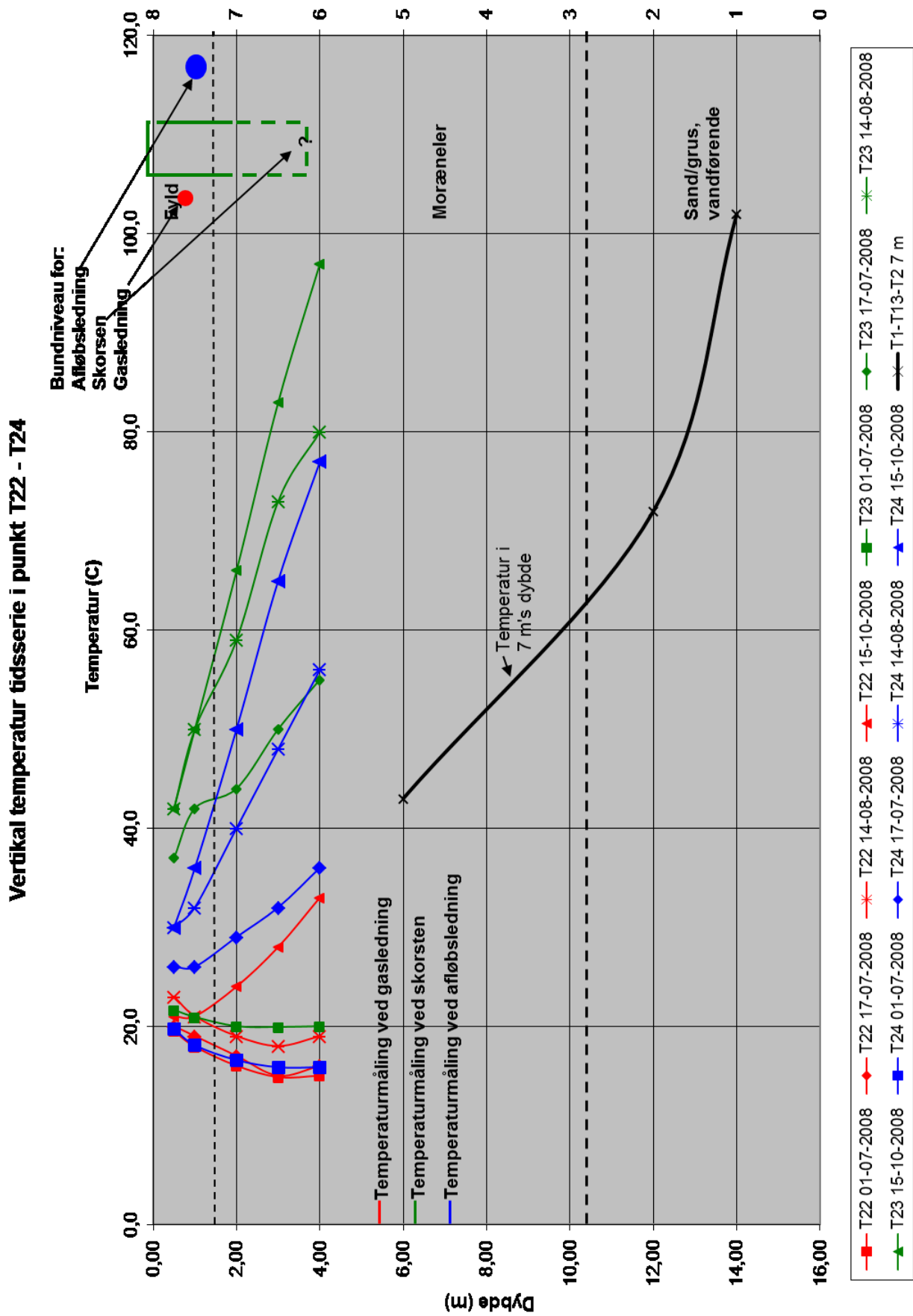


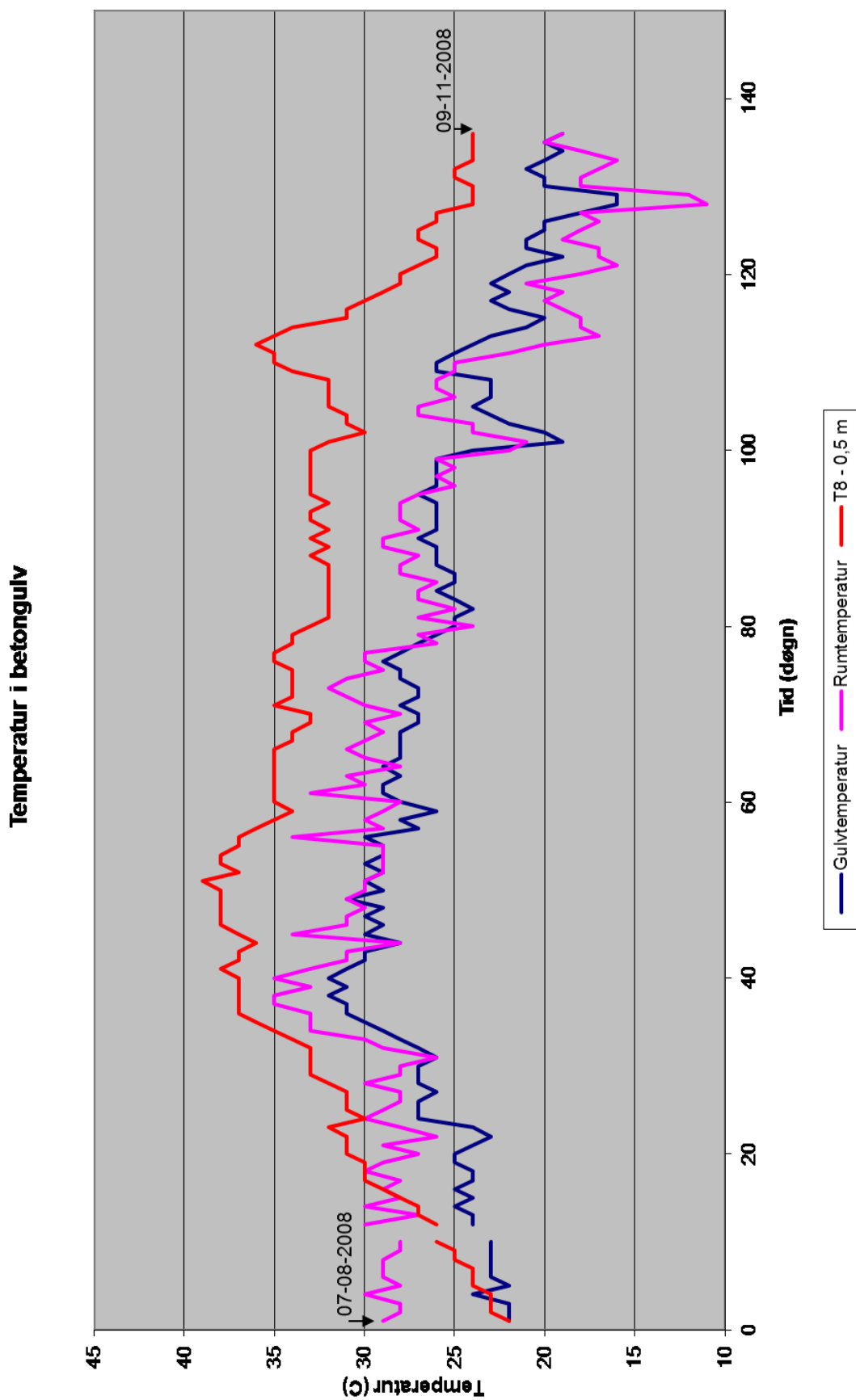
Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 2 m's dybde



Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 4 m's dybde

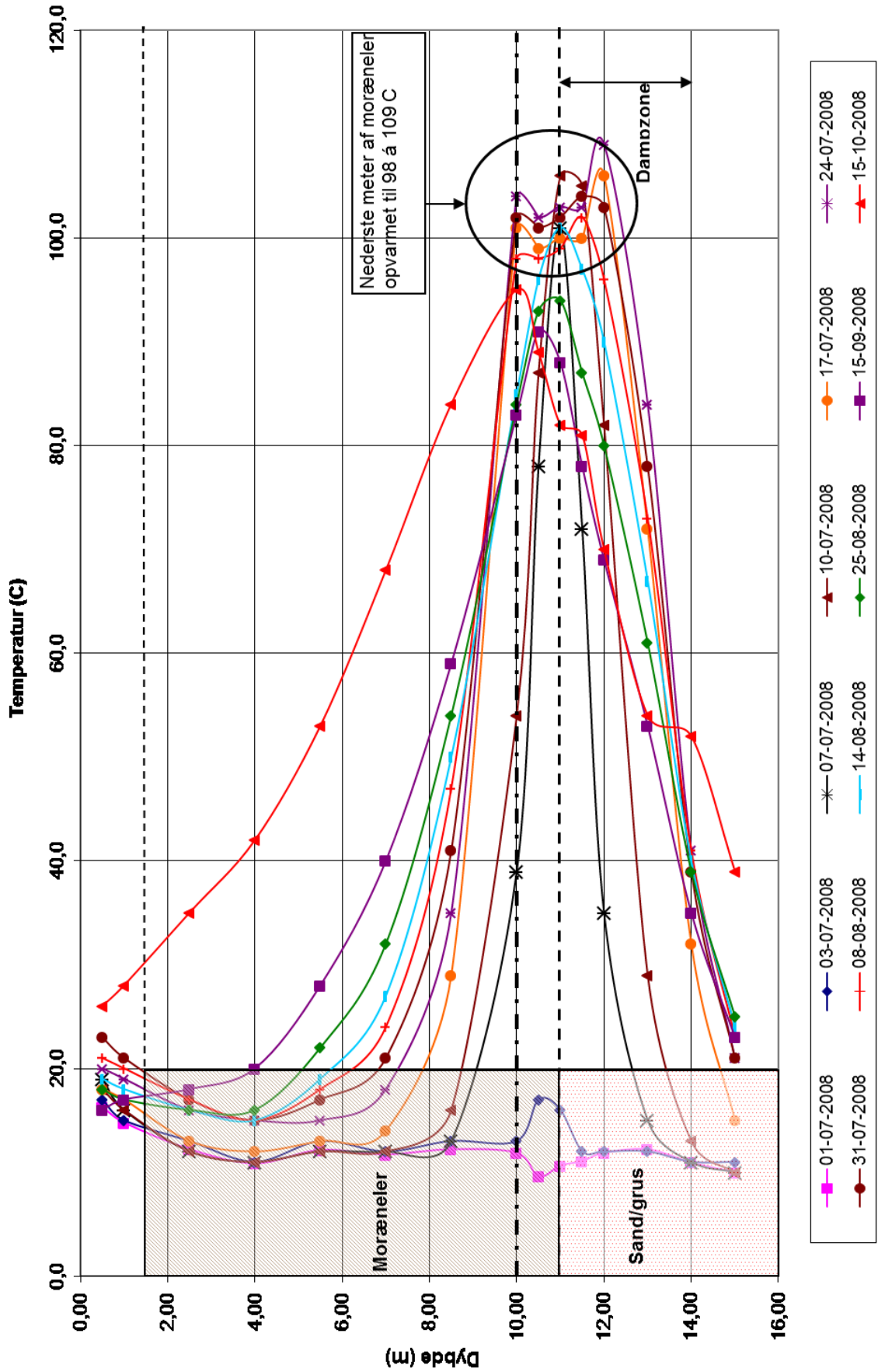




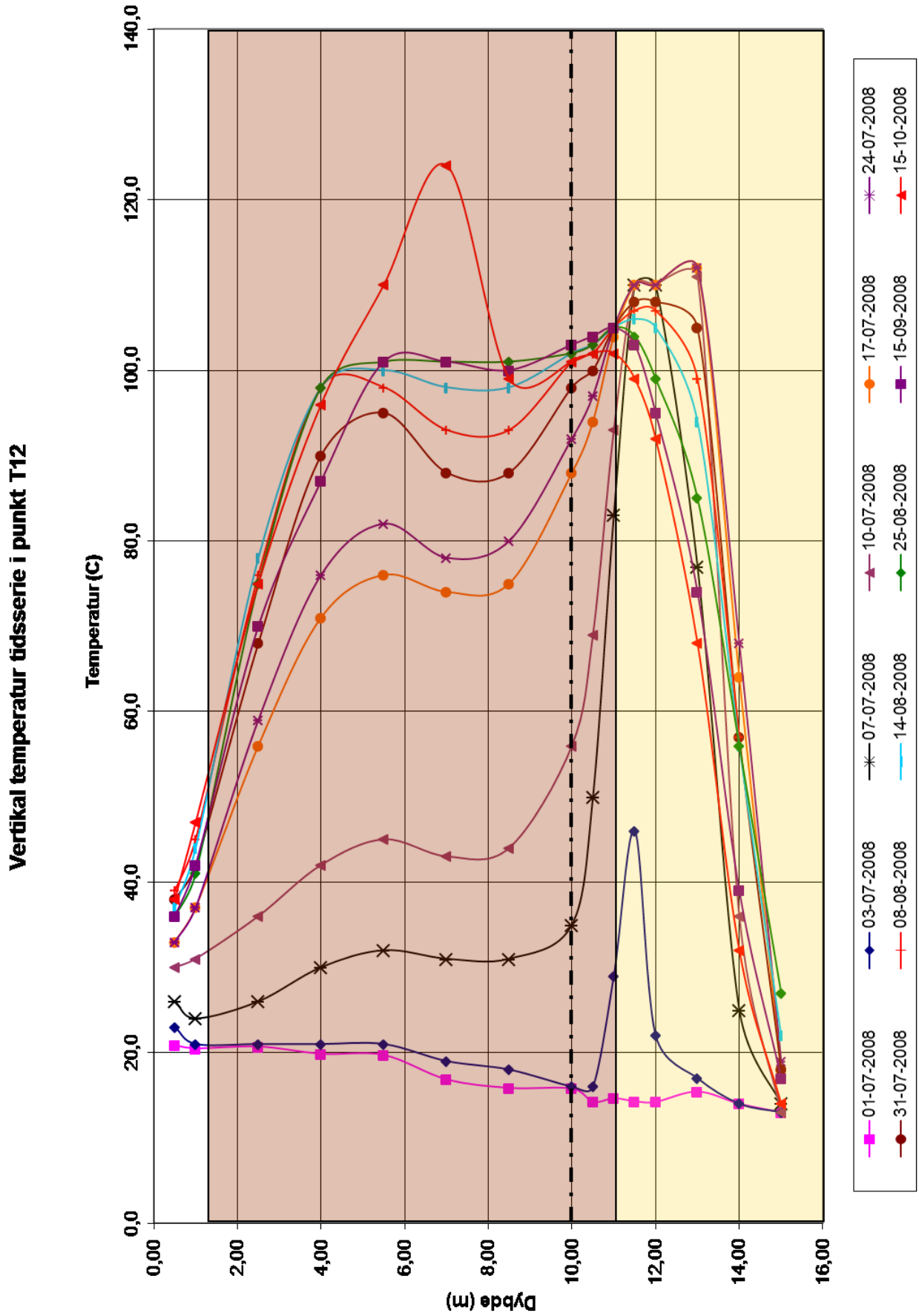


Bilag 8: Temperaturprofil T2

Vertikal temperatur tidsserie i punkt T2



Bilag 9: Temperaturprofil, dybere monitoring, T12

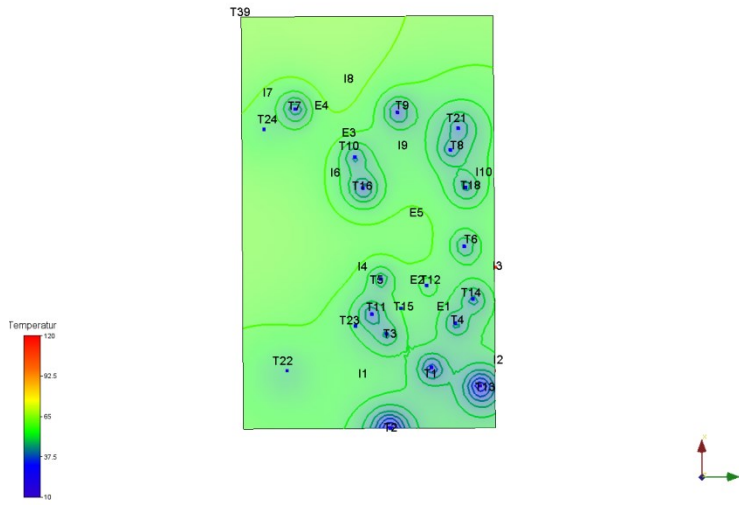




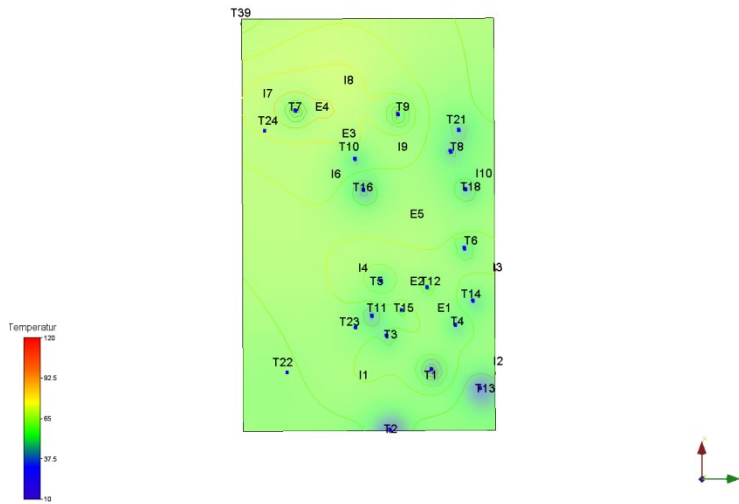
# Bilag 10: Temperaturflader, d. 10. juli, 26. august, 7. oktober 208

## Bilag 10.1 Temperaturflader 10. juli 2008

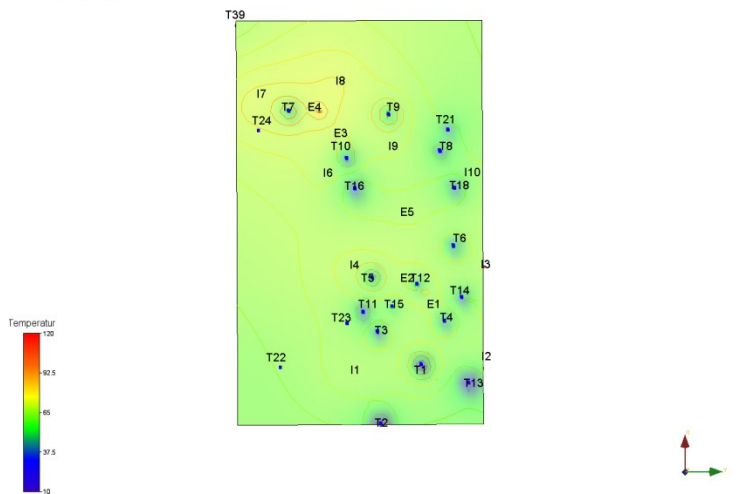
Torsdag d. 10 juli 2008 14.37  
7,5 m's dybde.



Torsdag d. 10 juli 2008 14.37  
10 m's dybde.

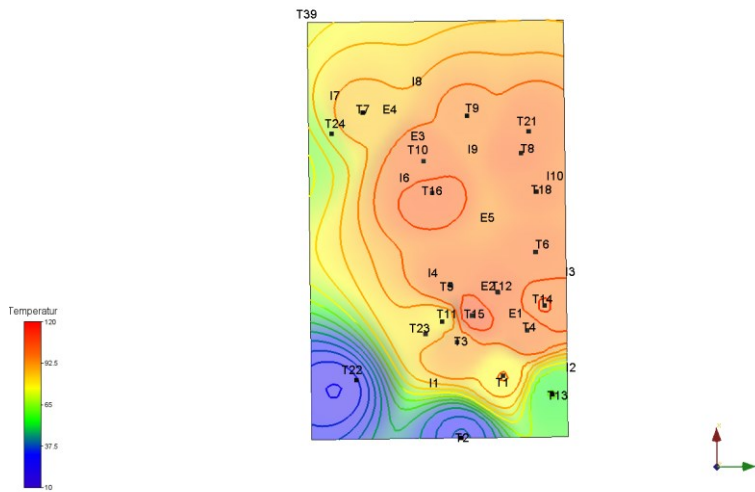


Torsdag d. 10 juli 2008 14.37  
10,5 m's dybde.

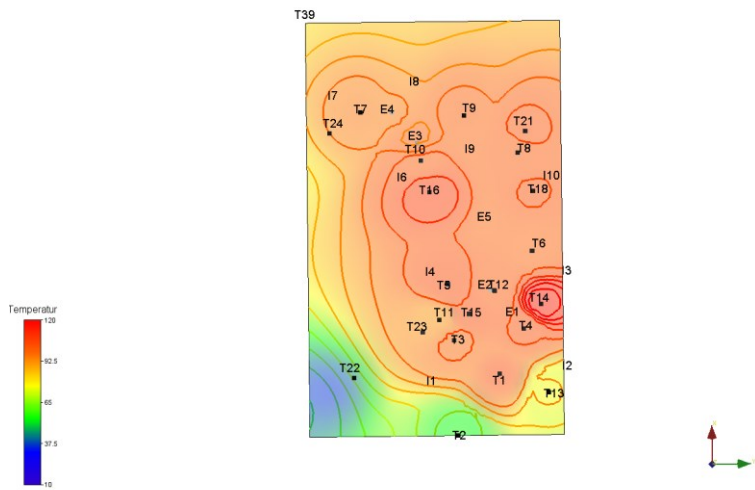


# Bilag 10.2 Temperaturflade 26. august 2008

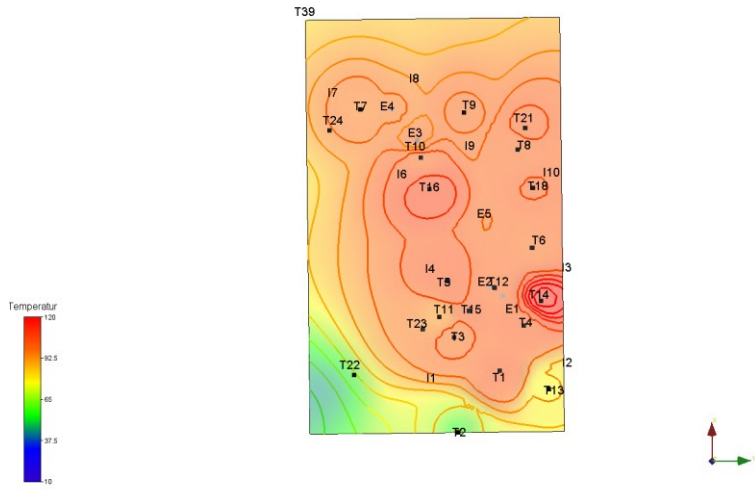
Torsdag d. 26 august 2008. 17.10  
7,5 m's dybde



Torsdag d. 26 august 2008. 17.10  
10 m's dybde

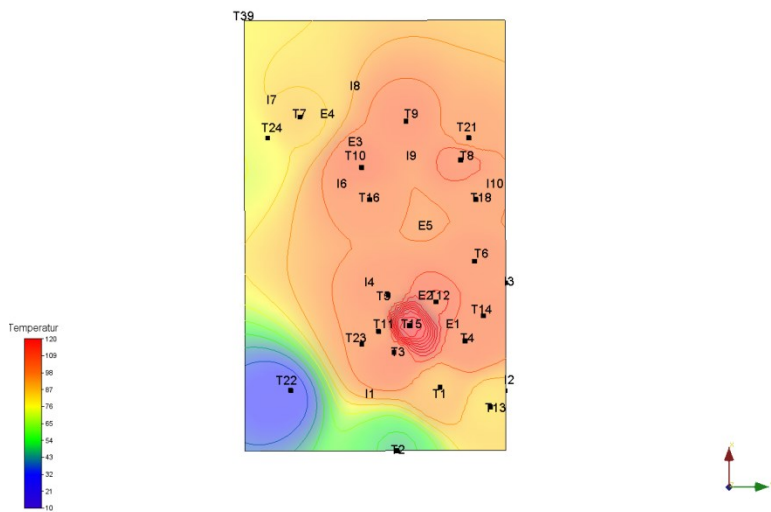


Torsdag d. 26 august 2008. 17.10  
10,5 m's dybde

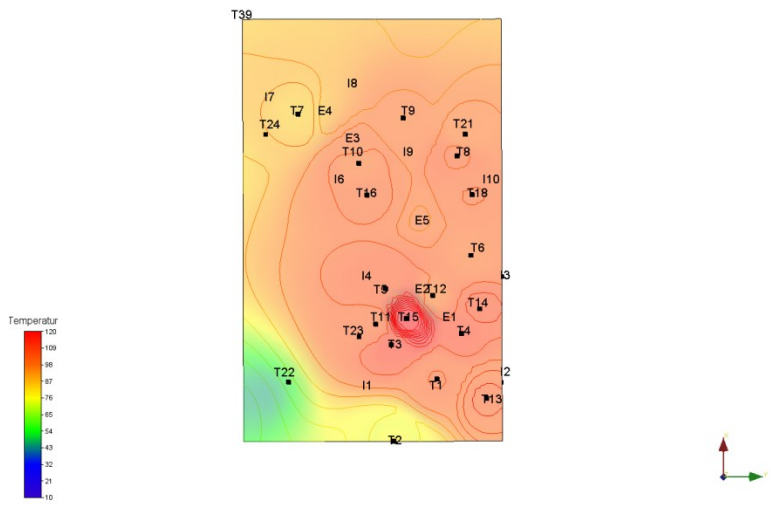


# Bilag 10.3. Temperaturflade 10. oktober 2008

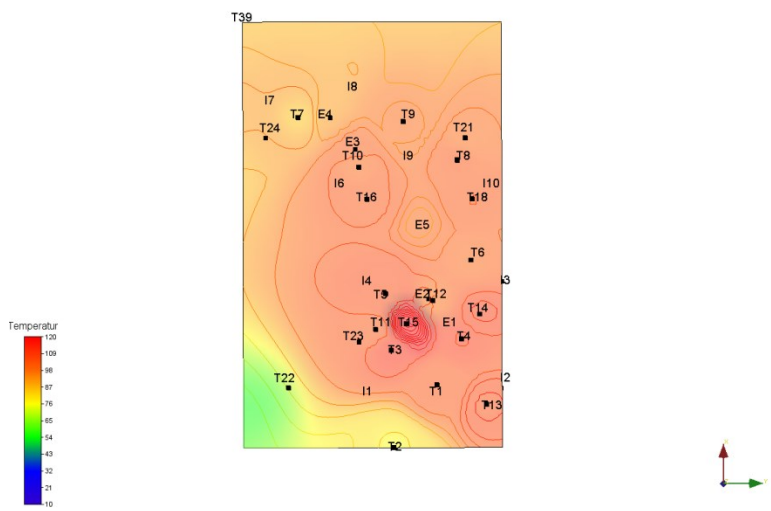
Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 7,5 m's dybde



Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 10 m's dybde

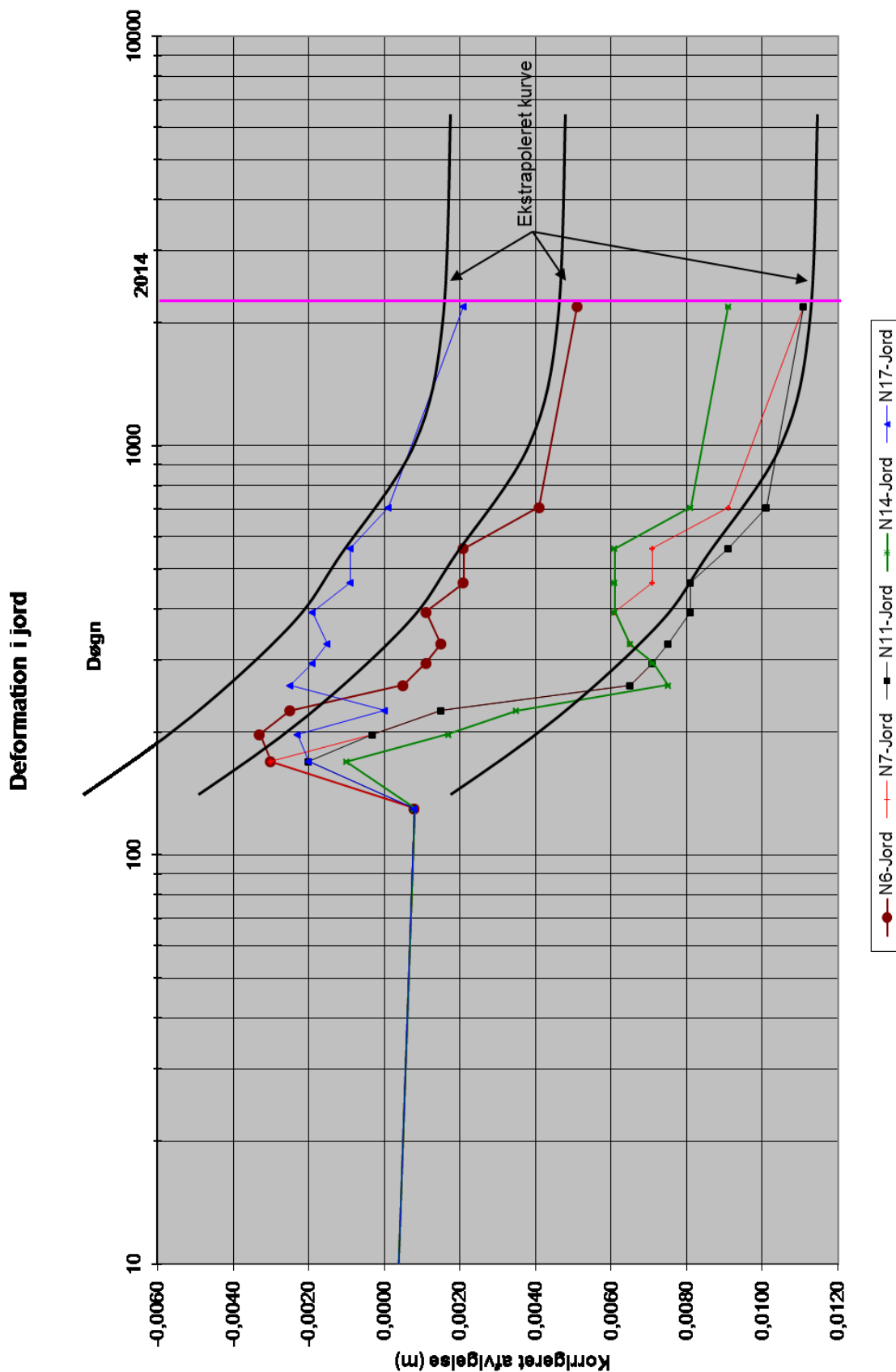


Tirsdag d. 7. oktober 2008 18.03.  
Temperatur i 10,5 m's dybde

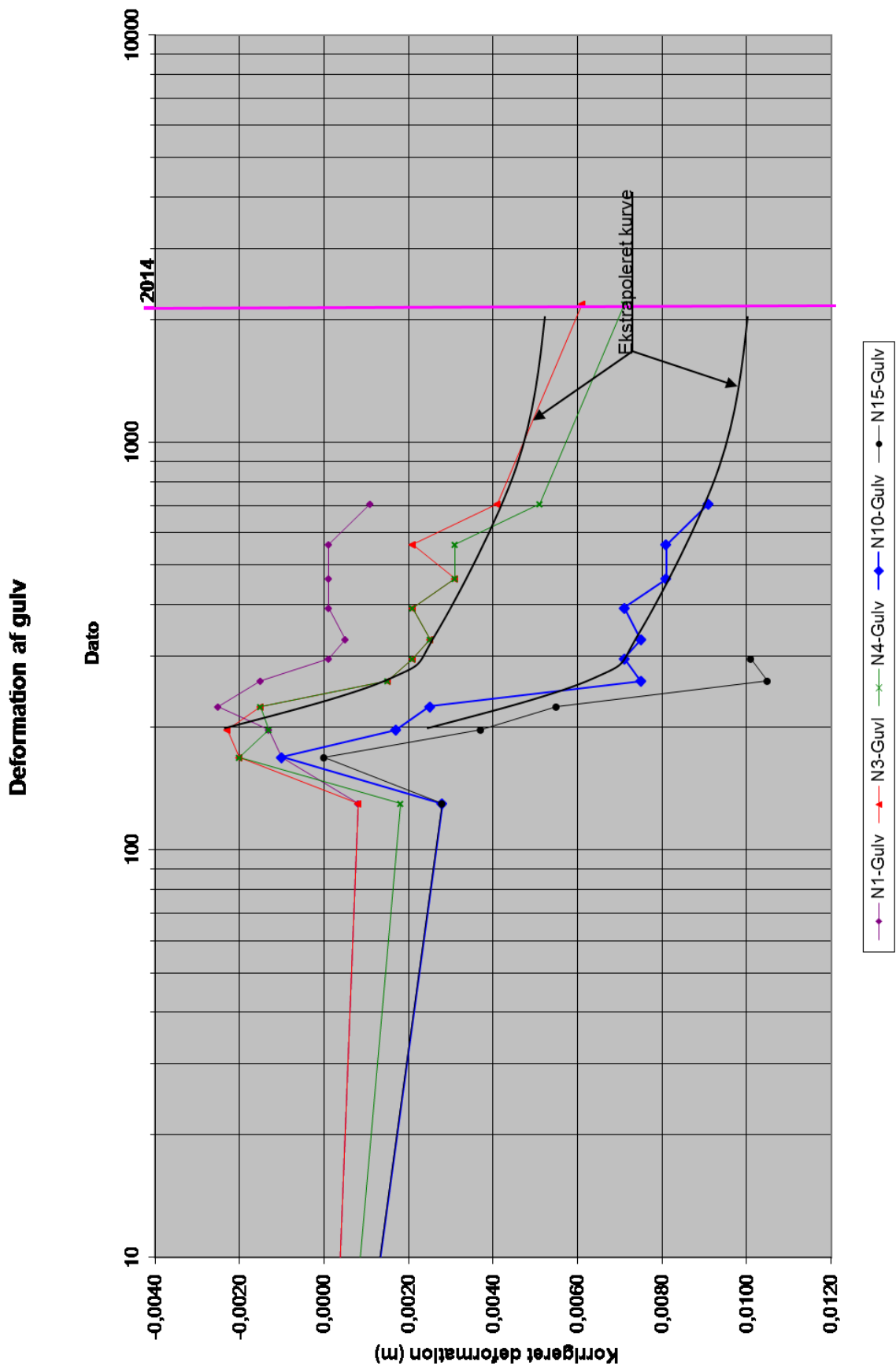


# Bilag 11: Ekstrapolerede deformationer

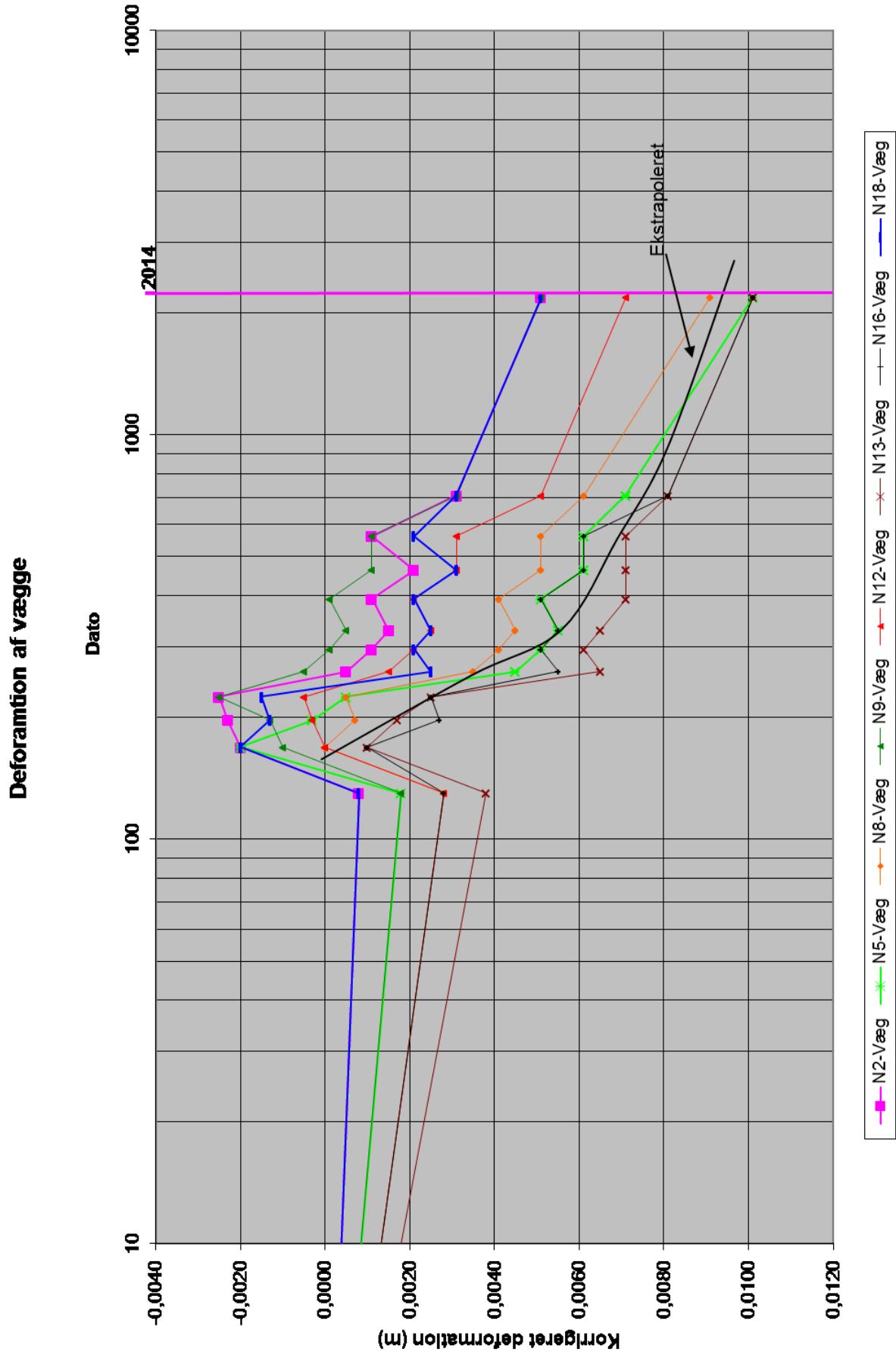
Bilag 11-1 Ekstrapolerede sætninger i jord



Bilag 11-2. Ekstrapolerede deformationer i gulve



Bilag 11-3 Ekstrapolerede deformationer i vægge.



## **Bilag 12: Udvalgte referencer**

- Abuel-Naga, H.M.; Bergado, D.T. & Chaiprakaikeow, S.; Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process, 2006, *Geotextiles and Geomembranes* 24, 359-370.
- Abuel-Naga, Hossam M.; Bergado, Dennes T. & Bouazza, Abdelmalek; Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay, 2007, *Engineering Geology*, 89, 144-154.
- Abuel-Naga, H.M.; Bergado, D.T., Soralump, S. & Rujivipat, P.; Thermal Consolidation of soft Bangkok Clay, 2005, *Lowland Technology International*, Vol. 7, No. 1, 13-21.
- Burghignoli, A.; Desideri, A. & Miliziano, S.; A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils, 2000, *Can. Geotech. J.* 37: 764-780.
- Cekerevac, Cane & Laloui, Lyesse; Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay, 2004, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28: 209-228.
- Cui, Yu Jun; Sultan, Nabil & Delage, Pierre; A thermomechanical model for saturated clays, 2000, *Can. Geotech. J.* 37: 607-620.
- Cui, Yu-Jun & Ye, Wei-min; On modelling of thermo-mechanical volume change behaviour of saturated clays, 2005, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 24, No. 21.
- Delage, Pierre; Sultan, Nabil & Cui, Yu Jun; On the thermal consolidation of Boom clay, 2000, *Can. Geotech. J.* 37: 343-354.
- Graham, J.; Tanaka, N., Crilly, T. & Alfaro, M.; Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays, 2001, *Can. Geotech. J.* 38: 608-621.
- Hueckel, Tomasz & Pellegrini, Rita; Reactive plasticity for clays: application to a natural analog of long-term geomechanical effects of nuclear waste disposal, 2002, *Engineering Geology* 64, 195-215.
- Jefferson, Ian & Rogers, Christopher David Foss; Liquid limit and the temperature sensitivity of clays, 1998, *Engineering Geology* 49, 95-109

- Laloui, L. & Cekerevac, C.; Numerical simulation of the non-isothermal mechanical behaviour of soils, 2008, Computers and Geotechnics.
- Laloui, L & Cekerevac, C.; Thermo-plasticity of clays: An isotropic yield mechanism; 2003, Computers and Geotechnics 30, 649-660.
- Neaupane, Krishna Murari & Nanakorn, Pruettha; Coupled Heat-Deformation-Flow Analysis for Clayey Soil, 2006, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 521-525.
- Marques, Maria Esther Soares & Leroueil, Serge; Chapter 36, Preconsolidating Clay Deposit by Vacuum and Heating in Cold Environment.
- Romero, E.; Villar, M.V. & Lloret A.; Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays, 2005, Engineering Geology, 255-268.
- Saix, C.; Devillers, P. & El Youssoufi, M.S; Éléments de couplage thermomécanique dans la consolidation de sols non saturés, 2000, Can. Geotech J. 37: 308-317.
- Sultan, N.; Delage, P. & Cui, Y.J.; Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay, 2002, Engineering Geology 64, 135-145.
- Tan, Özcan; Yilmaz, Lale & Zaimoglu, P.A. Sahin; Variation of some engineering properties of clays with heat treatment, 2004, Materials letters 58, 1176-1179.
- Villar, M.V. & Lloret. A.; Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite, 2004, Applied Clay Science 26, 337-350.
- Xiong, Yuchun, Fang, Yingguang & Xu, Guohui; A dynamic damage model and its application to soft clay, 2006, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 25, Supp. 1.
- Yashima, Atsushi; Leroueil, Serge; Oka, Fusao; Guntoro, Iwan; Modelling temperature and strain rate dependent behaviour of clays: One dimensional consolidation, 1998, Soils and Foundations, vol. 38. no. 2, 63-73.
- Zhang, Guoxiang; Samper, Javier & Montenegro; Luis; Coupled thermo-hydro-bio-geochemical reactive transport model of CERBERUS heating and radiation experiment in Boom clay, 2008, Applied Geochemistry.



- Zhang, Chun-Liang; Rothfuchs, Tilmann; Su, Kun Hoteit, Nasser; Experimental study of the thermo-hydro-mechanical behaviour of indurated clays, 2007, Physics and Chemistry of the Earth 32, 957-965.

### **Termisk oprensning på Knullen 8, Odense**

Denne rapport indeholder en gennemgang af relevant litteratur med henblik på at foretage en indledende indsamling af viden om effekten af opvarmning af jord på jordens styrke- og deformationsegenskaber. På Knullen 8, Odense er der gennemført en termisk oprensning i moræner ved termisk ledningsevne samt med damp i et underliggende sandlag. I forbindelse med projektet er effekten af denne dampude under læren monitoreret, ligesom der er foretaget en intensiv monitorering af deformationer i jord og overliggende bygningsdele for at indhente viden om hvilken indflydelse opvarmningen har på disse. Herudover er der redegjort for i hvilket omfang opvarmningen kunne give anledning til direkte nedbrydning af de chlorerede opløsningsmidler i opvarmningszonen. Desuden omfattede den geokemiske undersøgelse pyritdannelse i forbindelse med opvarmningen. Resultaterne af deformationsundersøgelserne viste, at der for en fast forkonsolideret moræner ikke opstår nævneværdige sætninger/deformationer, mens litteraturstudiet viste, at der for ikke forkonsoliderede jordarter kan ske større sætninger/deformationer.



**Miljø- og  
Fødevareministeriet**  
Miljøstyrelsen

Strandgade 29  
1401 København K  
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

**[www.mst.dk](http://www.mst.dk)**