



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## B9K - B10K projektforslag inden for Vand & Jord

Andersen, Lars; Augustesen, Anders; Andersen, Thomas Lykke; Sørensen, Carsten Steen; Burcharth, Hans F.; Brorsen, Michael; Ibsen, Lars Bo

*Publication date:*  
2007

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Andersen, L., Augustesen, A., Andersen, T. L., Sørensen, C. S., Burcharth, H. F., Brorsen, M., & Ibsen, L. B. (2007). *B9K - B10K projektforslag inden for Vand & Jord*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Latest News Nr. 3

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# **B9K – B10K projektforslag inden for Vand & Jord**

*Lars Andersen*

*Anders Augustesen*

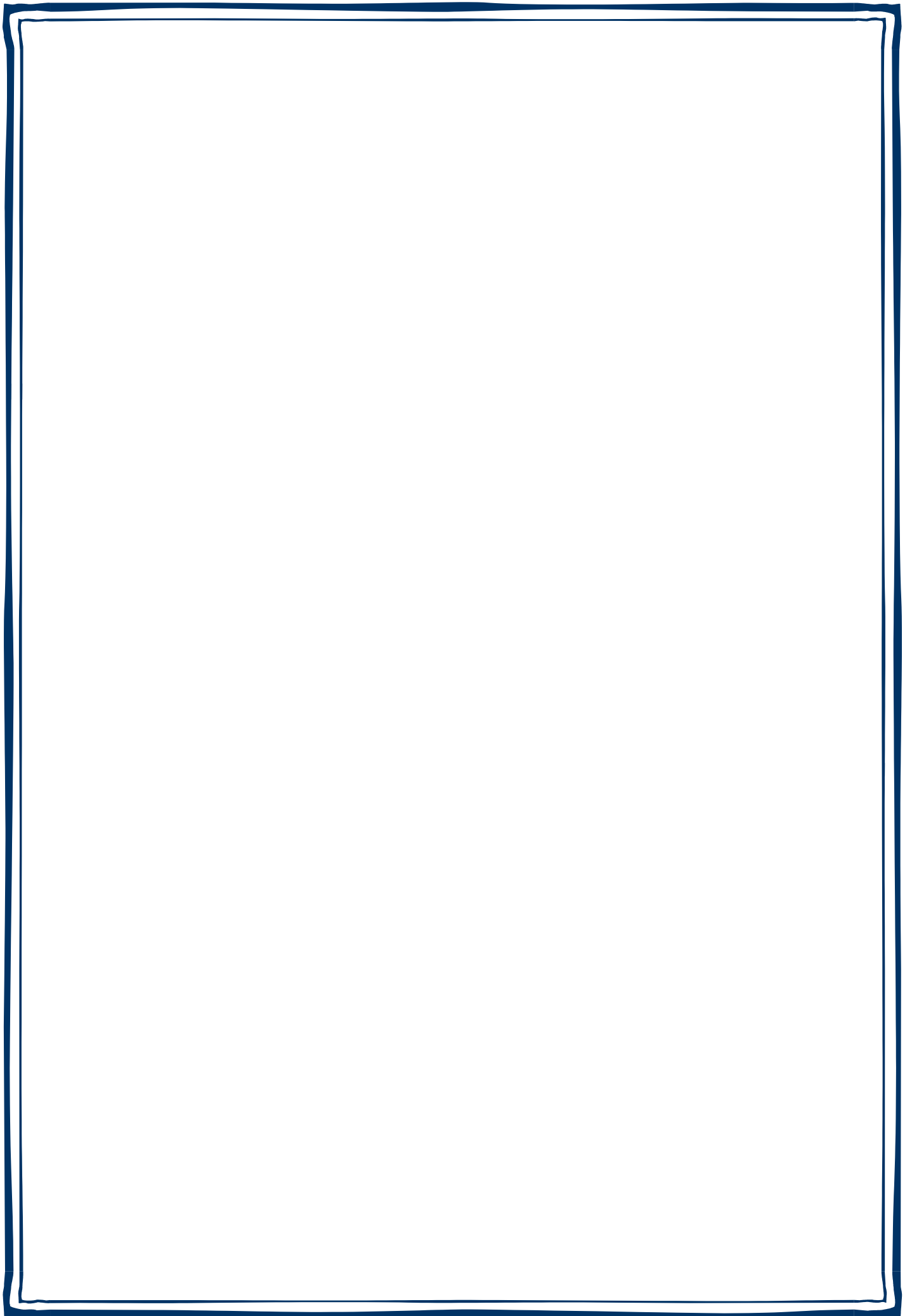
*Thomas Lykke Andersen*

*Carsten S. Sørensen*

*Hans F. Burcharth*

*Michael Brorsen*

*Lars Bo Ibsen*



Aalborg University  
Department of Civil Engineering  
Water and Soil

**DCE Latest News No. 3**

**B9K – B10K projektforslag  
inden for Vand & Jord**

by

Lars Andersen

Anders Augustesen

Thomas Lykke Andersen

Carsten S. Sørensen

Hans F. Burcharth

Michael Brorsen

Lars Bo Ibsen

May 2007

© Aalborg University

## **Scientific Publications at the Department of Civil Engineering**

*Technical Reports* are published for timely dissemination of research results and scientific work carried out at the Department of Civil Engineering (DCE) at Aalborg University. This medium allows publication of more detailed explanations and results than typically allowed in scientific journals.

*Technical Memoranda* are produced to enable the preliminary dissemination of scientific work by the personnel of the DCE where such release is deemed to be appropriate. Documents of this kind may be incomplete or temporary versions of papers—or part of continuing work. This should be kept in mind when references are given to publications of this kind.

*Contract Reports* are produced to report scientific work carried out under contract. Publications of this kind contain confidential matter and are reserved for the sponsors and the DCE. Therefore, Contract Reports are generally not available for public circulation.

*Lecture Notes* contain material produced by the lecturers at the DCE for educational purposes. This may be scientific notes, lecture books, example problems or manuals for laboratory work, or computer programs developed at the DCE.

*Theses* are monographs or collections of papers published to report the scientific work carried out at the DCE to obtain a degree as either PhD or Doctor of Technology. The thesis is publicly available after the defence of the degree.

*Latest News* is published to enable rapid communication of information about scientific work carried out at the DCE. This includes the status of research projects, developments in the laboratories, information about collaborative work and recent research results.

Published 2007 by  
Aalborg University  
Department of Civil Engineering  
Sohngaardsholmsvej 57,  
DK-9000 Aalborg, Denmark

Printed in Denmark at Aalborg University

ISSN 1901-7308  
DCE Latest News No. 3

## B9K – B10K projektforslag inden for Vand & Jord

På de følgende sider er listet en række projektforslag inden for vandbygning og geoteknik. Har man selv andre forslag, er de yderst velkomne. Ligeledes kan de stillede forslag kombineres og revideres efter ønske og behov, og alle projekter kan laves som 9.- og/eller 10.-semesterprojekter. Under alle omsdtændigheder vil det være en god ide at lave projekterne i tomandsgrupper (evt. tremandsgrupper).

- Run-up genererede slammingskræfter på adgangsplatforme til offshore-vindmøller
- Fritspændsanalyse af rørledning fra offshore installation
- Skalaeffekter relateret til bølgeopskyl
- Korrekt bestemmelse af bølgekræfter på offshore-fundamenter ved modelforsøg
- Vibrationer fra trafik på “smukke” gader
- Egenskaber af sand omkring pæle udsat for scour
- Den virtuelle bølgerende
- Egenskaber af anisotropisk jord
- Store horisontalt påvirkede pæle
- Stabilitet af geotekniske konstruktioner
- Bøttefundamentets styrke- og deformationsegenskaber ved cyklisk belastning
- Bøttefundamentets styrke- og deformationsegenskaber ved installation i ler
- Design af erosionsbeskyttelse til offshore-vindmøller
- Scour-beskyttelse omkring bøttefundament

Studerende på B9K og B10K, som har interesse i vandbygning og geoteknik, er velkomne til at henvende sig til en af undertegnede.

Med venlig hilsen,

Anders Augustesen (AA)

Thomas Lykke Andersen (TLA)

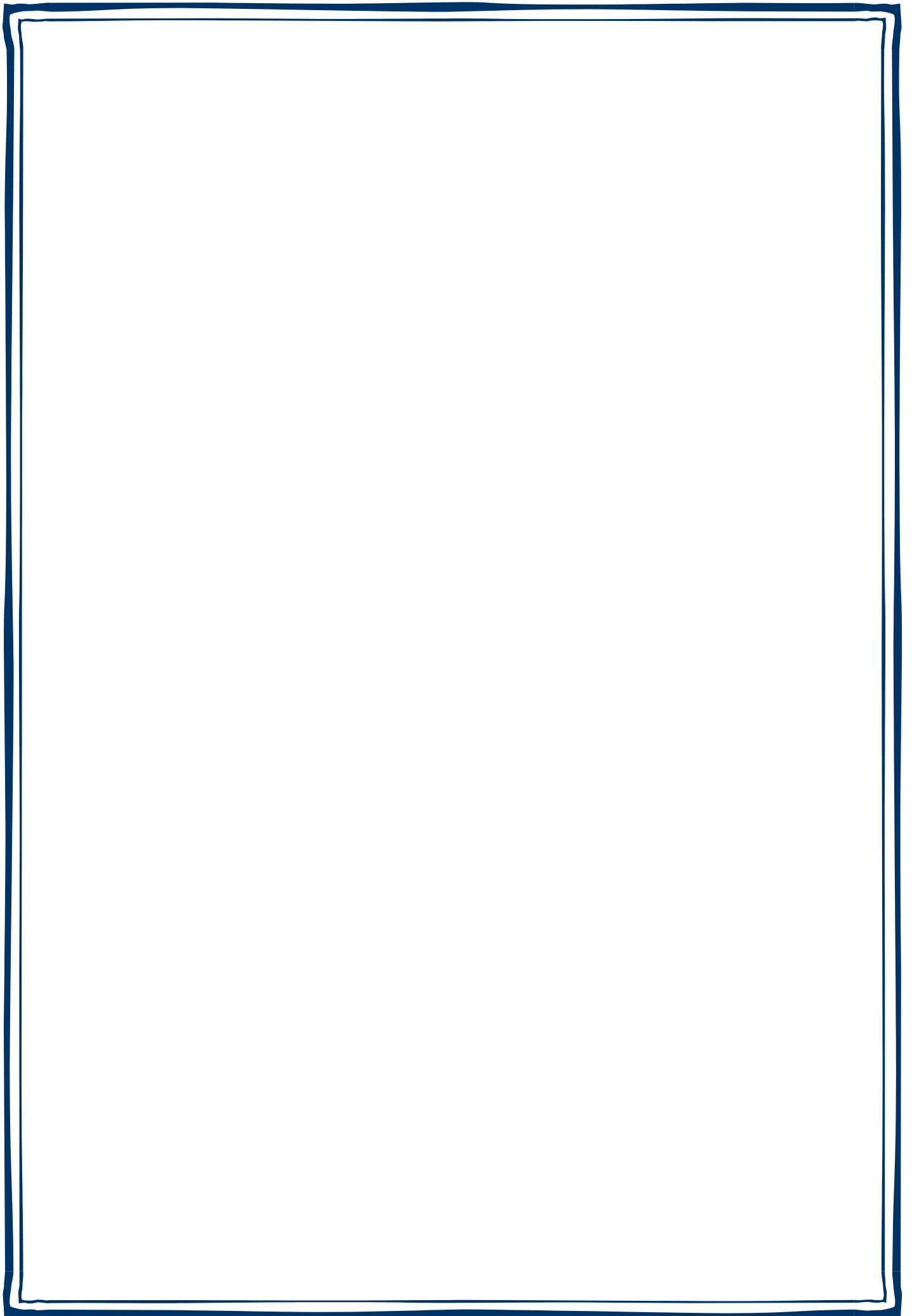
Carsten S. Sørensen (CSS)

Michael Brorsen (MB)

Lars Bo Ibsen (LBI)

Hans F. Burcharth (HFB)

Lars Andersen (LA)



## Run-up genererede slammingkræfter på adgangsplatforme til offshore-vindmøller

**Formål:** Når en brydende bølge rammer ind mod en pæl kan der genereres et ret stort opskyl på pælen. Dette kan give anledning til ret store belastninger på adgangsplatformen typisk slamming tryk op til 50 mVs. Da man ikke tog højde for de meget store påvirkninger ved design af Horns Rev 1, er der observeret store beskadigelser på en del af adgangsplatformene.



I forbindelse med design af fundamentene til Horns Rev 2 blev der på Aalborg Universitet udført forsøg til klarlægning af opskylshøjden på pælen og de belastninger opskyllet genererer på platformen. Disse forsøg benyttes nu til design af Horns Rev 2.

Sammenligning af video og målinger udført på DHI har dog sandsynliggjort at et målesystem bestående af elevationsmålere af modstandstypen ikke er optimalt. Hvis man kan klarlægge usikkerheden på de udførte opskyls målinger mere præcist, kan design belastningerne sandsynligvis reduceres med 10-30%.

I dette projekt ønskes undersøgt forskellige eksperimentelle målemetoder til bestemmelse af opskylshøjden undersøgt og deres usikkerheder belyses. Den bedste metode udvælges og en beregningsmodel kalibreres ud fra en række forsøg med denne metode.

### Indhold:

- Bestemmelse af opskylshøjde ved elevationsmåler af modstandstypen,
- Bestemmelse af opskylshøjde ved video,
- Bestemmelse af opskylshøjde ved step gauge,
- Kalibrering af run-up beregningsmodel,
- Kalibrering af slammingkraftmodel,
- Alternative platformsløsninger.

**Vejleder:** TLA

**Teori:**  **Forsøg:**  **EDB:**



## Fritspændsanalyse af rørledning fra offshore installation

**Formål:** Kraften på en rørledning er primært ekspansionskraften fra varmen tilført fra det gennemstrømmende olie/gas. Ved vertikale (sekundært laterale) imperfektioner kan rørledningen bøje op (eulerlast) med stor risiko for at rørledningen kollapser (Upheaval Buckling). Den krævede modstand mod udbøjning er en funktion af mediets temperatur og imperfektionens højde og længde. Denne modstand opnås under installationen ved at nedgrave rørledningen og i tilfælde af efterfølgende konstatering af imperfektioner ved stendækning.

Ved design af en rørledning tages der højde for en tilladelig fritspænds længde. Under de årlige rørledningsinspektioner findes regelmæssigt fritspænd på rørledningerne på grund af lokal erosion. I de fleste tilfælde er disse frie spænd under den maksimale tilladelige længde. I få tilfælde behøves der en mere detaljeret reanalyse af om det er nødvendigt med genopfyldning i form af sten.

De udførte fritspænds analyser indeholder dels brudgrænsetilstand (Ultimate Limit State) og dels udmattelse (Fatigue Limit State) analyser. I begge tilfælde kan der forekomme svingninger fra hvirveldannelse (Vortex Induced Vibrations), der dels bidrager til forøgelse af spændingerne i røret samt potentielt udgør et stort bidrag til udmattelseskaden på grund af det store antal cykler. Dette kan både være udmattelse i rørledningen og udmattelse i jorden hvor der måske er en potentiel mulighed for at rørledningen så at sige bliver vibreret ud af jorden og en større længde bliver frit lagt.

**Indhold:** Følgende punkter kan indgå i arbejdet:

- Bestemmelse af lasten på røret (hydrodynamisk last på rør ved havbund).
- Etablere bedre jord/rør interface ved indspændinger.
- Bestemmelse af dæmpning (inklusive jord dæmpning).
- Risikovurdering mht. brud i jord/rørledning pga. belastningen på rørledningen.
- Analyse af tilladeligt fritspænd ved kollision med anker.

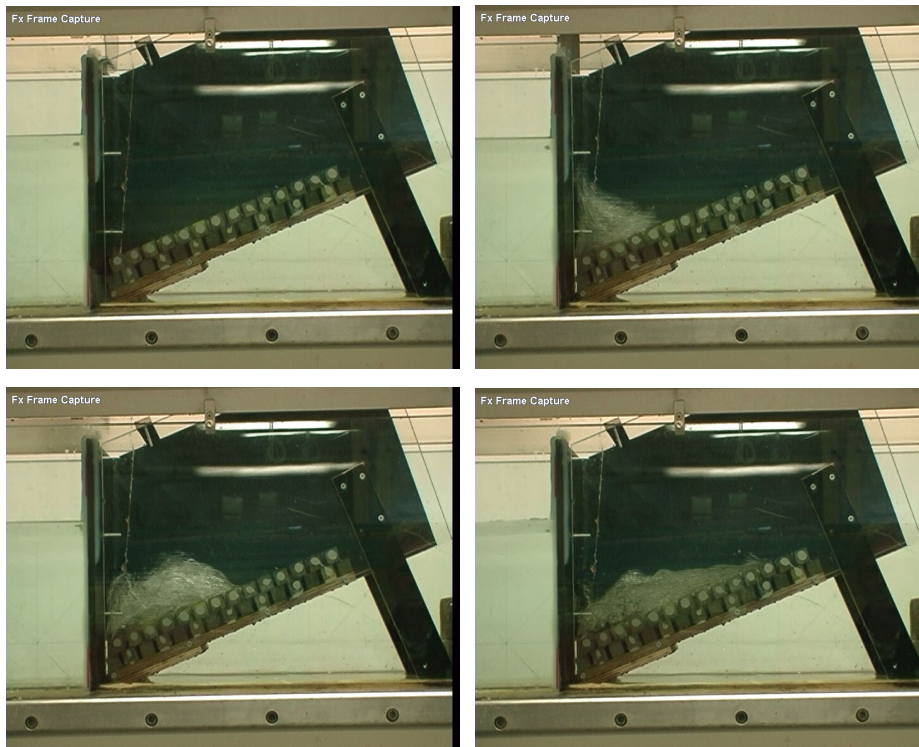
**Vejleder:** TLA, LA

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Skalaeffekter relateret til bølgeopskyl

**Formål:** Hvis en brydende bølge observeres i naturen vil man se den har et meget mere hvidt udseende end hvad der kan observeres når den samme situation reproduceres i laboratoriet. En sammenligning af luftindholdet og bobelstørrelsen viser at der er ret store forskelle mellem natur og modellen. Det skyldes hovedsageligt at vandets overfladespænding ikke er skaleret i Froudes modellov. Dette giver anledning til boblerne bliver relativt for store i modellen, hvormed de også hurtigere dissiperer end de mange flere mindre bobler i naturen. En anden vigtig grund til forskellen i luftindholdet er at der i modellen oftest benyttes ferskvand mens vandet i naturen er salt.

Indflydelsen af disse forskelle i luftindhold og bobelstørrelse på bølgeopskyl, overskyls mængden og de bølgeinducerede kræfter er dog ringe belyst. Dette ønskes undersøgt ved laboratorie forsøg. Her kan opskyllet af en ru skråning modelleres bl.a. modelleres ved opstillingen vist i figuren nedenfor. Hermed kan væsker med forskellige densiteter, viskositeter, saltindhold, luftindblanding meget lettere undersøges. Ligeledes undgås en række modeffekter.



**Indhold:** Effekten af følgende fænomener ønskes belyst gennem arbejdet:

- Variation af saltindhold,
- Variation af luftindhold og bobelstørrelse,
- Variation af viskositet og densitet.

**Vejleder:** TLA,HFB,LA

**Teori:**  **Forsøg:**  **EDB:**

## Korrekt bestemmelse af bølgekræfter på offshore-fundamenter ved modelforsøg

**Formål:** Når bølgebelastning på et fundament skal klarlægges suppleres beregningerne som oftest med modelforsøg. Den eksperimentelle bestemmelse af bølgelasten kan foregå på følgende to måder:

- Bestemmelse af trykvariationen på overfladen af fundamentet ved hjælp af trykceller og numerisk integration af denne.
- Ophænge konstruktionen i en krafttransducer således modellen hænger et lille stykke over bunden. Dermed kan moment og vandret kraft på modellen bestemmes.

Den sidste metode er langt billigst og lettest at udføre i praksis, men giver anledning til nogle modeffekter. Disse modeffekter ønskes klarlagt i dette projekt hvor de to målemetoder benyttes samtidigt.

Ligeledes suppleres med nogle beregninger af hvorledes de bølgeinducerede tryk penetrerer ind under fundamentet. Dette vil selvfølgelig afhænge af fundamentets udseende og jordens egenskaber. Indflydelsen af disse tryk på fundamentets bæreevne ønskes ligeledes undersøgt.

**Indhold:** Følgende punkter kan indgå i arbejdet:

- Udførelse af modelforsøg med varierende frihøjde over bunden.
- Indflydelse af tryk på undersiden på målingerne.
- Numerisk bestemmelse af trykkene på bunden når fundamentet står på en mere eller mindre permeable jord.
- Indflydelse på fundamentets bæreevne

**Vejleder:** TLA, LA

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Vibrationer fra trafik på “smukke” gader

**Formål:** Gennem de senere år har man i forbindelse med byforskønnelsesprojekter retableret brostensbelægningen på adskillige gader i de indre bydele. Som eksempel kan nævnes Boulevarden og dele af Østerå i Aalborg. Hertil kommer, at man med udgangspunkt i ønsket om mindre trafikhastigheder har etableret chikaner og fartbump. Dette er imidlertid sket på bekostning af et forøget vibrationsniveau. Den ujævne vejoverflade medfører nemlig, at rystelser genereres under bilernes hjul og føres gennem jorden til det omkringliggende miljø til gene for mennesker og muligvis til skade for bygninger. Spørgsmålet er imidlertid, om man kan udforme vejbelægningen, så den på samme tid tilgodeser såvel de “arkitektoniske” som de komfort- og sikkerhedsmæssige krav.



**Indhold:** Projektet består i en analyse af vibrationer fra køretøjer på forskellige vejbelægninger og efterfølgende design af vejbanen og underlaget. Følgende punkter kan indgå i arbejdet:

- numerisk modellering af vibrationsudbredelse gennem vej og underlag,
- verifikation af beregningsmodel vha. dynamiske målinger,
- design af vejoverflade med henblik på formindskelse af vibrationer,
- udformning af vejunderlag til forhindring af vibrationsudbredelse.

Arbejdet kan evt. ske i samarbejde med en virksomhed, som producerer materialer til vejbelægning fyldmaterialer til vejbygning.

**Vejleder:** LA

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Egenskaber af sand omkring pæle udsat for scour

**Formål:** Når en konstruktion bygges ud i vand eller helt offshore, vil dens tilstedeværelse ændre strømningens mønster lokalt. Denne ændring skyldes en eller flere af følgende fænomener: Indsnævring af strømmingen; dannelse af hestekohvirvel foran konstruktionen; dannelse af hvirvel skyggezone med eller uden hvirvel afløsning bag konstruktionen; dannelse af turbulens; refleksion og diffraktion på konstruktionen; og forekomst af bølgebrydning. Disse ændringer i strømningens mønster øger den lokale sedimenttransportkapacitet, og der er derfor en øget risiko for lokal erosion omkring konstruktionen. I langt de fleste projekter er dette problem løst ved at udlægge en bundbeskyttelse i form af sten.

Inden for de seneste par år er man dog begyndt at overveje om det er mere økonomisk rentabelt at dimensionere pælen uden bundbeskyttelsen. Det vil sige man tager hensyn til erosionshullet og dets variation i tid og sted. Det har nemlig vist sig at det store erosionshul kun eksisterer i en ganske lille procentdel af konstruktionens levetid. Typisk vil strøm medføre en nettotransport af materiale væk fra konstruktionen, dvs. et scour-hul dannes, mens bølger dækker hullet til igen. Spørgsmålet er imidlertid, hvordan styke- og deformationsegenskaberne er af det materiale, som bundfæles i scourhullet. Ligeledes er det interessant at vide, hvor langt ned under havbunden, scourprocessen kan spores. Det er disse spørgsmål, som ønskes besvaret gennem projektet.

Løsningen uden erosionsbeskyttelse er derfor interessant da det typisk er udmattelse der er dimensionsgivende for pælen.

**Indhold:** Projektet er rettet mod studerende, som ønsker at arbejde med forsøg og materialemodellering. Følgende punkter kan indgå i arbejdet:

- Studie af teori for scour,
- Udformning af model,
- Opstilling af designgrundlag (bølgetilstand, strøm, initial tilstand af jord),
- Udførelse af modelforsøg,
- Teoretisk analyse af jords opførsel under sedimentation,
- CFD/FEM modellering af jord og vand.

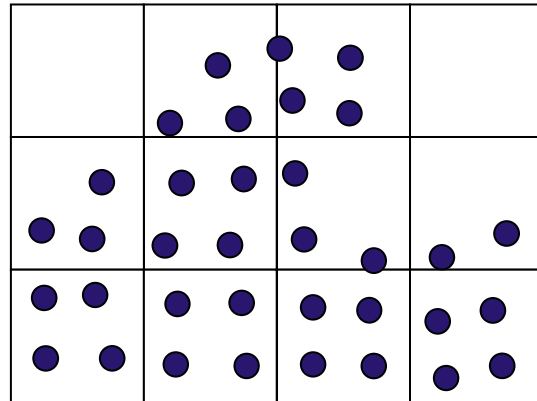
Det kan evt. komme på tale at lave observationer på eksisterende konstruktioner.

**Vejleder:** LA, TLA

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Den virtuelle bølgerende

**Formål:** Ved design af offshore-installationer, kystsikrings- og bølgeenergianlæg samt havnekonstruktioner anvendes ofte modelforsøg foretaget i en bølgerende. Modelforsøg er imidlertid tidskrævende og dyre at udføre – særligt hvis der skal laves parameterstudier, hvor forskellige/gentagne opbygninger af modellen kræves. Derfor er det yderst relevant at have en numerisk model til beregning af bølgepåvirkningen på konstruktioner. Problemet er, at eksisterende modeller baseret på traditionelle Computational Fluid Dynamics beregningsskemaer ikke kan håndtere et frit vandspejl på tilfredsstillende vis. Således opstår numerisk diffusion i modellen. Dette problem kan med al sandsynlighed omgås ved i stedet at benytte den såkaldte *Particle in Cell* (PiC) metode, hvor man holder styr på materialets (vandets) nøjagtige position, og ikke blot refererer til kontrolvolumener.



**Indhold:** Projektets hovedbestanddel er programmering af den virtuelle bølgerende baseret på Particle in Cell metoden. Følgende punkter kan indgå i arbejdet:

- formulering af numerisk model baseret på PiC metoden,
- programmering af den virtuelle bølgerende,
- implementering af en turbulensmodel i PiC-modellen,
- sammenligning af PiC-model med en/flere eksisterende modeller,
- sammenligning af PiC-model med forsøgsresultater for udvalgte konstruktioner,
- vurdering af PiC-modellens anvendelse mht. bølgekræfter og overskyl.

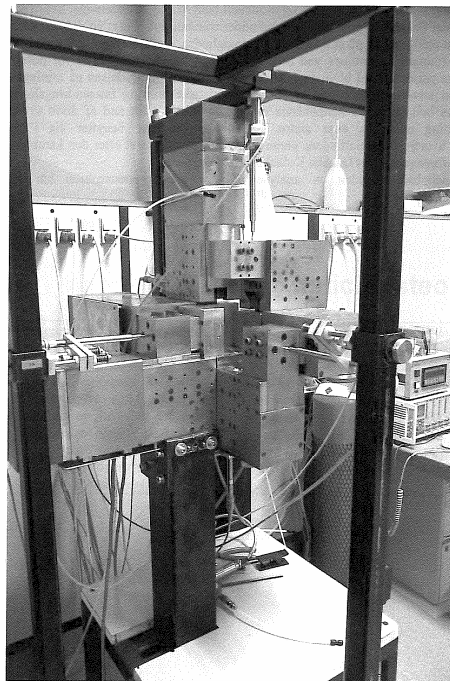
Der vil i forbindelse med projektet være mulighed for at køre parallelberegning på et computer cluster.

**Vejleder:** LA, MB

**Teori:**    **Forsøg:**    **EDB:**

## Egenskaber af anisotropisk jord

**Formål:** Dimensionering af geotekniske konstruktioner foretages i stor udstrækning i dag ved hjælp Finite Element Models. De i dag benyttede konstitutive modeller for jord antager generelt, at det modellerede materiale er isotropisk. Naturlig aflejring af jord er derimod sjældent isotropisk, men ofte krydsanisotropisk (éns egenskaber i de to vandrette retninger, som er forskellig fra egenskaberne på tværs af laggrænserne). Det er ønskeligt at undersøge, hvor stor en fejl, der begås, når geotekniske konstruktioner dimensioneres under antagelse af isotropiske egenskaber. I laboratoriet er det muligt at undersøge anisotropisk jords egenskaber i det kubiske triaxial apparat. Når de anisotropiske egenskaber er undersøgt, kan disse implementeres i en konstitutiv model med henblik på at undersøge ovennævnte fejl.



**Indhold:** Projektets hovedbestanddel er en kombination af laboratorieforsøg samt formulering af en anisotropisk konstitutiv model og implementering af denne i et FEM-program. Følgende punkter kan indgå i arbejdet, enten helt eller delvist:

- undersøgelse af krydsanisotropisk jords egenskaber, evt. ved forsøg,
- formulering/revidering af en konstitutiv model for anisotropisk jord,
- implementering af den konstitutive model, fx i FEM-programmet ABAQUS,
- undersøgelse af fundamenters bæreevne under antagelse om isotropisk jord kontra anisotropisk jord.

Eksisterende forsøgsresultater for sand foreligger, hvis det ikke ønskes at udføre laboratorieforsøg i forbindelse med nærværende projekt.

**Vejleder:** LA, AA

**Teori:**    **Forsøg:**    **EDB:**

## Store horisontalt påvirkede pæle

**Formål:** Idag anvendes pæle med store diametre ( $D=5-8\text{m}$ ) ofte i forbindelse med fundering af for eksempel havvindmøller. Pæle er udsat for store horisontale kræfter i form af for eksempel vind og bølger. Design af horisontaltbelastede pæle baseres ofte på en Winkler model hvor jord/pæl-responset er repræsenteret ved ikke-lineære fjedre og det kan beskrives ved såkaldte p-y kurver. Metoden baseret på p-y kurver ligger til grund for anbefalingerne beskrevet i API-standarden, som anvendes over hele verden ved fundering af konstruktioner på vand. API-standarden er udviklet i forbindelse med olieindvindingsanlæg af the American Petroleum Institute. Anbefalingerne i API-standarden vedrørende horisontaltbelastede pæle i sand er baseret på meget få tests og er primært gældende for pæle med diametre mindre end 2,5m. Det ser ud til, at API-standarden giver anledning til et ikke-konservativt design, når denne metode anvendes på pæle med store diametre ( $D=5-8\text{m}$ ). Skalering er altså en nøgle faktor, der ikke er nærmere belyst. Ydermere er interaktionen mellem jord og pæl ikke velbeskrevet og er den interaktionsmodel, der normalt dimensioneres ud fra korrekt? Projektet går altså ud på at undersøge/belyse designgrundlaget for store horisontaltbelastede pæle.



**Indhold:** Følgende punkter kan indgå i arbejdet, enten helt eller delvist:

- Numerisk modellering af jord/pæl interaktionen med for eksempel FLAC.
- Effekten af diameter, længde, stivheder af pæl og jord på pæleresponset.
- Kalibrering af p-y kurver for både statisk og cyklisk belastning.
- Opstilling af pæl/jord model baseret på et Pasternak fundament og forskydningsfleksibilitet af pæl.
- Brud i jorden omkring horisontaltbelastede pæle.
- Litteraturestudie.

**Vejleder:** AA, LA, LBI

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐



## Stabilitet af geotekniske konstruktioner

**Formål:** Undersøgelse af stabilitet af støttemure, spunsvægge, skrænter og ankre er vigtig i forbindelse med bygge- og anlægsprojekter. Ofte har vand en afgørende betydning, når der opstår stabilitetsbrud i forbindelse med sådanne konstruktioner. Imidlertid kan man spørge, om der tages højde for vandtryk i dag på korrekt vis. Hertil kommer, at skrænter i dag laves stejlere og stejlere. I den forbindelse er “soil improvement” et centralt begreb.

Jordtryk på konstruktioner kan i dag beregnes ved hjælp af konventionelle metoder og numeriske værktøjer såsom PLAXIS og ABAQUS. Det er ønskeligt at undersøge, hvor stor en forskel i jordtryk de to metoder giver anledning til. Der kan eventuelt tages udgangspunkt i en konstruktion, hvorpå der måles jordtryk. Desuden ændres jordtrykkene sandsynligvis med tiden. Det er interessant at vide, hvor stor denne ændring er, og om beregningsmodellerne tager højde for det. For at dimensionere jordtrykpåvirkede konstruktioner indføres der sikkerhed i form af regningsmæssige styrkeparametre; men er dette optimalt?



**Indhold:** Projektet omhandler problemstillinger med hensyn til stabilitet af geotekniske konstruktioner og skrænter. Hovedbestanddelen i projektet går på at sammenligne konventionelle metoders anvendelighed i forhold til numeriske. Beregningerne kan eventuelt følges op med mark- og laboratorieforsøg. Følgende punkter kan indgå i arbejdet, enten helt eller delvist:

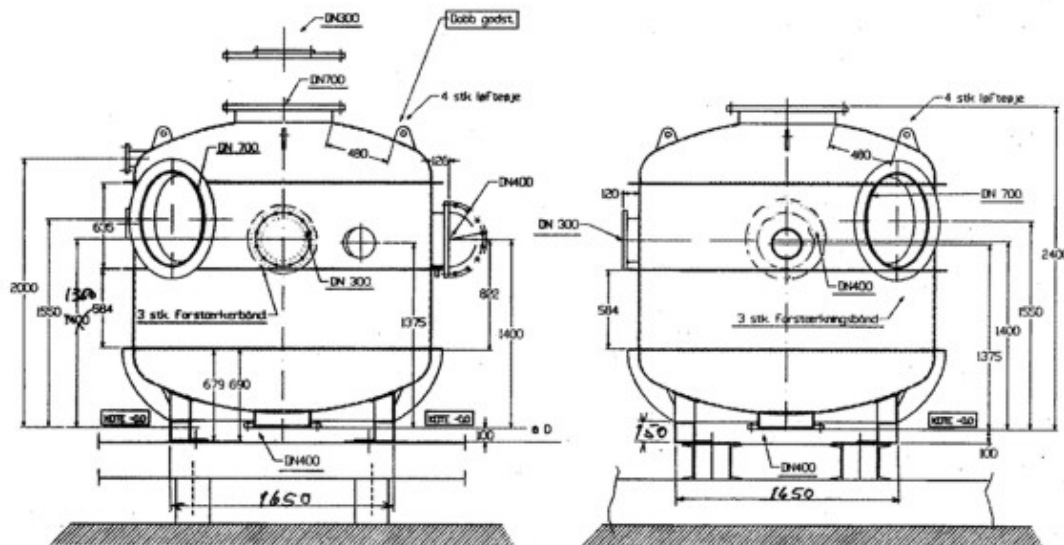
- vandtryks indflydelse på total stabilitet,
- undersøgelse af fordele ved “soil improvement” mht. stabilitet,
- teoretisk bestemmelse af jordtryk, konventionelle og numeriske beregninger,
- eksperimentel undersøgelse af jordtryk.

**Vejleder:** CSS, AA, LA

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Bøttefundamentets styrke- og deformationsegenskaber ved cyklisk belastning

**Formål:** De kræfter der virker på vindmøller, transient og cykliske i natur, giver anledning til elastiske oscillationer og muligvis til liquefaction af sandet inde i bøtten. Sådant sand liquefaction vil sandsynligvis føre til fuldstændige bæreevnesvigt, hvorfor liquefaction skal undgås.



**Indhold:** Forholdene, der kan føre til sådanne tilstande, skal undersøges og fastlægges ved eksperimenter. En forsøgstank indeholdende faciliteter til udlejring af jorden samt mulighed for statisk og transient og cyklisk belastning er udviklet i dette forår ved laboratoriet for fundering, Aalborg Universitet, se figuren. Tanken ønskes gennem dette projekt at blive gjort fuld operationel. Tankens belastningssystem er opbygget således, at det kan benyttes til cykliske udmattelsesforsøg. Herved kan risikoen for liquefaction undersøges:

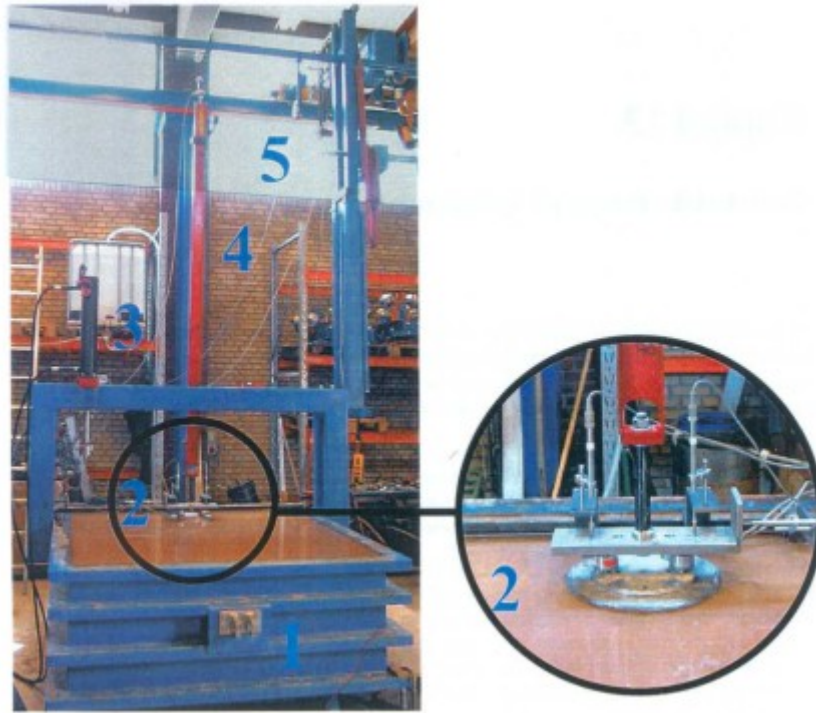
- Resultaterne af disse forsøg sammenholdes med resultaterne fra de statiske forsøg. Herved kan det evalueres, om den varierende belastning har indflydelse på fundamentets bæreevne, stivhed samt plastiske deformationer.
- Den elastiske opførsel under cyklisk belastning er vigtig for interaktionen med tårnet, og dette skal kortlægges ved hjælp af eksperimenter, analyse og beregning på baggrund af elasticitetsteori ud fra de udførte forsøg. noget til sidst.

**Vejleder:** LBI

**Teori:**    **Forsøg:**    **EDB:**

## Bøttefundamentets styrke- og deformationsegenskaber ved installation i ler

**Formål:** 3-D numerisk simulering af forskellige typer af bøttefundamenter installeret i ler foretages. Deres anvendelighed til offshore vindmøller undersøges med henblik på forståelse af deres opførsel under normale og ekstreme laster når den funderes i ler.



**Indhold:** Resultater fra en række modelforsøg (fra pågående afgangprojekt) skal simuleres numerisk og sammenlignes med resultater fra analytiske modeller.

- I de numeriske simuleringer vil der blive arbejdet med en avanceret konstitutiv model for jorden, Single Hardening modellen, og det tilsigtes at jord/struktur behandles så realistisk som muligt. Denne model er implementeret i det kommercielle finite element program ABAQUS som eksternt defineret materialemodel. Materialeparametre findes fra triaksialforsøg udført på jordprøver fra de relevante offshore lokaliteter og fra kalibrerede CPT-forsøg udført ved siden af borehullerne.
- De simulerede bøttefundamentforsøg er de ovenfor beskrevne modelforsøg og de forsøg. Disse inkluderer udrænedede forsøg, i hvilke bøtterne er påvirket af moment, horisontale og vertikale kræfter. De numeriske analyser er i stand til at simulere ændringen i størrelse og form af brudfladen i H-M/D planet, svarende til de eksperimentelle observationer.

**Vejleder:** LBI

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐

## Design af erosionsbeskyttelse til offshore-vindmøller

**Formål:** Når en konstruktion bygges ud i vand eller helt offshore, vil dens tilstedeværelse ændre strømningens mønster lokalt. Denne ændring skyldes en eller flere af følgende fænomener: Indsnævring af strømmingen; dannelse af hestekohvirvel foran konstruktionen; dannelse af hvirvel skyggezone med eller uden hvirvel afløsning bag konstruktionen; dannelse af turbulens; refleksion og diffraktion på konstruktionen; og forekomst af bølgebrydning. Disse ændringer i strømningens mønster øger den lokale sedimenttransportkapacitet, og der er derfor en øget risiko for lokal erosion omkring konstruktionen. Såfremt den lokale erosion udgør en fare for stabiliteten af konstruktionen er det nødvendigt med en eller anden form for bundbeskyttelse som typisk består af udlægning af sten. Bundbeskyttelsen designes mange gange ud fra et krav om, at der under ingen omstændigheder må forekomme flytninger af stenene. Når dette skal vurderes, er der grundlæggende 2 forskellige metoder der typisk anvendes.

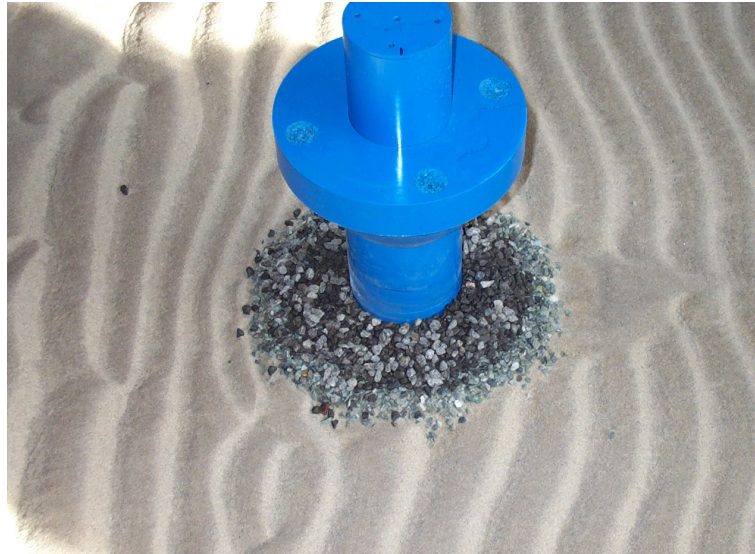
Den første metode er en traditionel beregning der forløber som følger:

1. Estimering af maksimal bundforskydningsspænding fra bølger og strøm i uforstyrret strømning.
2. Bestemmelse af bundforskydningsspænding i forstyrret strømning ved anvendelse af forstærkningsfaktor pga. fundamentet.
3. Bestemmelse af stenstørrelse f.eks. ved Shields diagram

En sådan beregning fører typisk til dæksten med en diameter omkring 1 meter. Men beregningen er meget usikker. Den største usikkerhed kan forventes at ligge i pkt. 3, da Shields diagram er udviklet fra forsøg med ren strøm og sandkorn. Anvendelse af dette diagram for store sten, hvor den drivende kraft er kombineret bølger og strøm, er meget tvivlsom.

Den anden metode til fastlæggelse af stenstørrelsen er udførelse af modelforsøg i lille skala (typisk 1:50). Aalborg Universitet har i flere tilfælde udført sådanne modelforsøg i forbindelse med design af en række havvindmølle parker. Sådanne modelforsøg fører typisk til sten med en diameter 0.2 til 0.6 meter. Usikkerheden i forsøgene ligger i at der kan være ret store skalaeffekter.

Der er således en stor forskel på de stenstørrelser, der findes ved de to metoder. I projektet ønskes ved forsøg klarlagt, hvilke problemer der kan være i den traditionelle beregningsgang primært med henblik på pkt. 3, således en bedre beregningsmetode findes. Hvis gabet mellem de 2 metoder klarlægges, kan behovet for udførelse af modelforsøg i fremtiden mindskes kraftigt.



Forsøg udført ved Aalborg Universitet med bundbeskyttelse omkring vindmøllefundament.

**Indhold:** Følgende punkter kan indgå i arbejdet, enten helt eller delvist:

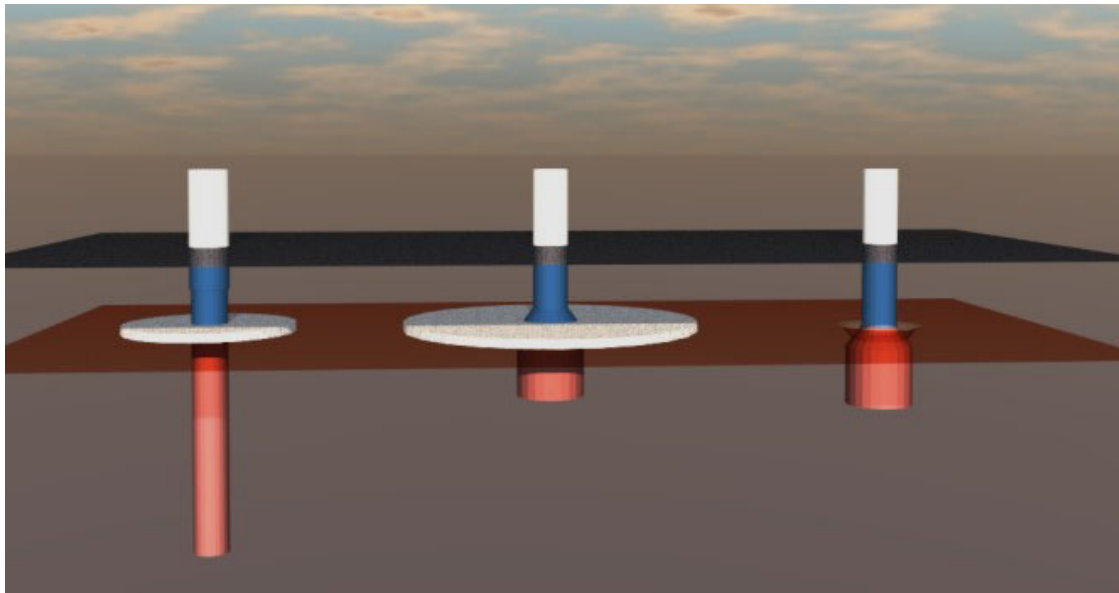
- Litteraturstudie,
- Udførelse af forsøg til fastlæggelse af kritisk bundforskydningsspænding i strøm ved forskellige stenstørrelser,
- Udførelse af forsøg til fastlæggelse af kritisk bundforskydningsspænding i bølger ved forskellige stenstørrelser,
- Udførelse af forsøg til fastlæggelse af kritisk bundforskydningsspænding i strøm + regelmæssige bølger,
- Udførelse af forsøg til fastlæggelse af kritisk bundforskydningsspænding i strøm + uregelmæssige bølger,
- Udførelse af forsøg med cylinder konstruktioner til undersøgelse af pkt. 2. Indflydelsen af beskyttelsens udstrækning bør undersøges,
- Forslag til ny design procedure.

**Vejleder:** TLA, MB

**Teori:**       **Forsøg:**       **EDB:**

## Scour-beskyttelse omkring bøttefundament

**Formål:** Placeres bøttefundamentet direkte på bunden udsættes det for scour som følge af de store lokale strømningshastigheder, som optræder umiddelbart omkring bøtten. Scour beskyttelsen udgør 20 - 25 % af den total pris for en installeret bøtte. Anvendes de designregler der gælder i dag er scour beskyttelsen umiddelbart en del større end den der kræves for en pæl, se øverste figur. For at gøre bøttefundamentet konkurrencedygtig er der udviklet en metode til at nedsænke bøtten ned i havbunden, se nederste figur. Ved at nedsænke bøtten 2 - 3 meter ned i havbunden postuleres det, at bøtten med dens lodrette skots besidder den egenskab, at udviklingen af scour hullet omkring tornet stopper, før det når ud til skørtekant, se øverste figur. Scour hullet påvirker derved ikke stabiliteten af fundamentet. Denne påstand ønskes undersøgt ved dette projekt. Projektet kan opdeles i to forløb. Projektet er derfor velegnet som et 9. semester projekt (3-6 studerende) eller som lang afgang (2-3 studerende).

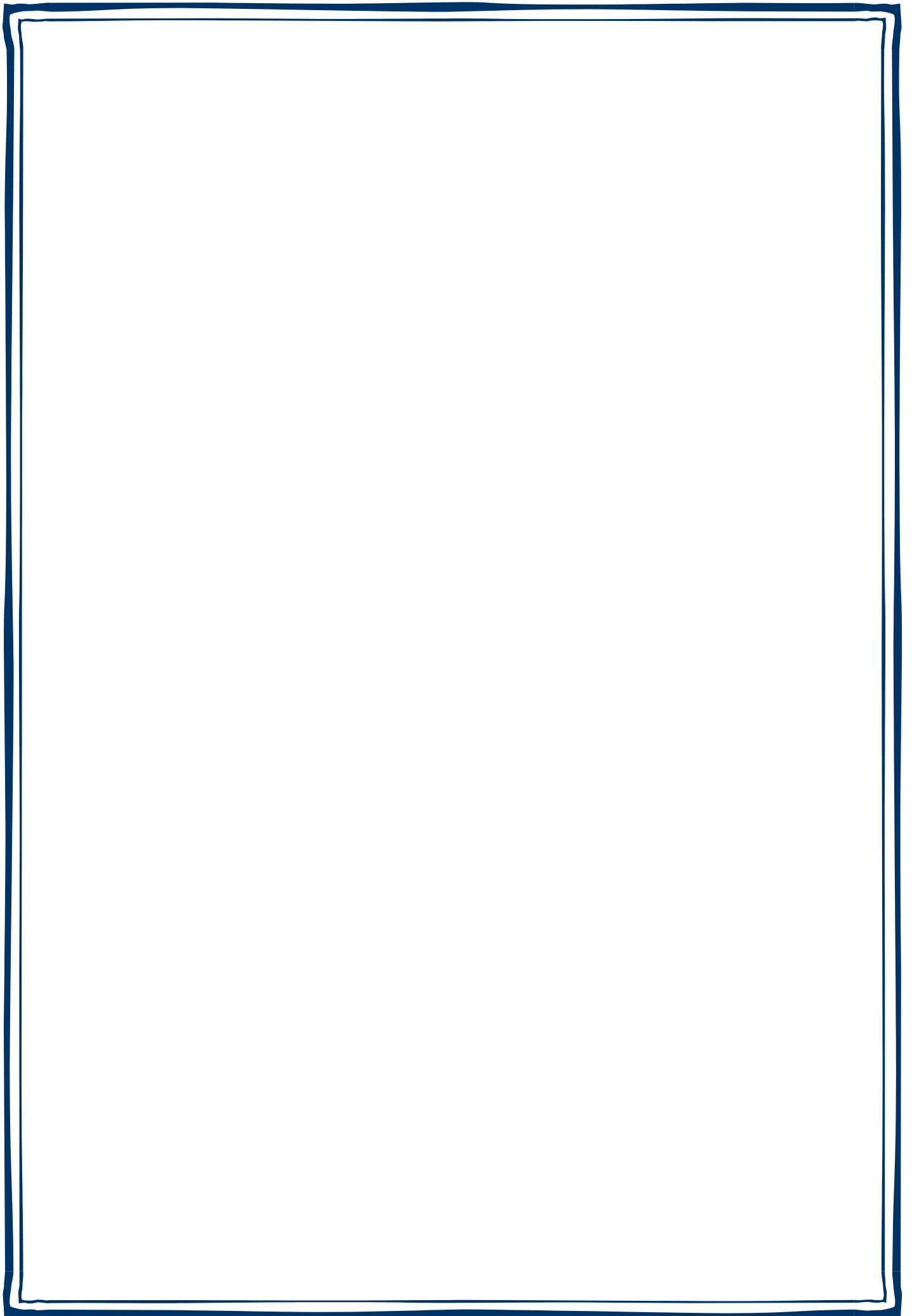


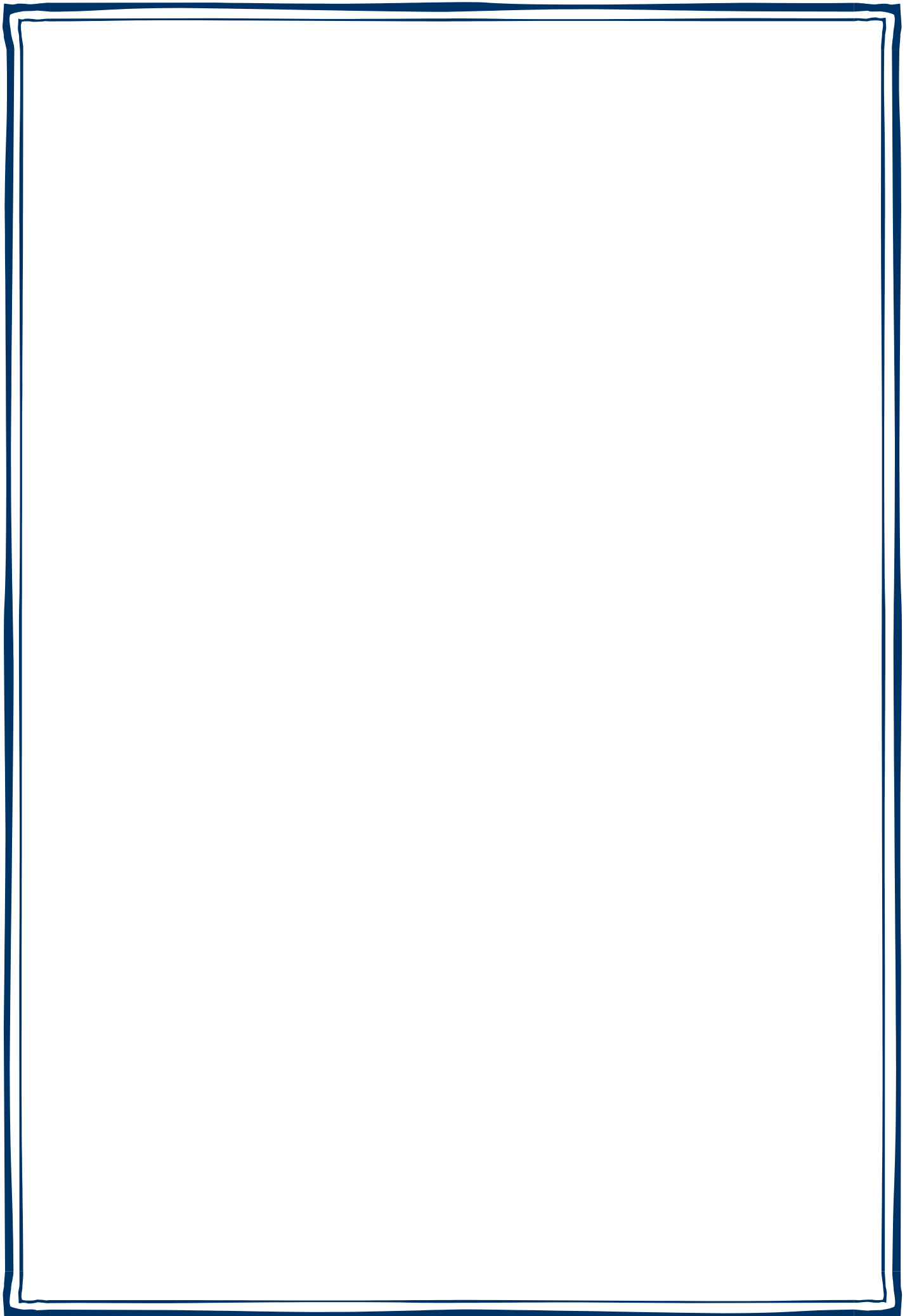
**Indhold:** Følgende punkter kan indgå i arbejdet, enten helt eller delvist:

- På 9. semester udføres der modelforsøg på bøtter 1:50 i bølgebassinet. Forsøgene skal klarlægge fænomener der relaterer sig til scour omkring en pæl, en bøtte samt en nedsænket bøtte. Ved hjælp af modellove og analytiske formler samt de udførte modelforsøg designs scour beskyttelsen ved en pæl, bøtte og en nedsænket bøtte placeret på horns rev. Der foreslås en projektgruppe på 2-6 studerende.
- På 10. semester foretages en numerisk modellering af modelforsøgene fra 9. semester. En kvantitativ analyse af problemet, dvs. en bestemmelse af mængden af borteroderet stof, kræver en kobling mellem jord og vand. En mulighed er at benytte Computational Fluid Dynamics (CFD) koblet med FEM, men alternativt kan benyttes en kobling med den såkaldte Material Point Method.

**Vejleder:** LBI, LA, MB

**Teori:** ☒☒☐ **Forsøg:** ☒☒☐ **EDB:** ☒☒☐







**ISSN 1901-7308**  
**DCE Latest News No. 3**