



Cryoremediering

**Oprensning af forurening i ler
ved hjælp af frysestimuleret
frakturering**

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Knud Erik Klint,
Claus Kjøller, Rasmus Jakobsen,
Hans Jørgen Lorentzen,
Anne Storgaard.

Grafiker/bureau: GEUS

Tryk: GEUS

Fotos: GEUS

ISBN: 978-87-93614-10-9

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.

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	9
1.1	Baggrund	9
1.2	Idé og motivation	9
1.3	Teoretisk baggrund for dannelse af naturlige fryse-/tø-sprækker i lerjord	10
2.	Strategi og projektering	12
2.1	Strategi	12
2.2	Projektplan	12
3.	Laboratorieforsøg	13
3.1	Udvælgelse af relevante prøvetyper	13
3.2	Indsamling af relevante prøvetyper	13
3.2.1	Feltlokaliteter	14
3.3	Forsøg 1: Indledende forsøg med identifikation af de mest betydende parametre for dannelse af fryse-/tø-sprækker	16
3.3.1	Formål/rationale	16
3.3.2	Kravspecifikationer	16
3.3.3	Metoder	17
3.3.4	Resultater	19
3.3.5	Delkonklusion efter 1. forsøgsrunde	25
3.4	Forsøg 2 (Sous Vide): Dannelse af fryse-/tø-sprækker og is-linser igennem frysning af intakte prøver med moræneler og forurenede sandet moræneler i et simuleret "åbent system".	26
3.4.1	Formål/rationale	26
3.4.2	Kravspecifikationer	26
3.4.3	Metoder	26
3.4.4	Resultater	28
3.5	Forsøg 3 (Sous Vide): Eksperiment med aktivt stimuleret transport af tracer/donorstoffer (Deuterium/ ¹⁸ O/Br ⁻ /sukkevand) ved at fryse intakte prøver med moræneler.	32
3.5.1	Formål/rationale	32
3.5.2	Kravspecifikationer	32
3.5.3	Metoder	32
3.5.4	Resultater	33
3.5.5	Delkonklusion for 2. og 3. forsøgsrunde	35
3.6	Forsøg 4 (LUC): Eksperiment med kombineret frysning og injektion af vand/donor/tracer i vertikale borer i store uforstyrrede intaktprøver med fastholdt og ekspanderende diameter.	35
3.6.1	Formål/rationale	35
3.6.2	Kravspecifikationer	36
3.6.3	Metoder	36
3.6.4	Resultater	39
3.7	Delkonklusion for 4. forsøgsrunde	43
4.	Feltforsøg	45

4.1	Forsøg 5: Felteksperiment med kombineret frysning og injektion af vand og ikke-reaktive stoffer i vertikal fryseboring installeret i uforstyrret moræneler under naturlige forhold.	45
4.1.1	Formål/rationale	45
4.1.2	Kravspecifikationer	45
4.1.3	Metoder	48
4.1.4	Resultater	49
4.2	Sammenfattende konklusioner på feltforsøg	58
5.	Sammenfattende resultater	60
6.	Diskussion og anbefalinger	61
6.1	Overordnet vandmætning kontra kontrolleret stoftransport ind i matrix	61
6.1.1	Diskussion	61
6.1.2	Anbefalinger	61
6.2	Lers sugeradius, stofkoncentrationer og placering af fryseboringer/infiltrationsboringer	62
6.2.1	Diskussion	62
6.2.2	Anbefalinger	62
7.	Referencer	63

Forord

Denne rapport omhandler undersøgelser der er gennemført i perioden 2010-2015 af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Projektet er gennemført i samarbejde med Region Hovedstaden og med firmaet Kjull Aps. som underleverandør af tekniske løsninger.

Projektet er dels finansieret af Region Hovedstaden og dels med midler fra Miljøstyrelsens Teknologi- og Udviklingspulje.

Projektet er udført af Seniorforsker Knud Erik S. Klint (Projektleder), Statsgeolog Claus Kjøller, Seniorforsker Rasmus Jakobsen og Laborant Hans Jørgen Lorentzen, fra GEUS, i samarbejde med studerende Anne Storgaard (IGN) Københavns Universitet, Mads Terkelsen, Camilla Maymann Christiansen, Nina Tuxen, Ida Damgaard og Nancy Hamburger fra Region Hovedstaden, der har deltaget løbende i projektet i forbindelse med strategimøder og teknisk rådgivning/sparring.

Peter Kjull (Kjull Aps) har deltaget i design og konstruktion af fryse-, injektion-, og monitoringsudstyr til både laboratoriet og feltforsøg.

Endelig har Teknologisk Institut i Høje Tåstrup, Kallerup Grusgrav i Hedehusene (Henrik Olsen) og DTU (forureningsgrund i Vadsby) velvilligt stillet arealer til rådighed for udgravning af de intaktprøver der er anvendt i projektet, samt til udførelse og udgravning af *in situ* fryseforsøg.

Sammenfatning og konklusion

Cryoremediering er en helt ny teknologi, der udnytter fryseprocesser til at opnå effektiv kontakt til forurening i lerjord. I nærværende rapport beskrives de indledende forsøg udført på laboratorieskala og feltkala.

De vigtigste resultater af hvert forsøg præsenteres. Undervejs er der sket markante ændringer i forsøgsstrategien i forhold til de mål der oprindeligt blev opstillet. Således er den oprindelige plan om at udnytte fryse/tø sprækker til at øge den hydrauliske bulk-ledningsevne blevet ændret til at fokusere mere på stimulering af den kapillære sugeeffekt i moræneler ved frysning.

Overordnet viser de indledende resultater fra nærværende laboratorie- og feltundersøgelser, at det er muligt at skabe et tæt netværk af fryse/tø sprækker ved at fryse ler langsomt under vandmættede forhold. Derudover viser forsøgene, hvordan væske ved frysning transporteres med stor hastighed ind i ler på grund af lerens kapillære sugeeffekt og udtørring under dannelsen af is-linser. Resultaterne af projektet indikerer, at det er sandsynligt, at reaktive stoffer kan iblandes væsken og på den måde fordeles i matrix. Generelt er følgende resultater opnået :

Sammenfattende resultater og konklusioner:

- Resultaterne viser, at det i laboratoriet samt omkring fryseboringer *in situ* er muligt at skabe et tæt sprække-netværk, der i udseende og stil er sammenlignelige med naturlige fryse/tø-sprækker, som de kan observeres i udgravninger og på blottede sektioner på f.eks. kystklinter. Det har endnu ikke været muligt at teste, om disse sprækkesystemer har bulk-hydrauliske egenskaber som er sammenlignelige med naturlige sprækkezoner dannet ved frysning, da forsøg på at måle permeabilitet i små kerneprøver viste sig at være stærkt påvirkede af målemetoden, herunder især omslutningstrykket.
- Den vigtigste parameter for dannelse af frostsprækker er adgang til vand, samtidig med at der genereres en retningsbestemt migrerende frysefront ved langsom frysning i temperatur-intervaller fra -1 til -10 °C . For at opnå denne jordtemperatur krævedes det i dette projekt, at der kunne fryses ned til -24 °C i en central frysekilde.
- Sprækkerne udvikles parallelt med frysefronten, og med en tæt indbyrdes afstand på 2-5 mm.
- En af de vigtigste observationer er, at der ved langsom frysning dannes markante is-linser i sprækkerne, og at der samtidig opstår en markant udtørring af matrix tæt på sprækkerne. Denne udtørring aktiverer kapillære sugekræfter så fugt og væske trækkes hen imod frysefronten. Radius af denne sugeeffekt overstiger 30-40 cm. Yderligere forsøg bør foretages for at afdække den maksimale suge-radius i forskellige lertyper.
- Den genererede væsketransport gør det muligt ved hjælp af tilførsel af vand med stoffer, at fordele disse stoffer jævnt i lermatrix med en hastighed, der er flere størrelsesordner hurtigere end diffusiv og normal advektiv transport.
- Der er på baggrund af forsøgene udviklet en metode der har potentiale til effektivt at kunne fordele stoffer i moræneler/ler på større skala ved hjælp af frysestimuleret transport.
- Metoden er baseret på frysning og injektion af stoffer fra/i borer og er afprøvet både under kontrollerede forhold i et laboratorium og *in situ* på en feltlokalitet ved Kallerup Grusgrav ved Hedehusene.

- Resultaterne viser, at det er muligt at overføre erfaringerne fra laboratorieforsøgene til en feltlokalitet med moræner overlejrende et udbredt grundvandsmagasin. I det aktuelle feltforsøg blev der skabt veludviklede fryse/tø sprækker i moræner samtidig med, at der til en vis grad blev genereret en transport af væske fra injektionsboringer hen imod frysefronten.
- Det skal bemærkes, at sandet moræner og lokale geologiske inhomogeniteter tilsyneladende kan påvirke metodens succes, idet der er risiko for, at en væsentlig vandmængde kan sive væk fra forsøgsfeltet.
- Det anbefales at monitorere alle nedbørshændelser ved tilsvarende fremtidige fryseforsøg i feltet. Det bør endvidere overvejes at overdække området, hvor der fryses eller lede regnvand væk fra forsøgsområdet for at undgå fortynding af de reaktanter der ønskes fordelt i lermatrix under frysningen.
- Det anbefales i en evt. fremtidig forsøgsrække, at foretage yderligere feltforsøg på lokaliteter med mindre sand og evt. også i den mættede zone for at se, hvorledes metoden præsterer under forskellige geologiske forhold.
- Endelig anbefales et pilotforsøg med oprensning af forurening på en forurennet grund for at dokumentere effekten af metoden samt for at kunne formulere en strategi for kommercialisering på baggrund af cost-benefit analyser og lignende.

Perspektivering

Metoden forventes at kunne bruges til at nedbryde forurening *in situ* og er som minimum pris-mæssigt sammenlignelig med eksisterende oprensningsmetoder og sandsynligvis op imod 50% billigere. Særlige fordele er, at metoden kan benyttes under bygninger og er mere bæredygtig end eksisterende løsninger, hvor forureningen ikke oprensnes *in situ*, men alene flyttes med efterfølgende krav til efterbehandling eller opvarmes til høje temperaturer, hvortil der kræves et meget højt energiforbrug.

1. Indledning

I 2010 indledte GEUS et projekt i samarbejde med Region Hovedstaden, der som overordnet formål havde at undersøge muligheden for at øge lers permeabilitet ved hjælp af frysefrakturering. Herigennem var det ønsket at øge mulighederne for oprensning af forurenede grunde - og særligt af forureninger med klorerede opløsningsmidler i lavpermeable sedimenter som fx moræneler. Projektets fik navnet CRYOFRAC. I løbet af projektet er det erkendt, at det ikke er selve fryse-/tøsprækkerne, der skaber mulighed for oprensning af den forurenede ler, men derimod en forceret vandtransport, der stimuleres af frysningen af jorden. Denne metode, hvor frysning anvendes til *in situ* oprensning af forurening i ler er efterfølgende navngivet **Cryostimuleret Remediering** af forurenede ler. (acronym: CryoRem). Metoden undersøges og udvikles i det nyligt opstartede CRYOREM projekt, der udføres af et konsortium bestående af GEUS, Geo, Orbicon, Frisesdahl A/s og Region Hovedstaden og er delvist finansieret af Innovationsfonden. I denne rapport beskrives resultaterne af CRYOFRAC projektet.

1.1 Baggrund

Jordforurening med kræftfremkaldende klorerede opløsningsmidler er en trussel for grundvand og indeklimate. Klorerede opløsningsmidler kan nedbrydes ved biologiske og kemiske processer, hvilket allerede udnyttes i *in situ* oprensninger ved tilsætning af reaktanter til undergrunden. I moræneler er dette dog meget vanskeligt, da det er svært at skabe den nødvendige kontakt mellem reaktanterne og forureningen, på grund af morænelerets lave permeabilitet. Med ca. 1500 forurenede grunde på områder dækket af ler bare i Region Hovedstaden, og mere end 15.000 tilsvarende grunde i Europa og Nordamerika, udgør klorerede opløsningsmidler et markant miljøproblem globalt set. Med varierende succes har der tidligere været udført en række forskellige forsøg på at ændre lers hydrauliske egenskaber for bedre at kunne trække forurening ud af leret, eller for at kunne tilføre reaktive materialer for at nedbryde forureningen på stedet. F.eks. er det forsøgt at opsprække ler ved hjælp af hydraulisk eller pneumatisk frakturering samt ved Geoprobe injektion (Christiansen et al. 2010).

Alle forsøg har imidlertid vist sig problematiske, primært fordi afstanden imellem inducerede sprækker stiger hurtigt med afstanden fra injektionspunktet. Soil mixing og blasting er andre metoder, der dog efterlader problematiske geotekniske forhold efter behandlingen. Den mest udbredte metode i dag er termal oprensning, hvor jorden på forskellig vis opvarmes til over kogepunktet for det forurenede vand, hvorefter gas og kondensat ekstraheres i nærliggende borer. Denne metode er dog meget energikrævende og anlæg til inddæmning, opsamling og bortskaffelse af forureningen er ligeledes dyr. Generelt set er der således et stort behov for at udvikle nye mere bæredygtige og kosteffektive metoder til at oprense ler, der er forurenede med især klorerede opløsningsmidler.

1.2 Idé og motivation

I forbindelse med en lang række undersøgelser af sprækkers naturlige forekomst i moræneler, Klint (1999), Klint et al. (2001), Gravesen et al. (2014), er der gentagne gange observeret højpermeable zoner med en tæt opsprækning, typisk i de øverste 3 meter under terræn (Fig. 1). Disse sprækker optræder uafhængigt af både udtørring og belastningsrelaterede processer og tolkes derfor dannet som et resultat af fryse-/tø-processer. Da fryse-/tø-processer i mindre grad påvirkes af tektoniske og mekaniske sediment-egenskaber og i højere grad er et resultat af en termodynamisk proces, var det nærliggende at undersøge muligheden for at skabe denne sprækketype kunstigt ved at fryse ler. Dette er således motivationen for iværksættelse af forsøgene med frysefrakturering.

Fryse/tø sprækker Gedserodde



Fryse/tø sprækker Englandsvej



FIGUR 1: NATURLIGE FROSTSPRÆKKER DANNET I MORÆNELER VED GEDSERODDE KLINT SAMT I EN UDGRAVNING VED ENGLANDSVEJ PÅ AMAGER.

1.3 Teoretisk baggrund for dannelse af naturlige fryse-/tø-sprækker i lerjord

Fryse-/tø-processer er af fundamental betydning for dannelse af naturlige frostsprækker i kølige områder. Generelt kan frostrelaterede sprækker opdeles i tre forskellige typer. 1) Is-kiler relateret til generelt nedbørsrige permafrosne områder, 2) sand-kiler som dannes i relativt tørre permafrosne områder og 3) sæsonbetonede fryse-/tø-sprækker relateret til is-segregerings processer i ikke nødvendigvis permafrosne områder.

Sprækkedannende processer forårsaget ved gentagen frysning og smeltning af vand i matrix, pore og sprækker eller andre hulrum er meget komplekse og er afhængige af en række parametre primært relateret til: vandindholdet i sedimentet, nedbør, temperatur, sedimentegenskaber (konsolidering, struktur og kornstørrelsesfordeling) samt lokale geomorfologiske forhold. (French, 1976; Kolstrup, 1987; Lachenbruch, 1961, 1962; Murton et al., 2000; Williams and Smith 1989; Washburn, 1979). Vandindholdet er den vigtigste faktor for dannelse af fryse/tø sprækker. Uden vand sker der ingen isdannelse. Når jorden fryser, vil det meste vand i jorden udskilles i is-linser. Samtidig vil der ske en ekspansion på ca. 9 % af den vandmængde der omdannes til is. Denne proces er også ansvarlig for fænomenet "frost heave" (Washburn, 1979), hvor jordoverfladen kan hæve sig når jorden fryser. Det faktum at ren is har en lineær ekspansionskoefficient på 52.7×10^{-1} ved 0°C og kun 50.5×10^{-1} ved -30°C (French, 1976) resulterer i, at der dannes åbne sprækker i is ved lave temperaturer hvor isens temperatur ændrer sig i tid og rum. Når disse sprækker fyldes med smeltevand eller flyvesand dannes henholdsvis is-kiler og sand-kiler i områder med permafrost, hvorimod sæsonbetonede fryse-/tø-sprækker kan dannes ved højere temperaturer. Således er ikke kun temperaturforskellen vigtig for dannelse af forskellige frysestrukturer, men også frekvensen af fryse-/tø-cykler (French, 1976).

Selve fryseprocessen er en kompliceret termodynamisk proces hvor migration af fugt/væske imod et fryseplan resulterer i dannelse af enten poreskala is eller større linser af klar is (Benson and Othman, 1993). Et hurtigt temperaturfald vil ofte reducere migrationen af vand og resultere i poreskala is, mens langsommere frysning resulterer i dannelsen af tykke is-linser (Rempel 2011). Processen kan endvidere resultere i udtørring og dannelse af udtørings-sprækker ifølge Coutard and Mûcher (1985). Endelig kontrollerer temperatur og kornstørrelse også *mængden* af ufrosset vand i forskellige sedimenter. Det ufrosne vand, der omgiver mine-ralkorn, danner en tynd film, 3–50 Å tyk ved temperaturer under -5°C og mængden af vand kan ifølge Anderson and Tice (1970) beregnes med udtrykket (1), hvor W_u er mængden af ufrosset vand i procent af jordens tørvægt, θ_f er temperaturen under frysepunktet ($^\circ\text{C}$), a og β er parametre målt i forhold til det specifikke overfladeareal af sedimentet.

$$W_u = a\theta_f\beta \quad (1)$$

Kornstørrelsesfordelingen påvirker således både porestørrelse, porøsitet, og permeabilitet af sedimentet og dermed også dannelsen af is i sedimentet.

Migrationen af vand imod frysefronten er på den anden side primært påvirket af kornstørrelsen, fordi potentialet for at trække vand til frysefronten stiger med faldende kornstørrelse ned til et givet punkt hvor leren bliver impermeabel og begrænser migrationen. Der er således nogle kornstørrelser, som er mere fordelagtige til at skabe is-linser end andre. (Tabel 1).

Strukturen og tekturen af jorden er ligeledes vigtig, idet iboende strukturer som sedimentære eller tektoniske lagdelinger må formodes at skabe bedre betingelser for dannelse af is-linser i bestemte horisonter.

Endelig har mineralogi sandsynligvis også en indflydelse på migration af vand i ler. Lermineraller med store svelnings-egenskaber som f.eks. smectit eller montmorillonit kan indeholde mere vand end mindre svellende lermineraller som f.eks. kaolinit. Vand er mere immobil i plastisk ler og kaolinit må teoretisk set være mere associeret med is-linsedannelse og frost heave end f.eks. smectit.

Et højt indhold af ioner, f.eks. i marine sedimenter (primært Na^+ og Cl^-), influerer også fryseprocessen ved at sænke frysepunktet for porevandet. Indflydelse af fryse-/tø-processer på strukturerne og de hydrauliske egenskaber i sedimenter er beskrevet af Viklander & Eigenbrod (2000) og forsøgt modelleret af Warden & Perrin (2008).

Laboratorieeksperimenter med gentagne fryse-/tø-cykler af ler resulterede i omdannelse af en massiv dårligt konsolideret ler til en let konsolideret næsten fissilt udseende ler (Othman & Benson, 1993). Samme fissile strukturer er observeret i de øverste 2–4 m på næsten alle 31 lokaliteter der er systematisk undersøgt af Klint (2001), Klint (1996), Klint et al. (2001), Gravesen et al. (2013) og Klint et al. 2010.

TABEL 1: RELATION MELLEM KORNSTØRRELSE OG MÆNGDEN AF UFROSSET VAND I SEDIMENTER VED TO TEMPERATURER (WASHBURN 1979).

Temperatur	Sand % ufrosset vand	Sandet ler % ufrosset vand	Ler % ufrosset vand
−0.2°C	0,3	18	42
−10°C	0,15	9	>20

2. Strategi og projektering

2.1 Strategi

Oprindeligt var det planen, at udføre en række indledende laboratorieforsøg for at undersøge om det i første omgang kunne lade sig gøre, at skabe kunstige fryse-/tø-sprækker i ler med samme egenskaber og udseende som naturlige fryse-/tø-sprækker dannet gennem flere tusinde år. Hvis det viste sig muligt, skulle teknologien testes i lille skala under naturlige forhold på en feltlokalitet, og hvis resultaterne stadig var lovende skulle metoden testes på en forurennet grund i stor skala. Strategien har således været, at resultaterne fra de indledende forsøg danner baggrund for næste række af forsøg. Efter hver forsøgsrække er projektplanen revideret og tilpasset de nye resultater for på den måde at opnå maksimalt udbytte.

2.2 Projektplan

På baggrund af tidligere observationer og litteraturstudier konkluderedes det, at de betydende parametre for dannelse af fryse-/tø-sprækker i naturen samt nogle af de risici, der er forbundet med frysning af jord, omfatter:

1. Temperatur. Absolut temperatur og frysehastighed er vigtig. I forhold til at variere temperaturen blev der anskaffet en fryser med mulighed for nøjagtig temperaturstyring for de mindre prøver.
2. Antal frysecykler. Betydning af gentagne fryse-/tø-cykler. Blev styret i førnævnte fryser.
3. Vandindhold/vandmætning. Har afgørende betydning ifølge litteraturen. Derfor blev der kun anvendt vandmættede prøver i lukkede fryseforsøg, og der arbejdedes på udvikling af en metode til at simulere "åbne" forsøg med mulighed for at tilføre vand under frysningen.
4. Sedimentegenskaber (struktur, kornstørrelsesfordeling, lermineralogi), hydrauliske egenskaber og varmeledningsevne. De fleste af disse parametre er beskrevet eller målt med forskellige metoder. Især permeabilitet viste sig at være en udfordring.
5. Geomorfologi. I naturen har den lokale geomorfologi stor indflydelse på dannelse af naturlige fryse-/tø-sprækker. Denne effekt har ingen relevans i laboratorieforsøg, og der blev ikke simuleret forskellige geomorfologiske forhold i projektet.
6. Frost heave "udvidelse" af jord, der fryser, er et kendt fænomen i permafrostområder, hvor overfladen hæver sig når jorden fryser. Ved hjælp af Arkimedes forsøg blev udvidelsen af små lerprøver målt i laboratoriet. Metoder til at vurdere udvidelsen af større lerprøver i laboratoriet og frost heave under feltforsøgene blev designet *ad hoc*.

Under kontrollerede laboratorieforhold kan det diskuteres, hvilke begrænsninger kunstige randbetingelser giver med henblik på at simulere naturlige forhold. Det er klart, at prøvestørrelsen kan være afgørende, men også adgangen til væske (grundvand) i naturen og simulering af naturlige temperaturgradier under "åbne" forhold kan være problematisk at simulere under "lukkede" forhold i et laboratorium. Derfor blev det besluttet at inddrage *prøver af forskellig størrelse* i laboratorieforsøgene for at vurdere effekten af randbetingelserne.

Endelig blev det også vurderet at være vigtigt at beskrive betydningen af forureningens påvirkning af fryseprocessen, da metoden netop skal anvendes i forbindelse med oprensning af forurening med klorerede opløsningsmidler.

I de næste afsnit beskrives de forskellige forsøg, der er foretaget samt de overordnede resultater for hvert forsøg. De enkelte delresultater diskuteres og danner baggrund for efterfølgende forsøg. Til slut gives anbefalinger til en mulig strategi for en fuldskala oprensning.

3. Laboratorieforsøg

De forsøg, der er udført i de indledende laboratorieforsøg, skulle give svar på følgende helt basale spørgsmål:

1. Er det muligt at skabe kunstige fryse-/tø-sprækker, der er sammenlignelige med naturlige fryse-/tø-sprækker, der optræder i moræner mange steder i naturen ?
2. Hvad er disse sprækkers indflydelse på den bulk hydrauliske ledningsevne (bulk permeabiliteten) i moræner?
3. Kan processen udnyttes i forbindelse med oprensning af forurenede moræner (specifikt til at distribuere reaktive stoffer jævnt i en massiv lermatrix)?

Disse spørgsmål forudsætter en grundig beskrivelse, sammenligning og diskussion af de underliggende specifikke parametres betydning for ændringer i permeabilitet og volumenændring ved frysning af ler.

3.1 Udvalgelse af relevante prøvetyper

I forbindelse med fryseforsøgene var det nødvendigt at udpege nogle relevante lertyper i Danmark så forsøgene dækkede over så repræsentativt et udsnit som muligt. Lerjord dækker en bred vifte af lertyper, men i Danmark er de mest almindelige, naturligt forekommende lertjordstyper:

Moræner: langt den hyppigst forekommende lertjordstype i Danmark, der dækker over 40 % af landets areal. I de tættest bebyggede områder er moræner klart den hyppigst forekommende lertjordstype. Moræner kan groft opdeles i to typer: i) generelt velkonsoliderede bundmoræner (basal till's) og ii) dårligt konsoliderede såkaldte flydemoræner (flow till's) afsat som mudderstrømme under afsmeltning af isdækket.

Smeltevandsler/issø-ler: ler afsat i søer i et glacialt landskab. Denne lertype har normalt et lavt indhold af organisk materiale og et højt indhold af ler, ofte over 40% ler. Issøler optræder typisk fint lamineret med mere siltede tynde lag vekslende med ler.

Ferskvandsler: ler afsat i søer efter isens tilbagetrækning. Man skelner typisk mellem senglacialt ferskvandsler med lille organisk indhold og postglacial ferskvandsler med højere indhold af organisk materiale. Som issøler optræder ferskvandsler også med en fin lamination, og hvor de enkelte laminae repræsenterer årsvariationer i tilført materiale til søbunden, tales der om *varv*.

Marint ler: kan både omfatte Holocæne aflejringer i nu tørlagte områder, der har været oversvømmet af havet efter sidste istid og prækvarter marine aflejringer, der optræder forskellige steder i Danmark. Især er Eocæne, Paleocæne og Oligocæne marine aflejringer udbredt flere steder i Danmark, typisk under et dække af glacialt kvartær aflejringer.

I nærværende projekt er der primært fokuseret på moræner, der er den altdominerende lertype i Danmark, men for at belyse betydningen af lerindhold er der også foretaget fryseforsøg på en fed smeltevandsler.

3.2 Indsamling af relevante prøvetyper

Der blev indsamlet forskellige størrelser af prøver, dels intakte klodser, typisk 30 x 30 x 30 cm, dels små kerneprøver (Ø38 mm cylindriske prøver af varierende længde i såkaldte A-rør), dels

såkaldte Kubienaprøver, som er prøver udtaget i en 10 x 8 x 5 cm stålbox. Endelig blev der også udtaget LUC-prøver (Large Undisturbed Columns; Jørgensen et al. 1998), der er store intakte cylindriske kerner med Ø50 cm og en højde på ca. 50 cm (200 kg). Det var vigtigt at prøverne var intakte og friske, hvorfor de blev indsamlet i store friskgravede udgravninger. Det var ligeledes vigtigt at få indsamlet både naturligt opsprækkede prøver og massive prøver uden sprækker for at se om det havde nogen betydning for fryse-/tø-processen, så nogle massive prøver blev indsamlet fra større dybde, mens de sprækkede prøver typisk blev indsamlet i den oxiderede ler tættere på overfladen.

3.2.1 Feltlokaliteter

Et antal forsøgslokaliteter blev udvalgt til indsamling af relevante lerprøver. I første omgang blev Lolland og området omkring Hedehusene udpeget som repræsentative områder (Fig. 2). Ved Hedehusene findes en let sandet, siltet og kalkrig moræneler, der er den mest almindelige type moræneler på Sjælland, hvorimod moræneleren på Lolland normalt anses for at være lidt "federe" da Prækvartær-overfladen her består af ler.

I november 2010 blev således udført en udgravning ved Nysted på Lolland, og i juni 2011 samt i november 2011 blev der indsamlet intakte morænelersprøver på en mark ved Teknologisk Institut i Høje Tåstrup, samt forurenede morænelersprøver ved Vadsby tæt på Hedehusene (Fig. 2). Der blev udført en gennemgribende geologisk karakterisering af moræneaflejringerne, og de blev klassificeret i forhold til deres dannelse, inden prøverne blev udtaget.



FIGUR 2: PLACERING AF FELTLOKALITETER I OMRADET OMKRING HEDEHUSENE.

Nysted

Ved Nysted på Lolland blev der udført en udgravning til ca. 4 meters dybde. En række kerneprøver og intakte "kubienaprøver" blev indsamlet fra både den reducerede del og den oxiderede del af lagpakken. Generelt var geologien kompleks med moræneler overlejrende en "bro-lægning" ca. 1 meter under terræn. Herunder fremstod en karakteristisk kalkmoræne og under den, fra ca. 2 meter under terræn til bunden af udgravningen optrådte stærkt opsprækket moræneler. Generelt blev prøverne vurderet at være dårligt egnede til fryseforsøg, da det netop er meningen at prøverne skal være massive og helst uden sprækker. Prøverne blev derfor i første omgang udtaget som referenceprøver, der evt. kunne bruges til at sammenligne naturlige sprækker med de kunstige sprækker, der skabes i laboratoriet.

Teknologisk Institut, Høje Tåstrup

Ved Teknologisk Institut (TI) ved Høje Tåstrup var et område på ca. 100 x 100 meter (Fig. 3) udlagt til forsøg med nedsivning i et andet forskningsprojekt. I forbindelse med den geologiske karakterisering af området blev i juni 2011 udført en udgravning til ca. 5,5 meter under terræn.

To LUC prøver (Large Undisturbed Columns) blev forsigtigt udgravet i henholdsvis den massive/let sprækkede oxiderede moræneler ca. 3,5-4 m u.t. og i den massive reducerede moræneler ca. 4,5-5 m u.t. (Fig. 3.). Prøverne blev forseglet med flydende gummi i en gummimembran og anbragt i en stålcylander med aftagelig top og bund, og fragtet til GEUS' kerneanalyse laboratorium.



FIGUR 3: TO STORE INTAKTE (LUC) PRØVER OG EN RÆKKE MINDRE INTAKTE "KLODSE" OG RØRPRØVER BLEV UDTAGET PÅ TEKNOLOGISK INSTITUT'S FORSØGSMARK VED HØJE TÅSTRUP.

Ved prøvetagningen blev der endvidere udtaget en række intakte klodser af moræneler på 5-10 kg stykket. I den reducerede zone blev yderligere udtaget 10 rørprøver (A-rør) til fryseforsøg.

I forbindelse med eksperimenter med jet-injektion i november 2011 blev yderligere udført en stor udgravning til ca. 7 meter under terræn. Også her blev der udtaget en række intakte morænelersprøver af den massive reducerede del til fryseforsøg. Prøverne i denne udgravning blev generelt udtaget som intakte blokke på 30-40 kg stykket, og mindre delprøver kunne derefter tildannes fra de store prøver.

Kallerup Grusgrav, Hedehusene

Supplerende lerprøver blev udtaget i Kallerup Grusgrav ved Hedehusene i oktober 2013, dels til imprægneringsforsøg og dels til såkaldte "Sous Vide" fryseforsøg. Grusgraven ligger kun 4 km fra grunden ved Teknologisk Institut i Høje Tåstrup og den geologiske opbygning i grusgraven svarer i store træk til geologien i Høje Tåstrup, med en ca. 8 meter tyk baltisk bundmoræne overlejrende smeltevandssand og grus. Moræneleren er generelt en smule mere sandet i Kallerup Grusgrav end ved Teknologisk Institut og Vadsby lokaliteterne.

Vadsby

I forbindelse med bortgravning af forurenede jord ved Vadsby nord for Hedehusene blev der gravet i gravekasse til mere end 15 meter under terræn. Ved den lejlighed blev der udtaget tre intakte forurenede prøver af moræneler fra ca. 7 meters dybde. Prøverne målte ca. 50 x 30 x 30 cm, var lettere opsprækkede og bestod generelt af velkonsolideret, massiv, siltet, sandet, svagt gruset moræneler. Forureningsgrad og type kendes ikke, men der var en stærk lugt af forurening med klorerede opløsningsmidler fra prøverne. Prøverne blev straks forseglet i to lag PE-plastposer og opbevaret nedkølet ved 8°C.

Netto

Der blev indkøbt issø-ler/"juleler" i Netto til at repræsentere ler med naturligt højt lerindhold og i alt 7 delprøver fra denne ler blev anvendt til forsøg. Prøverne blev tilskåret i "passende" størrelser til fryseforsøg, ligesom der blev udtaget Ø38 mm rørprøver.

3.3 Forsøg 1: Indledende forsøg med identifikation af de mest betydende parametre for dannelse af fryse-/tø-sprækker

I de indledende laboratorieforsøg blev det undersøgt hvorledes volumen, permeabilitet og sprækkedannelse påvirkes når man ændrer på følgende parametre: frysehastighed, prøve-størrelse, antal frysecykler, lerindhold og vandmætning.

3.3.1 Formål/rationale

Formålet med forsøg 1 er at studere effekten af frysning på sprækkedannelse og permeabilitet i en række forskellige lerprøver for at identificere de mest betydende parametre og den mest effektive metode til at generere sprækker. Det er hypotesen, at en øget sprækkedannelse medfører en øget permeabilitet i massiv ler.

Som udgangspunkt blev der udført en serie forsøg med 3 forskellige lertyper med stigende lerindhold: sandet moræner (oxideret/reduceret/forurenset, lerindhold ca. 10-12%), moræner (oxideret/reduceret, lerindhold ca. 12-16%), issø-ler (reduceret, lerindhold ca. 35-45%). Alle prøver var som udgangspunkt forsøgt vandmættet inden fryseforsøgene, og i de første forsøg anvendtes prøvestørrelser på henholdsvis 0,15 kg (A-rørprøver), 2 kg (boxprøver) og 200 kg (LUC-prøver).

Følgende parametre blev søgt belyst:

- Ændring i bulk-permeabilitet ved gentagne frysninger
- Volumenændringer af prøverne ved gentagne frysninger
- Sprækkedannelse ved gentagne frysninger
- Sprækkedannelse og permeabilitet ved forskellige frysehastigheder og temperaturintervaller.

3.3.2 Kravspecifikationer

Følgende kravspecifikationer blev formuleret i forbindelse med de forskellige forsøg:

Måling af ændring i bulk-permeabilitet ved gentagne frysninger

Krav: Der skal kunne udføres kontrolleret frysning af store (LUC) prøver mellem gentagne permeabilitetsmålinger.

Løsning: Fryseteknikken med de store LUC-prøver var vanskelig, idet prøvens størrelse (200 kg) umuliggjorde en gradvis nedfrysning i en fryser med variabel temperaturstyring. Prøverne kunne kun fryses i et decideret fryserum, så derfor repræsenterer dette forsøg en hurtig nedfrysning til -15 °C.

Krav: Der skal kunne udføres kontrolleret frysning af små kerneprøver mellem gentagne permeabilitetsmålinger.

Løsning: Fryseteknikken med de små prøver var en udfordring, idet det umiddelbart var ønskværdigt, at prøverne under frysning kunne forblive installeret i en kerneholder, der anvendes til permeabilitetsmålingerne før og efter frysning. Efter forskellige forsøg blev følgende procedure udviklet:

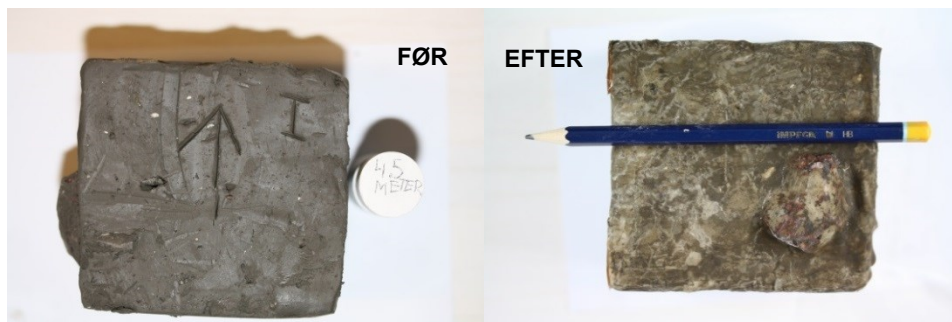
- De små (Ø38 mm) kerneprøver anbringes i en gummisleeve og vandmættes én af gangen i kerneholder.
- Derefter monteres morænelersprøven i kerneholder ved et omslutningstryk svarende til dybden, hvor prøven er udtaget. Omslutningstrykket etableres med glykol der kan tåle frysning til -15 °C, og der måles basispermeabilitet på prøven, der er monteret i kerneholderen inden frysning.
- Der er monteret et manometer på kerneholderens ventil således at omslutningstrykket løbende kan monitoreres under hele forsøget.

- Prøven placeres dernæst i fryser og fryses i forhold til valgte frysestrategi, inden den igen optøs og permeabilitetsmålingen gentages.

Måling af udvidelse af prøverne ved gentagne frysninger

Krav: Prøverne skal kunne fryses flere gange og nedsænkes i vandbad (Arkimedes opstilling) mellem hver frysning uden at tage skade, falde fra hinanden, eller lække væske.

Løsning: Disse forsøg blev kun udført på de små box prøver (2 kg og 0,15 kg) og med følgende procedure: prøven indstøbes i en fleksibel vandtæt gummimembran ved at male den med flydende gummimasse mellem hver frysecyklus. Når gummimassen er størknet er prøven tæt og så kan prøvens volumen måles nøjagtigt både i frossen og optøet tilstand (se Fig. 4).



FIGUR 4: PRØVE (10 x 10 CM) FØR OG EFTER EMBALLERING MED FLYDENDE GUMMIMASSE.

Måling af sprækkedannelse ved gentagne frysninger

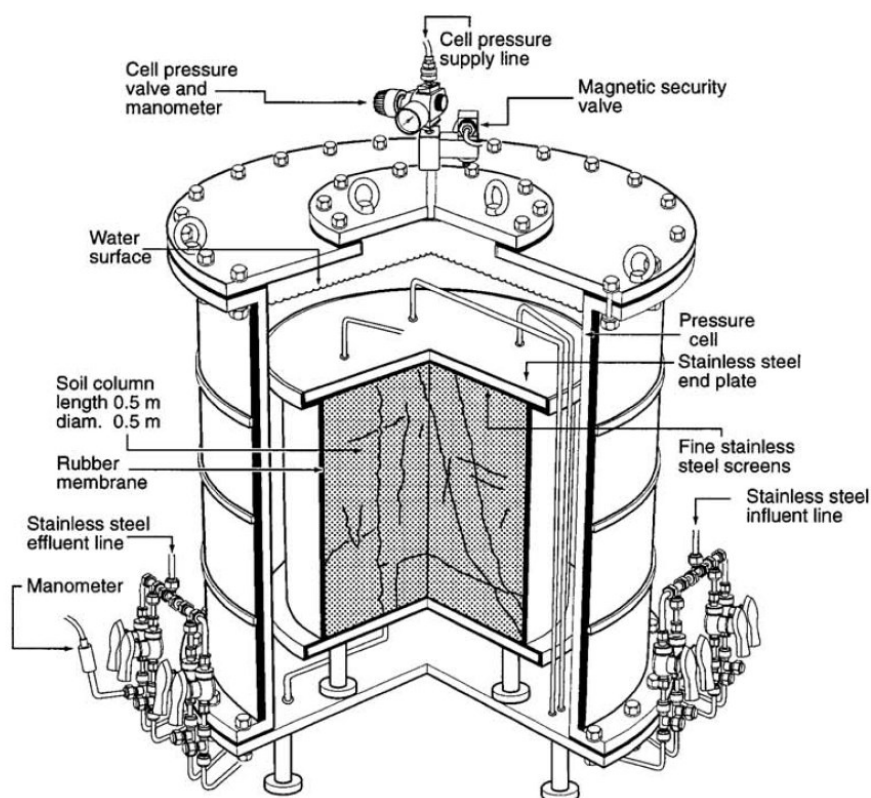
Krav: Sprækkerne skal fremstå så de kan opmåles systematisk.

Løsning: 5 ens prøver vandmættes i kerneholder og indstøbes i gummi. Efter hver frysecyklus "slagtes" én prøve. Sprækkerne inspiceres; dels direkte ved overskæring af prøven og efterfølgende fotografering, og dels ved indstøbning af prøven i en polyesterharpiks iblandet et farvestof. Når prøven er indstøbt slibes overfladen ned til leret og poleres så sprækkerne kan inspiceres/fotograferes under mikroskop og efterfølgende opmåles ved hjælp af et digitalt billedanalyse-program.

3.3.3 Metoder

Store LUC prøver

I LUC forsøget er prøvens basis-permeabilitet bestemt i en traditionel LUC opstilling som vist på Fig. 5 (Jørgensen et al. 1998), og herefter er prøven frosset til ca. -15°C og optøet igen i to på hinanden følgende cykler. Mellem de to frysecykler samt efter sidste optøning er prøvens permeabilitet bestemt igen. I første omgang blev det besluttet at afprøve metoden på den øverste oxiderede LUC-prøve der samtidig var naturligt opsprækket.



FIGUR 5: FORSØGSOPSTILLING FOR MÅLING AF PERMEABILITET PÅ DE STORE LUC-PRØVER. PRØVEN UDTAGES AF OPSTILLINGEN OG ANBRINGES I ET FRYSERUM MELLEM PERMEABILITETS-MÅLINGERNE (JØRGENSEN ET AL.1998).

Prøven blev instrumenteret med termofølere og bund og top blev forsigtigt "chippet" af for at fjerne smearing (udtværet ler) og derved skabe kontakt til iboende makroporer. Dernæst blev der anbragt et lag filtergrus på prøven for at sikre vandkontakt langs hele overfladen og et låg med indbygget udtag blev monteret i begge ender og anbragt i en dertil konstrueret beholder med mulighed for at skabe et omslutningstryk svarende til den dybde prøven er udtaget fra.

Små rørprøver (Ø38 mm)

Forsøgsrække med op til seks gentagne frysecykler. I forsøgene anvendtes én prøve fra den uforurened morænelers-lokaliteter ved Nysted, samt henholdsvis syv og fem prøver af henholdsvis den uforurened ler fra Teknologisk Institut og issø-leren.

Prøverne monteres som følgende:

- Prøven fra Nysted blev anvendt til at undersøge variationen i bulk permeabilitet i morænelers som funktion af antallet af frysecykler. Det var essentielt for forsøget med denne prøve, at målingerne af permeabiliteten ikke blev påvirket af andre forhold end frysningen. Derfor blev prøven monteret i en hydrostatisk kerneholder ved et omslutningstryk på 3 bar, som blev fastholdt gennem seks frysecykler. Mellem hver frysecyklus samt inden frysning blev påbegyndt, blev der målt bulk hydraulisk ledningsevne på prøven.
- Fem prøver af moræneleren fra Teknologisk Institut blev vandmættet og indstøbt i gummimasse. Ligeledes blev fem prøver af issøleren indstøbt i gummimasse, dog uden forudgående vandmætning. Efter hver frysecyklus "ofredes" en prøve fra hver lertype til visuel inspektion og fotografering af eventuelle sprækkedannelser.

Følgende procedure blev fulgt ved de gentagne fryseforsøg:

1. Alle morænelersprøver blev mættet i hydrostatiske kerneholdere ved et omslutningstryk på 3 bar. Under mætningen blev prøvernes bulk hydrauliske ledningsevne bestemt.
2. For morænelersprøven fra Nysted blev et omslutningstryk på 3 bar fastholdt og prøven forblev i kerneholderen.
3. De øvrige prøver emballeredes i gummimasse, og bulk-volumen blev bestemt ved en Arkimedes test.
4. Alle prøver blev placeret i en fryser og nedfrosset langsomt til -15°C ved at regulere fryserens temperatur med -1°C pr. dag til -7°C og derefter -2°C pr. dag til -15°C er nået.
5. Prøverne blev efterladt ved -15°C i minimum to dage.
6. Prøverne blev taget ud af fryseren og bulk volumen af de prøver, der var indstøbt i gummi blev bestemt umiddelbart herefter ved Arkimedes test for at vurdere volumenforøgelsen ved frysningen.
7. Kerneholderen og prøver der ikke skulle "ofres" i pågældende frysecyklus blev stillet til optøning.
8. Prøverne der for den pågældende frysecyklus skulle anvendes til at vurdere opsprækningsgraden blev ikke umiddelbart tøet op, men tildannedes hurtigst muligt på laboratoriesav, før de blev overført til en fryser og efterfølgende fotograferet, inden en delprøve blev udtaget til indstøbning, slibning, polering og billedanalyse.
9. Efter optøning af Nysted prøven i kerneholderen (1-2 dage) blev den bulk hydrauliske ledningsevne bestemt. Endvidere blev den optøede bulk-volumen af prøverne indstøbt i gummi bestemt ved en Arkimedes test.
10. For de resterende prøver blev pkt.4-9 gentaget indtil i alt fem frysecykler var gennemført for prøverne indstøbt i gummimasse og seks frysecykler var gennemført for prøven i kerneholder.

Udover disse forsøg blev der udført to forsøg med Ø38 mm prøver fra Teknologisk Institut, hvor effekten på den bulk hydrauliske ledningsevne af henholdsvis hurtig og langsom frysning blev undersøgt ved én frysecyklus i kerneholder. Ved den hurtige frysning blev prøven frosset ned til -15°C så hurtigt som muligt, mens der ved den langsomme frysning blev anvendt proceduren under punkt 4 ovenfor.

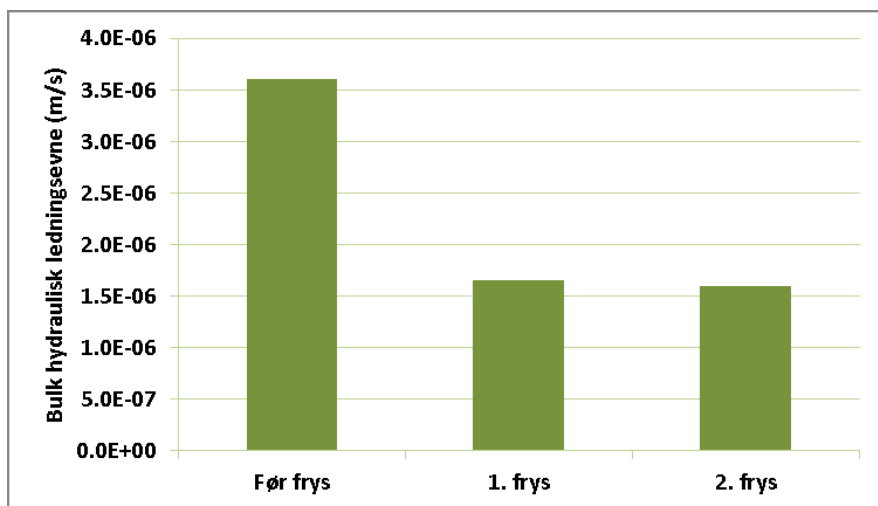
Endelig blev effekten på den målte bulk hydrauliske ledningsevne af et varierende omslutningstryk undersøgt for to Ø38 mm prøver – henholdsvis én prøve fra Teknologisk Institut (prøve T7) og én prøve fra et senere forsøg, hvor kunstige sprækker var dannet i prøven ved frysning i et Sous Vide vandbad (prøve SV1; jf. afsnit 3.4).

3.3.4 Resultater

Ændring i bulk hydraulisk ledningsevne ved forskellige typer af forsøg med gentagne frysecykler

LUC prøve

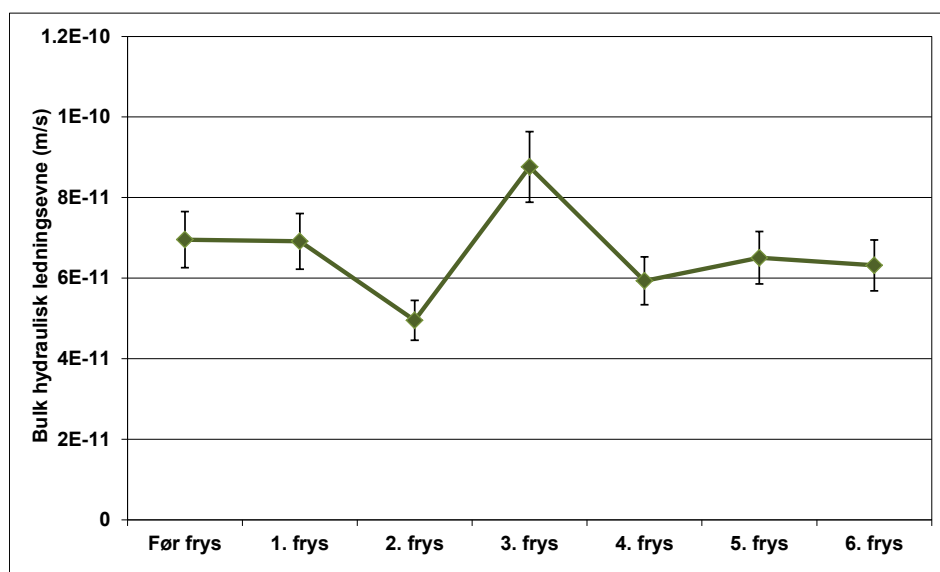
Resultaterne af dette forsøg har ikke kunnet påvise en øget bulk hydraulisk ledningsevne af prøven efter frysning (Fig. 6). Tværtimod kunne der konstateres et mindre fald i den bulk hydrauliske ledningsevne som følge af de to frysecykler, prøven gennemgik. Dette uventede resultat kan bl.a. skyldes, at prøven var naturligt opsprækket i forvejen. Denne hypotese vil kunne be- eller afkræftes ved fx at udføre tilsvarende forsøg med LUC-prøven fra den reducere zone, som ikke i samme grad er naturligt opsprækket.



FIGUR 6: BULK HYDRAULISK LEDNINGSEVNE I MORÆNELER EFTER 2 FRYSECYKLER. LUC-PRØVE

Ø38 mm prøve fra Nysted

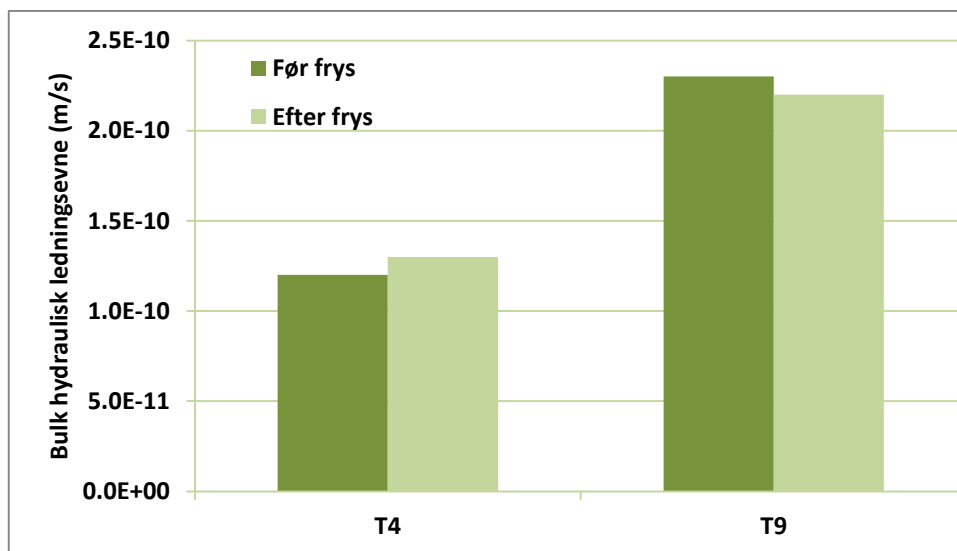
Af Fig. 7 fremgår udviklingen i bulk hydraulisk ledningsevne som funktion af antallet af fryse-cykler i prøven fra Nysted, der under hele fryseprocessen var placeret i en kerneholder. Som det ses, er den bulk hydrauliske ledningsevne stort set konstant gennem samtlige seks fryse-cykler.



FIGUR 7: MATRIXPERMEABILITET EFTER SEKS FRYSECYKLER I SMÅ RØRPRØVER.

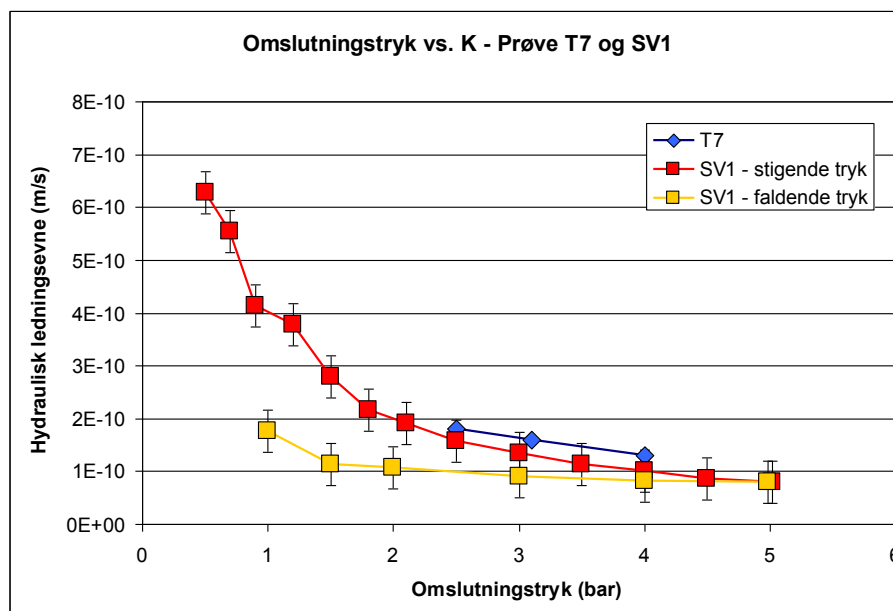
Effekt af frysehastighed og omslutningstryk på morænelerens bulk hydrauliske ledningsevne

Morænelers-prøve T4 og T9 blev frosset henholdsvis hurtigt og langsomt i kerneholder. Der blev målt bulk hydraulisk ledningsevne både før og efter frysning på begge prøver. Som det fremgår af Fig. 8 er der stort set ikke forskel på den målte bulk hydrauliske ledningsevne før og efter frysning i nogen af tilfældene.



FIGUR 8: BULK HYDRAULISK LEDNINGSEVNE I MORÆNELERSPRØVE T4 OG T9 FØR OG EFTER FRYSNING VED HENHOLDSVIS LANGSOM (T4) OG HURTIG (T9) FRYSNING.

Ved måling af den bulk hydrauliske ledningsevne skal prøverne påtrykkes et vist omslutningstryk for at undgå randeffekter med flow langs kanten af prøven. Herved kompakteres prøven. For at teste omslutningstrykkets effekt på den bulk hydrauliske ledningsevne, blev der målt permeabilitet på to prøver – én med naturlige sprækker (T7) og én med kunstigt dannede sprækker (SV1). For prøven med kunstigt dannede sprækker (SV1) blev effekten af et varierende omslutningstryk undersøgt både for situationen med et stigende tryk og for situationen med et efterfølgende faldende tryk. På Fig. 9 ses resultater, der bekræfter, at den bulk hydrauliske ledningsevne falder med stigende omslutningstryk, og kurven fremstillet ved faldende tryk tyder på, at denne effekt ikke er fuldt ud reversibel. Den faldende bulk hydrauliske ledningsevne med stigende tryk er sandsynligvis et udtryk for, at sprækker i moræneleren klapper sammen, og metoden vurderes således ikke at være den mest optimale metode til bestemmelse af nydannede sprækkers indflydelse på den bulk hydrauliske ledningsevne i moræneler.



FIGUR 9: PERMEABILITET AF MORÆNELER SOM FUNKTION AF GRADVIST STIGENDE (SV1 OG T7) OG FALDENDE OMSLUTNINGSTRYK (SV1).

Diskussion vedrørende bulk hydraulisk ledningsevne

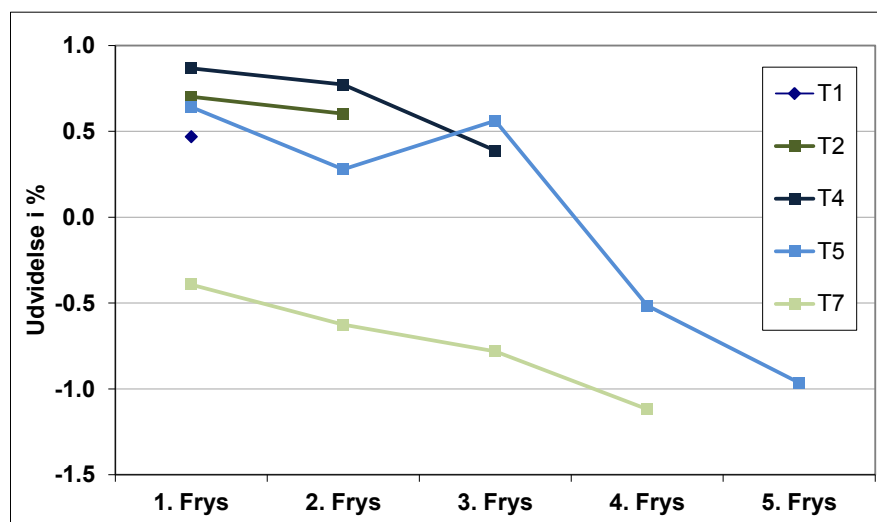
I alle forsøgene, både med cyklisk frysning og hurtig/langsom frysning, ses ingen stigning i den bulk hydrauliske ledningsevne efter frysning eller dannelse af fryse-/tø-sprækker, nærmest tværtimod. Dette strider imod den dokumenterede stigning i bulk hydraulisk ledningsevne efter frysning, som blev beskrevet af Othman & Benson (1993) sammen med dannelsen af flere sprækker i de frosne prøver. Endvidere strider den manglende stigning i bulk hydraulisk ledningsevne som resultatet af frysning imod observationer fra feltundersøgelser beskrevet af Viklander og Eigenbrod (2000), og egne observationer af vandførende sprækkezoner i moræner (Klint et al. 2001).

Forklaringen kan enten være, at sprækkerne i et lukket system er forskellige fra naturlige sprækker i et åbent system, eller at dannelse af sprækker ikke øger den bulk hydrauliske ledningsevne, idet sprækkerne klapper sammen, når dannede is-linjerne smelter. Målinger af den bulk hydrauliske ledningsevne på lerprøver er generelt behæftet med stor usikkerhed, idet ler kan komprimeres under målingen med dertil hørende fald i den bulk hydrauliske ledningsevne.

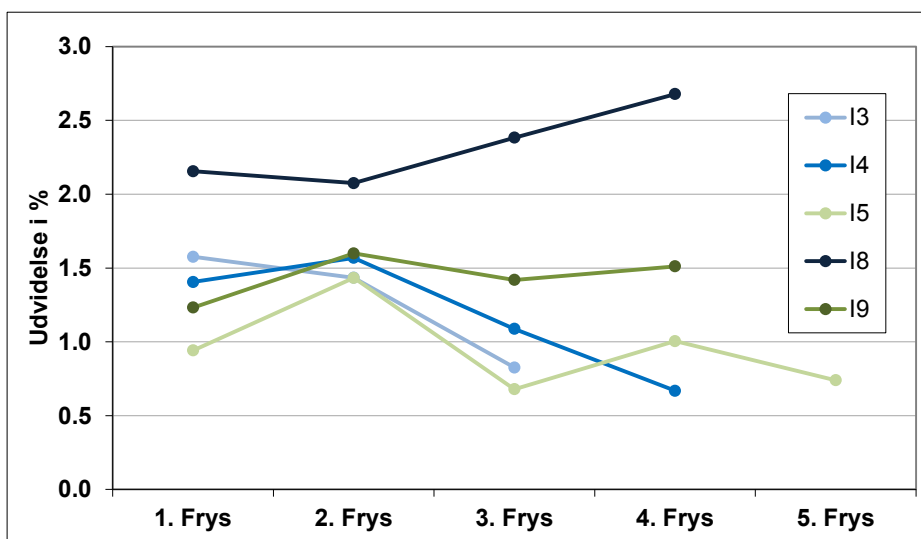
Samtidig fryses prøverne udefra og ind. Denne proces kan skabe kompaktion af de centrale dele af prøven under frysningen. Under naturlige forhold i naturen må det forventes at frysningen er retningsbestemt (ovenfra og ned) samt at prøverne forstyrres mindre i processen. Derfor kan de hydrauliske egenskaber af sprækker dannet under naturlige forhold godt være forskellige fra sprækkerne dannet i dette forsøg.

Måling af udvidelse af prøverne ved gentagne frysninger

Udvidelsen af både moræner og issøler under frysning blev målt ved Arkimedes forsøg og resultatet er generelt overaskende (Fig. 10 og 11), idet de vandmættede prøver kun udvidede sig 0,5 - 1,5 % imod en teoretisk forventet udvidelse på ca. 2,7 % i en situation, hvor en prøve med 30 % porøsitet er 100 % vandmættet. Det må nok konkluderes, at prøven enten ikke har været 100 % vandmættet eller at ikke al tilgængeligt vand er frosset i prøven (se Tabel 1). En forklaring kunne også være, at fryseprocessen kompakterer prøven, som derved gradvist ændrer volumen og dermed også porøsitet og hydrauliske egenskaber. Samme proces er beskrevet af (Othman og Benson 1993), hvor ukonsoliderede lerprøver blev kompakteret op til 10 % efter gentagne fryseforsøg.



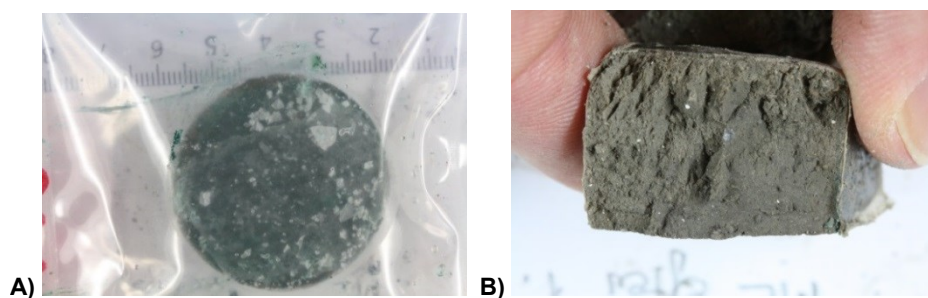
FIGUR 10: VOLUMEN-ÆNDRING I % VED FRYSNING AF MORÆNELER I OP TIL FEM FRYSECYKLER (X-AKSE).



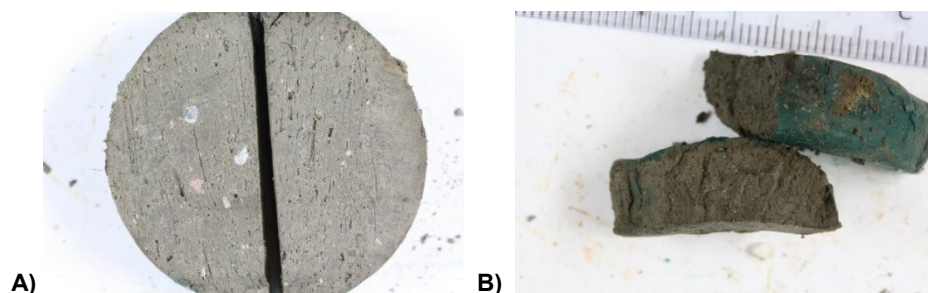
FIGUR 11: VOLUMEN-ÆNDRING I % VED FRYSNING AF ISSØ-LER.

Måling af sprækkedannelse ved gentagne frysnings og med forskellig frysehastighed

De små rørprøver med moræneler blev frosset både hurtigt og langsomt for at se effekten af frysehastighed. Ved langsom frysnings blev prøverne emballeret og frosset over 14 dage, hvor temperaturen blev gradvist sænket 1 grad om dagen i en uge og derefter 2 grader om dagen ned til -15 °C. Ved hurtig nedfrysning blev prøverne placeret i fryseren ved -15 °C i tre dage. Prøverne blev efter udtagning fra fryser først skåret over og dernæst forsøgt brækket over for at blotte interne is-linser og sprækker. Der viste sig at være stor forskel på de to prøver (Fig. 12 og 13).



FIGUR 12: A) LILLE VANDMÆTTET PRØVE EFTER LANGSOM NEDFRYSNING. BEMÆRK IS-LINSE PÅ OVERFLADEN AF PRØVEN. B) BRÆKKET PRØVE MED SMÅ IRREGULÆRE SPRÆKKEPLANER VED KANTEN OG ET GENERELT BROKKET UDSEENDE MED SMÅ SPRÆKKEPLANER.



FIGUR 13: A) LILLE VANDMÆTTET PRØVE EFTER HURTIG NEDFRYSNING. BEMÆRK DEN MASSIVE FREMTONING. B) BRÆKKET PRØVE MED PORE-IS I STEDET FOR IS-LINSER.

Overordnet konkluderes det, at frysehastigheden spiller en vigtig rolle for dannelse af is-linser (og dermed sprækker). Metoden med at sænke temperaturen 1 grad om dagen synes at producere gode sprækker. Yderligere forsøg med andre temperaturer eller fryseintervaller er ikke udført, men det kan ikke udelukkes, at endnu bedre resultater kan opnås ved udførelse af flere forsøg.

Resultat af sprækkedannelse efter flere frysecykler og med forskellige lertyper

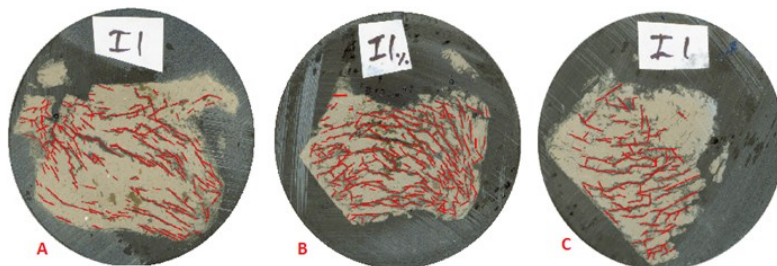
For at kunne beskrive sprækkedannelsen numerisk blev en kendt metode til at opmåle såkaldt sprækkespors-densitet bragt i anvendelse (Klint 2001). En serie rør-prøver (TI1-TI5), udtaget af samme morænekolds, blev frosset og efter hver frysecyklus blev én prøve "ofret" og imprægneret og slebet så sprækkerne kunne fotograferes og opmåles på fotos taget af tværsnit fra top og bund samt på langs af prøven. Dernæst kunne den samlede sprækkespors-længde opmåles og divideres med overfladearealet af prøven. Værdien Dt (Fig. 14) kunne så beregnes. Da målingerne er lavet på forskellige prøver, men fra samme udgangsprøve, er de sammenlignelige, men der er naturligvis en vis variation på grund af den naturlige heterogenitet i moræneler.



Prøve nr.	Areal cm ²	længde cm	Dt cm/cm ²	Antal	Antal pr. areal
TI1 top	7,4	19,4	2,6	83	11
TI1 bund	6,0	16,9	2,8	88	15
TI1	5,4	22,8	4,2	75	14
sum	18,8	59,1		246	
middel			3,2		13
TI2 top	8,0	33,8	4,2	149	19
TI2 bund	7,8	31,4	4,0	181	23
TI2	5,6	20,7	3,7	121	22
sum	21,4	85,8		451	
middel			4,0		21

FIGUR 14: SPRÆKKESPORS-DENSITET FOR MORÆNELER EFTER 2 FRYSECYKLER (TI1 OG TI2). DER SES EN SVAG STIGNING I SPRÆKKE-DENSITETEN VED ANDEN FRYSECYKLUS (TI2).

For issøleren ses en større sprækkespors-densitet end for moræneler – 5,43 cm/cm² for issøler (Fig. 15) sammenlignet med 3,2 cm/cm² for moræneler (Fig. 14) efter én frysecyklus. Dette indikerer, at jo større lerindhold des større sprækkespors-densitet dannes der ved frysning.



Prøve nr.	Areal cm ²	længde cm	Dt cm/cm ²	Antal	Antal pr. areal
I1A	6,51	38,52	5,92	198	30
I1C	4,91	24,29	4,95	212	43
SUM	11,42	62,81		410	
Middel			5,43		36
I1B	4,81	40,99	8,52	106	22

FIGUR 15: SPRÆKKE-DENSITET FOR ISSØ-LER EFTER 1. FRYSNING. DER SES EN GENEREL STØRRE SPRÆKKE-DENSITET END I MORÆNELEREN.

3.3.5 Delkonklusion efter 1. forsøgsrunde

På baggrund af forsøgene i denne første del af projektet kan det konkluderes, at det er muligt kunstigt at skabe fryse-/tø-sprækker i moræneler og issøler. Resultaterne tyder dog ikke på, at der umiddelbart kan opnås en stigning i den bulk hydrauliske ledningsevne som følge af de kunstigt genererede sprækker.

Den bedste opsprækning opnås ved:

- Langsom frysning ved temperaturer over -15°C
- Gentagne frysecykler
- Prøver med højt lerindhold
- Høj vandmætning
- Retningsbestemt frysning (dog ikke dokumenteret)

Følgende øvrige pointer og observationer bør fremhæves:

- Prøvestørrelsen er vigtig i forhold til dannelse af iskrystaller uden på prøven.
- Dannelse af fryse-/tø-sprækker er en kompliceret termodynamisk proces, hvor der dels opstår udtørningsprækker og dels dannes is-linser, der vokser mest ved langsom frysning.
- Der sker en udtørring af prøven ved langsom frysning og forsøg med tilsætning af farvetracer ved målinger af den bulk hydrauliske ledningsevne (ikke vist i denne rapport) viste i nogle tilfælde præferentielt makropore-flow i stedet for rent matrix flow, hvorfor det kan være svært at sikre sig, at prøven er 100 % vandmættet, selv efter målingen af bulk hydraulisk ledningsevne i kerneholder.
- Sprækker dannes med tilfældig orientering i et lukket system, når der fryses fra alle sider på en gang. Vandet vil i dette tilfælde trækkes ud mod kanten af prøven og udkrystalliseres på overfladen af prøven, mens udtørningsprækker dannes centralt i prøven.

3.4 Forsøg 2 (Sous Vide): Dannelse af fryse-/tø-sprækker og is-linser igennem frysning af intakte prøver med moræner og forurenede sandet moræner i et simuleret "åbent system".

3.4.1 Formål/rationale

Formålet med dette eksperiment er, at teste observationerne fra forsøg 1 og dels undersøge, om man kan danne veludviklede fryse-/tø-sprækker ved at simulere et naturligt "åbent system", der genskaber naturens egne sprække-processer, og dels at måle specifikke parametres betydning for denne proces. Følgende problemstillinger blev formuleret:

- Kan man danne veludviklede fryse-/tø-sprækker i moræner under kontrollerede forhold ved at simulere en naturlig retningsbestemt frysning svarende til de naturlige fryseprocesser, der foregår i naturen?
- Hvor hurtigt dannes fryse-/tø-sprækker i forurenede moræner/morænesand?
- Ved hvilke specifikke temperaturer dannes sprækkerne i forurenede moræner/morænesand?
- Hvor meget påvirker ler-indholdet migrationen af frysefronten og dannelse af fryse-/tø-sprækker i forurenede moræner/morænesand?

3.4.2 Kravspecifikationer

Følgende krav til forsøget er opstillet for opfyldning af målsætningen i forsøg 2:

Krav: Etablering af en retningsbestemt frysning ved at skabe en temperaturgradient der afspejler en frostperiode med frysning ovenfor og varmere temperaturer (plusgrader) længere nede i jorden.

Løsning: Etablering af varmekilde med termostatsstyring til opvarmning af prøvens nederste del mens den øverste del er blottet imod kuldekilden og i øvrigt isoleret i siderne af prøven under fryseforsøget.

Krav: Tilstedeværelse af permanent vandmættede forhold i den optøede nederste del.

Løsning: Mulighed for tilførsel af ekstra vand under selve fryse-eksperimentet.

Krav: Mulighed for monitorering af frysefront for at kunne vurdere frysehastighed igennem matrix ved kendte temperaturgradienter samt tykkelse af frysefronten ved bestemte temperaturgradienter.

Løsning: Placering af termistorer i morænersprøven og monitorering af temperatur igennem hele forsøget.

Krav: Mulighed for at måle frysefront-tykkelse og is-linse-udvikling ved forskellige temperaturgradienter.

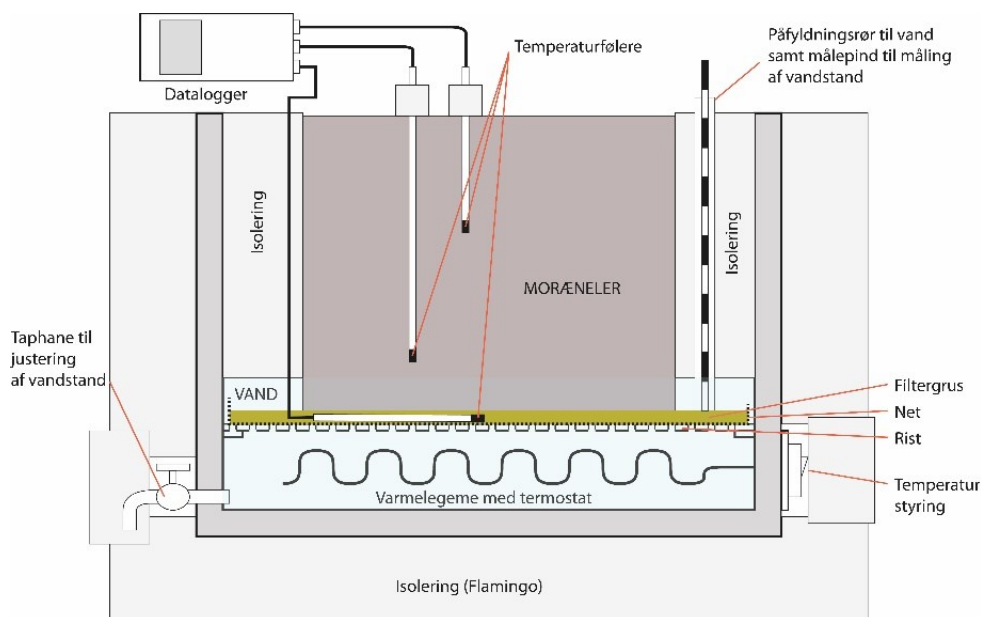
Løsning: At åbne mulighed for at udtage prøven til visuel inspektion under fryseforsøget ved at montere "løfteseler" på prøven.

3.4.3 Metoder

Simulering af frysning af jord under naturlige forhold i et åbent system svarende til den årlige vintersituation, hvor jorden fryser ovenfra og ned blev udført ved hjælp af en såkaldt "Sous Vide gryde" som basalt set er et vandbad med en termostat og et varmelegeme, hvor vandtemperaturen kan fastholdes med en nøjagtighed på 0,1°C.

Sous Vide gryden blev forsynet med et metalnet og ca. 3 cm filtergrus i bunden. En intakt prøve af moræneler (ca. 15 x 25 x 30 cm) blev tilpasset gryden og anbragt på filtergruset. Termofølere blev installeret i prøven og i gruset under prøven. Prøven blev isoleret med flamingo (polystyren), så kun overfladen var blottet, og et rør til vandpåfyldning samt en måler til at måle vandspejlsniveau blev installeret. (Se Fig. 16).

En datalogger blev forbundet til termofølerne, og der blev påfyldt vand til vandet stod ca. 2 cm over bunden af ler prøven. Dernæst blev hele opstillingen isoleret med flamingo stadig med toppen af prøven eksponeret, og prøven blev anbragt i et køleskab ved 8°C i 2 dage således, at temperaturen og vandmætningen var i balance.



FIGUR 16: SKEMATISK FORSØGSOPSTILLING MED "SOUS VIDE PRØVERNE" DER ER OPKALDT EFTER GRYDEN ("SOUS VIDE MASTER")

Til sidst blev hele opstillingen anbragt i et fryserum med en konstant temperatur på -15°C og termostaten i bunden af Sous Vide gryden blev sat til $+5^{\circ}\text{C}$, så der opstod en temperatordifference på 20°C mellem top og bund af prøven. Vandstanden i gryden blev holdt konstant ved jævnlig påfyldning af nyt vand, og den påfyldte vandmængde blev registreret, ligesom den vertikale ekspansion af morænelers-prøven blev målt.

Temperaturgradienten blev observeret, og efter 4 dage blev prøven hurtigt udtaget, sprækkerne opmålt og fotograferet inden den blev anbragt i gryden igen, og en ny temperatur gradient blev etableret med $+4^{\circ}\text{C}$ i bunden i stedet for $+5^{\circ}\text{C}$. Efter yderligere 4 dages frysning blev prøven taget ud af fryserummet igen og grundigt opmålt og fotograferet for at registrere tykkelse af den frosne del, antallet og formen af is-linser og fryse-/tø-sprækker samt udtage kerner til måling af vandindhold i både den frosne og ufrosne del (Fig. 17).

Eksperimentet blev gentaget med 2 forskellige prøver; dels en prøve med fed moræneler fra Teknologisk Institut lokaliteten og dels med en mere sandet forurenset morænelers-prøve fra Vadsby lokaliteten, med det formål, at observere om henholdsvis ler-indholdet og forureningen kunne påvirke sprækkedannelsen.



FIGUR 17: BILLEDE AF FORSØGSOPSTILLING MED SOUS VIDE GRYDE OG MONTERET MORÆNELERSPRØVE INDEN FRYSEFORSG (TIL VENSTRE) OG EFTER UDTAGNING AF DELVIS FROSSET SOUS VIDE PRØVE (TIL HØJRE).

3.4.4 Resultater

I forhold til de opstillede problemstillinger kan følgende konkluderes ud fra forsøgsrækken:

Kan man danne veludviklede fryse-/tø-sprækker i morænelers-prøver under kontrollerede forhold ved at simulere en naturlig retningsbestemt frysning svarende til de naturlige fryseprocesser, der foregår i naturen?

Svar: Som illustreret i Fig. 19 dannes der særdeles veludviklede fryse-/tø-sprækker fyldt med is-linser jævnt fordelt i den frosne del af morænelers-prøven. Sprækkerne dannes primært parallelt med frysefronten og med en indbyrdes afstand på 2-5 mm. De synes relativt upåvirket af inhomogeniteter såsom kalkklaster, der også sprækker op på samme måde som moræneleren. Ved sammenligning med observationer af naturlige fryse-/tø-sprækker i moræneler som illustreret i Fig. 18, kan det konkluderes, at det er muligt at simulere dannelsesmekanismen for fryse-/tø-sprækker under kontrollerede forhold i et laboratorium. De afgørende parametre er, at frysningen gøres retningsbestemt, og at der er vand tilstede i en vis afstand fra frysefronten.

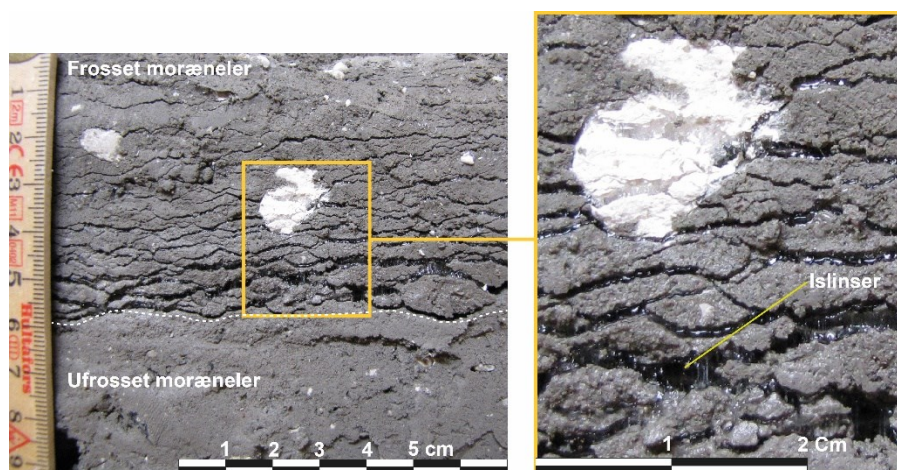
Fryse/tø sprækker Gedserodde



Fryse/tø sprækker Englandsvej



FIGUR 18: BILLEDE AF NATURLIGE FRYSE/TØ-SPRÆKKER FRA MORÆNELERS-PROFILER VED KYSTPROFIL PÅ GEDSER OG UDGRAVNING FRA AMAGER.

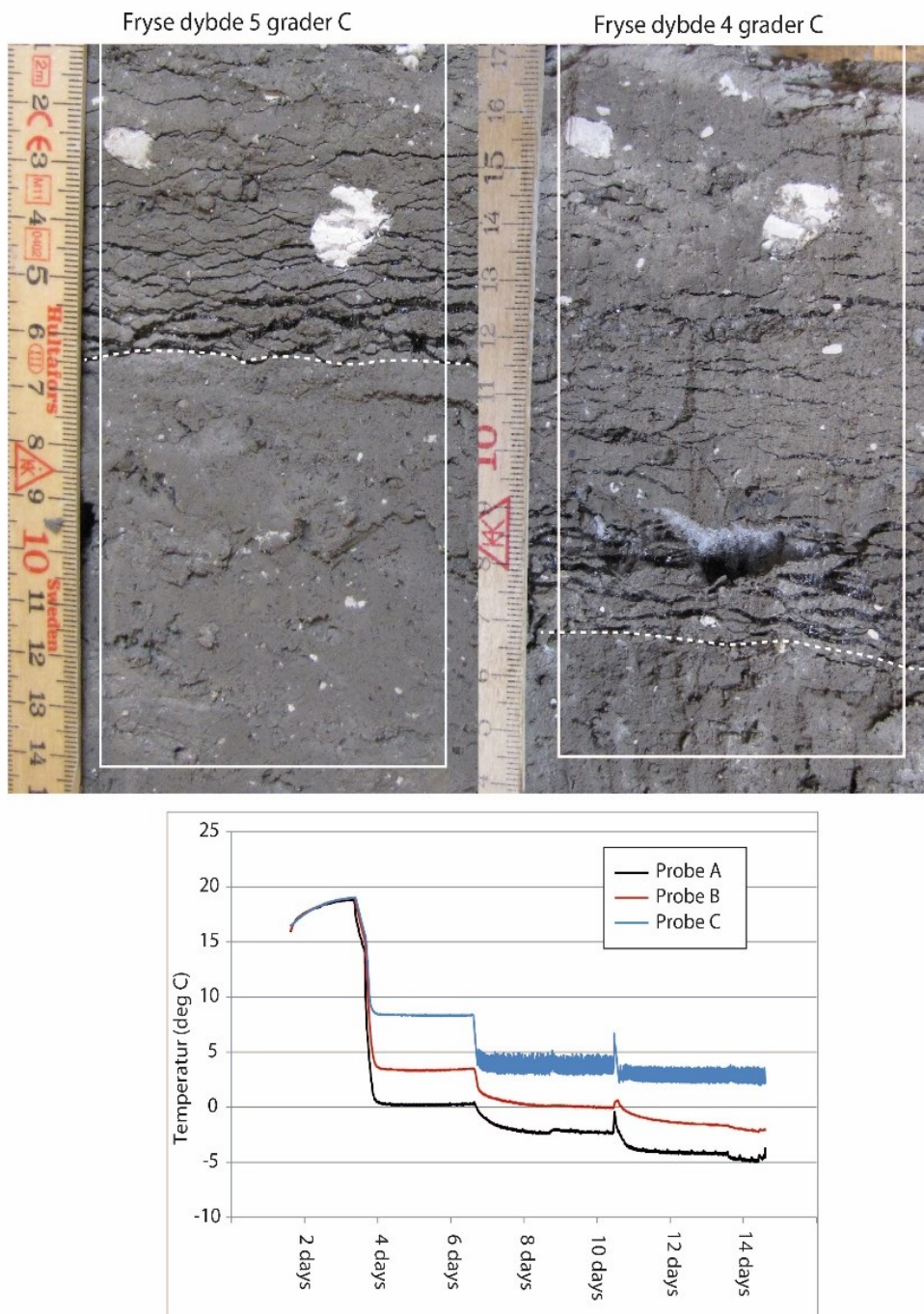


FIGUR 19: BILLEDE AF VELUDVIKLEDE KUNSTIGE FRYSE-/TØ-SPRÆKKER FRA FORURENET Sandet MOPRÆNELERS-PRØVE FRA VADSBY. BEMÆRK AT SPRÆKKERNE ER FYLDT MED IS-LINSE OG FORTSÆTTER UPÅVIRKET GENNEM EN KALKKLASTER OG ER DERMED RELATIVT UAFHÆNGIG AF SEDIMENT-TYPE.

Hvor hurtigt dannes fryse-/tø-sprækker i moræneler?

Svar: På baggrund af vandforbruget og de målte temperaturkurver kan det konstateres, at dannelsen af is-linser og fryse-/tø-sprækker starter i samme øjeblik temperaturen når under -1°C . Frysefronten bevæger sig ned i prøven, til der opnås temperaturligevægt. Ved en temperaturgradient på $+5^{\circ}\text{C}$ til -15°C over 20 cm vil temperaturligevægt opnås i løbet af ca. 2 døgn (Fig. 20). Is-linserne i den frosne del fortsætter derefter med at vokse så længe temperaturgradienten fastholdes og vand tilsættes, men mest de første 150 timer og derefter gradvist mindre. Ved en yderligere sænkning af temperaturen i bunden af gryden til $+4^{\circ}\text{C}$ voksede frysefronten yderligere 5 cm længere ned i prøven på 2-3 dage (Fig. 20).

Det mest opsigtsvækkende resultat er imidlertid, at is-linserne tilsyneladende dannes ved at trække vand ud af det omkringliggende moræneler, og at vandet i bunden af forsøgsopstillingen begynder at trækkes op gennem den ufrosne del af prøven til frysefronten umiddelbart efter at frysningen er påbegyndt. For at danne is-linser skal vandet således først passere igennem mere end 10-15 cm ufrossen massiv moræneler på mindre end 1 døgn. Det svarer til en hastighed på ca. $1,1 \times 10^{-6}$ m/sek., hvilket er mellem 1000 og 100.000 gange hurtigere end morænelers naturlige bulk hydrauliske ledningsevne ved vertikalt flow. Denne accelererede transport-proces kan kun skyldes, at morænelerets kapillære sugeevne aktiveres ved udtørring omkring is-linserne og en deraf følgende opfugtning sker ved at trække væske til fra omgivelserne. Denne iagttagelse danner således grundlag for at udnytte den kapillære sugeevne til at transportere stoffer i væsker hurtigt gennem ler



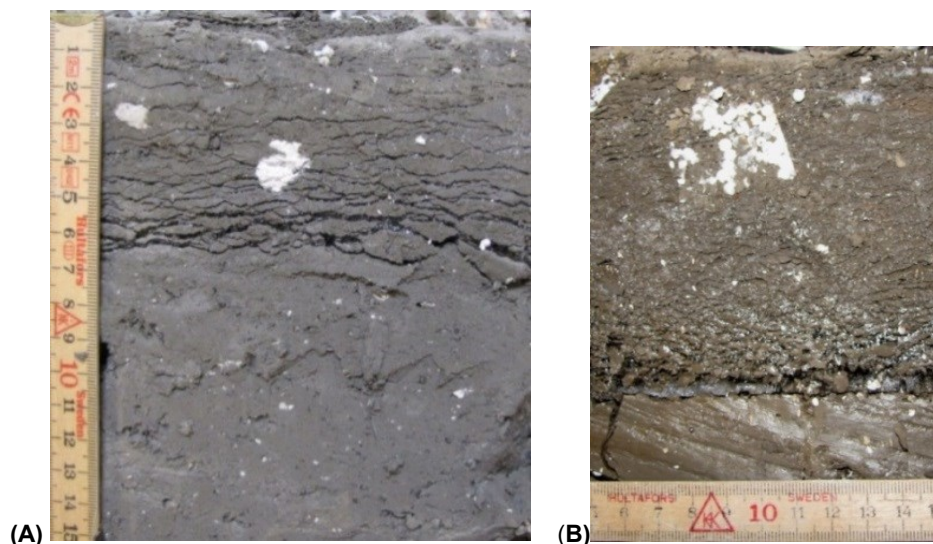
FIGUR 20: TYKKELSE AF DEN FROSNE ZONE MED FRYSESPRÆKKER I VADSBY PRØVEN VED FORSKELLIGE TEMPERATURGRADIENTER MED 1 GRADS FORSKEL, DVS. MED -15°C PÅ OVERFLADEN OG HENHOLDSVIS $+5^{\circ}\text{C}$ (TIL VENSTRE) OG $+4^{\circ}\text{C}$ (TIL HØJRE). BEMÆRK, AT IS-LINSENE I PRØVENS ØVRE DEL ER SKRUMPET (TIL VENSTRE) EFTER AT FRYSEFRONTEN ER MIGRERET LÆNGERE NED. KURVEN UNDER BILLEDET VISER TEMPERATURUDVIKLINGEN I PRØVEN UNDER FRYSNINGEN. PROBE C ER ANBRAGT I DET VANDMÆTTEDE SAND UNDER PRØVEN, OG PROBE B ER ANBRAGT 10 CM UNDER TOPPEN, MENS PROBE A ER ANBRAGT 5 CM UNDER TOPPEN AF PRØVEN.

Ved hvilke specifikke temperaturer dannes sprækkerne i forurenede moræner/morænesand?

Svar: Forbruget af vand startede umiddelbart efter prøven blev anbragt i fryserummet. Det betyder, at sprækker og is-linser begynder at dannes ved temperaturer lavere end -1°C . De fortsætter med at vokse ved temperaturer under mindst -10°C . Is-linser tæt på prøvens overflade ($<10\text{ cm}$) begynder imidlertid at skrumpe (fordampe/sublimere) ret hurtigt, men det er usikkert, om dette også sker under naturlige forhold flere meter under overfladen.

Hvor meget påvirker ler-indholdet migrationen af frysefronten og dannelse af fryse/tø-sprækker i forurenede moræner/sandet moræner?

Svar: I Fig. 21 er to prøver fra henholdsvis Teknologisk Institut (moræner) og Vadsby (sandet moræner) frosset under samme temperaturgradient, og det ses, at frysefronten i den mere lerholdige moræner er vokset længere ned end i den sandede moræner. Dette indikerer, at enten har forskellig porøsitet/vandindhold/porestruktur eller forskelle i varmeledningsevnen en indflydelse på migration af frysefronten. Det kan dog konkluderes, at fryseradius stiger med øget ler-indhold. Det kan imidlertid heller ikke udelukkes, at forureningen i den sandede moræners-prøve kan have påvirket vandets fryseegenskaber og dermed frysedybden.



FIGUR 21: FIGUREN VISER EFFEKTEN AF FORSKEL I LERINDHOLD OG MULIGVIS FORURENING. PRØVE (A) ER FORURENET SANDET MORÆNELER FRA VADSBY, PRØVE (B) ER FED MORÆNELER FRA TEKNOLOGISK INSTITUT. BEGGE PRØVER ER FROSSET VED -15°C MED EN BUNDTEMPERATUR PÅ $+5^{\circ}\text{C}$. TOPPEN AF PRØVERNE SVARER TIL TOPPEN AF BILLEDET OG SKALAEN ER DEN SAMME, SÅ DE TO PRØVER KAN SAMMENLIGNES DIREKTE. BEMÆRK FORSKEL I TYKKELSE AF DEN FROSNE DEL. DET TYDER PÅ, AT FED VANDMÆTTET LER ENTEN HAR EN SAMLET BEDRE VARMELEDNINGSEVNE END SANDET MORÆNELER OG DERFOR OGSÅ MÅ FORMODES AT HAVE EN STØRRE SUGERADIUS, ELLER AT KORNSTØRRELSEN HAR EN BETYDNING FOR FLOWPROCESSEN.

3.5 Forsøg 3 (Sous Vide): Eksperiment med aktivt stimuleret transport af tracer/donorstoffer (Deuterium/¹⁸O/Br⁻/sukkervand) ved at fryse intakte prøver med moræneler.

3.5.1 Formål/rationale

Hele grundlaget for at anvende frysemetoden som en oprensingsmetode er, at transport af væsker i moræneler/ler nødvendigvis foregår i en vandig fase og ikke i en gasfase, der derved ville destillere eventuelle tilsatte stoffer fra. Følgende spørgsmål ønskes derfor belyst ved dette eksperiment:

- Foregår transporten af væske i en vandfase eller gasfase?
- Hvor stor vandmængde transporteres imod frysefronten i et veldefineret volumen pr. tidsenhed i forurenede moræneler/morænesand?
- Kan reaktive stoffer/tracere tilsættes og transporteres i matrix hen imod frysefronten?

3.5.2 Kravspecifikationer

Følgende krav til forsøget er opstillet for opfyldelse af målsætningen i forsøg 3:

Krav: Mulighed for at observere om vandet periodevis har været på gasfase.

Løsning 1: At tilføje en konservativ tracer, der følger med vandet på opløst form, men forsvinder (destilleres fra), hvis vandet transporteres som gas (damp). Her blev brugt bromid (Br⁻).

Løsning 2: At tilføje en tracer, som vil ændre koncentration i forbindelse med gas/vand/is faseovergange. Her blev brugt vand beriget med Deuterium (D) og ¹⁸O ved inddampning.

Krav: Mulighed for lokalt at prøvetage jord/væske i den ufrosne del og jord/is i den frosne del.

Løsning: Der blev udviklet en teknik til udtagning af små intakte stykker af den ufrosne matrix. Teknikken bestod i, at skære stænger ud af det frosne ler, vinkelret på frysefronten og opdele stængerne i mindre bidder. Vandfasen fra bidderne blev ekstraheret ved centrifugering og vandet analyseret ved hjælp af ionkromatografi (Br⁻), Cavity Ring-Down Spectroscopy (D og ¹⁸O) samt en måling af totalt organisk kulstof (TOC) som en proxy for koncentrationen af sukker.

Krav: Mulighed for at se om en donor, der kan anvendes til stimuleret mikrobiologisk oprensning, kan transporteres gennem leret.

Løsning: Der blev opløst sukrose (alm. hvidt sukker) i vandet.

3.5.3 Metoder

Det eksperimentelle set-up var identisk med forsøgsopstillingen i forsøg 3 (Fig. 16). For at kunne undersøge transport-processerne og kapaciteten for at sprede stof opløst i vand ud i ler-matrix, blev der udført to forsøg, hvor morænelers-prøver blev frosset imens forskellige stoffer blev tilsat vandet i Sous Vide gryden.

I det ene forsøg blev der anvendt vand beriget med D og ¹⁸O ved indkogning. Vandet var indkogt 5 gange til ca. 1/10 i volumen og havde derved opnået værdier på $\delta D = 11\text{‰}$ og $\delta^{18}O = 2.5\text{‰}$. Til sammenligning målttes der i almindeligt postevand værdier på $\delta D = -62\text{‰}$ og $\delta^{18}O = -9\text{‰}$. I det andet forsøg blev almindeligt postevand tilsat bromid (Br⁻) som NaBr og i en koncentration svarende til 1.500 mg/L Br⁻. Til samme vand blev også tilsat en model-donor, sukrose (hvidt sukker) i en koncentration svarende til 2.300 mg/L DOC. I begge tilfælde blev den anvendte moræneler først vandmættet i almindeligt postevand, mens det to forskellige opløsninger blev brugt i Sous Vide gryden.

I forsøget med stabile isotoper blev opstillingen med Sous Vide gryden stillet i fryser med en fastholdt temperatur på +5°C i bunden af Sous Vide gryden. Herved blev opnået en temperaturgradient på +5°C til -15°C over prøvens højde på ca. 20 cm i sammenlagt 250 timer, efter at prøven havde stået i vandbadet i 160 timer ved 8°C.

I forsøget med bromid og sukker blev opstillingen med Sous Vide gryden stillet i fryser med varierende temperatur i bunden af Sous Vide gryden – og dermed varierende temperaturgradient over den 22 cm høje prøve af moræneler, idet temperaturen i fryseren var konstant -15°C under hele forsøget. Bundtemperaturen i Sous Vide gryden var således +6°C de første 170 timer af forsøget. Herefter blev temperaturen sænket gradvist til +5°C (170 timer til 216 timer), +4°C (216 timer til 380 timer), og sidst +3°C (380 timer til 545 timer).

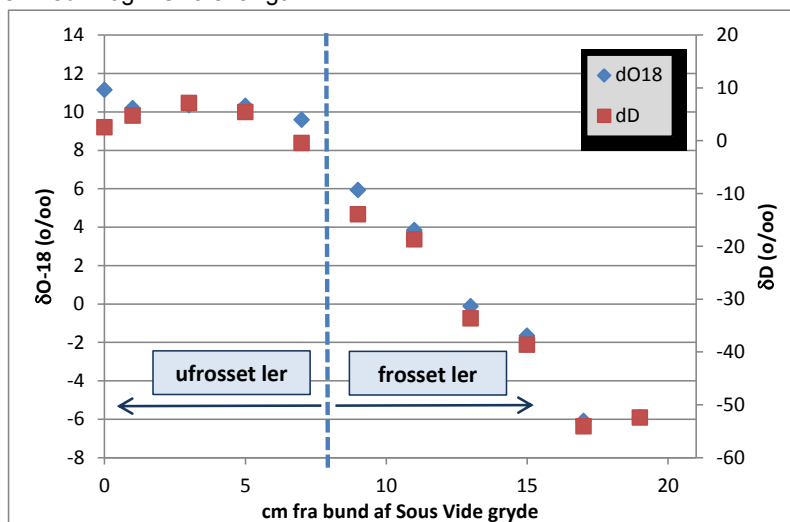
Under begge fryseeksperimenter blev prøverne nøje overvåget, og ekstra vand blev tilsat jævnligt, ligesom den tilsatte vandmængde omhyggeligt blev registreret.

Efterfølgende blev prøverne udtaget af fryserummet, og sprækkerne blev omhyggeligt blotlagt, opmålt og fotograferet for at dokumentere sprækkedannelsen. Dernæst blev der udtaget en serie intakte prøver af både den frosne og ikke frosne del, og vandet i prøverne blev analyseret for indhold af tracere og sukrose.

3.5.4 Resultater

Foregår transporten af væske i en vandfase eller gasfase?

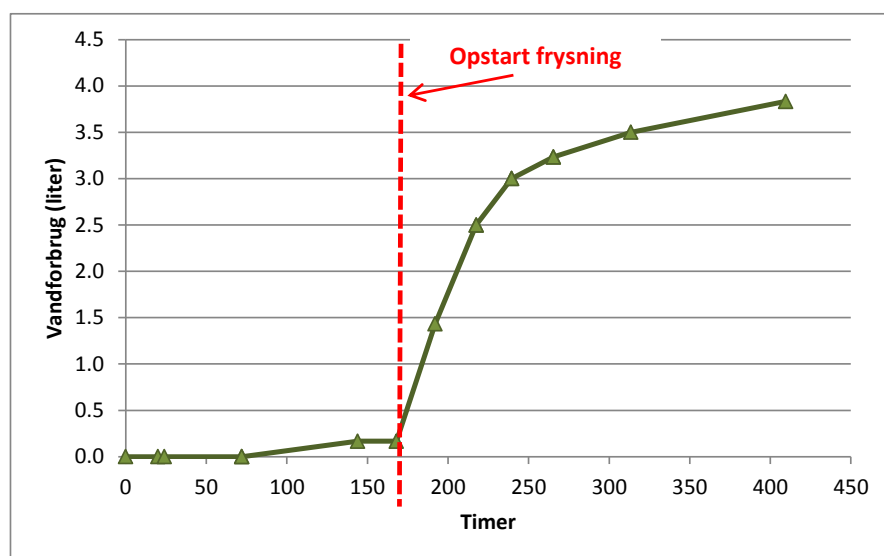
Svar: Som det kan aflæses på grafen i Fig. 22 har Deuterium og ^{18}O stort set konstant koncentration op igennem den ufrosne del af prøven, hvilket indikerer, at der er sket en transport ved strømning gennem matrix i en vandig fase. Det betyder, at processen potentielt kan udnyttes til hurtigt at fordele stof i en massiv ler-matrix. Fordelingen i den frosne del aftager imod toppen og er øverst i prøven for begge stoffer tæt på koncentrationen målt i det postevand, der blev anvendt til forsøgene. Dette skal formentlig ses som et resultat af en kombination af en dispersiv front, og at frysefronten er migreret nedad, samt at det område, der er frosset først har modtaget vand/tracer i kortest tid. Der sker ingen adskillelse af kurverne for de to tracere, hvilket indikerer, at der ikke sker faseovergange, idet disse normalt påvirker vandmolekyler med D og ^{18}O forskelligt.



FIGUR 22: FORDELING AF DEUTERIUM OG ^{18}O I PRØVEN EFTER AFSLUTNING AF EKSPERIMENTET. SOM DET FREMGÅR, ER DER EN JÆVN FORDELING OP IMOD FRYSEFRONTEN, HVOREFTER KONCENTRATIONEN FALDER GRADVIST OP IMOD TOPPEN AF PRØVEN.

Hvor stor vandmængde transporteres imod frysefronten i et veldefineret volumen pr. tidsenhed i forurenede moræner?

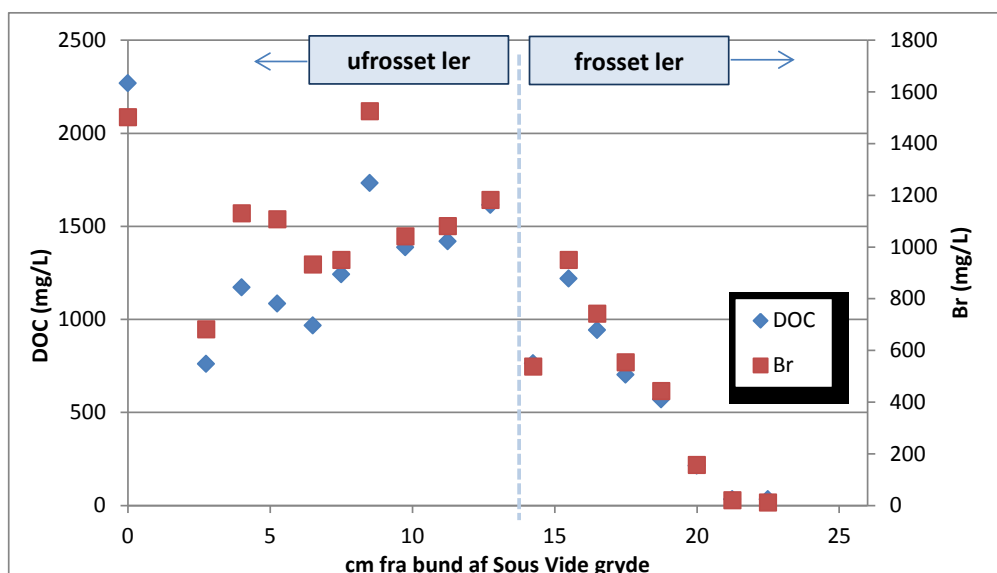
Svar: I alt 3,8 liter vand blev konsumeret af prøven under fryseforsøget med den sandede moræner, der blev anvendt til forsøget med stabile isotoper. Med et prøvevolumen på ca. 10,5 dm³, svarer det til ca. 35 volumen % af hele prøven. Prøven ekspanderede imidlertid kun 7-10 %, hvorfor det overskydende vand tolkes at være fordampet. Dette dokumenteres delvist af det faktum, at en stor del af is-linserne dannet i første fryse-cyklus på en tilsvarende ler-prøve var skrumpet/forsvundet efter anden fryse-cyklus i eksperiment 2 (Fig. 20). Vandforbruget under forsøget er hurtigst i starten og derefter langsommere, se Fig. 23. I forsøget med sukkervand, hvor der blev frosset med stadigt stigende gradient, konsumerede prøven af moræner en smule mindre vand (2,5 liter) ved anvendelse af en lidt mere fed ler fra den forurenede Vadsby lokalitet (data ikke vist).



FIGUR 23: VANDFORBRUG UNDER FRYSEFORSØGET MED STABILE ISOTOPER. PRØVEN BLEV FØRST VANDMÆTTET I CA 160 TIMER. DERNÆST BLEV OPSTILLINGEN ANBRAGT I FRYSERUMMET VED -15°C.

Kan reaktive stoffer/tracere tilsættes og transporteres i matrix hen imod frysefronten?

Svar: Tilsvarende forsøget med isotoper (Fig. 22) var der også i forsøget med sukrose og bromid en jævn fordeling af stofferne i matrix under frysefronten (Fig. 24). Dette indikerer, at det er muligt at fordele stoffer af forskellig art jævnt i en tæt ler-matrix i løbet af få døgn. Metoden og processen kan tilsyneladende potentielt reguleres i forhold til den mængde stof, man ønsker at fordele i matrix ved at regulere på temperaturen og ændre på temperatur-gradienten. Der er således i forsøget med sukrose og bromid, hvor der blev frosset "langsomt" med en stadigt stigende temperaturgradient, opnået transport længere ind i lermatrix af de ønskede stoffer end i forsøget med stabile isotoper (sammenlign Fig. 24 med Fig. 22). Der kan dog også være andre faktorer der har haft betydning for dette såsom lertype, total varighed af forsøg, etc. At både sukrose og bromid transporteres viser også, at transporten af vand sker som væske og ikke som damp.



FIGUR 24: VISER FORDELINGEN AF SUKROSE OG BROMID I SOUS VIDE PRØVEN EF-TER EKSPERIMENTET. SOM DET FREMGÅR ER DER OGSÅ HER EN JÆVN FORDELING HEN IMOD FRYSEFRONTEN, HVOREFTER KONCENTRATIONEN FALDER GRADVIST OP IMOD TOPPEN AF PRØVEN.

3.5.5 Delkonklusion for 2. og 3. forsøgsrunde

På baggrund af forsøg 2 og 3 med simulering af dannelse af fryse-/tø-sprækker i et åbent system ved hjælp af "Sous Vide" metoden kan følgende delkonklusioner opsummeres:

- Kontakt til vand er helt afgørende for udvikling af is-linser i moræneler.
- Is-linser dannes overordnet parallelt med frysefronten.
- Stabil ligevægt til frysefront og lang frysetid >1 uge skaber store is-linser og stor vandtransport.
- En temperatur gradient på ca. 20°C over en afstand på 20-25 cm skaber en ca. 10 cm bred opsprækket zone med en sprække afstand på 2-4 mm.
- Ændring af temperatur-differensen med 1 grad skabte en ca. 5 cm bredere frysefront.
- Frysefronten udbredes også længere ved højere lerindhold end ved lavt lerindhold.
- Det er muligt at opsprække selv sandet moræneler ved tilførsel af vand under fryseprocessen.
- En enkelt frysecyklus synes at være nok til at skabe en markant opsprækning og en markant stoftransport ved Sous Vide metoden.

3.6 Forsøg 4 (LUC): Eksperiment med kombineret frysning og injektion af vand/donor/tracer i vertikale borer i store uforstyrrede intaktprøver med fastholdt og ekspanderende diameter.

3.6.1 Formål/rationale

Det primære mål med disse eksperimenter er, at transformere resultaterne og observationerne fra Sous Vide forsøgene, hvor jorden fryses fra oven og ned via et horisontalt fryseplan, til en opstilling, hvor både injektion og frysning foregår *via borer*, da det vil være den mest oplagte mulighed i et fuldskala projekt på en forurennet grund. Hurtig frysning i borer er desuden en teknologi, der anvendes i forbindelse med midlertidig stabilisering af løse bjergarter og sedimenter ved f.eks. tunnelbyggerier og større anlægsopgaver. Eksisterende erfaringer fra frysning i borer kan således eventuelt udnyttes – om end der sandsynligvis skal udvikles en ny frysemetode til Cryorem teknologien, da den øjensynligt virker bedst ved langsom og kontrolleret frysning..

På den skala, der anvendes til LUC forsøgene, er der behov for at designe eksperimenterne på en måde så alle nøgleparametrene (temperatur, vandmætning, injektionsrate, etc.) kan monitoreres præcist gennem alle faserne af fryseforsøget. Derfor blev det besluttet, at de indledende forsøg med frysning i borerer skulle foretages på intakte prøver under kontrollerede forhold i et laboratorium.

De primære spørgsmål der er behov for at få svar på er:

1. Hvad er form og størrelse af fryse-/tø-sprækker/is-linser, der dannes rundt om en potentiel fryseborer ved forskellige temperaturgradienter, og hvilken betydning har sedimentets naturlige tekstur og struktur for dannelsen af is-linser og fryse-/tø-sprækker?
2. Hvor hurtigt migrerer frysefronten ved forskellige temperaturgradienter? Dette er især vigtigt for at kunne modellere de optimale temperaturer for at opnå den mest effektive fordeling af stoffer i ler-matrix, og for at beregne de mest kost-effektive konfigurationer af borerer?
3. Hvor meget ekspanderer LUC prøven? Dette er især vigtigt for at kunne vurdere/modellere potentielle skader på nær-/overliggende bygninger/installationer dannet i forbindelse med "frost heave", hvor jorden hæver sig over et ekspanderende jordvolumen?
4. Hvor meget vand kan LUC prøven absorbere? Dette er vigtigt i forhold til oprensingsstrategien og beregning af den nødvendige stofmængde, der kan tilføres for at nedbryde forureningen?
5. Kan reaktive stoffer transporteres og fordeles jævnt i matrix fra injektionsborer hen imod en fryseborer ?

3.6.2 Kravspecifikationer

Krav: Etablering af temperaturgradient der skaber en frysefront med en målbar migrationshastighed i en LUC-prøve.

Løsning: Etablering af central frysekilde med regulerbar temperatur i centrum og langs periferien af intaktprøven.

Krav: Tilstedeværelse af permanent vandmættede forhold i den ufrosne del af prøven.

Løsning: Mulighed for tilførsel af ekstra vand/væske under selve fryse-eksperimentet.

Krav: Mulighed for monitorering af frysefront for at kunne vurdere frysehastighed igennem matrix ved kendte temperatur-gradienter samt tykkelse af frysefronten ved bestemte temperatur-gradienter.

Løsning: Placering af termistorer og monitorering af temperatur igennem hele forsøget.

Krav: Mulighed for nøjagtigt at måle frysefront-tykkelse og is-linse udvikling ved forskellige temperatur-gradienter.

Løsning: Etablering af fryseopstilling hvor overfladen af prøven kan besigtiges visuelt og opmåles under selve fryseforsøget.

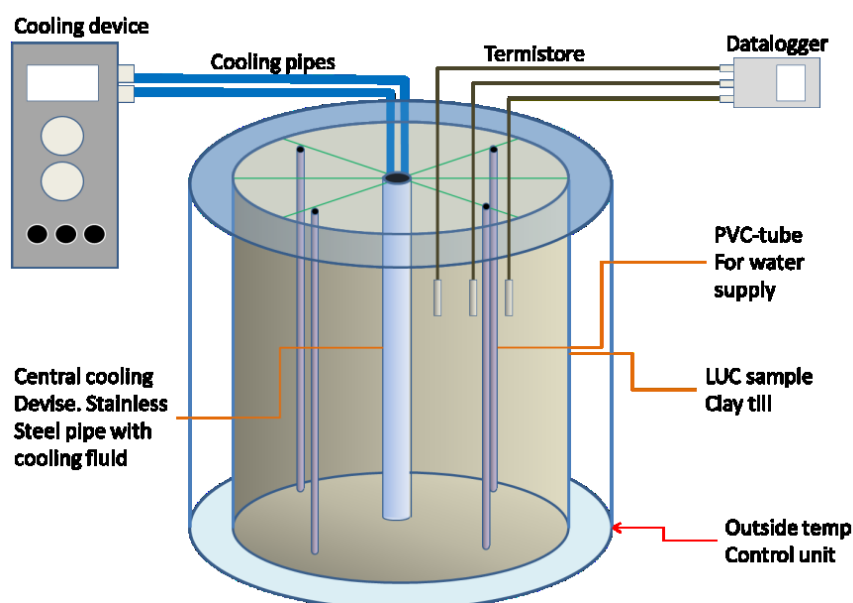
3.6.3 Metoder

I laboratoriet blev LUC-prøverne anbragt i en cylinder med fast bund og et fleksibelt stålskørt, der kunne "åbne sig" eller fastholdes med konstant diameter, så LUC-prøven kunne ekspandere enten i alle retninger eller kun opad. Cylinderen blev dernæst anbragt i en specielt designet køleboks med mulighed for nøjagtig temperatur-regulering inde i boksen. Et vertikalt hul blev forsigtigt boret ned i centrum af LUC-prøven og et centralt fryserør af rusfrit stål (4 cm i

diameter) blev derefter placeret i hullet (Fig. 25). Et køleaggregat blev placeret i fryserøret og koblet til en regulerbar frysekilde.

Fire vandinjektions-boringer blev udført og installeret med fire slidsede Ø16 mm PVC-rør ca. 5 cm fra yderkanten af LUC-prøven og 20 cm fra centrum (18 cm fra kanten af fryserøret), Fig. 25. Vandinjektions-boringerne blev forbundet til fire "vandbeholdere" konstrueret efter "hønsesvander-metoden", hvor der etableres et konstant vandspejl i de enkelte rør, og hvor vandforbruget kan aflæses nøjagtigt. Se Fig. 25, 26a og 26b.

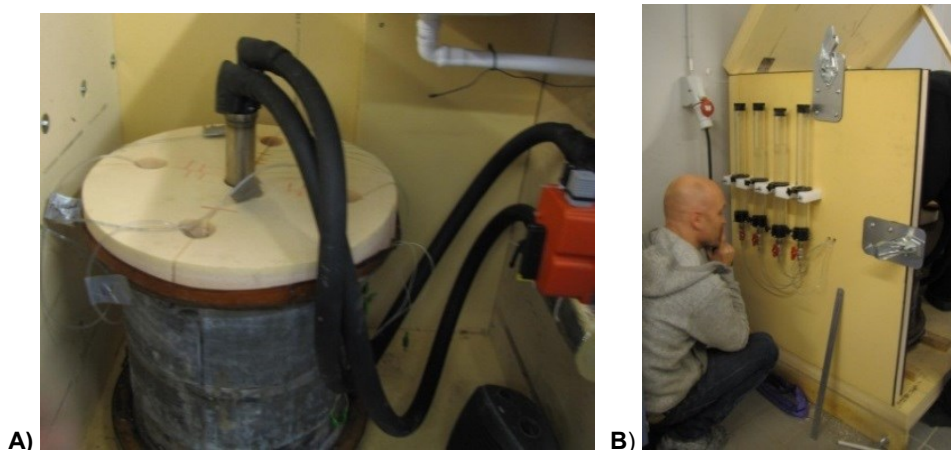
I alt ni termofølere blev dernæst installeret med forskellig afstand til den centrale frysekilde langs med to tracéer placeret henholdsvis mellem vander og frysekilde og parallelt med vander og frysekilde for at kunne monitorere om vanding langs punktkilder ville påvirke frysefrontens udbredelse (Fig. 31). Temperaturen rundt om prøven kan reguleres, ligesom temperaturen inde i prøven. Derved kunne forskellige temperaturgradienter simuleres.



FIGUR 25: FORSØGSOPSTILLING FOR LUC-PRØVER MED MORÆNELER FRA HØJE TÅSTRUP. BEMÆRK CENTRAL KØLEENHED I FORM AF 4 CM RUSTFRIT STÅLRØR MED CIRKULERENDE KØLEVÆSKE (SPRIT) OG 4 INJEKTIONSBORINGER (Ø16MM SLIDSEDE PVC-RØR) SAMT TERMOFØLERE TIL REGISTRERING AF TEMPERATURVARIATIONER.

Den oxiderede LUC1-prøve blev udstyret med et fleksibelt stålskørt så prøveudvidelsen kunne monitoreres under frosøget. Åbningsafstanden ved samlingen af skørtet blev under fryseforsøgene løbende monitoreret foroven, på midten og ved bunden og volumen-udvidelsen kunne beregnes som en funktion af den øgede omkreds. Samtidig blev temperaturen langs de to tracéer, og vandforbruget i "vanderne" omhyggeligt monitoreret.

Den reducerede LUC2-prøve blev fixeret med en konstant diameter så prøven kun kunne ekspandere i lodret retning. Derudover var forsøgsopstillingen identisk med LUC1.



FIGUR 26: A) LUC-PRØVE I STÅLSKØRT MED CENTRAL FRYSENHED INSTALLERET OG ISOLERENDE BUND OG LÅG. B) VANDINJEKTIONS-SYSTEM BASERET PÅ "HØNSE-VANDERPRINCIPPET" DER OPRETHOLDER ET KONSTANT TRYKNIVEAU I PRØVEN OG SAMTIDIG MULIGGØR MONITERING AF VANDFORBRUGET.

Forsøgsplan LUC-1

Følgende forsøgsstrategi blev valgt for LUC-1 prøven:

- Oxideret sprækket moræneler med fleksibelt skørt.
- Initial vandmætning og nedkøling til 8°C.
- Første frysekonfiguration gennemførtes med -5°C i den centrale fryseboring og +8°C som omslutningstemperatur. Monitoring af temperatur, vandforbrug og volumenændringer indtil ligevægt opnås.
- Anden frysekonfiguration. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -10°C i den centrale fryseboring og hæves til +15°C omslutningstemperatur. Monitoring gentages som i første cyklus.
- Tredje frysekonfiguration. Ved sidste forsøg fastholdes -10°C kernetemperatur og omslutningstemperaturen sænkes til +8°C.
- Når vandet i injektionsboringerne fryser, så stoppes forsøget, og prøven demonteres, hvorefter fryse-/tø-sprækkerne frigraves og opmåles på det horisontale plan.
- Deuterium/¹⁸O beriget vand påfyldes i én vander, og der udtages prøver af ufrossen og frossen ler for at måle koncentrationsfordelingen i LUC-1 prøven.
- Der indsamles prøver af ren is for at vurdere om is-linserne dannes via sublimation (gasfase) eller simpel transport af vand hen imod is-linsen.

Forsøgsplan LUC-2

I kontrast til LUC-1 forsøget, er der overordnet ændret på moræneleren ("massiv reduceret" i forhold til "opsprækket oxideret"). Der er også ændret på opstillingen, så diameteren fastholdes, og der fryses i flere forskellige temperatur-intervaller.

Følgende strategi blev besluttet for LUC-2 forsøget:

- Reduceret massivt moræneler.
- Fikseret skørt.
- Initial vandmætning og nedkøling til 8°C.
- Deuterium/¹⁸O beriget vand påfyldes i én vander, og der udtages prøver af ufrossen og frossen ler ved forsøgets afslutning for at måle koncentration af vandet/isen i prøven.
- Første frysecyklus startes ved -5°C i den centrale fryseboring og +8°C omslutningstemperatur. Monitoring af temperatur, vandforbrug og volumenændringer indtil temperaturligevægt opnås.

- Anden frysekonfiguration. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -10°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring gentages.
- Tredje frysekonfiguration. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -15°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring gentages indtil ligevægt er opnået.
- Temperaturen hæves til $+4^{\circ}\text{C}$ i den centrale boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring gentages indtil prøven er tøet helt op.
- Anden frysecyklus startes ved -5°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutnings temperatur. Monitoring af temperatur, vandforbrug og volumenændringer indtil temperatur-ligevægt.
- Anden frysekonfiguration i anden frysecyklus. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -7°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring gentages.
- Tredje frysekonfiguration i anden frysecyklus. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -9°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring gentages.
- Fjerde frysekonfiguration i anden frysecyklus. Ved stabil ligevægt sænkes temperatur til -15°C i boring og $+8^{\circ}\text{C}$ omslutningstemperatur, monitoring af vandforbrug og temperaturkurver gentages indtil vandere fryser til.

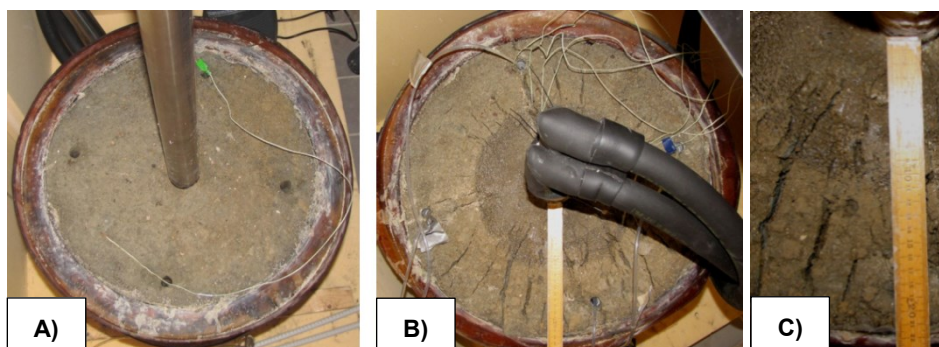
Efter det afsluttende forsøg udtages prøven af forsøgsopstillingen, og der indsamles prøver af ren is langs udvalgte tracéer til kemisk analyse for fordelingen af Deuterium/ ^{18}O i prøven, ligesom sprækkemønstre beskrives.

3.6.4 Resultater

De primære spørgsmål der er behov for at få svar på er:

Hvad er form og størrelse af fryse-/tø-sprækker/is-linser der dannes rundt om en fryseboring ved forskellige temperaturgradienter, og hvilken betydning har sedimentets naturlige tekstur og struktur på dannelsen af is-linser og fryse-/tø-sprækker?

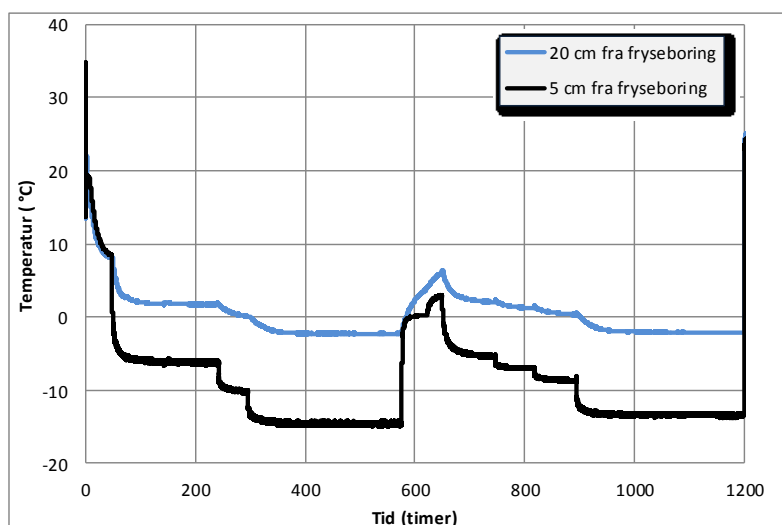
Svar: De primære is-linser og fryse-/tø-sprækker danner koncentriske ringe af sprækker parallelt med frysefronten og vinkelret på den naturlige subhorizontale fabric i moræneleren. Et sekundært system af radierende sprækker dannes i den ikke-frosne del af moræneleren på grund af den indefra voksende udvidelse i den frosne del af matrix (Fig. 27). Det kan konkluderes, at fryseretningen kontrollerer dannelse af is-linser og sprækker på samme måde som i Sous Vide forsøgene. Dannelsen af sprækker i LUC-2 prøven viste samme mønster, om end de radierende sprækker var dårligere udviklet idet prøvens diameter blev fastholdt.



FIGUR 27: OPSPRÆKNING I LUC-1 PRØVEN. A) UFROSSET PRØVE VED FORSØGSOP-SÆTNING. B) FROSSET PRØVE UMIDDELBART INDEN OPTØNING. C) DETAILUDSNIT AF B). BEMÆRK DEN INDRE FROSNE DEL (MØRKT OMRÅDE MED KONCENTRISKE SMÅ SPRÆKKER RUNDT OM FRYSENHEDEN) OG DEN YDRE UFROSNE DEL MED STORE ÅBNE RADIERENDE SPRÆKKER DER ER OPSTÅET SOM ET RESULTAT AF DEN CENTRALE UDVIDELSE.

Hvor hurtigt migrerer frysefronten ved forskellige temperaturgradienter? Dette er især vigtigt for at kunne modellere de optimale temperaturer, der skaber den mest effektive fordeling af stoffer i ler-matrix, og for senere at kunne give input til beregning af de mest kosteffektive konfigurationer af borer.

Svar: Fig. 28 illustrerer temperaturmålinger henholdsvis tæt på (5 cm) og langt fra (20 cm) den centrale fryseboring. Som det fremgår af figuren, opnås der i forsøget i en afstand af ca. 20 cm fra boringen en ligevægtstilstand med konstant temperatur senest ca. 50 timer efter temperaturen er blevet sænket med 5°C (jf. f.eks. temperaturfaldet fra -10°C til -15°C ca. 300 timer inde i forsøget). Det antages på baggrund af disse resultater, at der er rimeligt, at forvente, at der inden for en afstand af ca. 25 cm fra en fryseboring, kan opnås ligevægt for frysefrontens udbredelse ca. 2-3 dage efter sænkning af temperaturen på 5°C.



FIGUR 28: TEMPERATURMÅLINGER HENHOLDSVIS 20 OG 5 CM FRA FRYSESONDEN I LUC-2 FORSØGET.

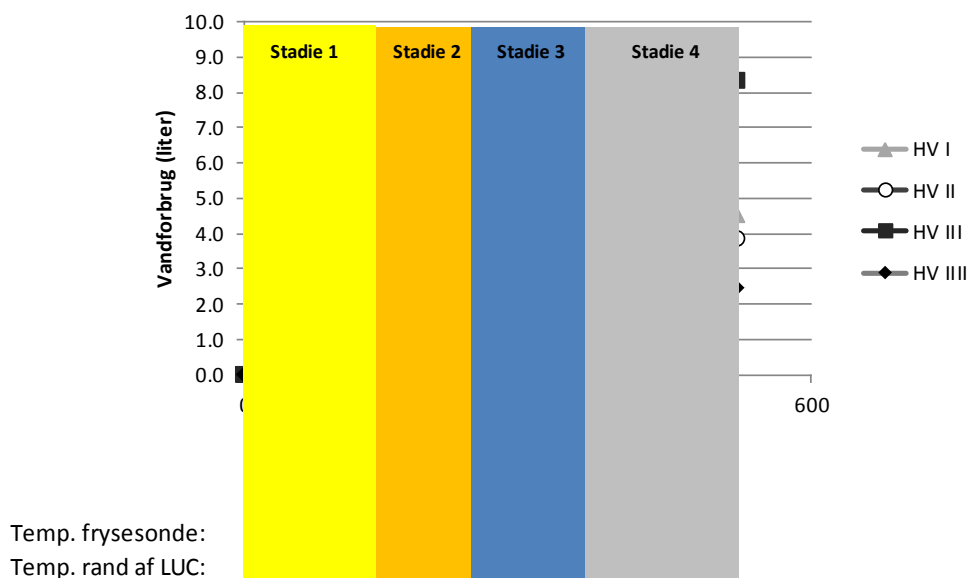
Hvor meget ekspanderer LUC prøven? Dette er især vigtigt for at kunne vurdere/modellere potentielle skader på nærliggende bygninger/installationer dannet i forbindelse med "frost heave" hvor jorden hæver sig over et ekspanderende jordvolumen.

Svar: LUC-1 prøven (med flexibelt skørt) ekspanderede 14 % og LUC-2 prøven (med fastholdt skørt) ekspanderede 8,1 %. Dette indikerer, at de radierende sprækker, der blev dannet i LUC-1 prøven også var vand-/is-mættede. Den vertikale ekspansion under naturlige forhold er sandsynligvis mindre, da der også vil være mulighed for en udvidelse til siderne, men nogen "frost heave" må forventes.

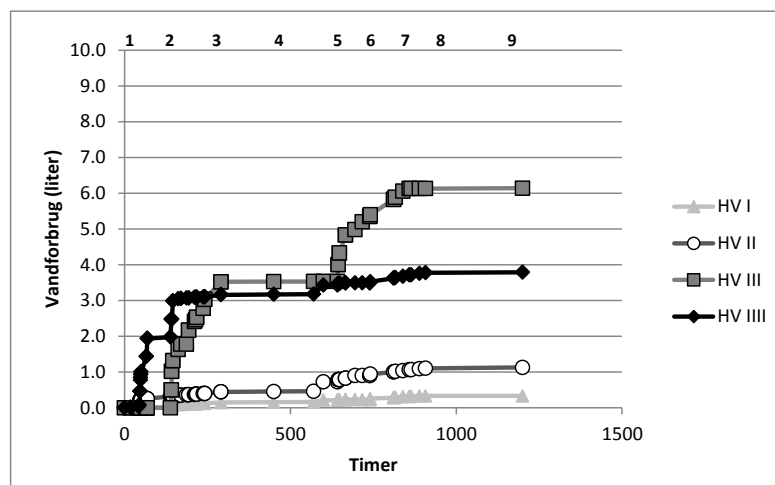
Hvor meget vand kan LUC prøven absorbere? Dette er vigtigt i forhold til oprensningsstrategien og beregning af den nødvendige stofmængde, der skal injiceres for at nedbryde forureningen.

Svar: Vandforbruget under de to fryseforsøg er illustreret i Fig. 29 og 30. LUC-1 prøven optog i alt 19,16 liter vand, hvilket svarer til ca. 20 % (v/v). LUC-2 prøven optog 11,39 liter vand, hvilket svarede til ca. 12 % (v/v). En vigtig observation var, at forbruget af vand fra injektionsboringerne startede hurtigt ved frysestart og at vandforbruget gradvist faldt efterfølgende. Generelt blev der dog forbrugt vand, så længe frysefronten voksede. I LUC-1 forsøgets stadie 3 var vandforbruget minimalt (Fig. 29) og samtidig var frysefronten passiv. Det indikerer, at væsketransporten kan styres ved at regulere på temperaturen. Generelt absorberer moræner mere væske i Sous Vide opstillingen end i LUC opstillingen.

Denne forskel tilskrives dels det større fryseareal og dels det større væsketilførsels-areal. Det skal også bemærkes, at der var ret stor variation på mængden af vand, som de individuelle "hønsevandere" bidrog med (Fig. 29). Således bidrog HVIII med dobbelt så meget vand, som HVI og HVII under LUC-1 forsøget. Det skal måske ses i relation til de radierende sprækker da netop HVI syntes at være i direkte kontakt med en af disse sprækker. Det forklarer også den store forskel, der er i vandoptaget på de to prøver. Generelt vil et konservativt estimat af morænelers evne til at optage væske under frysning fra borerer nok ligge i nærheden af 10 % (v/v).



FIGUR 29: VANDFORBRUG UNDER FORSKELLIGE TEMPERATURGRADIENTER I LUC-1 PRØVEN. "HV" STÅR FOR "HØNSEVANDER OG ANGIVER VANDFORBRUGET I DE ENKELTE INJEKTIONSBORINGER SOM SES AT VÆRE MEGET FORSKELLIGT.



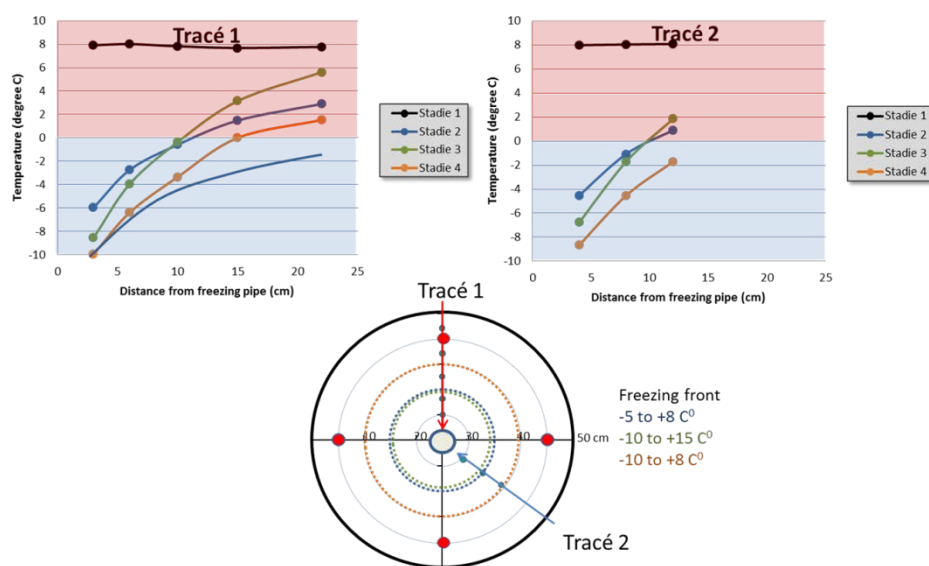
FIGUR 30: VANDFORBRUG UNDER FORSKELLIGE TEMPERATURGRADIENTER I LUC-2 PRØVEN. "HV" STÅR FOR "HØNSEVANDER OG ANGIVER VANDFORBRUGET I DE ENKELTE INJEKTIONSBORINGER SOM SES AT VÆRE MEGET FORSKELLIGT. ØVERST I FIGUREN ER ANGIVET DE 9 FØRSØGSSTADIER SOM OGÅS ER BESKREVET I TABEL 2.

TABEL 2: NI FORSKELLIGE KOMBINATIONER AF TEMPERATURER (FORSØGSSTADIER) ANVENDT I FORSØGET MED Luc-2 PRØVEN (JF. OGSÅ FIGUR 30).

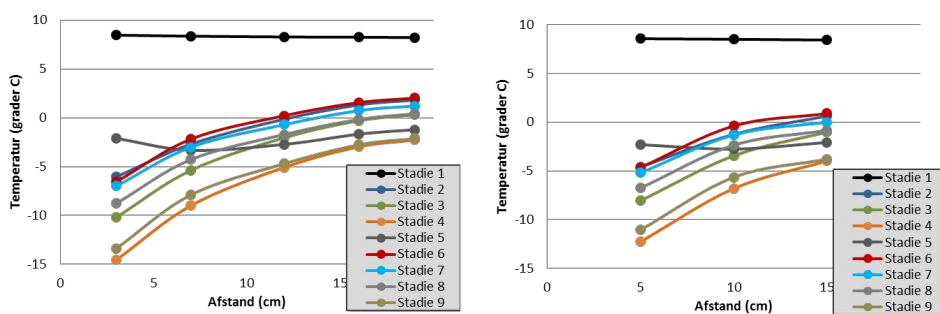
Stadie	Temp. frysesonde (°C)	Temp. Rand af LUC prøve (°C)
1	sluk	8
2	-5	8
3	-10	8
4	-15	8
5	4	8
6	-5	8
7	-7	8
8	-9	8
9	-15	8

Hvad er temperaturgradienten ved forskellige frysetemperaturer under naturlige forhold? Denne information er vigtig for at beregne de optimale afstande imellem fryseboringer.

Svar: Kurverne fra de forskellige temperatur-konstellationer er illustreret i Fig. 31 og Fig. 32. Som det ses på LUC-1 kurven krydser kurven 0 grader samme sted for grænsetemperaturerne på -5 til +8°C grader og -10 til +15°C. Derfor vokser frysefronten ikke i denne situation. Kurverne antyder også, at ved en generel jordtemperatur på 8°C burde man kunne opnå en fryseradius på ca. 1 meter ved at fryse med -30°C i fryseboringen. Dette er forudsat, at der kan ekstrapoleres lineært fra resultaterne fra LUC forsøgene og er således en noget usikker antagelse, da flere parametre er forskellige fra en laboratorieopstilling til helt naturlige forhold.



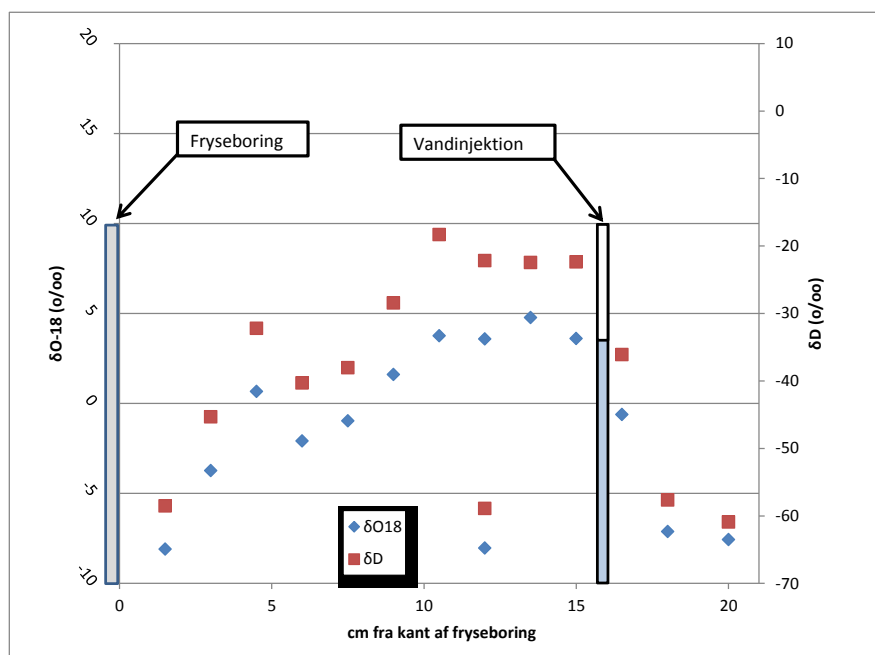
FIGUR 31: FRYSEKURVER PÅ ALLE 9 TERMISTORER (5 I TRACÉ 1, 3 I TRACÉ 2 OG 1 UDEN FOR PRØVEN) UNDER FRYSEFORSØGET MED LUC 1 PRØVEN.



FIGUR 32: FRYSEKURVER PÅ ALLE 9 TERMISTORER (5 I TRACÉ 1, 3 I TRACÉ 2 OG 1 UDEN FOR PRØVEN) UNDER FRYSEFORSØGET MED LUC 2 PRØVEN.

Kan reaktive stoffer transporteres og fordeles jævnt i matrix fra injektionsboringerne hen imod fryseboringerne?

Svar: JA. Som dokumenteret på Fig. 33 fordeles isotoperne hurtigt ud i matrix hen imod fryserøret. Koncentrationen aftager gradvist hen mod frysefronten, idet transporten pågår i længst tid tættest på vandinjektionsboringen. Som dokumenteret i Sous Vide forsøgene, vil f.eks. sukrose givetvis transporteres på samme måde. Figuren viser også, at transporten i modsat retning, som må formodes at ske ved diffusion er langt mindre.



FIGUR 33: FORDELING AF DEUTERIUM OG O-18 MELLEM INJEKTIONSRØR OG FRYSESENDEN.

3.7 Delkonklusion for 4. forsøgsrunde

Følgende konklusioner er uddraget af laboratorieforsøgene i 4. forsøgsrunde:

- Frysning i central frysekilde (boring) skaber et netværk af koncentriske fryse-/tøsprækker med en indbyrdes afstand under 5 mm. Samtidig opstår der, på grund af udvidelsen, radierende åbne sprækker med stor transportkapacitet.

- Det er muligt at skabe en kapillær sugeeffekt med en sugeradius på >20 cm fra frysekilden.
- Prøverne opsugede i forsøgsperioden mellem 12 % (v/v) og 20 % (v/v) væske.
- Denne effekt kan i løbet af få dage fordele forskellige stoffer i massiv moræneler med meget lave bulk-hydrauliske ledningsevner.

4. Feltforsøg

4.1 Forsøg 5: Felteksperiment med kombineret frysning og injektion af vand og ikke-reaktive stoffer i vertikal fryseboring installeret i uforstyrret moræneler under naturlige forhold.

Fryseeksperimentet blev gennemført over en periode på 24 dage i november-december 2014.

4.1.1 Formål/rationale

Det primære mål for dette eksperiment er at teste fryseboringsmetoden i uforstyrret moræneler under naturlige forhold (temperatur/tryk/vandmætning/nedbør). Især fryse-, injektions-, og monitoringsmeknologier er begrænset af randværdier i laboratorieforsøgene, og det er derfor nødvendigt at lave et forsøg under realistiske forhold, der kan sammenlignes med forholdene under en reel oprensning.

Felteksperimentet blev designet på baggrund af de erfaringer, der var høstet i laboratorieforsøgene, og de konklusioner/resultater, der var opnået. Resultaterne fra dette forsøg skal fremadrettet benyttes til at optimere oprensningsapplikationen, herunder specielt designet og konfigurationen af fryse- og injektionsboringer så de indbyrdes afstande optimerer spredningen af reaktive stoffer set i forhold til antal boringer og energiforbrug/tidsforbrug. Forsøget skal derudover bruges til at udvikle og teste et monitoringsystem så både vandforbrug, temperaturgradienter og potentiel "frost heave" kan dokumenteres.

Overordnet er det strategien at indhente data vedrørende følgende spørgsmål?

- Hvad er fryseradius rundt om en fryseboring under naturlige forhold i moræneler?
- Hvor hurtigt migrerer frysefronten ved fastsatte afstande og frysetemperaturer?
- Hvad er den kapillære sugeradius under naturlige forhold i moræneler?
- Hvor meget vand skal der tilføres for at opretholde vandmættede forhold i den ellers umættede zone rundt om fryseboringen?
- Hvordan fordeles tilførte stoffer i matrix mellem injektionsboringer og fryseboring?
- Hvor meget hæver jordoverfladen sig over fryseboringen set i forhold til volumen af det frosne område nedenunder?

4.1.2 Kravspecifikationer

Krav: Forsøgsområdets geologi skulle repræsentere en typisk dansk moræneler. Samtidig skulle det være muligt at monitorere forsøget gennem længere tid og afslutningsvis udgrave hele eksperimentet med henblik på, at inspicere fryseforsøget, opmåle det frosne område og udtage jordprøver fra den optøede og frosne del til dokumentation.

Løsning: For at kunne opfylde ovenstående blev en egnet lokalitet udpeget. Ved Kallerup Grusgrav i nærheden af Hedehusene og Teknologisk Institut, hvor en del af prøverne til de foregående forsøg var indsamlet, blev et område udvalgt til at lave forsøg med in-situ frysning af moræneler i en fryseboring. Kallerup Grusgrav er karakteriseret ved en 8-10 meter tyk morænebænk overlejrende smeltevandsgrus/-sand. Morænen er klassificeret som "bundmoræne", der er aflejret under en gletsjer, der bevægede sig frem over området for ca. 16.000 år siden. Denne moræneenhed, der således stammer fra det sidste af de ungbaltiske fremstød, dækker det meste af Sjælland og er repræsentativt for store områder af Danmark. Morænen er i Kallerup Grusgrav karakteriseret som sandet moræneler med flere tynde sandlinser/-bånd. Den er generelt umættet, idet den ligger på kanten af en ca. 10 m dyb grusgrav, hvor grund-

vandet kunstigt holdes ca. 12 meter under terræn. Ikke desto mindre eksisterer der et øvre sekundært magasin med stærkt varierende grundvandsspejl afhængig af nedbøren i området, så jorden i forsøgsområdet var delvist mættet. Et område på 10 x10 meter blev udvalgt og overjord samt ca. 1 meter jord blev borttrømmet for at kunne foretage fryseforsøget i den kalkholdige, massive moræneler 3-4 meter under terræn uden at skulle bore alt for dybt.



FIGUR 33: FLYFOTO MED PLACERING AF FORSØGSOMRÅDET I KALLERUP GRUSGRAV PÅ MARKEN LANGS KANTEN AF GRUSGRAVEN TIL VENSTRE OG TÆT VED SØEN LIGE NORD FOR OMRÅDET. FORSØGSOMRÅDET ER CA 100 M².

Krav: Eksisterende forsøgsopstilling skal gøres mobil.

Løsning: Alt fryseudstyr fra LUC forsøgene blev installeret i en container sammen med en 1000 liters tank, et vandværk til at fordele vandet i borerne, samt et specielt designet vandinjektionssystem, der var i stand til at fastholde et konstant vandspejl 25 cm under terræn og monitere den præcise mængde vand, der blev tilført borerne. Samtidig blev der etableret et temperatur-monitoringssystem med datalogger og systematisk indsamling af temperaturdata på en computer (se Fig. 34).

Krav: Etablering af strøm og vandforsyning der kan fungere i minimum 24 timer uden tilsyn.

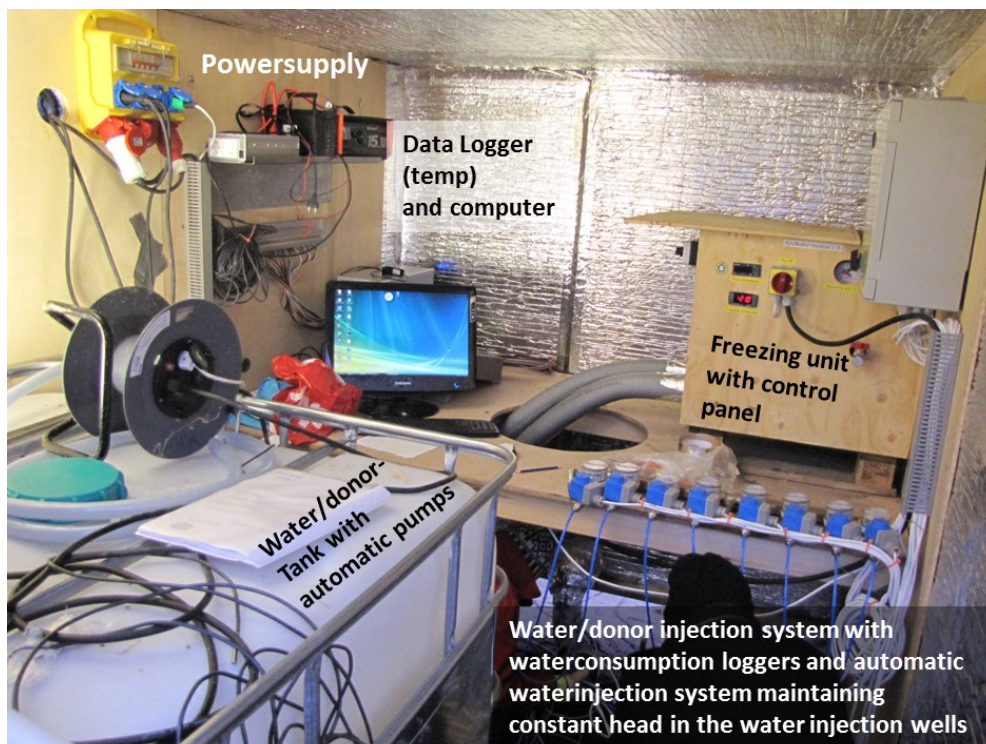
Løsning: Da der ikke er indlagt strøm på pladsen, blev det besluttet at indkøbe en ekstra container med strømforsyning i form af en benzindrevet generator med tilstrækkelig kapacitet til at gennemføre fryseforsøget. Der blev samtidig installeret 2 serieforbundne 30 liters benzin-tanke så generatoren kunne køre i ca. 2 døgn mellem optankningerne.

Krav: Grejet skal tyveri- og frostsikres.

Løsning: For at undgå tyveri og hærværk blev det besluttet, at placere containeren med frysegrejet oven over selve forsøgsopstillingen og fjerne dele af bunden så borerne var tilgængelige og beskyttede, og med strømforsynings-containeren lige ved siden af (Fig. 35). Containerne var aflåst under hele frysefasen, og led ingen overlast.

Krav: Etablering af fryseboring til minimum 3-4 meters dybde i original intakt moræneler under den forvitrede øverste del (defineret ved kalkgrænsen).

Løsning: Ved at afrømme ca. 1 meter overjord og etablere et plant område med dræn-grøfter rundt om kunne fryseboringen installeres i jorden relativt nemt via håndbor til 3 meters dybde og derved nå den ønskede dybde på ca. 4 m u.t.



FIGUR 34: INDRETNING AF FRYSECONTAINER MED VANDINJEKTIONSSYTEM, VAND-TANK, VANDVÆRK, MONITERINGSSYSTEMER FOR BÅDE FRYSE, VAND OG TEMPERATUR SAMT STYRING AF FRYSEPROCESSEN. DET HELE REGISTRERES VIA DATA-LOGGERE PÅ COMPUTEREN.

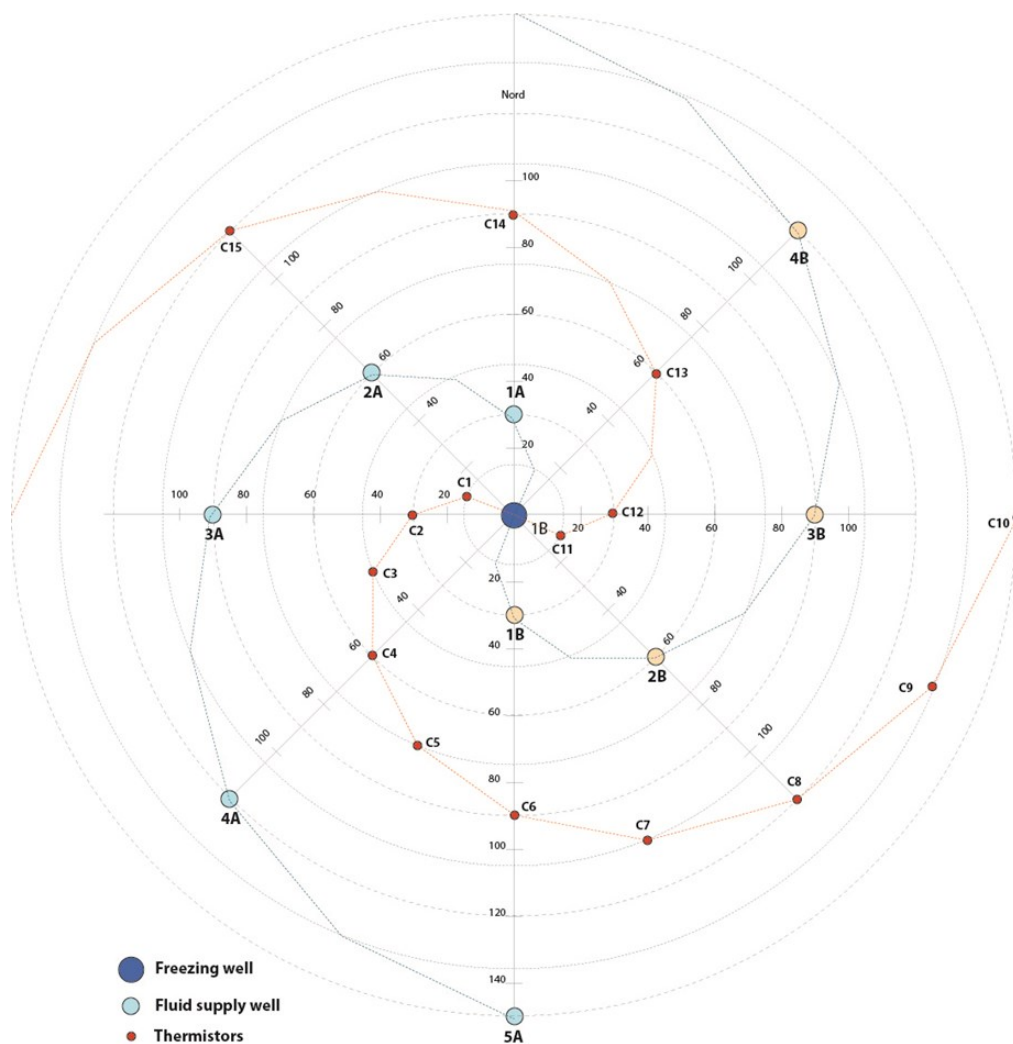


FIGUR 35: PLACERING AF DE TO CONTAINERE I FORSØGSOMRÅDET.

Krav: Etablering af vandforsyningsboringer og temperaturfølere med forskellig afstand til fry-

seboring så sugeradius i forhold til frysefronten kan monitoreres så effektivt som muligt.

Løsning: En konfiguration med 9 vandforsyningsboringer (A1-A5 og B1-B4), bestående af 40 mm slidsede PVC-rør blev installeret rundt om en central fryseboring i et mønster der er navngivet "Galakse-konfigurationen" på grund af dens form (Fig. 36). Dette mønster er udtænkt således, at alle boringer parvis har forskellig afstand og areal i forhold til fryseboringen. Dette muliggør talrige analysemuligheder af de indsamlede data. Samtidig blev der udviklet et særligt injektionssystem, der blev installeret i PVC-rørene og som var tilsluttet et vandværk i containeren, så det var muligt at etablere et fast vandspejl 25 cm under terræn. Termistorene blev placeret 1,5 meter under terræn i samme konfiguration (se Fig. 36). Endelig blev hele opstillingen isoleret med vintermåtter for at undgå frostpåvirkning udefra da forsøget skulle udføres fra november til januar.



FIGUR 36: DESIGN AF PLACERING AF FRYSEBORING, INJEKTIONBORINGER, TEMPERATUR-MONITERINGSBORINGER. VANDFORSYNNINGS- OG FRYSEBORINGER UDFØR- TES TIL 3 M UNDER TERRÆN, OG TERMISTORER BLEV PLACERET 1,5 METER UNDER TERRÆN. FRYSESONDEN I FRYSEBORINGEN FRØS I DYBDEINTERVALLET 0,5 TIL 3 METER UNDER TERRÆN.

4.1.3 Metoder

På baggrund af erfaringerne fra laboratorieforsøgene blev en frysestrategi formuleret og en færdig strategi for frysning, injektion, monitoring og efterfølgende udgravning planlagt. Overordnet var det planen, at sænke temperaturen gradvist for at etablere en relativt jævn og konstant udbredelse af frysefronten.

Jorden blev først vandmættet i 3 dage. En bromid-tracer opløsning blev dernæst blandet i vandet således at fordelingen og koncentrationen kunne måles bagefter. Efter 3 dage startede fryseforsøget med en initial frysetemperatur på -8°C . Derefter blev temperaturen sænket til henholdsvis -12 , -16 , -20 , og -24°C i 3-dages intervaller. Endelig blev -24°C fastholdt i resten af forsøgsperioden for at få en længere monitoringsperiode af frysefrontens udbredelseshastighed med øget afstand fra frysekilden under konstant frysetemperatur. Under hele forsøget blev vandforbruget i de individuelle injektionsboringer løbende monitoreret og baggrundsdata som nedbør blev også registreret i hele perioden. Temperaturen i jorden blev løbende monitoreret og straks efter at fryseforsøget var afsluttet blev borerne koblet fra og hele containeren blev løftet væk.

I første omgang opmålte "jordoverfladens hævnning" efterfølgende ved at udspænde liner mellem "upåvirkede" målepunkter og opmåle opløftet på de i forvejen placerede målepunkter i det opløftede område.

Hele forsøget blev derefter udgravet og den frosne del af moræneleren blev omhyggeligt opmålt og prøver til analyse af bromid-traceren blev indsamlet både i den ufrosne og frosne del af forsøgsområdet. Analyse af bromid koncentrationer blev udført i laboratoriet og den generelle fordeling blev vurderet.

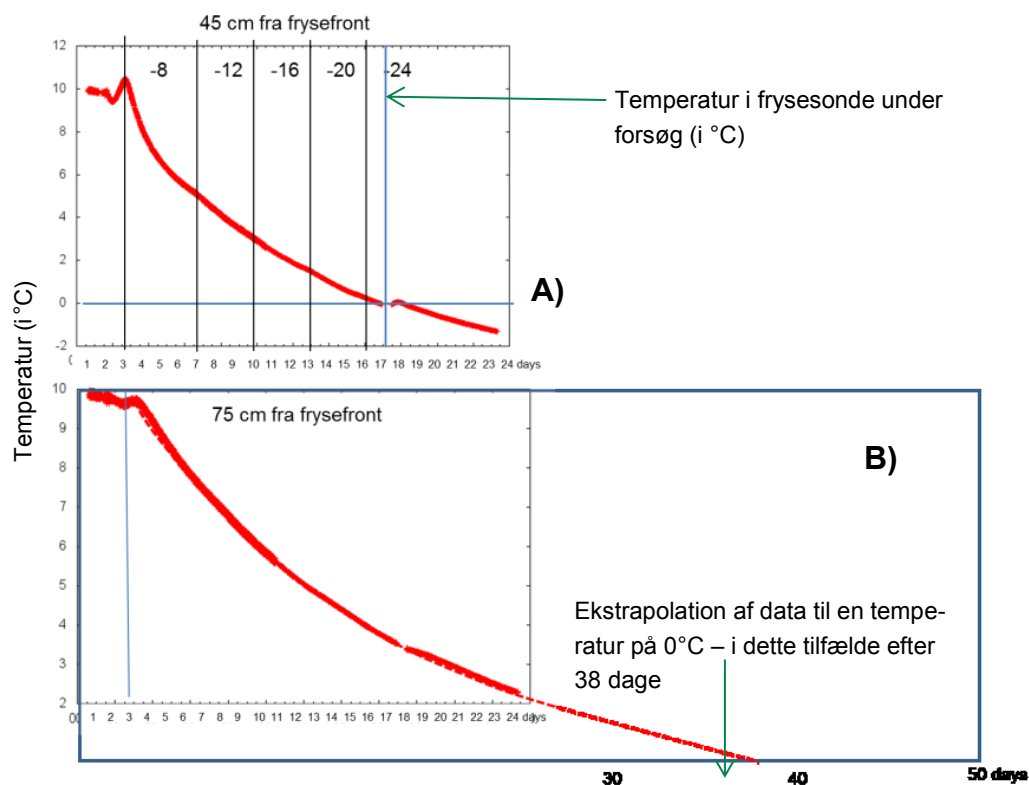
Endelig blev vandforbruget fra de enkelte borer kalkuleret og temperaturdata fra termofølerne organiseret i regneark.

4.1.4 Resultater

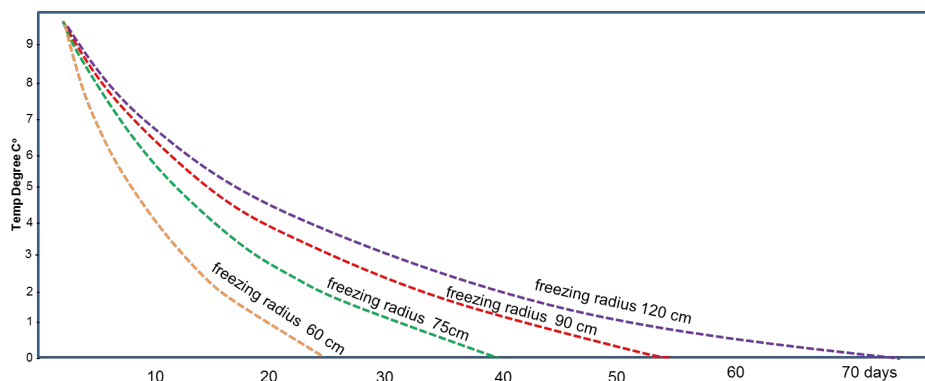
Følgende specifikke spørgsmål ønskedes belyst i dette eksperiment:

Hvad er fryseradius rundt om en fryseboring under naturlige forhold i moræneler?

Svar: I forsøget blev temperaturen i fryseboringen gradvist sænket med 4°C hver tredje dag fra en initial temperatur på -8°C til en sluttemperatur i fryseboringen på -24°C . Herefter blev temperaturen i fryseboringen holdt konstant på -24°C . Ved denne procedure dannedes en fryseradius (området hvor inden for jorden var frossen) på ca. 60 cm på 23 dage. Ved at ekstrapolere de målte temperaturkurver fra termistorer placeret uden for denne radius fra fryseboringen, anslås det, at det ved at anvende en temperatur i frysesonden på -24°C vil tage ca. 38 dage at nå en radius på ca. 75 cm (Fig. 37), 54 dage at nå en radius på 90 cm og mere end 75 dage at nå en radius på 120 cm (Fig. 38).



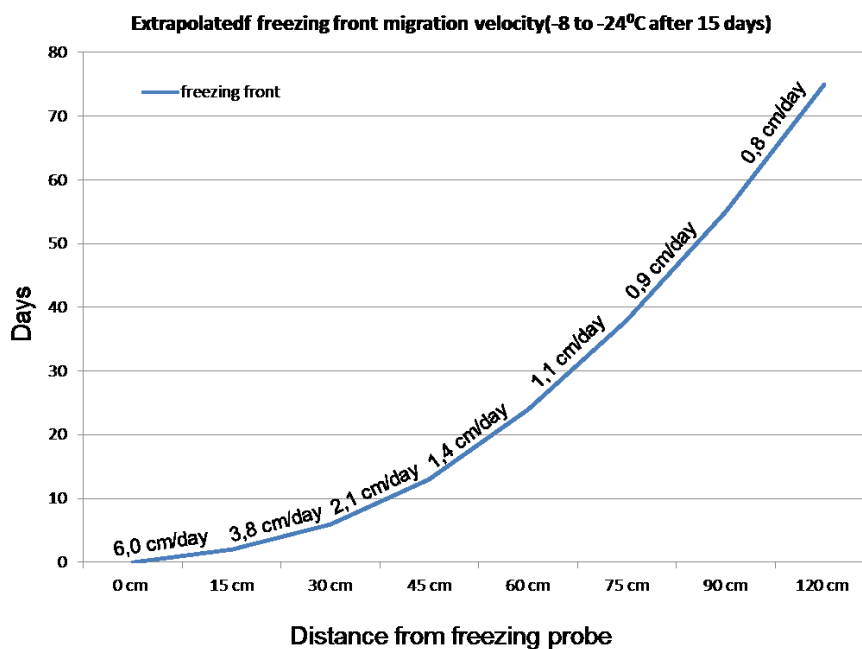
FIGUR 37: EKSEMPEL PÅ FRYSEKURVE FRA TERMISTORERNE C3 og C5 ANBRAGT HENHOLDSVIS A) 45 CM OG B) 75 CM FRA FRYSEBORINGEN.



FIGUR 38: EKSTRAPOLEREDE FRYSEKURVER FOR TERMISTORER ANBRAGT HENHOLDSVIS 60, 75, 90, OG 120 CM FRA FRYSEBORINGEN.

Hvor hurtigt migrerer frysefronten ved fastsatte afstande og frysetemperatur?

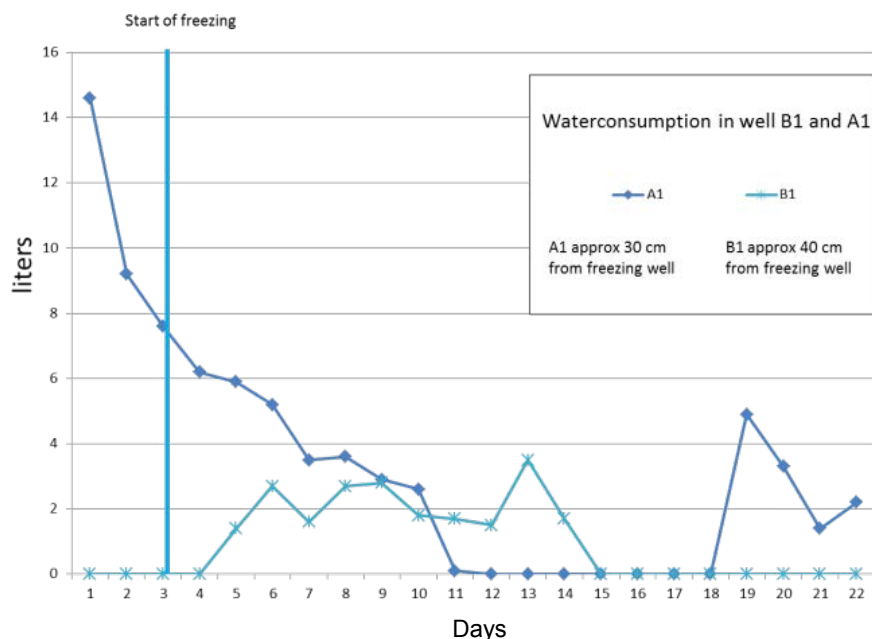
Svar: Ved en initial frysetemperatur på -8°C foregår frysningen hurtigt (6 cm/dag) i starten og aftager derefter hurtigt. Efter ca. 6 dage er hastigheden nede under 3 cm/dag og ved at sænke temperaturen 4°C hver tredje dag kan en migrationshastighed tæt på 2 cm/dag opretholdes. Efter 14 dage holdes temperaturen konstant på -24°C, og derefter falder migrationshastigheden gradvist fra 2 til ca. 0,8 cm/dag efter ca. 2 måneders frysning.



FIGUR 39: EKSTRAOLERET FRYSEFRONTS-MIGRATIONSHASTGHED I SANDET MORÆNELER VED START-TEMPERATUR I FRYSEBORINGEN PÅ -8°C OG GRADVIS SÆNKNING TIL -24°C EFTER 14 DAGE.

Hvad er den kapillære sugeradius under naturlige forhold i moræneler?

Svar: Den præcise kapillære sugeradius i den sandede moræneler ved Kallerup er vanskelig at vurdere, da den nøjagtige afstand i forhold til frysesonden 1,5 meter under terræn ikke er præcist målt. Baseret på frysekurverne og den tid det tog for frysefronten at nå frem til B1 boringen, kan det beregnes, at afstanden her har været ca. 40 cm da boringen frøs efter ca. 12 dage. A1 (Fig. 40) var ca. 30 cm fra frysesonden og frøs efter ca. 8 dage. B1 var den eneste boring der ikke lækkede nævneværdigt til de omkringliggende områder, og det må derfor antages at hele vandforbruget på, i gennemsnit, 2 liter pr. dag over en 2 meter lang sektion er trukket hen til frysefronten. Boringen begyndte at afgive væske i samme øjeblik frysesonden blev aktiveret (se Fig. 40). Forsinkelsen på kurven skyldes, at borerne fyldes til 25 cm under terræn, når vandet i boringen er sunket ca. 25 cm, svarende til et volumen på ca. 1,1 liter. Derfor registreredes begyndelsen af vandforbruget med nogen forsinkelse (12 timer). På den baggrund kan det konkluderes, at sugeradius er mere end 40 cm. Sous Vide forsøgene med fryseradius og sugeradius i forskellige typer ler antyder, at denne afstand også er afhængig af ler-indholdet, og der skal derfor flere forsøg til at finde "variationen" i sugeradius under forskellige forhold.

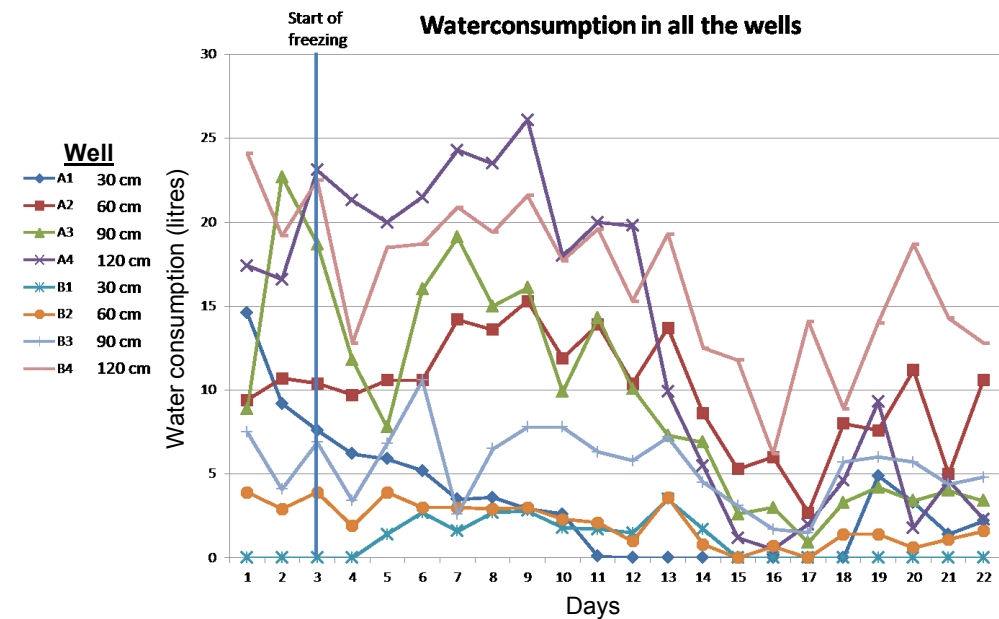


FIGUR 40: KURVERNE VISER VANDFORBRUGET I DE TO NÆRMESTE INJEKTIONSBORINGER, DER ER PLACERET HENHOLDSVIS 30 CM (A1) OG 40 CM (B1) FRA FRYSE-SONDEN. SOM DET FREMGÅR VAR B1 TÆT INDIL FRYSNINGEN STARTEDE, MENS A1 HAR HAFT KONTAKT TIL SANDLINSE/SPRÆKKER, DER HAR LÆKKET VAND, INDIL BORINGEN FRØS EFTER 8 DAGES FRYSNING. REAKTIVERINGEN AF A1 PÅ DAG 18 MÅ SKYLDES FROST HEAVE OG DANNELSE AF ÅBNE SPRÆKKER I DEN ØVERSTE UFROSNE DEL AF MORÆNEN 0-0,5 M U.T.

Hvor meget vand skal der tilføres for at opretholde vandmættede forhold i den ellers umættede zone rundt om fryseboringen?

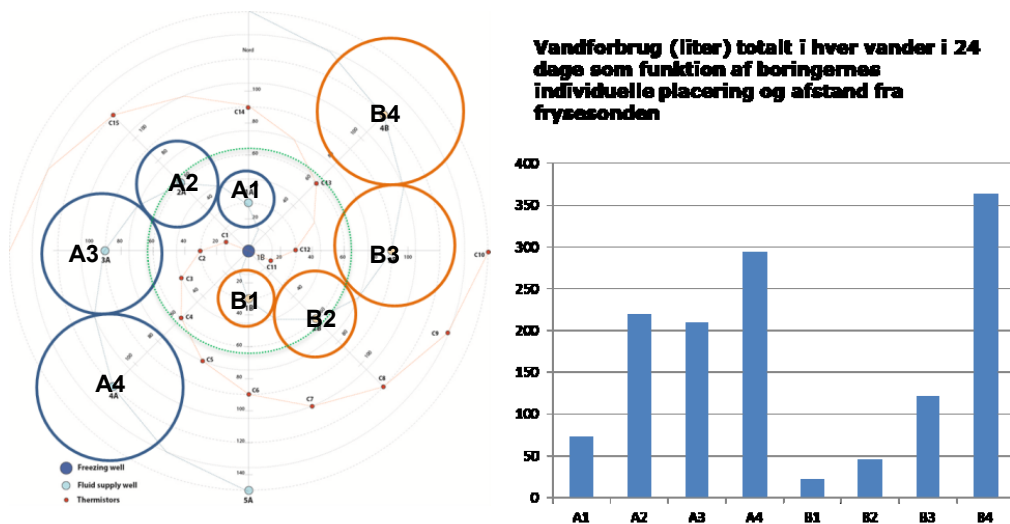
Svar: På grund af de særlige forhold ved placeringen af forsøgsfeltet tæt på gravekanten til en grusgrav og det faktum, at morænebænken indeholdt både sprækker og mindre sandlinser, var det vanskeligt at mætte jorden omkring forsøgsfeltet fuldstændigt.

Totalt 1345 liter vand blev tilført borerne under det 22 dage lange forsøg. I starten lå vandforbruget ret stabilt på samlet ca. 90 liter pr. dag, men hen imod forsøgets afslutning faldt vandforbruget markant til knap 20 liter pr.dag, samtidig med, at der faldt en del regn i området. Det viste sig også hurtigt, at der var stor forskel på, hvor meget de enkelte borer lækkede ud i matrix (Fig. 41).



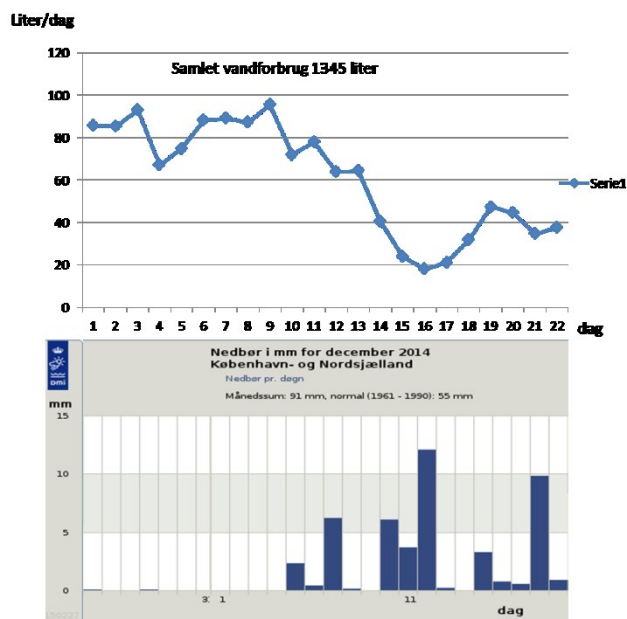
FIGUR 41: KURVERNE VISER VANDFORBRUGET I ALLE INJEKTIONSBORINGER UNDER HELE FORSØGET. SOM DET FREMGÅR ER DER STORE VARIATIONER MELLEM DE ENKELTE BORINGER. DOG SYNES ISÆR B1, A1 OG A2 AT PÅVIRKES AF FRYSE-PROCESSEN.

På Fig. 42 ses fordelingen mellem hvor meget vand de enkelte boringer lækkede og deres indbyrdes placering. Der er en klar systematisk sammenhæng imellem vandforbrug og afstand til naboboringer, som det jo også må forventes. Variationerne fra denne forklaring er sandsynligvis betinget af lokale makropore-systemer (sprækker/sandlinser) i morænen.



FIGUR 42: TIL VENSTRE SES BORINGERNES INDBYRDES PLACERING OG KURVERNE TIL HØJRE VISER VANDFORBRUGET I LITER I ALLE BORINGERNE UNDER HELE FORSØGET. DER SES EN TYDELIG TENDENS TIL, AT DE BORINGER DER LÆKKER MEST LIGGER I STØRST AFSTAND FRA FRYSESONDEN OG DE ANDRE BORINGER, OG DERMED HAR KONTAKT TIL DET STØRSTE UMÆTTEDE OMRÅDE.

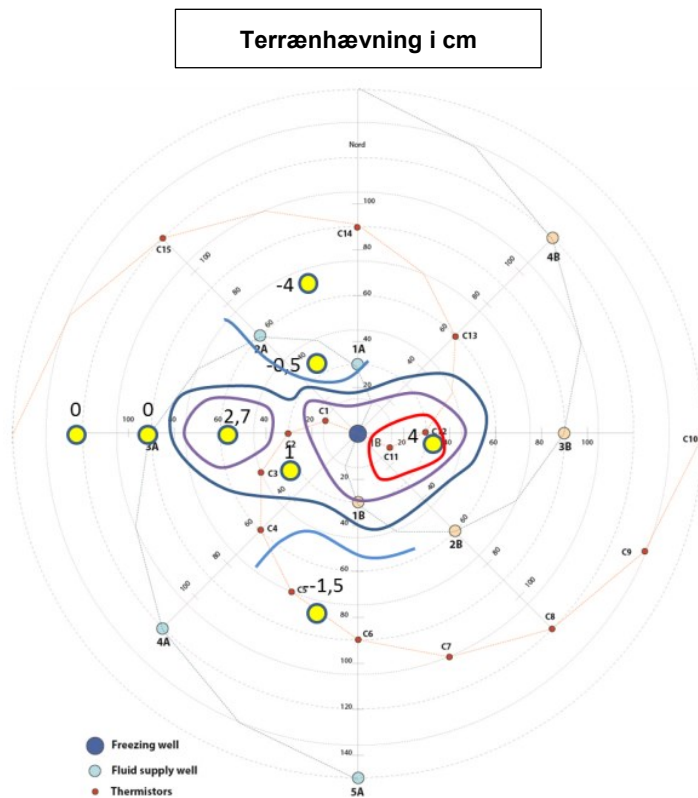
På Fig. 43 ses sammenhængen mellem nedbør og infiltration i boringerne. Det må overvejes om det ikke er klogt at dække området af under et evt. oprensningsforsøg, og sørge for afledning af regnvand i drængrøfter, for at undgå, at den infiltrerede væske ikke fortyndes unødigt.



FIGUR 43: SAMMENHÆNG MELLEM DET TOTALE VANDFORBRUG OG NEDBØRS-MÆNGDEN. I FORSØGSPERIODEN FALDT DER I ALT MERE END 90 MM NEDBØR.

Hvor meget hæver jordoverfladen sig over fryseboringen set i forhold til volumen af det frosne område nedenunder?

Svar: Efter fryse-eksperimentet var afsluttet, blev hele forsøgsopstillingen koblet fra containeren, som derefter blev flyttet så hele jordoverfladen var tilgængelig. I første omgang blev de målepunkter, der var installeret i jorden målt ind langs reference-linjer til det område, hvor der ikke var sket hævnings. På Fig. 44 ses hvordan et område på ca. 70 x 50 cm omkring fryseboringen har hævet sig op til 4 cm. Der observeredes samtidig en lokal sænkning i terrænet nord for fryseboringen. Enkelte radierende sprækker optrådte også tæt på selve fryseboringen.



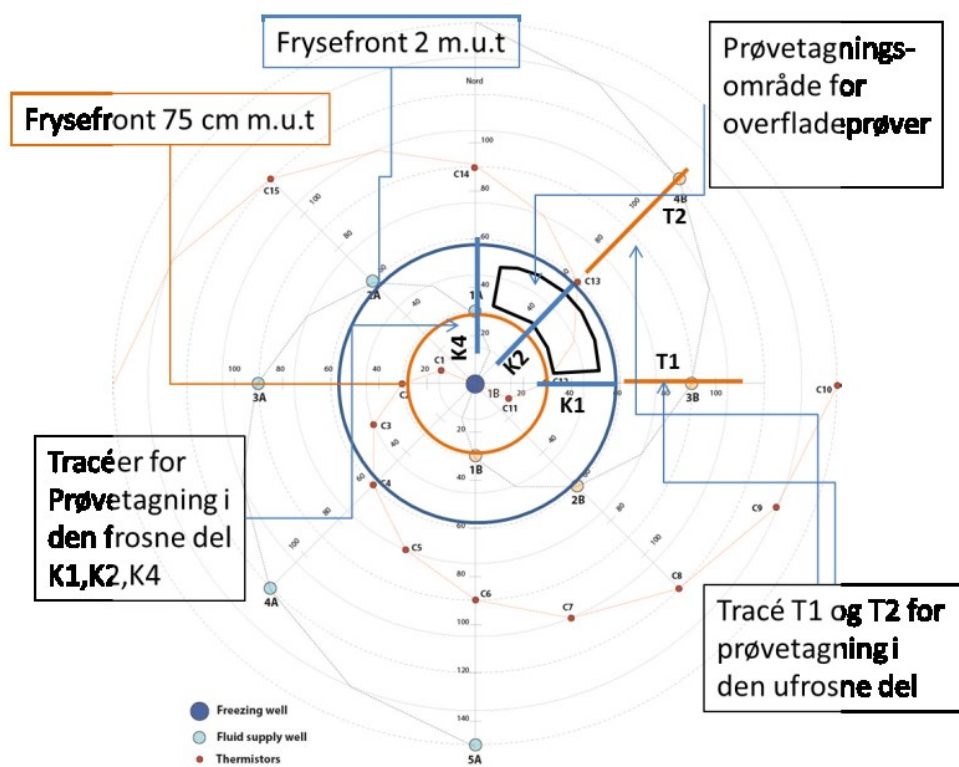
FIGUR 44: OPLØFT ANGIVET I CM I OMRÅDET OMKRING FRYSEBORINGEN. SOM DET SES, HAR ET MINDRE OMRÅDE I DEN CENTRALE DEL HÆVET SIG CA. 3-4 CM. TIL GENGÆLD HAR OMRÅDET LIGE NORD OG SYD FOR DET HÆVEDE OMRÅDE SÆNKET SIG TILSVARENDE. GULE PUNKTER ER MÅLEPUNKTER FOR TERRÆNHÆVNINGEN.

Hvordan fordeles tilførte stoffer i matrix mellem injektionsboringer og fryseboring?

Svar: Efter opmålingen af opløft blev hele området ryddet så den frosne blok straks kunne udgraves og blotlægges ved hjælp af en gravemaskine og med håndkraft tæt på den frosne blok. Blokken blev i første omgang udgravet til 1,5 meter under terræn, svarende til dybden hvor termo-følerne blev installeret. På denne måde kan blokken direkte sammenholdes med de målte temperaturdata og injektionsboringernes afstand fra frysefronten. I Fig. 45 ses den udgravede frosne blok, samt fotos af prøvetagnings-processen, der var vanskelig på grund af vedvarende regn under hele processen. Især kan det være vanskeligt at vurdere, om prøverne blev delvist fortyndet af regnvand under processen. Det var af samme grund også kun muligt at prøvetage fra 3 tracéer samt et udvalgt område på overfladen af den frosne ler-klods (Fig. 45 og 46).



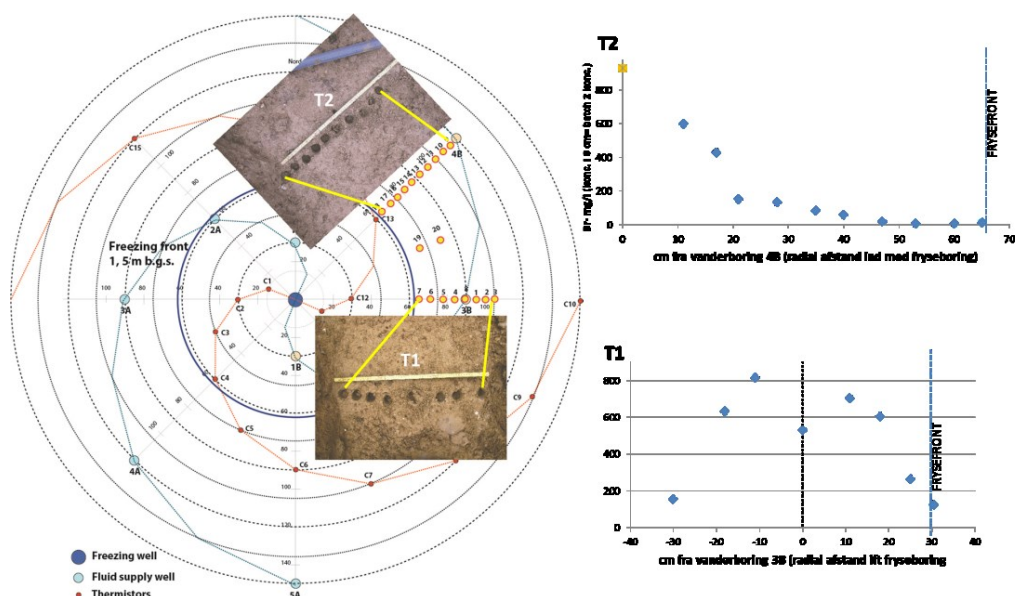
FIGUR 45: UDGRAVNING AF DEN FROSNE BLOK RUNDT OM FRYSEBORINGEN. BE-MÆRK BLOKKENS FORM OG DE FASTFROSNE INJEKTIONSRØR. DIAMETEREN ER 120 CM OG JORDPRØVER BLEV UDTAGET I MESSINGRØR I DEN UFROSNE ZONE OG SOM BOREKERNE I DEN FROSNE DEL. ARBEJDET VAR SÆRDELES VANSKELIGT AT UDFØRE PÅ GRUND AF REGN.



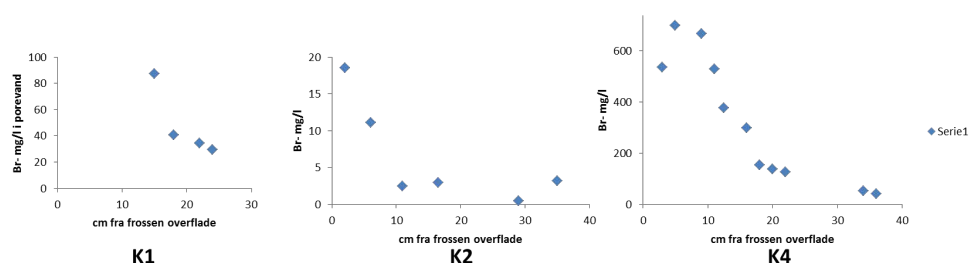
FIGUR 46: PRØVETAGNINGSPUNKTER RUNDT OM OG I DEN FROSNE DEL AF FORSØGSOPSTILLINGEN.

Som angivet udvalgte de tre tracéer K1/T1 (der ligger på en linje der krydser boring B3 (også benævnt 3B) 90 cm fra frysesonden), K2/T2 (der ligger på en linje fra injektionsboring B4 (også benævnt 4B) til centrum 120 cm fra frysesonden) og K4 (der krydser boring A1(1A) 30 cm fra frysesonden), Fig. 46. Boring A1(1A) blev frosset efter ca. 8 dages frysning fra fryseboringen, mens B3(3B) og C3(3C) ved forsøgets afslutning var placeret ca. 30 cm og 65 cm fra frysefronten. Resultaterne af analyserne af bromidkoncentrationer viser en generelt stor variation. Det kan dog konkluderes, at der rundt om injektionsboringerne er relativt høje koncentrationer af bromid i en radius på ca. 20 cm (Fig. 47). Koncentrationerne hen imod frysefronten er størst for B3(3B) (>200 mg/l), hvorimod der er meget små koncentrationer fra B4(4B) hen imod frysefronten. Det stemmer godt overens med, hvad der kunne forventes.

I den frosne del af jordvolumenet (Fig. 48) er der også højere koncentrationer ved K1 end ved K2. K4 viser meget høje koncentrationer tæt på injektionsboring B1(1B) som forventet, og et gradvist fald hen imod frysesonden i stil med, hvad der kunne observeres ved LUC forsøgene.



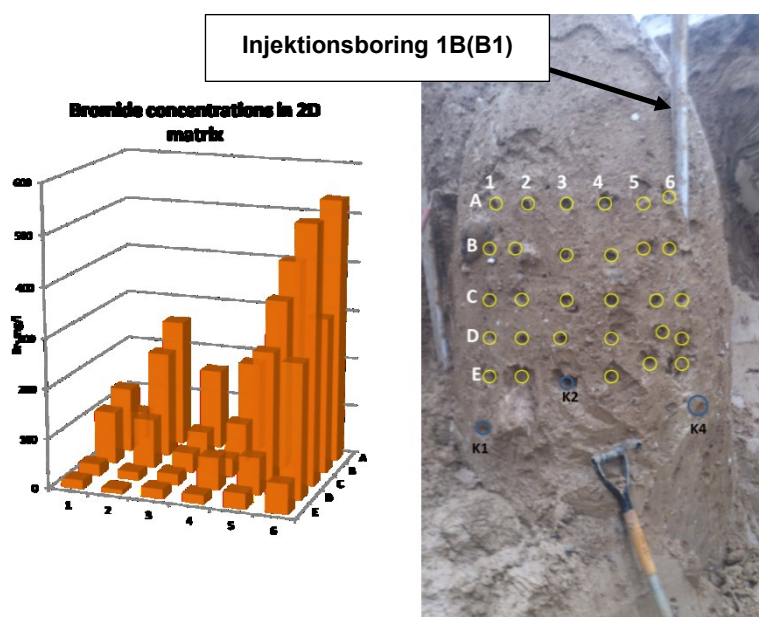
FIGUR 47: PRØVETAGNINGSPUNKTER OG KONCENTRATIONER AF BROMID LANGS TRACÉ T1 OG T2 I DEN IKKE-FROSNE DEL AF FORSØGSOMRÅDET PÅ EN LINJE MOD FRYSEBORINGEN FRA VANDER-BORING B3 (AFSTAND 90 CM FRA FRYSEBORING OG 30 CM FRA FRYSEFRONTEN) OG B4 (AFSTAND 120 CM FRA FRYSEBORING OG 60 CM FRA FRYSEFRONTEN).



FIGUR 48: KONCENTRATIONER AF BROMID LANGS TRACÉ K1, K2 OG K4 I DEN FROSNE DEL AF FORSØGSOMRÅDET. DE HØJE VÆRDIER I K4 AFSPEJLER PRØVETAGNINGSPUNKTERNES NÆRHED PÅ BORING A1(1A).

For at få et mere detaljeret billede af variationen i bromidkoncentration i den frosne blok blev der indsamlet i alt 30 prøver fra blokkens netop optøede overflade i et grid med en gennemsnits-afstand på 10 cm mellem prøverne (Fig. 49). Prøverne blev udtaget i kraftigt regnvejr og kan være fortyndede. Resultatet viser en noget blandet fordeling af bromid (Fig. 49) fra områder med meget høje koncentrationer tættest på boring 1B(B1) til områder med meget lave koncentrationer længst væk. Sammenfattende viser analyseresultaterne, at bromid spredes ud i matrix fra injektionsboringerne.

Der er også antydnet en tydelig frysestimuleret transport fra injektionsboringer hen imod frysefronten i boringerne 1B(B1), 1A(A1) og 2A(A2) på baggrund af vandforbruget i disse boringer. Imidlertid var det på grund af kraftig regn på udgravningstidspunktet ikke muligt at gennemføre hele prøvetagningsprogrammet, og indsamling af data fra to tracéer ved 2A(A2) og 1B(B1), hvor der er påvist en aktiv transport hen imod frysefronten blev ikke gennemført. Derudover gjorde nedbøren (90 mm i sidste halvdel af forsøgsperioden) det meget vanskeligt at tolke vandforbrugsdata og vurdere den rene effekt af frysestimuleret transport.



FIGUR 49: KONCENTRATIONER AF BROMID UDTAGET SYSTEMATISK I DEN FØRSTE OPTØEDE DEL AF OVERFLADEN. BEMÆRK VARIATIONEN I KONCENTRATIONEN TÆT PÅ VANDER-BORING OG LÆNGERE FRA.

4.2 Sammenfattende konklusioner på feltforsøg

Sammenfattende kan følgende konkluderes i forhold til feltforsøget:

1. Det er muligt at måle fryseradius ved forskellig temperatur/afstand under naturlige betingelser samt at etablere en kurve, der viser frysefrontens migrationshastighed ved specifikke temperaturintervaller og afstande fra frysesonden.
2. Det er "delvist" muligt at måle "sugeradius" under naturlige betingelser i to boringer (1A (A1) og 2A (A2)), og muligt for boring 1B (B1). Generelt synes injektionsboringer at kunne blive aktiveret i sandet moræneler på en afstand af ca. 40 cm, men der er også boringer, der ikke synes at blive aktiveret (fx boring 2B (B2)), selvom de sidder i samme afstand fra frysefronten som deres dublet. For andre boringer gælder det, at det er vanskeligt at tolke signalet ud fra vandforbruget alene. Så det er spørgsmålet, om der er specifikke kornstørrelser, der virker hæmmende for migration af frysefronten, eller om det handler om et teknisk problem, som f.eks. tilstoppede slidser i filterne.

3. Det var ikke muligt at dokumentere præcis samme form, størrelse og antal af fryse/tø-sprækker dannet i forbindelse med feltforsøget som ved laboratorieforsøgene, men samme radiære frysemønster som i LUC-forsøg er observeret tæt på frysesonden. Til gengæld er formen af den frosne blok meget symmetrisk og antyder, at mindre geologiske heterogeniteter ikke påvirker frysefronten i nævneværdig grad. De store variationer i vandforbruget indikerer derimod en tilsyneladende større geologisk heterogenitet, med mindre vandforbruget er påvirket af andre faktorer af mere teknisk karakter.

4. Vandforbruget under hele fryseforsøget er målt, men med en del usikkerhed, idet naturlig nedsivning/bidrag fra regn m.m. samt en hvis usikkerhed på målemetoden gør det vanskeligt at skelne mængden der danner is-linser fra mængden, der naturligt nedsiver. Resultatet åbner for flere spørgsmål og flere forsøg er påkrævet.

5. At måle stoftransport af tracer under naturlige betingelser:

Bromidkoncentrations profiler er opmålt og viser både advektiv og diffussiv transport ind i matrix. En noget variabel fordeling af tracer i moræneleren er observeret. Det kan der som sagt være flere mulige forklaringer på:

- Den kapillære sugkapacitet påvirkes måske af iboende sandlinser, der virker som hydrauliske barriere.
- Det kunstige vandspejl og mætningsgraden kan være heterogen og ligeledes påvirke den kapillære sugkapacitet.
- De store regnmængder og forsøgsområdets placering tæt på kanten af grusgraven kan påvirke infiltrationsmønsteret.
- Prøvetagnings-strategien/-metoden/-forholdene kan have påvirket prøvernes kvalitet.

Det anbefales således, at udføre flere fryseforsøg, hvor jorden består af en mere homogen, gerne mere fed, moræneler, og hvor der er naturligt vandmættede forhold, eller hvor vandmætningen i det mindste strækker sig over et større område. Det bør også tilstræbes, at området overdækkes, og at regnvand bortledes fra forsøgsområdet for at undgå fortynding af traceren/reaktanter. Endelig er det vigtigt, at prøvetagningsstrategien lægges på baggrund af en indgående analyse af både infiltrationsdata og frysedata, så de indsamlede data relaterer sig til det målbare vandforbrug skabt af frysningen.

6. "Frost heave" (opløft) ved frysning under naturlige betingelser omkring en fryseboring viser et relativt beskedent opløft (3-4 cm) i et lille område tæt på fryseboringen og en svag indsynkning (1-2 cm) visse steder rundt om opløft-området. Det er stadig et åbent spørgsmål, hvor stor påvirkningen er ved en dybere frysning med flere boringer.

5. Sammenfattende resultater

Overordnet viser de indledende resultater fra de udførte laboratorie- og feltundersøgelser, at det er muligt at skabe et tæt netværk af fryse-/tø-sprækker ved at fryse ler langsomt under vandmættede forhold. Og endnu vigtigere viser forsøgene, hvordan væske ved frysning transporteres ekstremt hurtigt ind i ler på grund af lerens kapillære sugeseffekt og udtørring under dannelsen af is-linser. Forsøgene dokumenterer, at reaktive stoffer kan iblandes væsken og på den måde fordeles gennem matrix. Generelt er følgende resultater opnået i forsøgene:

Sammenfattende resultater:

- Forsøgene har påvist, at det i laboratoriet samt omkring fryseboringer *in situ* er muligt at skabe et tæt sprække-netværk, der i udseende matcher naturlige fryse/tø-sprækker, som de kan observeres i udgravninger og i blotninger ved f.eks. kystkliner. Det har endnu ikke været muligt at teste, om disse sprækkesystemer har sammenlignelige bulk-hydrauliske egenskaber med naturlige fryse-/tø-sprækkezoner, da den målte permeabilitet i små kerneprøver viste sig at være stærkt påvirket af målemetoden, herunder især omslutningstrykket.
- Den vigtigste parameter for dannelse af disse sprækker er adgang til vand, samtidig med at der genereres en retningsbestemt migrerende frysefront ved langsom frysning.
- Sprækkerne udvikles parallelt med frysefronten med indbyrdes afstande på 2-5 mm.
- En vigtig opdagelse er det faktum, at der ved langsom frysning dannes markante is-linser i sprækkerne, og at der samtidig opstår en markant udtørring af matrix tæt på disse. Denne udtørring aktiverer de kapillære kræfter, så fugt og væske trækkes hen mod frysefronten. Radius af denne sugeseffekt overstiger 30-40 cm, og yderligere forsøg bør foretages for at afdække den maximale sugeradius i forskellige lertyper.
- Ligeledes er det påvist, at transporten foregår på væskeform, og at det er muligt, ved hjælp af tilsætning af stoffer til vandet, at fordele disse stoffer jævnt i både optøet og frossen ler-matrix med en hastighed, der er flere størrelsesordner hurtigere end diffusiv transport.
- Der er således på den baggrund udviklet en metode til effektivt at fordele stoffer i moræner/ler ved hjælp af frysestimuleret transport.
- Metoderne er inkorporeret i en opstilling baseret på frysning og injektion af stoffer i borer og afprøvet både under kontrollerede forhold i et laboratorium og *in situ* på en feltlokalitet ved Kallerup Grusgrav ved Hedehusene.
- Resultaterne viser, at det er muligt at overføre erfaringerne fra laboratorieforsøgene til en feltlokalitet med moræner overlejrende et udbredt grundvandsmagasin og skabe veludviklede fryse/tø-sprækker i moræner samtidig med, at der trækkes væske fra injektionsboringer hen mod frysefronten.
- Metoden kræver vandmættede forhold for at fordele eventuelle reaktanter homogent i jorden. I den umættede zone er det derfor nødvendigt at vandmætte jorden, inden der fryses eller som et led i selve fryseprocessen.
- Det skal understreges, at sandet moræner og lokale geologiske inhomogeniteter påvirker den initiale vandmætning, idet en væsentlig vandmængde kan sive væk fra forsøgsfeltet.
- Det anbefales at foretage flere forsøg på lokaliteter, der er mindre sandede og evt. også i den naturligt mættede zone, for at se, hvorledes metoden præsterer under andre og forskellige geologiske forhold.
- Det anbefales ligeledes, at analysere fryse/infiltrations data inden prøvetagningsstrategien lægges samt at sikre optimale forhold under udgravning og prøvetagning.
- Endelig er det meget vigtigt at monitorere alle nedbørshændelser under fryseforsøget og evt. også at overdække området og/eller lede regnvand væk fra forsøgsområdet for at undgå fortynding af infiltrerede reaktanter.

6. Diskussion og anbefalinger

Der vil fremadrettet blive arbejdet med at udføre yderligere fryseforsøg i stil med opstillingen, der blev anvendt ved Kallerup. Derudover tænkes der udført yderligere laboratorieforsøg med forskellige typer reaktanter, så transporten af disse i forskellige lertyper kan vurderes. Endelig ønskes udført et storskala pilotforsøg med oprensning af forurening på en forurennet grund, for at dokumentere effekten af metoden. Som supplement til disse tekniske undersøgelser skal der foretages en grundig analyse og modning af projektet med henblik på kommercialisering af metoden. Nogle vigtige punkter frem mod gennemførelsen af disse forsøg er diskuteret nedenfor.

6.1 Overordnet vandmætning kontra kontrolleret stoftransport ind i matrix

6.1.1 Diskussion

Et af de store spørgsmål ved feltforsøgene var at estimere, hvor stor en del af den infiltrerede vandmængde der blev trukket hen imod frysefronten, og hvor stor en del der infiltrerede til omgivelserne via geologiske heterogeniteter som sandlinser og sprækker. Nogle borer var væsentligt mere hydraulisk aktive end andre. Eftersom der i forsøgsopstillingen var kalkuleret med dubletter (4 x 2) af borer med samme placering, burde det være muligt direkte at sammenligne effekten af geologisk heterogenitet som en funktion af forskellen på infiltrationsraten på to ens placerede borer. Imidlertid viste de indsamlede data en meget stor variation i infiltrationen fra dag til dag. Variationen kan til dels skyldes geologisk heterogenitet, men især også nedbørsmængderne spillede en vigtig rolle, ligesom infiltrationsmetoden med tilførsel af vand i pulser viste sig diskutabel i forhold til at monitorere et helt nøjagtigt vandforbrug. Endelig kan den præcise placering af borerne i forhold til frysefronten variere med dybden, idet det kan være vanskeligt at placere borerne 100 % nøjagtigt i dybden. Afstanden til frysefronten kan således godt variere mere end 10 cm i 3 meters dybde.

6.1.2 Anbefalinger

For at minimere usikkerheden på de tekniske parametre bør det overvejes at forbedre teknikken på nogle kritiske punkter. Det anbefales således, at overveje en bedre teknisk løsning, der kan opretholde et konstant vandspejl i en boring og samtidig monitorere vandforbruget med en nøjagtighed på 1 dL.

Samtidig er det vigtigt, at infiltrationsrørene er ensartet opslidset og har god kontakt til morænen. Det kunne måske være en fordel at grus-kaste omkring infiltrationsboringerne for at sikre en optimal infiltration langs hele filterintervallet.

Endelig er det essentielt at monitorere baggrundsnedbøren i selve forsøgsområdet, da selv små lokale regnbyger kan have indflydelse på infiltrationsraten.

I forhold til at styre mængden af reaktanter, der tilføres matrix, anbefales det at lave en opdelt infiltration, så man eventuelt venter med at tilføre reaktanterne, indtil boringen aktiveres hydraulisk af fryseprocessen for derved at minimere infiltration andre steder hen. Det skal dog tilføjes, at reaktanter, der følger naturlige heterogeniteter/makroporer såsom sandlinser og større sprækker, må formodes at følge samme veje som eventuel nedsivende forurening, og derved også den vej rundt kan bidrage til nedbrydning af forureningen.

6.2 Lers sugeradius, stofkoncentrationer og placering af fryseboringer/infiltrationsboringer

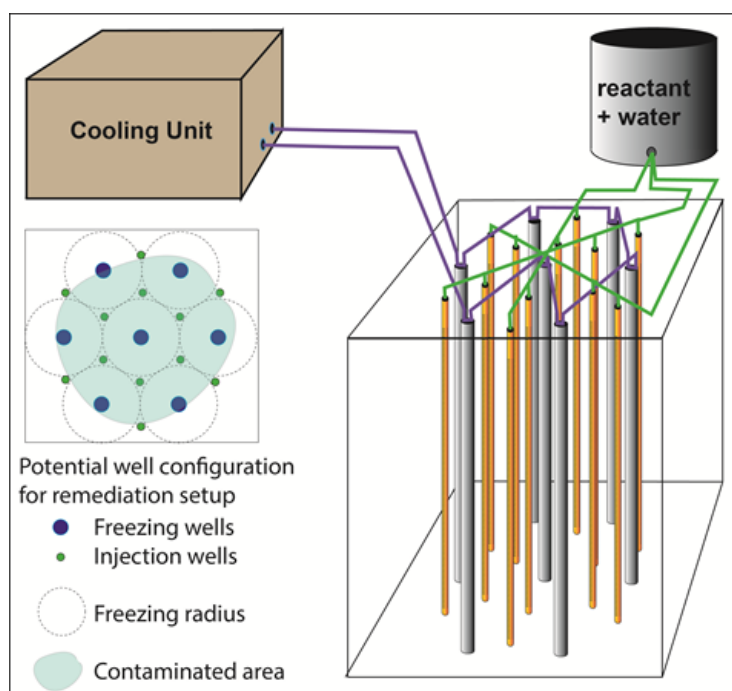
6.2.1 Diskussion

Et andet meget vigtigt spørgsmål er vurdering af den effektive frysestimulerede "sugeradius" i forskellige lertyper, da det er en afgørende parameter at forholde sig til i forhold til, hvor tæt infiltrationsboringerne bør placeres på fryseboringerne. Indtil videre kan det kun konkluderes, at den maksimale sugeradius for sandet moræneler er ca. 40 cm, men Sous Vide forsøgene antyder, at denne radius kan være væsentligt større i mere fed moræneler og måske helt anderledes i issø-ler. Dette spørgsmål kræver, at der laves en modellering af transportkapacitet som en funktion af afstand til frysefronten/frysefrontens migrationshastighed og koncentration/fordeling af reaktanter i leret efter fryseforsøget. Dette kræver, at der bliver foretaget flere forsøg i laboratoriet med større prøver, samt nogle få udvalgte feltforsøg.

6.2.2 Anbefalinger

I forhold til de videre undersøgelser bør der lægges vægt på at forbedre infiltrationsstrategien, dels ved at optimere placeringen af fryseboringer i forhold til potentiel fryseradius og dels ved at optimere den initiale vandmætningsprocedure – herunder eventuelt at foretage vandmætningen med vand tilsat reaktanter.

I Fig. 50 ses en potentiel opstilling med 7 fryseboringer med en indbyrdes afstand på ca. 1-2 meter, og et grid der tillader infiltration af vand/reaktanter til hver fryseboring fra 6 infiltrationsboringer. Man kan eventuelt vurdere, om det er muligt at skabe en mere fladeorienteret frysefront frem for cirkulært omkring en boring, og man kan teste forskellige konfigurationer af injektionsboringer for at se, hvilke der giver den mest effektive fordeling af reaktanter i matrix i forhold til suge radius. Det kan også overvejes at vandmætte jorden og monitere infiltrationen i en periode op til fryseforsøget starter, så det er nemmere at adskille frysestimuleret "sugeeffekt" fra naturlig infiltration.



FIGUR 50: ALTERNATIV KONFIGURATION AF FRYSEBORINGER OG INJEKTIONSBORINGER I PILOTFORSØG PÅ FORURENET GRUND.

7. Referencer

- Anderson, D.M., Tice AR., 1970. Predicting unfrozen water content in frozen soils from surface area measurements: 12-18 in Highway Research Board, *Frost action in soils*: National Academy of Science – Natl. Acad. Eng., Highway Research Record. 393, pp 88.
- Christiansen, C.M., Damgaard, I., Broholm, M.M., Kessler, T., Klint, K.E., Nilsson, B. & Bjerg, P.L. 2010: Comparison of Delivery Methods for Enhanced In Situ Remediation in Clay Till. Ground Water Monitoring & Remediation, vol. 30 pp 107-122.
- Coutard, JP., Mûcher, HJ., 1985. Deformation of laminated silt loam due to repeated freezing and thawing cycles. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 309-319.
- French HM., 1976: *The periglacial environment*. Longmont, London, 309.
- Gravesen P., Balling I.M., Vignoli G. Klint K.E.S. Brûsch W., Nilsson B., Larsen C.L., Juhler R. & Rosenbom A.E. 2014. Vurdering af mulighederne for udpegning af pesticidfølsomme lerområder (SFO-ler) på grundlag af eksisterende data. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2014/2.
- Jørgensen P.R, McKay L.D & Spliid N.H., 1998: Evaluation of chloride and pesticide transport in a fractured clayey till using large undisturbed columns and numerical modeling. *Water Resources Research*, Vol. 34 no. 4 pp 539-553.
- Klint. K.E.S., and Gravesen P., 1999: Fractures and Biopores in Weichselian Clayey Till Aquitards at Flakkebjerg, Denmark. *Nordic Hydrology*. Vol. 30, No, 4/5, pp. 267-284.
- Klint, KES., 2001. Fractures in Glacigene Diamict Deposits; Origin and Distribution. Ph.D-thesis. *Geological Survey of Denmark and Greenland., Report*, 129, 40.
- Klint, KES., Abildtrup, CA., Gravesen, P., Jakobsen, PR., Vosgerau, H. 2001. Sprækkers op-rindelse og udbredelse i moræner i Danmark. *Vand og Jord* 8, 3, 111-119.
- Lachenbruch, AH., 1961. Depth and spacing of tension cracks. *Journal of Geophysical Research*, 66, 4273-4292.
- Klint K.E.S., Richardt N. and Krüger J. 2010: Evidence for subglacial deformation and deposition during a complete advance-stagnation cycle of Kötluþjökull, Iceland – a case study. In *The Myrdalsjökull Ice Cap, Iceland*, 13, Glacial Processes, Sediments and Landforms on an Active Volcano. Ed. Schomacker A, Johannes Krüger J, Kjaer K. pp 145-159.
- Lachenbruch, AH., 1962. Mechanics of Thermal Contraction Cracks and Ice-wedge Polygons in Permafrost, *Geological Society of America*, Special paper, 70, 69.
- Murton, JB., Worsley, P., Godzik J., 2000. Sand veins in cold aeolian environments. *Quaternary Science Reviews* 19. 899-922.
- Othman, MA., Benson, CH., 1993. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 30; 2, 236-246.

Kolstrup, E., 1987. Frost wedge casts in western Jutland and their possible implications for European periglacial research. *Zeitschrift für Geomorphologie*. N.F.. 31. 449-262.

Rempel A.A., Frost 2010. Frost heave. *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 200, 1122-1128.

Singh, K., Niven, R.K. (2013) "Non-aqueous phase liquid spills in freezing and thawing soils: critical analysis of pore-scale processes", *Critical. Rev. Environ. Sci. Eng.* 43: 551-597.

Warden, G., Perrin, B. (2008) "Numerical modeling of the behavior of consolidated porous media exposed to frost action", *Construction & Building Materials* 22: 600-608.

Viklander P., & Eigenbrod D., (2000) Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing. *Cold region. Science and Technology*. 151-162.

Rempel A.W., (2011) Microscopic and environmental controls on the spacing and thickness of segregated ice lenses. *Special Issue on Periglacial Processes, Landforms, and Environments in Honor of Link Washburn Quaternary Research* Vol. 75. 2. Pp. 316–324.

Singh, K., Niven, R.K. (2013) "Non-aqueous phase liquid spills in freezing and thawing soils: critical analysis of pore-scale processes", *Critical. Rev. Environ. Sci. Eng.* 43: 551-597.

Tsytoich, NA., 1958. Comments: 92-3 in *Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, 4th London Proc. 3. 291.

Washburn, AL., 1979. *Geocryology, A survey of periglacial processes and environments*. Quaternary research centre, University of Washinton. by Edward Arnold (publishers) Ltd.

Williams P.J. & Smith M.W., 1991; *The frozen earth: Fundamentals of Geocryology* Cambridge University Press p. 328.

Cryoremediering

Cryoremediering er en ny teknologi, der udnytter fryseprocesser til at opnå effektiv kontakt til forurening i lerjord. I nærværende rapport beskrives en række indledende forsøg udført på laboratorieskala og feltskala.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk