

Forstærkning af Lillebæltsbroens (1935) fundering

Carsten Steen Sørensen
Technical Director

1

FORSTÆRKNING AF LILLEBÆLTSBROENS
FUNDERING

COWI

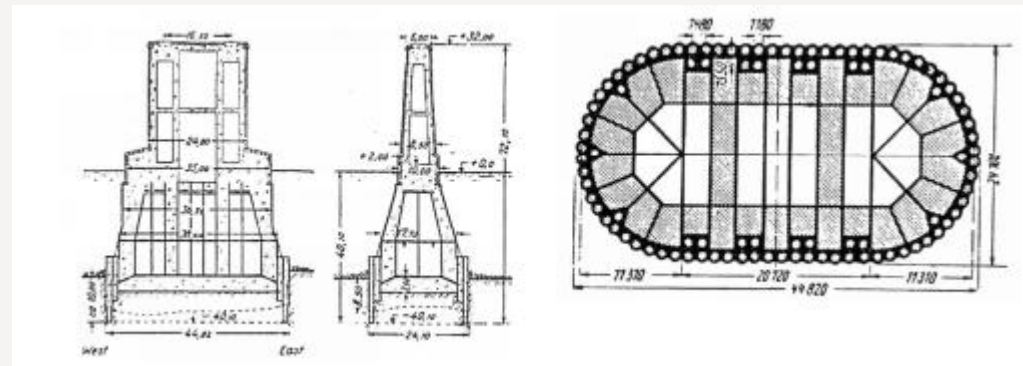
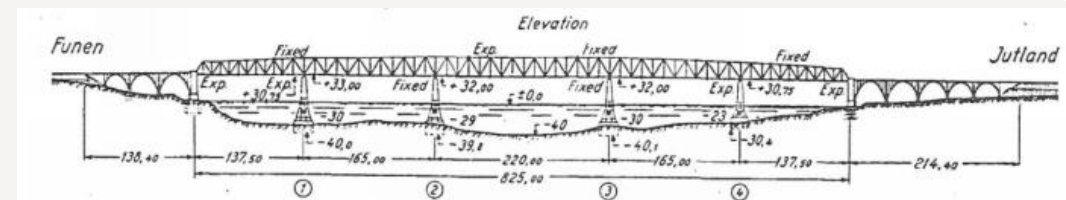


Agenda

- › Lillebæltsbroen (1935)
- › Introduktion til forstærkningsprojektet
- › Projektorganisation
- › Hvad opdagede vi?
- › Løsning
- › Status

Lillebæltsbroen (1935)

- › 825 m lang stålgytterbro
- › Indviet i 1935
- › Funderet på palæogent ler (Lillebæltsler)
- › Eneste baneforbindelse mellem Fyn og Jylland
- › Vanddybde op til 40 m
- › Stærk strøm



Introduktion til forstærkningsprojektet

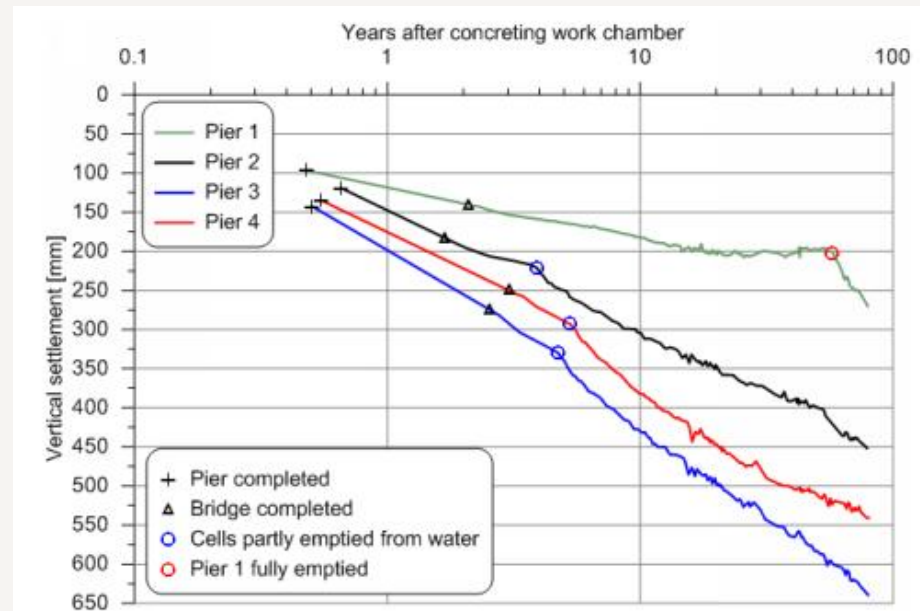
› Udgangspunkt for start af projekt:

› Femern A/S

- › Anvendte broen som case
- › Udførte borer og tæt ved broen
- › Gennemførte avancerede laboratorieforsøg
- › Styrkeparametre blev målt lavere end tidligere

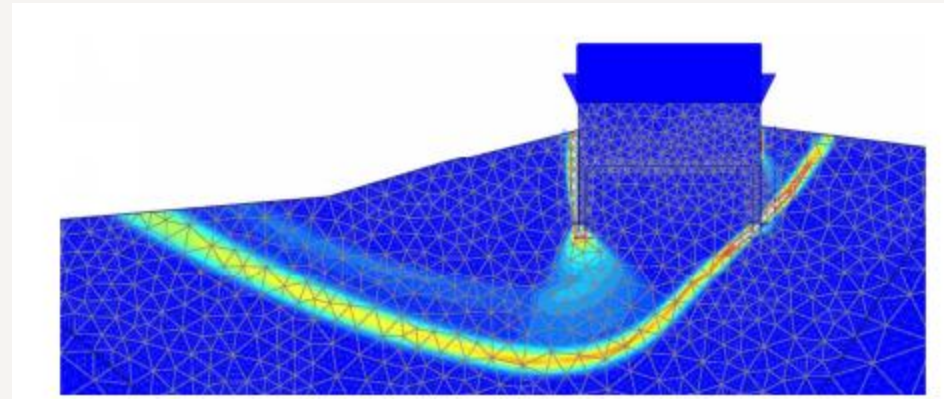
› Sætningsmålinger

- › Store sætninger
- › Lineær med tid



Introduktion til forstærkningsprojektet (2)

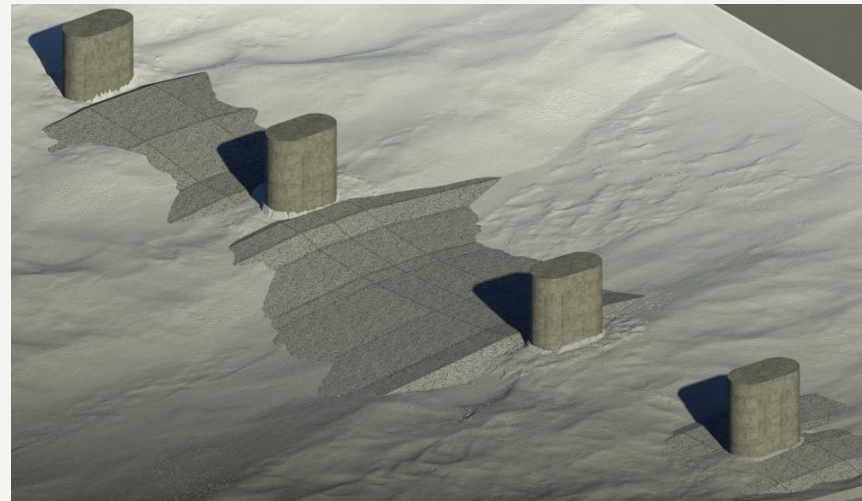
- › Banedanmark nedsatte et ekspertpanel i 2012 fra:
 - › COWI, Rambøll, GEO, nmGeo, Grontmij, DTU and AAU
- › Arbejdsgruppens kommissorium:
 - › Gennemgang af nyeste forskning relevant for emnet
 - › Analysere sætningsforløbet
 - › Opstille program for avancerede laboratorie-forsøg
 - › Gennemføre FEM-analyser for vurdering af sikkerhed mod brud



Pier	1	2	3	4
$\gamma_{\text{tang}} = \gamma_c'$	1.18	0.95	1.00	1.04

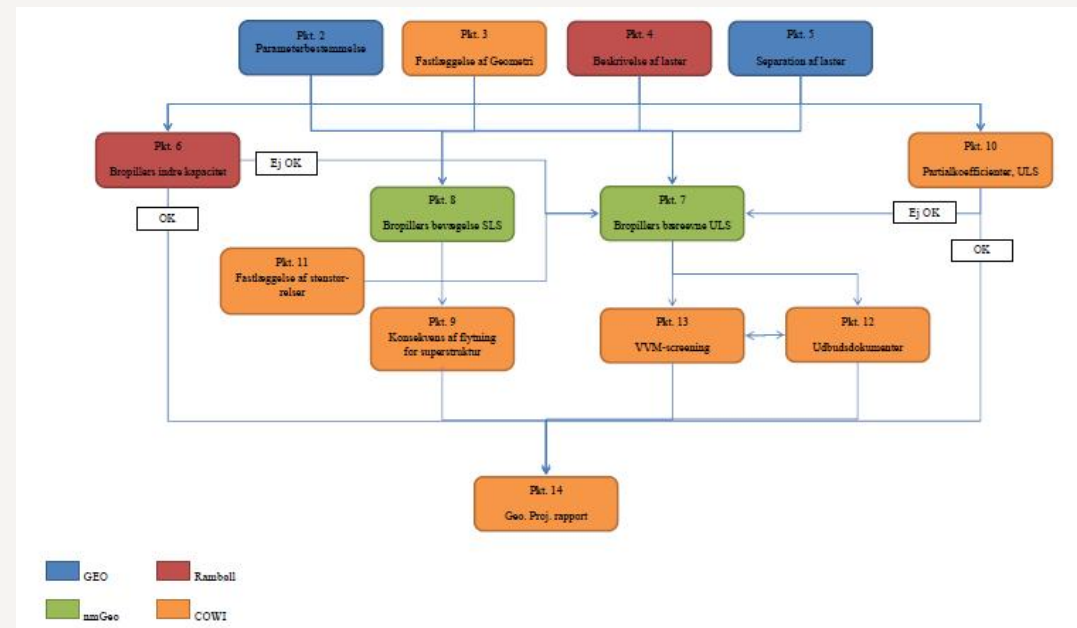
Introduktion til forstærkningsprojektet (3)

- › Konklusion:
 - › Pille 2 og 3 er tæt på en karakteristisk brudtilstand
 - › Sætninger skyldes forskydningskryb
 - › Risiko for krybningsbrud
- › Ekspertpanelet anbefalede forstærkning af broens fundering:
 - › 125.000 m³ sten
 - › Udført inden 1. oktober 2014!



Projekt organisation

- › Banedanmark opfordrede ekspertgruppen til at gå videre med selve forstærkningsprojektet
- › Banedanmark bad COWI koordinere projekteringen
- › 4 firmaer var involveret i selve projekteringen



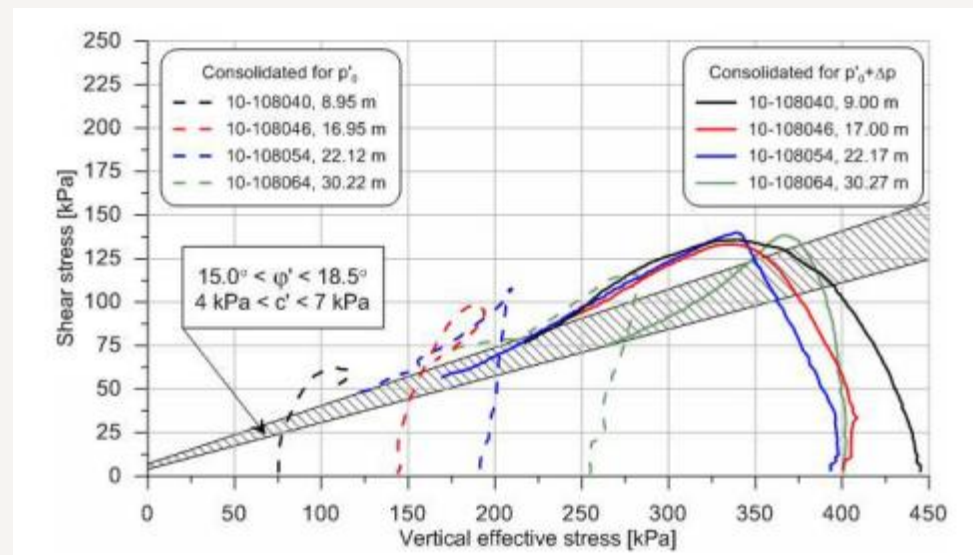
Projekt organisation (2)

› Meget optimistisk tidsplan

- › Projekt start: 9. januar 2014
- › Udbud: 14. februar 2014
- › Licitation: 14. march 2014
- › Udførelse start: 1. maj 2014
- › Udførelse slut: 1. oktober 2014

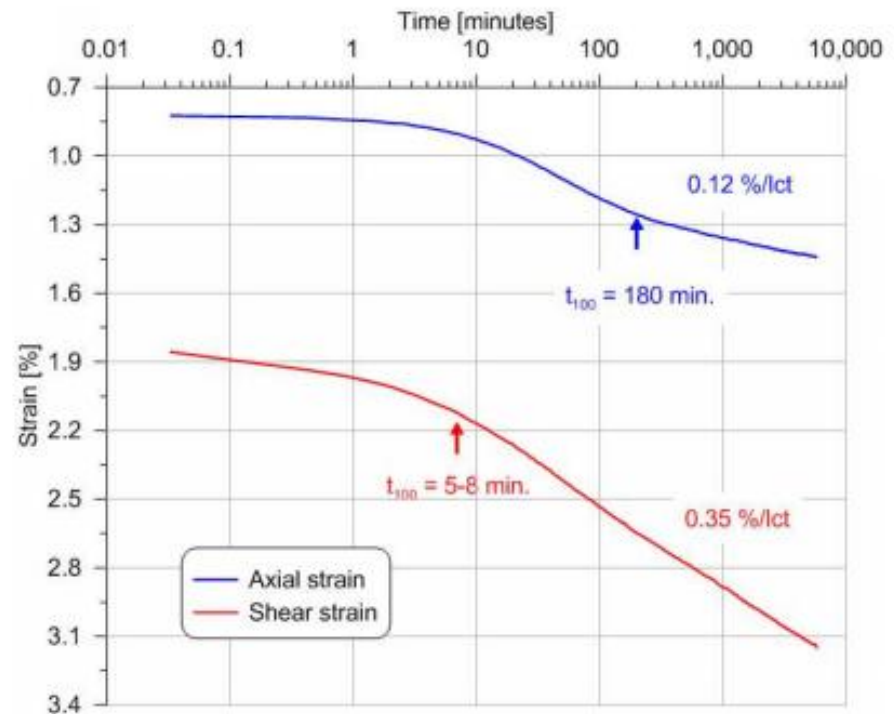
Hvad opdagede vi?

- › Styrkeparametre generelt lave
- › "Strain softening" opførsel af Lillebæltsler
- › Pille 2 og 3 tæt på brud:
 - › Store tøjninger ($\approx 30\%$)
 - › Nødvendig styrke: $\varphi = 15^\circ$ and $c' = 4.5 \text{ kPa}$
- › Medfører at pillerne er tæt på en karakteristisk brudtilstand!
 - › Årsagen til de store sætninger



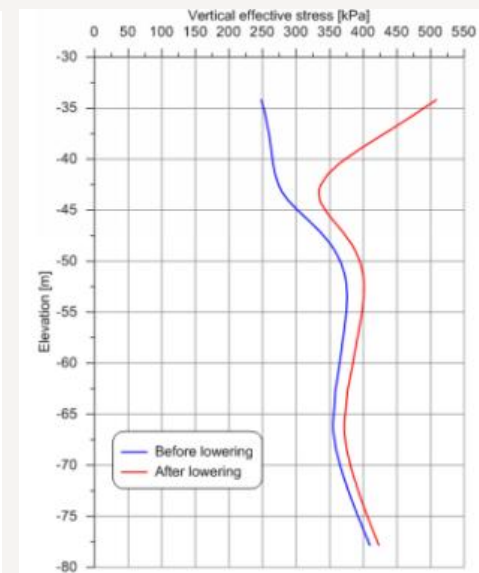
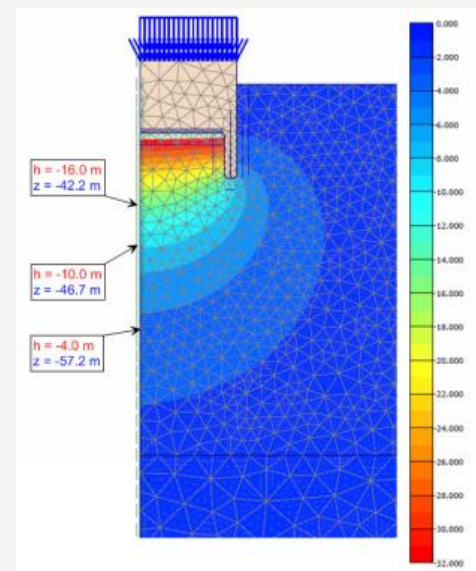
Hvad opdagede vi? (2)

- › Signifikante krybnings-sætninger
 - › Aksial-krybning
 - › Forskydnings-krybning
 - › Forskydnings-krybning op til 3 x aksial krybnings-rate!
- › Pille 2, 3 and 4 er placeret på skråninger
 - › Forøger forskydnings-krybning



Hvad opdagede vi? (3)

- › Knæk i arbejdskurve kan forklares for Pille 1
 - › Tømmes for vand i 1991
 - › Ændring af potentiale
 - › Forøgede effektive spændinger under pille
 - › Ny konsolideringsproces
 - › Yderligere sætning på 2 cm før konsolidering er overstået for denne spændingsændring



Hvad opdagede vi? (4)

- › Opgaven kan løftes af flere firmaer i fællesskab
- › Enighed om at:
 - › forstærkning er nødvendig
 - › forstærkningsmetode
- › Vi haft mange faglige diskussioner og udfordret hinanden

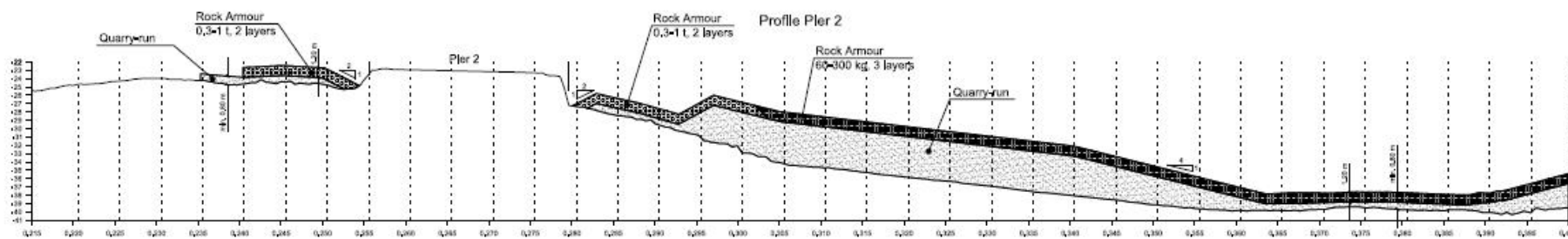


Løsning

- › Forstærkning ved hjælp af stenudlægning (forøgelse af q-led)
- › 125.000 m³ sten
 - › 6,5 m lagtykkelse
 - › 1:7 hældning i strømretning
 - › 1:4 hældning vinkelret på strømretning
 - › Filterlag og dæksten
 - › Erosionssikring ved pillerne



Løsning (2)



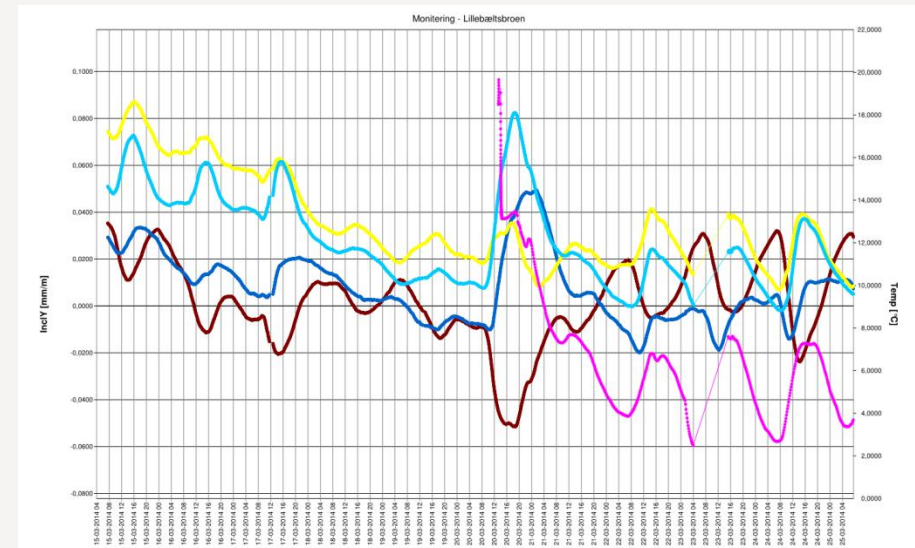
Løsning (3)

› Forstærkning til CC2-niveau:

- › Partial faktor, $\gamma_{G,dst}$ kalibreret ved at anvende den probabilistiske metode
- › Design optimering for maksimal bærevne-effekt og minimal sætnings-effekt
- › Konsekvens for overbygning er undersøgt
- › Total sætninger: max 2 cm
- › Differens-sætning: max 6 mm

Løsning (4)

- › Sætninger følges
 - › Verifikation af øgning af sikkerhed
 - › Reduktion af sætningshastighed
 - › Positiv effekt på overbygning
- › Hældning
 - › 2 målinger pr. pille
 - › Godstogs-passage kan registreres



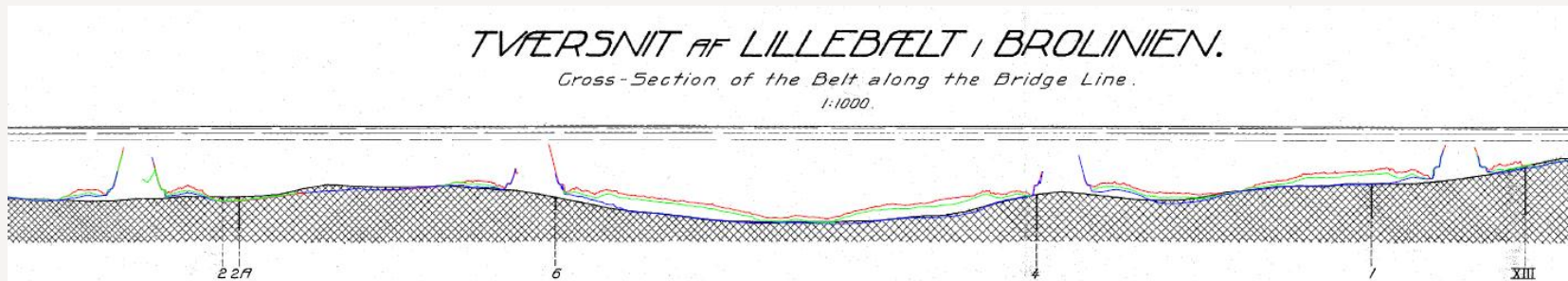
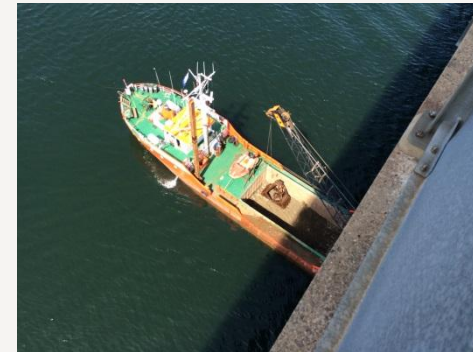
Udførelse

- › Entreprenør blev Aarsleff A/S
 - › Vores estimat: 87,9 Mkr
 - › Tilbud: 88,1 – 91,0 Mkr
- › Udførelse startede den 21. maj 2014
- › Sidste sten blev placeret den 17. dec. 2014
- › Stærk strøm var en udfordring for entreprenøren



Udførelse (2)

- › Ca. 150.000 m³ sten
- › Ingen "alarmer" under udførelsen – grænser for sætning og hældninger blev ikke overskredet
- › Forstærkningen er gennemført
- › Ekstra sætningsmålinger vil blive udført de kommende år



Videnoverførsel

- › Stort bidrag til geoteknikeres forståelse af palæogent ler
- › Forskydnings-krybning skal tages alvorligt ved stor forskel mellem peak- og residual-styrke
- › Fundering på og i palæogent ler er en udfordring
- › Undgå direkte fundering i palæogent ler

Spørgsmål ?

Carsten Steen Sørensen

css@cowi.dk

40377764

