

DANMARKS LUMSKE LER



Forfatteren

Thomas Rye Simonsen er uddannet civilingeniør i Teknisk Geologi fra Aarhus Universitet i 2008 og har siden arbejdet hos rådgivningsfirmaet Geo, som er specialister i geoteknik. I perioden 2015 – 2018 laver han en erhvervs-ph.d. i samarbejde med Geo og Aarhus Universitet. Her forsker han i, hvordan plastisk ler opfører sig under vores bygninger. Projektet skal gøre ingeniører og geoteknikere i stand til bedre at forudsige lerets opførsel i forbindelse med byggeri og danne grundlag for nye og mere præcise beregningsmetoder med henblik på optimering af fremtidige funderingsløsninger for byggerier på plastisk ler. Institut for Ingeniørvidenskab, Aarhus Universitet thrs@eng.au.dk

I undergrunden under Danmark findes plastisk ler – en jordtype, som har udfordret ingeniører i årtier. Nu skal et nyt forskningsprojekt gøre os klogere på lerets opførsel, så skader på bygninger og anlæg bedre kan undgås i fremtiden.

De fleste af os opfatter det som en selvfølge, at vores bygninger bliver stående der, hvor de er opført og ikke pludselig braser sammen eller slår store revner på grund af bevægelser i undergrunden. Det skyldes, at vi i Danmark rent naturgeografisk lever i et fredsommeligt område. Vi oplever ikke markante jordskælv eller vulkanudbrud, vi har ingen store floder, som kan forårsage voldsomme oversvømmelser, og grundet vores relativt flade

terræn har vi ingen altødelæggende jordskred. Desuden har vi dygtige ingeniører og lang tradition for god byggeskik, så det er sjældent, at vi ser alvorlige skader på bygninger, broer og veje, som skyldes undergrunden – heldigvis.

Men den danske undergrund kan nu sagtens byde ingeniørerne på udfordringer. I 1940'erne måtte ingeniørerne således se måbende til, da Skive Museum hævede sig 10 centimeter i løbet af få år efter op-

førelsen. Og for nylig har Banedanmark betalt over 100 millioner kr. for at redde den gamle Lillebæltsbro, som er sunket 75 centimeter siden 1935. Årsagen til problemerne for disse bygningsværker – og mange andre i Danmark – er en særlig jordtype, som er vidt udbredt i den danske undergrund, nemlig plastisk ler. Plastisk ler er nok Danmarks mest komplicerede jordtype, som sætter sit umiskendelige præg på landskabet mange steder og sætter grå hår i hovedet på bygningsingeniører.

Kvældetryk

Kvældetryk er et udtryk for den kraft, som leret kan udvide sig med. Kvældetrykket måles i laboratoriet og svarer til den vægt, der skal påføres leret, så det ikke udvider sig. Lerprøven, der måles på, er cirka 6 cm i diameter og 2 cm i højden og monteres i en stålring i et apparat som vist på fotoet. Når der tilsættes vand til prøven, vil lerminerallerne indbygge vandmolekylerne i deres struktur, og lerprøven vil derfor udvide sig. Apparatet måler den kraft, som leret udvider sig med, og det er lerets kvældetryk.



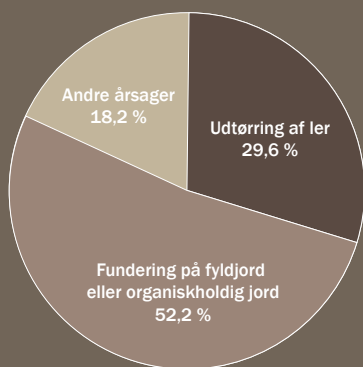
En lerprøve samt et apparat til måling af kvældetryk.



Når kvældetrykket er bestemt i laboratoriet, ved ingeniørerne, hvilken potentiel kraft der kan udløses i leret under en kommende bygning. Hvis kvældetrykket

er højere end den last, som bygningen påfører jorden – det kan typisk være, hvis der er foretaget en kælderudgravning – er der stor risiko for, at leret vil udvide sig og

dermed hæve bygningen ovenover. På baggrund af denne viden kan ingeniørerne designe en funderingsløsning, der er i stand til at modstå disse hævnings.



Årsager til 713 revneskadede ejendomme i Danmark siden 1985. Kilde: Geo's arkiv.

Plastisk ler kan få huse til at slå store revner, hvis det tørrer ud, for eksempel som følge af træer i nærheden. Foto: Geo →



Ler med uheldige egenskaber

Plastisk ler minder mest af alt om en halvård modellervoks eller en lidt stivere udgave af juledekorationer. At leret er "plastisk" har intet at gøre med materialet plastik, men refererer til dets materialeegenskaber. Det betyder, at leret er meget deformerbart, og den egenskab stammer fra lerets evne til at indeholde rigtig meget vand.

I byggetekniske sammenhænge har plastisk ler mange uheldige egen-

skaber. For eksempel vil leret, selv om det virker temmelig stift, kunne give anledning til store sætninger som følge af sammentrykning fra bygningslast. Sætninger, som finder sted i takt med, at vandet i leret langsomt presses ud ved belastning. Ydermere har leret den uheldige egenskab, at det hæver sig, hvis det bliver befriet for vægt – for eksempel hvis man fjerner en stor jordmængde i forbindelse med en kælderudgravning. Kræfterne i leret er enorme og kan forårsage alvorlige skader

på en bygning, hvis bygningen vejer mindre end den jordmængde, man fjerner. Problemerne opstår, fordi det plastiske ler besidder, hvad geoteknikerne kalder et højt kvældetryk. Kvældetryk er et udtryk for den kraft, som leret kan udvide sig med.

Ikke nok med, at leret kan hæve eller sætte sig ved af- og belastning – leret kan også give anledning til store skader på bygninger, hvis det får lov til at tørre ud. Igen er det lerets store vandindhold, der er



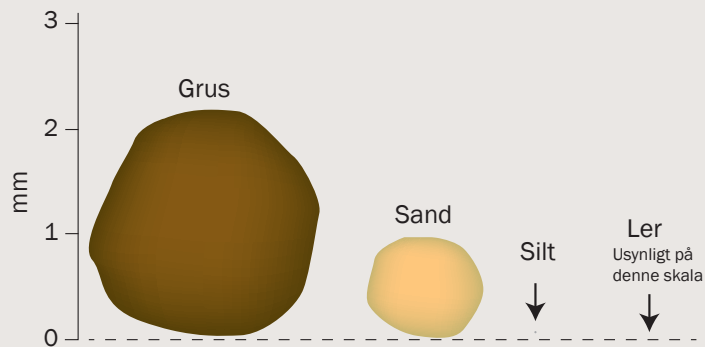
For cirka 10 år siden skred en cirka 100 år gammel banedæmning syd for Vejle udlagt over plastisk ler pludselig sammen.
Foto: Torben Thorsen



Blottet overflade af plastisk ler. Bemærk volumenreduktionen, når leret tørrer ud, og de medfølgende store sprækker.
Foto: Thomas Rye Simonsen

Kornstørrelse

I sand er de enkelte korn mellem 0,06 og 2 mm i diameter. Derfor kan man tydeligt fornemme kornene i en håndfuld sand fra stranden eller fra sandkassen, og man kan også se dem med det blotte øje. Er kornene større end 2 mm defineres materialet som grus eller sten. Er kornene mellem 0,06 mm og 0,002 mm, er der tale om jordarten silt. I en silt kan det være vanskeligt at skelne de enkelte korn med det blotte øje, og våd silt kan nemt forveksles med ler. Tør silt derimod, vil i hånden føles som finmalet mel. Når kornstørrelsen bliver mindre end to tusindedele millimeter (eller 0,002 mm), taler man om ler. Ler er således den mest finkornede jordart, der findes, og i en ler er det selvsagt helt umuligt at skelne de enkelte "korn" med det blotte øje.



Netop fordi ler består af mikroskopiske partikler har ler grundlæggende forskellige egenskaber i forhold til sand- eller grusjord. I sand og grus er sammenhængskraften og dermed jordens styrke primært styret af kontaktryk-kene (eller friktionen) mellem de

enkelte korn, hvorimod sammenhængskraften i en lerjord er af kemisk eller molekylær art – også kaldet kohæsion. Ingeniører og geoteknikere omtaler derfor typisk sand- og grusjord som friktionsjord, mens lerjord betegnes kohæsionsjord.

synderen, for når vandet forsvinder fra leret – f.eks. fordi det suges ud af leret af træerødder – medfører det en markant reducere af volumen.

Sætter sit præg på bygninger og landskab

Udtørring af ler under huse er en hyppig skadevolder i Danmark. Geo har udført over 700 undersøgelser af

revneskadede ejendomme de seneste mere end 30 år. Dataene afslører, at næsten 1/3 af alle revneskadede ejendomme skyldes udtørring af ler under husets fundament. Typisk opstår skaderne, hvis der står store træer nær ved bygningen. Træernes rødder kan fjerne store mængder vand fra leret og være medvirkende til skader på ejendomme.

Det er selvfølgelig ikke kun huse, der påvirkes af det plastiske lers bevægelser. For cirka 10 år siden var det for eksempel nær gået galt syd for Vejle, hvor en banedæmning udlagt over plastisk ler pludselig skred sammen. Heldigvis blev skredet opdaget, inden der kørte tog på skinnerne.

Faktisk er plastisk ler så ustabil,

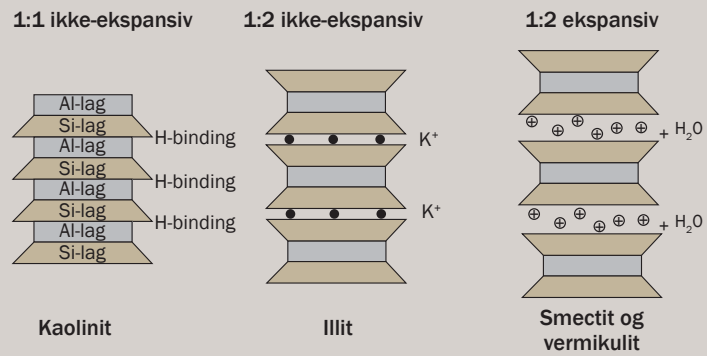
Lermineraller

Der findes en række forskellige lermineraller. To af de mest almindelige kendte er kaolinit og smectit. De har forskellig geologisk opvindelse og kemisk opbygning og dermed også vidt forskellige egenskaber. Smectit kan blandt andet stamme fra omdannet vulkansk aske, mens kaolinit stammer fra kemisk nedbrydning af feldspat, som er en af hovedbestanddelene i granit.

Lermineraller er kendetegnet ved deres pladeformede opbygning af vekslende lag af aluminium (Al) og silika (Si) og inddeles typisk efter den måde, hvorpå lagene ordner sig på. Overordnet klassificeres lermineraller som enten 1:1 eller 1:2 lermineraller.

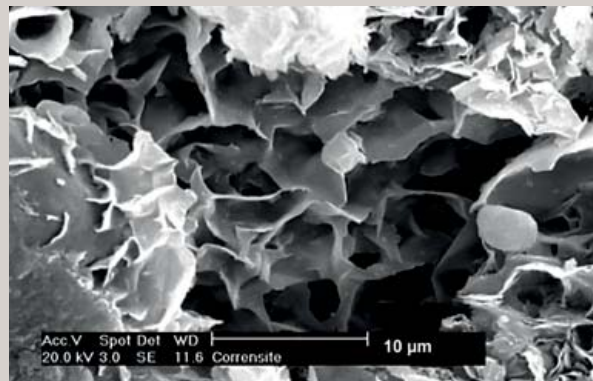
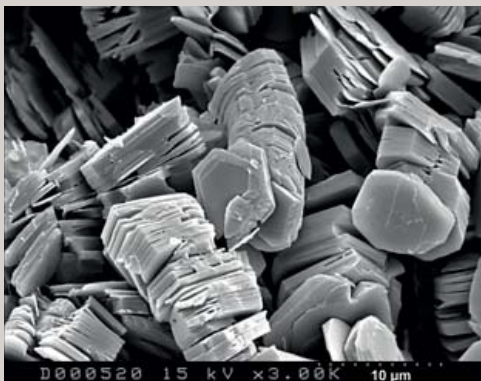
1:1 lerminerallerne som kaolinit består af stakke af flager, hvor hver

Lag og flager



flage består af et Al-lag og et Si-lag. Imellem hver flage er der en stærk hydrogenbinding. Denne opbygning gør leret relativt inaktivt, idet der ikke umiddelbart kan indbygges andre ioner imellem flagerne. Man siger, at kaolinit har en lav ionbytningskapacitet. Overfladearealet af mineralet er ligeledes relativt beskedent i forhold til andre lermineraller. Det er på omkring 20 m²/gram.

De ekspansive 1:2 lermineraller er bygget op af flager bestående af et Al-lag og to Si-lag, og der er svage bindinger imellem flagerne. Grundet de svage bindinger er lermineralet meget tilbøjelig til at indbygge andre kationer mellem sine lag og har derfor en meget høj ionbytningskapacitet. Overfladearealet kan ligeledes være helt op til 50 gange større end i kaolinit, imponerende 1000 m²/gram.



Elektromiskopi-fotos af kaolinit (venstre) og smectit (højre). Bemærk forskellen i opbygningen, som gør, at smectit har et meget større overfladeareal end kaolinit. Fotos: Wilson et al. 2014.

Ler – et anvendeligt materiale

Nok er visse lertyper problematiske i forhold til byggeri, men lerminerallers specielle egenskaber er eftertragtet indenfor mange andre anvendelsesom-

råder. Ler anvendes i alt fra mursten og keramik til kosmetikprodukter og tandpasta. Pulveriseret ler er også en af hovedkomponenterne i boremud-

der, som er en tyktflydende væske der er uundværlig i olieindustrien. Boremudder anvendes til at stabilisere de dybe oliebrønde, så de ikke kollapser.

at selv skråninger med hældninger på helt ned til 5-6° er i risiko for at skride, hvis de rette omstændigheder er tilstede (for eksempel massiv nedbør). Flere steder kan man i dag ved selvsyn se aktive skred i plastisk ler – som i skoven umiddelbart øst for den gamle Lillebæltsbro, hvor der jævnlige sker markante skred i skråningen ned mod Lillebælt.

Ler og lerjord – hvad er det?

Når geologer og geoteknikere snakker om materialer som ler eller sand, er de defineret ved deres kornstørrelse, altså diameteren af de enkelte korn i materialet. Ler er den mest finkornede af alle jordarter og er defineret ved at have kornstørrelser mindre end 0,002 mm.

Når man snakker om lerjord er det vigtigt at vide, at der findes mange forskellige slags. Og faktisk indeholder de hyppigst forekommende typer lerjord også meget andet end ler, for eksempel silt, sand og grus. Indholdet af ler og andre kornstørrelser afhænger helt af, hvilke geologiske processer der har medvirket til at danne leret. Eksempelvis vil

Plastisk ler – et 40 millioner gammelt materiale

Det plastiske ler i Danmark stammer fra den geologiske tidsperiode Eocæn for 35-55 mio. år før nu. Dengang var det globale klima markant varmere end i dag, der var stort set ikke is ved polerne, og det globale havniveau var flere hundrede meter højere. Det areal, der nu er Danmark, var dengang dækket af et dybt hav, og på bunden af dette hav blev der aflejret ler, som vi i dag kan finde i vores undergrund. Det er afgørende, at der var tale om et dybhav, for når korn af sand og grus skylles ud i havet af for eksempel floder, vil disse partikler bundfældes tæt på kysten på grund af deres vægt og den ringe energi i havvandet. Det er kun de allerfineste partikler – nemlig lerpartiklerne – der kan holde sig flydende og dermed har en chance for at blive ført med havstrømmene ud på dybt vand.

Dybhavet eksisterede over det danske område i mange millioner år, og i løbet af årene blev der bundfældet flere hundrede meter tykke lag af mikroskopiske lerpartikler. I samme periode skete der heftige vulkanudbrud i Nordatlanten, da Amerika og Europa begyndte at glide fra hinanden på grund af pladetektoniske bevægelser. Asken fra vulkanud-

Geologisk kort over Danmarks undergrund. Bæltet med grå/mørkegrå farver, som strækker sig fra Nordvestjylland over Østjylland til Fyn/Sjælland og ned mod Femern Bælt er, hvor vi i dag kan finde plastisk ler nær terræn. Modificeret efter Geocenter Danmark 2010.

bruddene endte i havet sammen med lerpartiklerne, og asken blev med tiden omdannet til lermineralet smectit.

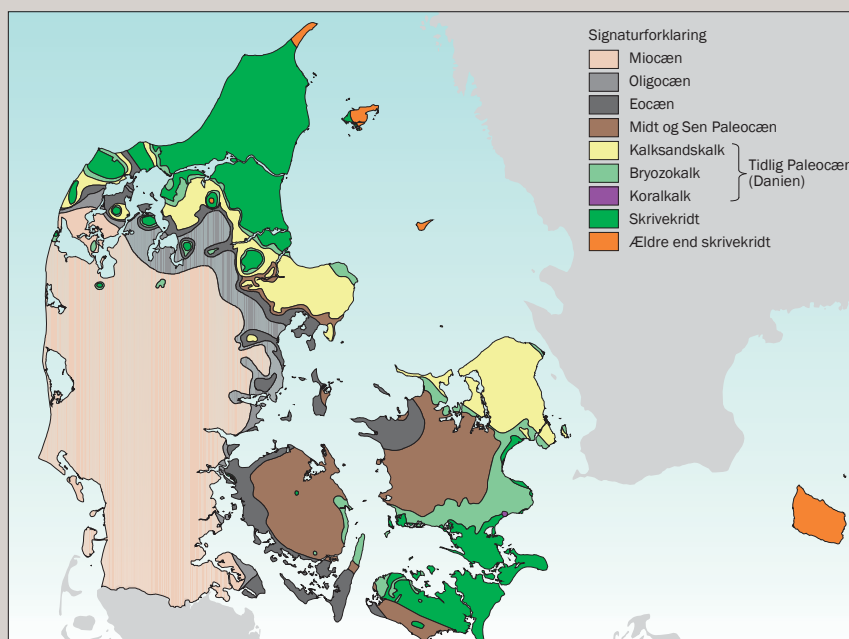
Kortet th viser fordelingen af hav og land, som den kan have set ud i slutningen af Eocæn for cirka 35-40 mio. år siden. Som det fremgår, lå ikke kun den centrale del af Danmark langt fra kysten, men også dele af England og landene syd for os samt store dele af Nordsøen. Mange af disse steder vil man derfor også kunne finde plastisk ler aflejret i dette urgamle ocean.

Faktisk forskes der i lande som England, Frankrig og Belgien også intenst i plastisk lers egenskaber. I London er store dele af undergrundsbanens tunneller udgravet i



Illustration: Geocenter Danmark, 2010

plastisk ler, mens man i Belgien siden 1980 har haft et laboratorium i mere end 200 meters dybde i dybtliggende lag af plastisk ler. Formålet her er at studere lerets kemiske og mikrobiologiske egenskaber med henblik på at udvikle og bygge sikre depoter til radioaktivt affald dybt under jordens overflade.



en ler, som er aflejret af en gletscher under istiden, typisk være en blanding af ler, silt, sand og grus og kan indeholde helt ned til 10-20 % ler, men stadig blive betegnet som en lerjord. Denne type ler kaldes moræneler. Plastisk ler har derimod typisk et lerindhold højere end 60 % og er helt fri for større partikler som sand og grus.

Da forskellige lertyper har vidt

forskellige egenskaber, har vi som geoteknikere brug for at kunne klassificere de forskellige lertyper. Det gør vi blandt andet ved at måle lerets plasticitetsindeks, som er et udtryk for, hvor meget vand leret kan indeholde og stadig være plastisk eller deformerbart. Plasticitetsindekset bestemmes ved at måle, hvor meget vand leret indeholder i to forskellige tilstande. Den ene tilstand er, hvor leret bliver så vådt,

at det netop bliver flydende, og den anden tilstand er, hvor leret bliver netop så tørt, at det ikke længere kan ruller ud til en tynd pølse på 3 mm i diameter. Forskellen på vandindholdet ved disse to konsistensgrænser er lerets plasticitetsindeks.

Moræneler, som rigtig mange danskere i Østjylland, Fyn eller Sjælland vil kunne finde, hvis de graver et hul i deres have, har typisk et plas-

ticitetsindeks på mellem 10 og 20 %. De plastiske lertyper, som vi her har med at gøre, kan derimod have plasticitetsindeks på helt op til 200 %. Den opmærksomme læser vil måske undre sig over, hvordan jord kan have vandindhold på over 100 %. Det skyldes, at vi ingeniører ikke beregner vandindhold i volumenprocent, men i vægtprocent i forhold til den tørre vægt. Hvis en jordprøve for eksempel vejer 100g i våd tilstand og 40g efter at være blevet tørret, så er vandindholdet $w = (100 - 40) / 40 * 100 \% = 150 \%$.

I virkeligheden er det et særligt mineral – lermineralet smectit – der er grunden til, at det plastiske ler kan optage så meget vand. Alle lermineraller har en helt speciel opbygning, som gør, at de kan udskifte nogle af deres ioner under de rette omstændigheder – man taler om et lerminerals ionbytningskapacitet. Smectit har den højeste ionbytningskapacitet af alle lermineraller, og det plastiske ler i Danmark er meget rigt på smectit.

Problemfyldt undertryk i leret

Når man laver en dyb udgravning over plastisk ler, falder trykket i leret. Når trykket falder, skabes et undertryk i leret, og som vi kender det fra fysikkens love, vil trykforskelle altid forsøges udlignet. Det sker i leret ved, at vand fra områder med højere tryk bevæger sig i retning af de lavere tryk. Trykudligningen kan dog tage flere årtier, fordi lerets meget tætte struktur gør, at vandet har svært ved at strømme igennem leret. Men i takt med, at vandet ligeså langsomt strømmer til, vil smectit-mineralerne optage vandet i deres struktur. Det kan få leret til at udvide sig op til 500 %.

Når man bygger ovenpå plastisk ler, er ingeniørerne derfor nødt til at designe bygningen på en måde, så den kan modstå lerets udvidelser. I langt de fleste tilfælde betyder det, at man må hamre lange pæle af stål eller beton ned i jorden, som udover at bære bygningens vægt også skal modstå de kræfter fra leret, som forsøger at hæve



bygningen. Desuden kan det være nødvendigt, at lave hulrum under kældergulvene, så lerets opadrettede kræfter ikke ødelægger gulvet.

Målinger skal forbedre beregningsmodeller

I et nyt forskningsprojekt er vi netop nu i gang med at gøre os klogere på det plastiske lers måde at opføre sig på igennem et omfattende måleprogram på en række byggepladser i Aarhus. Ved hjælp af avanceret måleudstyr, som er installeret i ned til 75 meters dybde, kan vi måle de undertryk, der opstår, når det plastiske ler befries for vægt, ligesom vi med stor nøjagtighed kan måle, hvor meget leret hæver sig.

Vi er dermed i stand til – for første gang – at koble trykforhold og bevægelser sammen. Sammenholdt med laboratorieforsøg og vores øvrige viden om leret gør de nye data os i stand til at forbedre beregningsmodellerne. Dermed kan vi mere præcist forudsige lerets – og dermed bygningens – bevægelser.

Løsningen er måske enkel

Når ingeniørerne har beregnet, hvor meget leret vil udvide sig, skal byggeriet designes, så det kan modstå lerets udvidelser. Og det fordyrer projektet. Men måske er problemerne ikke altid så store, som vi tror.

De lange pæle af stål eller beton, som bygninger skal stå på, bankes typisk ned i jorden med stor kraft af en tonstung maskine. Det er velkendt, at denne proces skaber meget høje tryk i jorden, idet pælene fortrænger jorden, så den flytter sig væk fra pælene. Det er nærliggende at forestille sig, at de høje overtryk som pæleramningen genererer i jorden kan udligne de undertryk som kælderudgravningen har skabt. Dette er dog aldrig forsøgt eftervist i praksis. Igen-nem vores målinger håber vi på at kunne vise, at trykkene udligner hinanden. Hvis det er tilfældet, vil det være helt ny viden. Det vil betyde, at de hævninger, som vi i dag beregner os frem til, slet ikke vil ske. Undertrykket er altså blevet udlignet langt tidligere end forventet – og endda ved en proces, som alligevel skal udføres. Hvis vores teori holder stik, vil vi i fremtiden ikke skulle være bekymrede for, om vores bygninger hæver sig på grund af plastisk ler – så længe bygningerne står på pæle.

Da de tryk og bevægelser vi gerne vil måle, typisk vil udvikle sig i mere end 50 år, er det sin sag at forsøge at drage endelige konklusioner i løbet af et 3-årigt forskningsprojekt. Derfor skal målingerne da også fortsætte i mange år frem i tiden, før vi kan knække koden til lerets opførsel. ■

Målinger som denne fra Aarhus Havn skal være med til at afdække, om det plastiske lers kvældetryk udlignes af den måde, bygninger konstrueres.

Foto: Kenny Kataoka Sørensen.

Yderligere læsning:
Artiklen er en udvidet version af artiklen *Forskere til kamp mod lumske jordtyper i undergrunden* oprindeligt bragt på Videnskab.dk

Generel geologisk viden om plastisk ler:
Naturen i Danmark – geologien. Gyldendal.
Geoviden nr. 3/2010 og 3/2012:
<http://geocenter.dk/publikationer/geoviden/>

Videnskabelige tekster om smectit og geotekniske egenskaber af plastisk ler:
Effects of smectite content on the deformation behaviour of clays. Ph.d.-afhandling af Michael Lodahl.

Grønbech et. al. 2014: *Geotechnical properties of Søvind Marl – a plastic Eocene clay*. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(4)