

# BOREKERNEN

Stødbølger sikrer  
mod sætninger  
– side 4



På jagt efter  
miner

– side 2

Stødbølger sikrer  
mod sætninger

– side 4

Danmarks højeste  
hus skal bygges  
på plastisk ler

– side 6



De tre mineattrapper gøres klar til at blive udlagt.

# På jagt efter miner

Kravene om sikkerhed ved marine anlægsarbejder vokser. Det sender GEO på minejagt i Kattegat.

På bunden af havet findes store sten, skibsvrag, fiskegrej og miner. Alt sammen objekter, der kan få betydning for anlægsarbejdet i forbindelse med en havmøllepark. Energiselskaberne, som bygger havmølleparkerne, har i stadig større grad fokus på, at anlægsarbejdet sker sikkert. Og i takt med den øgede fokus på sikkerhed, rettes opmærksomheden også mod de farligste af objekterne, nemlig søminerne. Det har ført til, at energiselskaberne nu udfører de såkaldte UXO-surveys (Unexploded Ordnance), eller minejagter, som led i forundersøgelserne til deres havmølleparker. Heriblandt også DONG Energy, der i april igangsatte en minejagt ved Anholt Havmøllepark. Minejagten blev

udført af GEO. "Inden for de sidste par år er der fundet miner i de danske farvande. Derfor var det relevant for os at foretage en UXO-survey på Anholt Havmøllepark. Sikkerheden er vigtig for os," siger geofysisk projektleder hos DONG Energy, Arne Röd Lauridsen.

## Minejagt

Minejagt udføres ved systematisk afsøgning af havbunden med sonar eller magnetometer. Ved Anholt blev den udført med magnetometer, fordi minerne her kan gemme sig bag store sten, og det ville en sonar ikke kunne afsløre. En sonar kan finde miner på sandbund. Alle jernholdige objekter påvirker Jordens naturlige magnetfelt. Det vil

sige, at de skaber en anomali i Jordens magnetfelt. Et magnetometer registrerer disse anomalier, og ved at analysere dem er det muligt at estimere et objekts størrelse. De observerede objekter bliver endeligt identificeret ved hjælp af undervandsdroner eller minedykkere. "Når eventuelle miner er lokaliseret, er det vores strategi at føre kabler uden om dem og eventuelt ændre møllens placering. Dog kun i en vis udstrækning," siger Arne Röd Lauridsen fra DONG Energy.

Det er ikke nogen enkel sag at finde minerne. De giver nogenlunde samme udslag

## FAKTA

Den kommende Anholt Havmøllepark vil bestå af 111 turbiner med en samlet kapacitet på 400 MW, hvilket svarer til fire procent af Danmarks samlede el-forbrug.



## FAKTA

### ■ Projekt

Geofysiske undersøgelser, inklusiv minejagt, af kabelrute og havmøllepark

### ■ Kunde

DONG Energy

### ■ Samarbejdspartnere

COWI A/S

### ■ Projektperiode

Marts-maj 2011

på magnetometeret som ankre og store, plutoniske sten. Sidstnævnte er bjergarter indeholdende jern, f.eks. granit. En undersøgelse med magnetometer kan dermed give mange udslag, der viser sig slet ikke at være miner. Men det er der råd for.

### Mineattrapper

Sidste år foretog GEO forundersøgelser for DONG Energy ved Anholt Havmøllepark, heriblandt også en undersøgelse med magnetometer. Den registrerede 2000 jernholdige objekter på bunden. Det er umuligt at sende minedykkere ned til så mange emner, og umuligt at flytte så mange møller og kabler. Blandt andet derfor kom GEO igen i år med sit magnetometer. "Sidste års undersøgelse skulle filtreres for det vi kalder geologisk

støj, hvilket vil sige store, plutoniske sten," siger geofysiker Simon Hviid, der er projektleder på GEO.

For at kunne sortere sten fra miner har det været nødvendigt at kende en mines nøjagtige magnetiske signatur på måleudstyret. Til det formål blev der lavet mineattrapper af tre miner fra 2. verdenskrig. "Vi udvalgte blandt andre den mine, der giver den mindste anomali. Den skulle udgøre en grænse for målingerne. Alle udslag derunder antager vi ikke er miner," forklarer Arne Röd Lauridsen. Attrapperne blev i første omgang tegnet af DONG Energy. På den baggrund udarbejdede GEO arbejds-tegninger til udførelsen. "Det er egentlig mest nogle jernrør, fordi det er formen og ikke vægten, der er vigtig for minens magnetiske signatur," siger Simon Hviid.

### Man made objects

Området skulle ikke kun renses for miner. GEO ledte også efter andre MMO'er (Man Made Objects) og store sten, der kan besværliggøre anlægsarbejdet og få betydning for sikkerheden. Omkring hver turbineplacering blev et område på 200x200 meter undersøgt. Arealet omkring hver turbine udgør arbejdspladsen under installationen af turbinerne, og det er vigtigt at vide, at den er sikker, før der sendes anlægsarbejdere og maskiner på havet.



Anholt Havmøllepark ligger midt imellem Anholt og Djursland.

## FAKTA

### Sømine

Sprængladning udlagt i vandet med det formål at beskadige eller sænke skibe eller forhindre besejling af et område. Søminer kategoriseres som bundminer eller forankrede miner afhængig af deres position i vandet. Under 2. verdenskrig blev der udlagt – også nedkastet fra fly – 6.589 bundminer og 17.051 forankrede miner i danske farvande. Der er efterladt 6-8.000 miner i havene omkring Danmark. Senest blev der i august 2010 fundet tre britiske MK.7-bundminer nordøst for Samsø. Minerne blev fjernet af Søværnet.

## FAKTA

Foruden UXO-survey og lokalisering af objekter, der kan obstruere anlægsarbejdet, indsamledes forskellige andre data:

- Præcisionsopmåling af havbundens topografi (bathymetri)
- Basis for en vurdering af sediment-transportprocesser og erosion omkring fundamenter
- Strukturen af havbund og undergrund langs kabelruter
- Jordprofiler af kabelruten

# Stødbølger sikrer mod sætninger

Stødbølgemålinger kan svare på hvor meget en pæl kan bære. De kan dermed være med til at reducere antallet eller længden af pæle i et byggeri.

Pæle kan bære meget. Især på jordtyper med ringe bæreevne kan pæle sikre funderingen af et byggeri. Men hvor meget kan en pæl bære, og hvordan sikrer vi os, at pælen ikke er knækket under nedramningen? Det kan stødbølgemålinger, også kaldet PDA-målinger (Pile Driving Analysis), svare på. Metoden bliver stadig mere udbredt i kraft af den nye europæiske standard, Eurocode7 Geotechnical design, der tillader en højere bæreevneudnyttelse, hvis der anvendes PDA-målinger under et byggeri, der skal stå på pæle. Det betyder, at det er muligt at bruge færre og/eller kortere pæle.

PDA-målinger er dynamiske belastningsforsøg, der udføres ved at montere kraft- og hastighedssensorer på en pæl. Derefter slås på pælen med ramme-grejet. Slaget skaber en trykbølge ned gennem pælen og resulterer i, at bølger sendes tilbage til sensorerne. Herudfra kan det estimeres, hvor stor en del af bæreevnen, der kommer fra overfladen af pælen hhv. fra pælenspidsen.

## CAPWAP-analyse

Når PDA-målingerne skal analyseres, udføres der oftest en avanceret stødbølgeanalyse, CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Programme). "Analysen kan fastlægge pælebæreevnen, estimere forholdet

mellem spids- og overflademodstand og fastslå hvilke jordlag, der bidrager til overflademodstanden. Den sker på baggrund af måleresultaterne, vores viden om pælens geometri og materiale, og ikke mindst kendskabet til jordbundsforholdene," forklarer projektleder på GEO, Jens Groth Eriksen. Det er også vigtigt at vide, hvilken jordtype pælen står i. "I lerjord bærer pælene hovedsageligt på overfladen, fordi lerets egenskaber gør at leret binder sig til pælen. Sand bærer ikke pælelasten på samme måde, idet det i sand hovedsageligt er pælenspidsen, der bærer," siger Jens Groth Eriksen.

## Statisk prøvebelastning

PDA-målinger er hurtige at udføre, men der opnås kun tilnærmede bæreevner. Målingerne kan derfor sjældent stå alene. For at få kalibreret målingerne, sammenholdes de normalt med den bæreevne som fås ved statiske prøvebelastninger. Ved statiske prøvebelastninger presses en pæl langsomt til brud i jorden. De statiske belastningsforsøg er dog væsentligt dyrere og langsommere at udføre end de dynamiske forsøg, idet selve forsøgsopstillingerne kræver kraftigt grej i form af hydrauliske donkrafte, tunge stålbjælker og modhold, der opnås ved nedramning af ekstra pæle. Ved en korrekt fortolkning af måleresultaterne vil der være

## FAKTA

### ■ Projekt

PDA-målinger og CAPWAP-analyser

### ■ Bygherre

Fonden Musikkens Hus i Nordjylland

### ■ Kunde

Arkil Fundering A/S

### ■ Projektperiode

2010-2012



## FAKTA

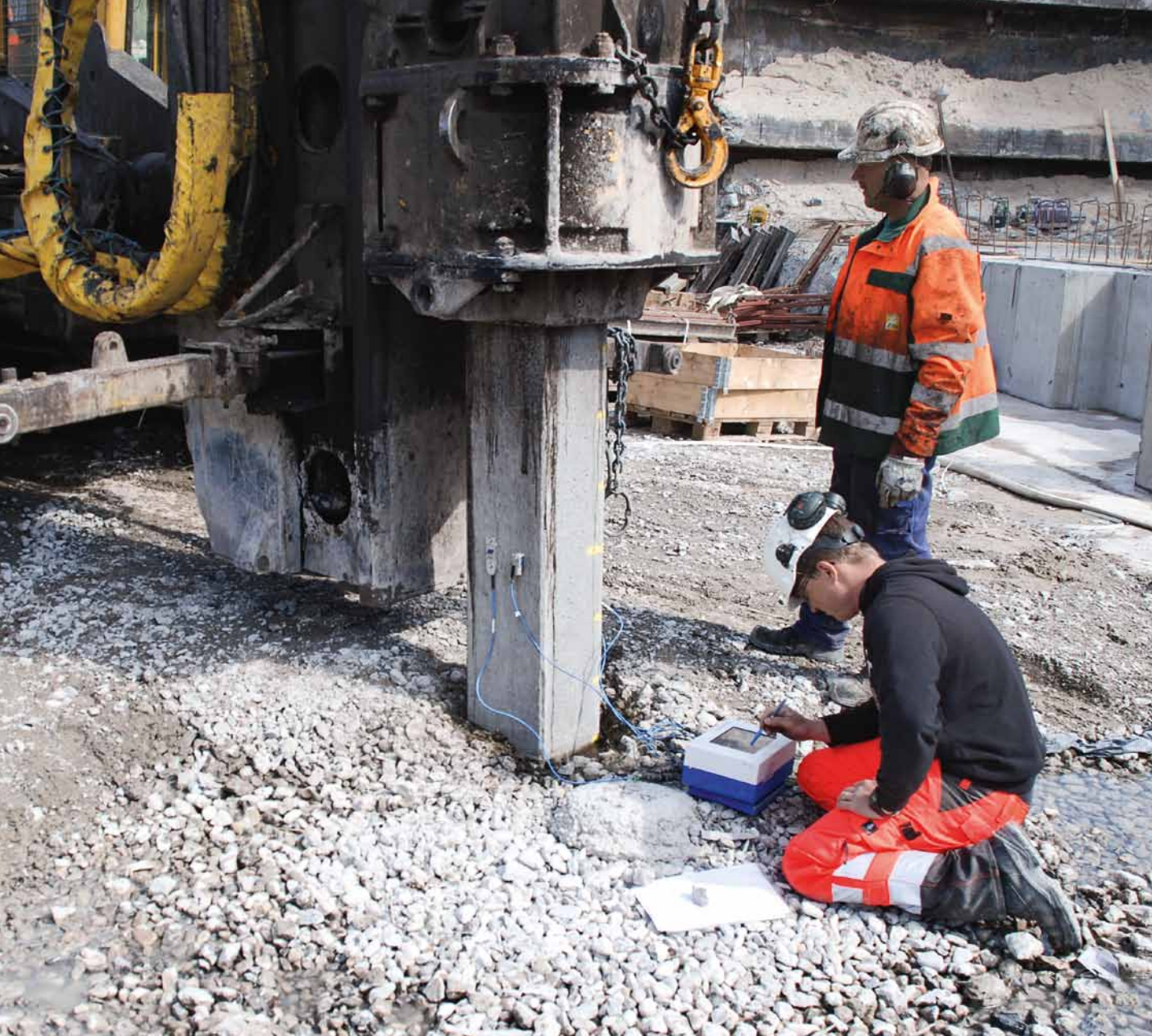
### Musikkens Hus i Nordjylland – forundersøgelser

Der har tidligere ligget et kraftværk på grunden, der blev bygget for 50 år siden. GEO foretog de geotekniske undersøgelser. For 10 år siden blev det revet ned og ideen om et Musikkens Hus i Nordjylland dukkede op. GEO har til byggeriet leveret supplerende undersøgelser til de 50 år gamle undersøgelser. I 2009 blev der udført 8 geotekniske boringer, 3 filterboringer og 7 CPT-tryksonderinger til mellem 15 og 30 meters dybde, inkl. standard klassifikationsforsøg i laboratoriet og korte pumpeforsøg.

god overensstemmelse mellem pælens "dynamiske bæreevne" og den tilsvarende "statiske bæreevne", hvis en sådan er blevet målt på samme tidspunkt.

### Ødelagte pæle

PDA-målinger kan også bruges til at påvise eventuelle skader på en rammet pæl. I Aalborg er 2000 pæle ved at blive rammet i jorden. Pælene skal bære Musikkens Hus i Nordjylland. Inden for byggegruben er der stadig gamle pæle fra Nordkraft - det kraftværk, der tidligere lå på grunden. De gamle pæle øger risikoen for skader



Måleudstyret er monteret på pælen, rammegrejet slår på pælen og PDA-målingen er igang.

på de nye pæle, der nedrammes. Her har GEO foretaget PDA-målinger for at fastslå om der er skader på pælene. "Vi kan med målingerne påvise om der er brud eller skader på pælen, og i givet fald også hvor på pælen, der er noget galt," siger Jens Groth Eriksen. Dermed kan det afgøres om der blot er tale om en pælekobling, hvor to pælestykker er koblet sammen for at nå en tilstrækkelig længde på pælen, eller om der reelt er tale om et brud. "Hvis der er tale om et dybereliggende brud, og ikke en kobling, kan pælen stadig have bæreevne – om end den kan være reduceret i forhold til det forventede – men pælen kan stadig bruges. Hvis det derimod er et højtliggende brud vil pælen oftest blive kasseret, og der vil blive rammet en ny pæl som erstatning tæt ved," forklarer han. Grundet en for-

højet risiko for pæleskader på grund af de gamle pæle, udfører GEO PDA-målinger på et forholdsvis bredt udvalg af pælene for at få klarlagt omfanget af pæleskader ved Musikkens Hus i Nordjylland.

#### Ikke planlagt dybde

Pælene, der skal bære Musikkens Hus i Nordjylland, kan ikke alle rammes ned i planlagt dybde. Der har derfor været usikkerhed om deres bæreevne. Her har PDA-målinger bidraget til at fastlægge om bæreevnen er tilstrækkelig på trods af, at pælene ikke kan rammes helt ned.

PDA-målinger er med til at give sikkerhed for en godt udnyttet pælefundering. Det gør de også på Musikkens Hus i Nordjylland, der kommer til at stå sikkert på sine pæle.

## FAKTA

### Stødbølgemålinger

PDA-målinger eller stødbølge-målinger bidrager til fastlæggelse af pæles bæreevne. Samtidig kan de afdække en mulig svækkelse eller et brud på en pæl. Målingerne anvendes nu oftere end før på grund af den nye EC7-norm, hvor bæreevnesikkerheden kan reduceres, hvis der anvendes PDA-måling under et byggeri, der skal stå på pæle. Det betyder, at antallet af pælemeter kan sænkes. Målemetoden er udviklet i USA.



# Danmarks højeste hus skal bygges på plastisk ler

Et 142 m højt højhus skal bygges på Aarhus' plastiske ler. Den Gamle Lillebæltsbro står også på fedt ler og har sat sig over en halv meter. Det kræver dyb indsigt i den komplicerede lertype at sikre Danmarks højeste hus mod sætninger.

Aarhus står foran byggeriet af Lighthouse\*, der med sine 142 m bliver Danmarks højeste hus. For både Den Gamle Lillebæltsbro og det nye højhus gælder det, at funderingsunderlaget er plastisk, fedt ler. Den gamle broes strømpiller har sat sig op til 65 cm siden den blev opført i starten af 1930'erne, og det er langt mere end man accepterer i forbindelse med husbyggeri og sædvanligt brobyggeri. Heldigvis blev broen konstruktivt

forberedt på meget store sætninger, så den har klaret sig igennem den mellem-liggende periode uden brugsmæssige gener. Derimod er det vanskeligt at forestille sig, at Lighthouse\* kan udformes, så sætninger i den størrelse kan accepteres.

## Lighthouse\* på pæle

Nu skal Lighthouse\* pælefunderes ligesom Den Ny Lillebæltsbro, mens Den Gamle Lillebæltsbro er direkte funderet.

Til gengæld er den sætningsgivende last for det 142 m høje Lighthouse\* formentlig også ca. 30 % tungere end broens strømpiller. Det er derfor bekymrende, at den gamle bro har sat sig så meget som den har gjort, og spørgsmålet er naturligvis, om vi har ordentlig styr på lerets egenskaber og på vores beregningsmodeller.

Med det formål at afprøve vores viden om det fede, plastiske ler, der er under-



## FAKTA

### ■ Plastisk ler

Plastisk ler er en uformel geologisk betegnelse for en række meget finkornede lerlag i Danmark, som på grund af et højt indhold af lermineralet smectit er meget fede. De er aflejret i de have som dækkede Danmark under den paleogene periode i tidsrummet fra for godt 57 millioner år til 23 millioner år siden. Lertyperne er kendetegnet ved relativ lav styrke og stor deformationsevne. Det betyder, at de ikke kan bære ret meget uden at sætte sig, og at de sveller (hæver sig) ved afgravning til f.eks. fundament.

### Plasticitetsindeks

Plasticitetsindekset siger noget om lerets evne til at indeholde vand uden at blive flydende. En jordart, der indeholder meget vand, har dårlige byggeegenskaber, og et højt plasticitetsindeks er derfor et faresignal i forbindelse med byggeri. Meget fedt ler skal per definition have et plasticitetsindeks større end 50%, og de plastiske lere har typisk endnu højere plasticitetsindeks.

laget for Lillebæltsbroerne og også bliver det for Lighthouse\*, satte GEO sig for at revurdere årsagen til Den Gamle Lillebæltsbros meget store sætninger på grundlag af vores nuværende viden.

### Viden fra broer

Vurderingen er primært baseret på resultaterne af de undersøgelser, som blev udført ved den gamle bro i 1960'erne i forbindelse med undersøgelserne for Den Ny Lillebæltsbro. På dette grundlag er der opstillet et opdateret designgrundlag, og bropillernes fundament er efterregnet i både brudgrænsetilstanden og anvendelsesgrænsetilstanden.

Beregningerne viser, at pillernes bæreevne er hårdt udnyttet, og at de var hårdest udnyttet, lige da broen stod færdig. Efterfølgende er bæreevnereserven stille og roligt øget i takt med at poreovertrykkene fra lastpåvirkingen er reduceret ved at vandet i leret drænes bort. Samtidig hermed er sætningshastigheden aftaget. Vi kan med andre ord forklare udviklingen af de meget store sætninger.

Også fra Den Ny Lillebæltsbro, som stod færdig i 1970, er der viden at hente. Dens brotårne blev funderet på 30 m lange pæle og har derfor sat sig væsentlig mindre end den gamle bro, skønt den også er funderet på plastisk ler.

Endelig har de nyligt udførte og meget grundige forundersøgelser for den

## FAKTA

### ■ Projekt

Lighthouse\* – 142 m højhus på havnen i Aarhus

### ■ Bygherre

Aktieselskabet Havneinvest

## FAKTA

### Forskellen på direkte fundering og pælefundering

Ved direkte fundering, der er den mest udbredte funderingsform i Danmark, funderes på sribefundamenter og enkeltfundamenter, der enten udstøbes i beton eller udlægges som præfabrikerede betonelementer direkte på de bæredygtige lag.

Ved pælefundering føres bygningslasten igennem sætningsgivende bløde lag og dybt ned i jorden via pælene til de underliggende bæredygtige aflejringer. For meget tunge bygninger anvendes pælefundering desuden til at reducere sætningerne til et acceptabelt niveau, idet pælene forlænges indtil de beregnede sætninger vurderes ikke at medføre gener for byggeriet. Pælene bliver enten rammet ned eller støbt i borede huller.

## FAKTA

### Kort over plastisk ler i Aarhus

GEO har tegnet et kort over oversiden til de forskellige typer af plastisk ler (Viborgler, Kysingmergel, Moesgårdler og Søvindmergel), der findes i den øvre del af Aarhus' undergrund. Kortet er primært baseret på de tusindvis af undersøgelsesboringer, som GEO i tidens løb har udført. Kortet revideres løbende i takt med at nye undersøgelsesboringer bidrager med nye oplysninger. Ved hjælp af kortet kan GEO forudsige beliggenheden af de problematiske jordtyper uden at lave boringer. Dermed kan den rigtige undersøgelse planlægges i første forsøg. Kortet kan desuden agere støtte for en vurdering af, hvorvidt der er tale om faststående plastisk ler eller isoppressede løse flager af plastisk ler. Det kan have stor geoteknisk betydning at kende svaret på det spørgsmål.

## FAKTA

### Den Gamle Lillebæltsbro

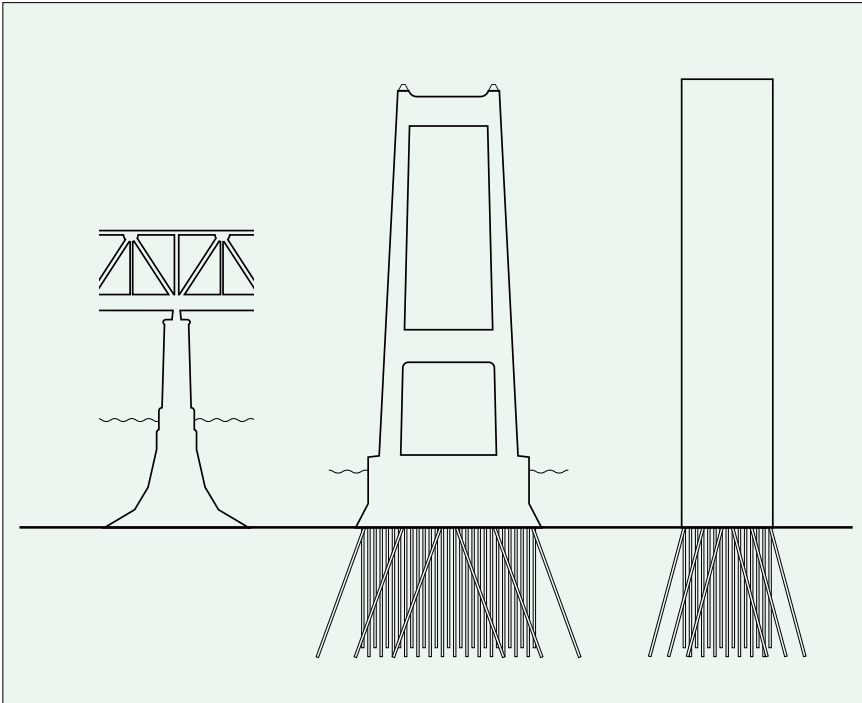
I forbindelse med undersøgelserne for Den Ny Lillebæltsbro i 1964 udførte GEO også nye borer for den gamle bro samt et tilhørende laboratorieprogram, der blandt andet omfattede 63 avancerede forsøg med Lillebæltsler.

### Den Ny Lillebæltsbro

Udover borearbejder for broen udførte GEO i 1963/64 et omfattende laboratorieprogram med Lillebæltsler, som er en kalkfattig variant af Søvindmergel. Programmet omfattede 125 avancerede forsøg. Den nye Lillebæltsbro's brotårne er ca. 140 m høje og er funderet på ca. 30 m lange pæle. Sætningerne er i størrelsesordenen 10 cm.

### Femern Bælt

I forbindelse med forundersøgelserne til en fast forbindelse over Femern Bælt udførte GEO i 2010 flere end 500 avancerede laboratorieforsøg med meget fedt, plastisk ler.



Til venstre ses en af Den Gamle Lillebæltsbro's strømpiller – samlet højde ca. 100 m – og i midten det ca. 140 m høje, pælefunderede brotårn fra Den Ny Lillebæltsbro. Til højre ses et 142 m højt højhus, funderet på pæle.

kommende Femern Bælt-forbindelse væsentligt udvidet vores viden om samspillet mellem store konstruktioner og plastisk ler.

### Usædvanlig konstruktion kan trække på kendt viden

Lighthouse\* er alene på grund af sin højde en usædvanlig konstruktion efter danske forhold. Det meget fede, plastiske ler (Søvindmergel) i Aarhus havns undergrund er samtidig et vanskeligt funderingsunderlag – selv efter inter-

national målestok. Denne kombination kommer til at udfordre projektet og stille krav til omfanget og kvaliteten af de geotekniske undersøgelser og laboratorieforsøg, som skal danne grundlag for designet af et sikkert og økonomisk optimalt funderingsprojekt.

Men der er altså hjælp at hente fra de førnævnte projekter, og Aarhus Havn kan drage nytte af den kendte viden. Det vil give mulighed for hurtigt at identificere projektets geotekniske problem-

stillinger, og for efterfølgende at få udvalgt de undersøgelser og forsøg, der er relevante for løsningen.

GEO har udført undersøgelser og/eller laboratorieforsøg for alle de nævnte projekter, og har et meget omfattende lokalkendskab til de specielle funderingsforhold, som de meget fede plastiske lere byder på. Den viden trækkes der på, når GEO rådgiver om funderingen af konstruktioner som Lighthouse\* og andre store byggerier.

**Udgiver:**  
GEO

**Redaktion afsluttet:**  
17. maj 2011

**Redaktion:**  
Birgitte Hannibal, Kim Sillemann

**Grafisk tilrettelæggelse:**  
Ehrhorn Hummerston

**Tryk:**  
Jannerup Offset

**Oplag:**  
3000



**København**  
Maglebjergvej 1  
2800 Kgs. Lyngby

Web: [www.geo.dk](http://www.geo.dk)  
Mail: [geo@geo.dk](mailto:geo@geo.dk)  
Tlf.: +45 4588 4444

**Aarhus**  
Sødalsparken 12  
8220 Brabrand

Web: [www.geo.dk](http://www.geo.dk)  
Mail: [geo@geo.dk](mailto:geo@geo.dk)  
Tlf.: +45 8627 3111