

KARAKTERISERING OG STIMULERING AF MORÆNELER/LERJORD

Seniorforsker, ph.d. Knud Erik Klint, GEUS
Seniorforsker Bertel Nilsson, GEUS

ATV JORD OG GRUNDVAND

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011

RESUMÉ

GEUS har i perioden 2004-2008 gennemført Projektet STRESOIL under EU's 6 rammeprogram /1/2/. Projektet havde som overordnet formål at teste fraktureringsmetoder og måle effekten af *in situ* oprensning af organisk forurening i den umættede del af opsprækket moræneler. I 2008 indgik GEUS samarbejde om et nyt forskningsprojekt REMTEC finansieret af DSF og koordineret af DTU, hvor effekten af tre stimuleringsmetoder testes i forbindelse med oprensning af chlorerede opløsningsmidler fra mættet moræneler. /3/ Sideløbende med stimulering og oprensningsforsøg er der udviklet simple metoder til karakterisering af moræneler, herunder implementering af GISværktøjer for at kunne vurdere geologisk og hydraulisk variabilitet i områder dækket af moræneler.

BAGGRUND

Opsprækkede lavpermeable glaciale sedimenter dækker store dele det nordlige og centrale Europa og udgør et problem i relation til spredningen af forurenende stoffer gennem umættet zone til grundvandet gennem naturlige sprækker og makroporer. Forsøg på at rense organiske forureninger op fra disse opsprækkede sedimenter er forbundet med store udfordringer. Det er velkendt at de organiske forureningers strømning primært følger de naturlige vertikale sprække og makroporesystemer og derfor ikke særlig effektivt blive indfanget af filtre installeret i vertikale borer.

Forsøg med stimulering af lavpermeable bjergarter for at ændre på de bulkhydrauliske egenskaber og accelerere oprensnings metoder har således været i gang i flere år, både i Europa og især i USA og Canada. Metoderne strækker sig fra mere drastiske forsøg som blasting og mixing til mere skånsomme metoder som pneumatisk og hydraulisk frakturering. Dette foregår ved at lave horisontale sandfyldte sprækker der forbinder de eksisterende vertikale naturlige sprækkesystemer med hinanden og derved forøger virkningsgraden af oprensningsmetoderne væsentlig, og på den måde optimerer eksisterende *in situ* oprensningsteknologier af punktkildeforureninger. Fordelene er åbenlyse i forhold til traditionel bortgravning af forurenede jord idet især forureninger i byområder kan være vanskeligt tilgængelige og meget omkostningstunge at håndtere. De fleste "In situ" oprensningsteknologier har imidlertid vist sig at have en begrænset effekt i lavpermeable sedimenter især moræneler der udgør mere end 40 % af Danmarks overflade areal. Der er derfor et åbenbart behov for udvikling af metoder til at effektivisere teknologierne.

FORMÅL

Kravet i REMTEC-projektet var at skabe horisontale sprækker med en lille indbyrdes afstand, helst ned til 20 cm. Metoderne omfattede pneumatisk/hydraulisk frakturering og geo-probe-injection, der basalt set også er en hydraulisk frakturerings metode. Metoderne viste sig kun delvist effektive, idet især de dybtliggende frakturer var vanskelige at styre. Konklusionen var at den bedste effekt blev opnået med Geo-proben når det drejede sig om at kontrollere fordelingen af mange tætliggende sprækker. Det viste sig også at nogle af de hydrauliske sandfyldte sprækker opførte sig noget anderledes end de sprækker der blev installeret under STRESOIL projektet.

Da samme metoder blev benyttet under de to forsøg må årsagen søges i de forskellige geologiske/geotekniske forhold på de to forsøgslokaliteter. Det leder igen spørgsmålet hen på

hvilke typer lerjorde, der er velegnede til stimulering og hvilke typer hvor metoden er mindre effektiv.

Nærværende artikel har derfor tre formål

1. Præsenterer en systematisk metode til at klassificere moræneler i forskellige typer på baggrund af texturelle, geologiske og geotekniske egenskaber.
2. Redegøre for hvordan de forskellige morænelerstyper er fordelt i det danske istidslandskab.
3. At vurdere hvilke typer moræneler der potentielt er mest velegnede til udførelse af kunstig frakturering.

KLASSIFIKATION AF MORÆNELER

Termen moræneler benyttes bredt om lerede dårligt sorterede sedimenter, der er aflejret i et glacialt miljø. Der findes imidlertid mange forskellige glaciale miljøer hvorunder moræneler kan aflejres. For at kunne lave en yderligere opdeling i specielle aflejningsmiljøer og processer relateret til glaciale aflejningsprocesser benyttes her den engelske procesrelaterede term "till" i stedet for moræneler.

Till er sedimenter direkte afsat fra en gletscher (iskontaktsediment), enten som en basal till under gletscheren som *deformation till*, *lodgement-till* eller "*subglacial melt-out-till*" (bundmoræne), eller oven på isen (supraglacialt), ved uds melting og nedglidning fra selve isen som *meltout* eller *flow-till* (flydemoræne).

I forbindelse med analyse af forekomsten af naturlige sprækker i moræneler skelner man ikke imellem de forskellige typer basale tills, men da deres interne deformationsmekanisme er afgørende for dannelse af naturlige sprækker, skelnes der derfor to overordnede typer basale tills: A-type der er deformeret blødt "ductile" og B-type der er deformeret sprødt "Brittle" (tabel 1). Forsøg med kunstig frakturering har vist at især forekomsten af naturlige sprækker har betydning for dannelse af kunstige sprækker. Derfor er det vigtigt at skelne imellem opsprækkede og massive tills.

Det er vigtigt for tolkningen af naturlige sprækkers oprindelse, at belyse om det undersøgte moræneler er afsat foran eller under en gletscher, samt i hvilken retning gletscheren bevægede sig. De geologiske undersøgelser omfatter bjergartsbeskrivelse og kinetostratigrafiske undersøgelser/5/, der indbefatter beskrivelse af bjergarternes kornstørrelsesvariation, tekstur, sedimentære strukturer, farve, kalkindhold samt måling og beskrivelse af deformationer, skurestriber, fabrik m.m. Kombineret med geotekniske undersøgelser og geomorfologisk analyse kan aflejningsmiljøet tolkes og den geologiske/geotekniske historie rekonstrueres.

I tabel 1 præsenteres en opdeling af moræneler i till-typer der er inddelt efter deres geologiske variabilitet og geo-tekniske egenskaber.

FORDELING AF MORÆNELERSTYPER I GLACIALE LANDSKABS-TYPER

Sammenhængen imellem till-typer og geomorfologi er essentiel idet specielt sub-glaciale (belastede) landskabstyper har vist sig ofte at indeholde relativt systematisk opsprækket massivt moræneler. Randglaciale landskabstyper er ofte tektonisk forstyrrede og dermed stærkt heterogene, hvorimod supra-glaciale landskabsformer som f.eks. dødislandskaber ofte er domineret af svagt konsoliderede flow tills der overlejrer underliggende landskabselementer som hedesletter, moræneflader eller randmoræner. I øjeblikket er det digitale geomorfo-

logiske kort over Danmark under udarbejdelse på GEUS. Ved hjælp af dette kort kan landskabet inddeles i områder præget af subglacial, rand-glacial eller proglaciale processer (tabel 2). De sub-glaciale deformationsmekanismer påvirker kun sediment under selve gletscheren, og relaterede sprækker er derfor kun til stede i sediment af samme eller ældre alder end isfremstødet. Sprækker, der overpræger eller genanvender ældre sprækker i f.eks. en lodgement till, kan derfor antages at være yngre og af "ikke glacial oprindelse" d.v.s. fryse/tø, udtørring eller neo-tektonisk oprindelse. Dette understreger betydningen af at kende et sediments alder og dannelseshistorie når man skal klassificere moræneler. Det har også vist sig at ikke kun den geomorfologiske ramme, men også de underliggende lag synes at have indflydelse på de geotekniske forhold og dermed fordelingen af naturlige sprækker i moræneler.

Det polymorfologiske koncept

I et forsøg på at kombinere og sammenligne nogle af ovenstående parametre er der blevet udarbejdet en ny type tematisk kort med det formål at vurdere graden af opsprækning/geologisk heterogenitet i områder dækket af ler. Kortet benævnes *Det Polymorfologiske Kort* og tager udgangspunkt i det geomorfologiske kort, men en tolkning af underliggende landskabsformer er indarbejdet i kortet (fig. 1), der dermed kan sammenlignes med bl.a. ler tykkelse og dybde til redox grænse for at udpege områder med potentielt ensartet grad af heterogenitet og opsprækning.

Kortet kombinerer i hele eller dele af sit dækningsområde

1. geologisk information fra JUPITER-databasen, kystklinter og grusgrave,
2. sand/ler tykkelse under øverste moræneler (GIS-søgninger),
3. det geologiske kort (jordartsskortet)
4. det digitale geomorfologiske kort
5. den nye detaljerede højdemodel,
6. Prækvartæroverfladens topografi og geologi, samt
7. ekspertviden indhentet fra den systematiske kortlægning, råstofundersøgelser, geofysik og diverse udgravninger til kortlægning af sprække- og makropore fordelingen.

Kortet benævnes "det polymorfologiske kort" fordi det i modsætning til et traditionelt geomorfologisk kort også inddrager underliggende landskabsformer (Figur 1).

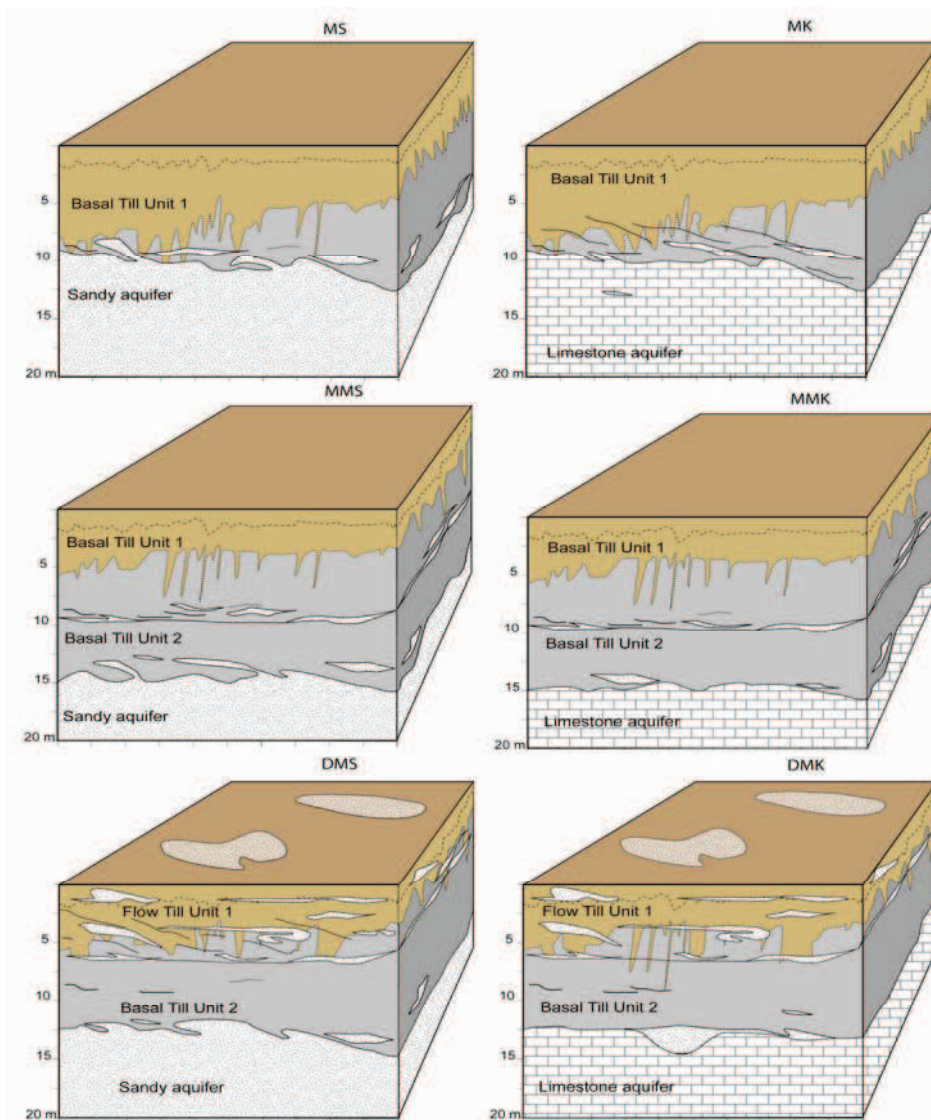
De primære polymorfologiske landskabsformer (domineret af ler) er moræneflader og dødislandskaber samt randmoræner. De kan kombineres på mange måder og opdeles yderligere i forskellige polymorfologiske landskabskonfigurationer herefter benævnt PM-typer, hvoraf de mest almindelige er:

1. Moræneflade over dødislandskab MD,
2. Moræneflade over randmoræne MR,
3. Moræneflade over smeltevandsslette MS,
4. Moræneflade over kalkoverflade MK,
5. Moræneflade over issøler eller moræneler ML/M,
6. Dødislandskab over moræneflade DM,
7. Dødislandskab over randmoræne DR,
8. Dødislandskab over morænelandskab over smeltevandsslette DMS,
9. Dødislandskab over morænelandskab over randmoræne DMR, og
10. Ikke overskredne randmoræner R.

Det antages, at de forskellige polymorfologiske typer også har karakteristiske hydrauliske egenskaber, som i praksis dikteres af de underliggende sedimenters skønnede dræningsevner.

WEB baseret site karakteriserings værktøj

Et simpelt web baseret till klassifikationssystem er under udarbejdelse. Det fungerer som et "multiple choice" værktøj hvor forskellige egenskaber kan vælges og hvor output gerne skulle være en konceptuel geologisk model figur 1.



Figur 1 Konceptuelle geologiske modeller repræsenterende forskellige PM-konfigurationer.

Step 1: **Till Klassification af de enkelte enheder.** (baseret på GIS-data, feltopmålinger, boredata.

Input data er: Klast fabrik, skurestriber, deformationsstrukturer, tekstur, konsolidering, geomorfologisk ramme.

Out-put : *till type*

Step 2a: **Vurdering af sprækkefordeling i hver enkelt enhed.** (baseret på boredata)

Input data er: Till type (fra step 1), till/ler tykkelse, dybde til redoxgrænse, sediment/bjergartstype i første lag under till, Dybde til grundvandsspejl (primært og sekundært). Referer til "best fit PM-geologisk model se figur 1"

Output: *Potentiel sprækkefordeling i enkelt till enhed*

Step 2b: **Vurdering af sandlinsefordeling i hver enkelt enhed** (baseret på bore data)

Input data er: till type fra step1, sandlinsefrekvens. kumulativ tykkelse af sandlinser.

Step 3: Hydraulisk karakterisering baseret sprække fordeling og sandlinsefordeling.

Step 4: Kalibrering af model baseret på hydrauliske test og evt. fund af forurening m.m.

Step 5: Evaluering af data, definerer af yderligere vidensbehov, anbefalinger til yderligere undersøgelser (flere borer, evt. udgravning, hydrauliske test m.m.), herefter gentagelse af step 1-4 indtil optimal model er opnået.

Step 6 Formulering af stimulering og oprensings strategi.

HVILKE TILL TYPER ER VELEGNED TIL STIMULERING?

Forsøgene med hydraulisk frakturering og injektion af sandfyldte sprækker i Polen under STRESOIL projektet viste at ud af de 21 sprækker der blev installeret i tre forskellige till typer var der 5 sprækker der mislykkedes. Dette skyldtes til dels menneskeskabte årsager såsom gamle borer. Men i 4 tilfælde skød sprækkerne direkte til overfladen i stedet for at lave en horisontal "pandekage" som det var planen. Den geologiske lagfølge i Polen bestod af en basal till type-A (blød uden sprækker) overlejrende smeltevandssand. Over den kom dernæst en basal till type B (velkonsolideret opsprækket), dernæst en dårlig konsolideret flow till og øverst en dårlig konsolideret drop till (sø-aflejring). De hydrauliske sprækker i den nedre bløde type A basale till dannede ikke særlig gode sprækker, hvorimod de hydrauliske sprækker i den hårde opsprækkede type B basale till var flod udviklede. En karakteristisk egenskab var at de hydrauliske sprækker fulgte de eksisterende sub-horisontale sprækker, hvorimod de hydrauliske sprækker i de øvre bløde flow og drop till synes at være styret af fysiske love mere end geologien. Her var både sandlinser og andre inhomogeniteter gennemsat af sprækkerne der ikke synes påvirket af de strukturelle forhold.

Ved sprækkeforsøgene i Vadsby blev der injekteret i alt 6 hydrauliske sandsprækker og et noget større antal hydrauliske sprækker i geo-probe borerne. Her var de hydrauliske sprækker i den øvre opsprækkede basale till type B generelt pænt udviklet ligesom i Polen. De hydrauliske sprækker der lå i den bløde type A basale till under den hårde till blev derimod dårligere udviklet og en enkelt sprække skød op til overfladen.

Årsagen til at nogle sprækker vælger at skyde direkte op til overfladen i stedet for at danne subhorisontale sprækker skal måske søges i flere forskellige forklaringer.

1. Dybden har tilsyneladende betydning for sprækkeformen idet især dybtliggende hydrauliske sprækker synes at skyde oftere opad end, Den kritiske dybde synes at ligge under 5-6 meter i moræneler.

2. Bløde type A basal tills er måske ikke lige så velegnede til frakturering som velkonsoliderede tills.
3. Endelig kan konfigurationen af flere lag med velkonsoliderede og dårligt konsoliderede egenskaber måske også have en betydning. Det virker umiddelbart som om konfigurationen med et velkonsolideret øvre lag og et dårligt konsolideret (blødt) nedre lag vanskeliggør dannelsen af veldefinerede pandkageformede hydrauliske sprækker i den bløde moræneler.

KONKLUSION

Der er mange udfordringer i forbindelse med stimulering af moræneler. Generelt må det konkluderes at især dybden og de geotekniske egenskaber synes at være afgørende for om det er muligt at skabe velegnede sub-horisontale sprækker.

En ny metode til opdeling af glaciale landskaber i mindre områder med ensartet geologisk variabilitet er under udvikling og kombineret med simple webbaserede klassifikationsmetoder for moræneler vil metoden kunne udgøre et vigtigt skridt i retning mod en ny forbedret systematisk metode til geologisk karakterisering af punktkildeforureninger såvel som fladekilde forureninger.

REFERENCER

/1/ Klint, K.E., Kasela, T., Nilsson, B. & Haessler, F. 2005: Site description, geological settings and core oil sampling at the Kluczewo Airport, Poland. Deliverable report of D2 and D3 to EU in relation to Contract no. SSPI-CT-2003-004017. STRESOIL. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport **2005/74**, 24 pp.

/2/ Nilsson, B., Brøker, T., Slack, B., Kasela, T. & Klint, K.E. 2006: Installation of on-site stimulation set-ups within the Central Refuelling Station at the Kluczewo Airfield, Poland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport **2006/52**, 65 pp.

/3/ 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.

/4/ Berthelsen, A., 1978. The methodology of kineto-stratigraphy as applied to glacial geology. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 27, Special Issue, 25–38.

Dette Projekt er en del af REMTEC-projektet finansieret af DSF

Classification of Fine-grained Diamict Deposits		
Till type	Deposition process	Special characteristics
Basal till Type-A Type-B	Basal tills are formed as a result of two processes: by plastering and deformation of glacial debris from the sliding base of a moving glacier (lodgement process), and as a result of incorporation into the till of the substratum under the sliding base of a moving glacier (pure deformation). Most basal tills are formed by a combination of these two processes. They may be separated by the mode of deformation as: A-type (ductile) and B-type (brittle) basal tills.	Generally massive, ice scoured stoss-lee side blocks. Boulder pavements. Consist of exotic material mixed with locally derived sediment. A-type (ductile deformation). Generally low to medium strength till, massive matrix with occasional water-escape structures and intrusion of hydro-fractures into the subsurface. Medium/strong fabric. Often drag folding or slump structures along base. (Poorly drained till) B-type (brittle deformation): High strength till, massive matrix, generally strong clast fabric. Often low dipping fissile shear zones, systematic fractured or faulted. (well-drained till)
Glacitectorite	A glacitectorite is a glacial breccia formed as a result of basal squeezing and crushing of the substratum by a moving glacier.	Medium-high strength, highly deformed (brecciated) transition towards underlying substratum primarily consisting of the still recognisable basement material mixed with till.
Sub glacial melt-out till	Melt-out till is deposited by a slow release of glacial debris from the sole of a stagnant glacier by sub glacial melting.	Low strength. Very strong clast fabric, layers draped over clasts. Clasts are less rounded than in the lodgement till. Often embedded rafts of substratum. Occasional isoclinal folds of sandy/silty bands.
Supra glacial Flow till	Flow-tills derived from any glacial material that is released from glacier ice or from freshly deposited till and which is redeposited by gravitational processes.	Low strength. Varied clast fabric, sometimes layered with inclusions of glaciofluvial sediments. Random orientation of fold-axes fractures and faults. Sometimes stacked sequences of debris-flows.
Supra glacial melt-out till	Derived from any glacial material that is slowly released from glacier-ice without being redeposited	Low strength. Sorted and unsorted sediments. Small basins with primary sedimentary structures, sometimes with small-scale faulting from collapse after melting of buried ice.
Waterlain diamicts (drop-till)	Glaciers and icebergs floating in lakes or oceans will release drop material to the sea or lake-floor sediments, and sometimes deform them directly by grounding. Occasional turbidites occur.	Glaciolacustrine, usually clay-rich, thick, sometimes laminated matrix mixed with drop material. Random fabric, occasional randomly deformed sand bodies/lenses. Glacio-marine: as above but with marine fauna, foraminifer, shells etc.

Tabel 1. Klassifikation af moræneler og de enkelte tills fysiske egenskaber (klint 2001).

