

SEPTEMBER 2021
AARHUS HAVN

BILAG 7

UDVIDELSE AF AARHUS HAVN - YDERHAVNEN

KYSTMORFOLOGISK UNDERSØGELSE

SEPTEMBER 2021
AARHUS HAVN

BILAG 7

UDVIDELSE AF AARHUS HAVN - YDERHAVNEN

KYSTMORFOLOGISK UNDERSØGELSE

PROJEKTNR.

A104076

DOKUMENTNR.

A104076-PD-015

VERSION

2.0

UDGIVELSES DATO

16.09.2021

BESKRIVELSE

TEKNISK RAPPORT

UDARBEJDET

PABM, HGLN

KONTROLLERET

THGI

GODKENDT

THGI

INDHOLD

1	Indledning	7
2	Naturbeskyttelsesområder	10
3	Geologi og geomorfologi	11
4	Hydrografiske forhold	13
4.1	Vandstand og vanddybder	13
4.2	Strøm	14
4.3	Bølger	15
5	Kystbeskrivelse	18
5.1	Tidligere undersøgelser	18
5.2	Generelt	18
5.3	Kysten syd for Aarhus Havn	18
5.4	Kysten nord for Aarhus Havn	33
6	Sedimenttransport	53
7	Havneudvidelsens indvirkning på kysterne	59
8	Referencer	64

1 Indledning

Aarhus Havn planlægger en større udvidelse af havnen (benævnt 'Yderhavnen'), som er nærmere beskrevet i Masterplanen [ref. /1/]. Yderhavnen vil bl.a. bestå af 140 ha nyt bagland, svajebassin med 600 m diameter og et nyt bassin på ca. 900 x 350 m, se Figur 1-1. Hovedforslaget for Yderhavnen fremgår af Figur 1-1.



Figur 1-1 Hovedforslaget for 'Yderhavnen', ref. /1/. I det følgende benævnt 'Yderhavnen hovedforslag'.

Endvidere planlægger Aarhus Kommune en udvidelse af området omkring Tangkrogen, dels for at opføre et nyt renseanlæg (Aarhus ReWater) og dels for at udvide Marselisborg Lystbådehavn. Udvidelsen af Tangkrogsområdet betegnes 'Helhedsplanen for Tangkrogen', og hovedforslaget er vist sammen med Yderhavnen i Figur 1-2 [ref. /2/].



Figur 1-2 Yderhavnen, inkl. hovedforslaget for Helhedsplanen for Tangkrogen med udvidelse af Marselisborg Lystbådehavn og landindvinding til etablering af nyt renseanlæg, Aarhus ReWater. I det følgende benævnt 'Yderhavnen hovedforslag inkl. Helhedsplanen'.

Yderhavnen hovedforslag benævnes i det følgende 'Yderhavnen hovedforslag', og Yderhavnen inkl. Helhedsplanen for Tangkrogen benævnes i det følgende 'Yderhavnen hovedforslag inkl. Helhedsplanen'.

I forbindelse med miljøkonsekvensvurderingen for Yderhavnen er der gennemført en kystmorfologisk undersøgelse af konsekvenserne ved etablering af Yderhavnen samt Helhedsplanen for Tangkrogen.

Følgende udformninger er således vurderet i kyststudiet, som er præsenteret i denne rapport:

- > Eksisterende forhold
- > Havneudvidelse med Yderhavnens hovedforslag, jf. Figur 1-1
- > Havneudvidelse med Yderhavnens hovedforslag i kombination med hovedforslaget for Helhedsplanen for Tangkrogen, jf. Figur 1-2

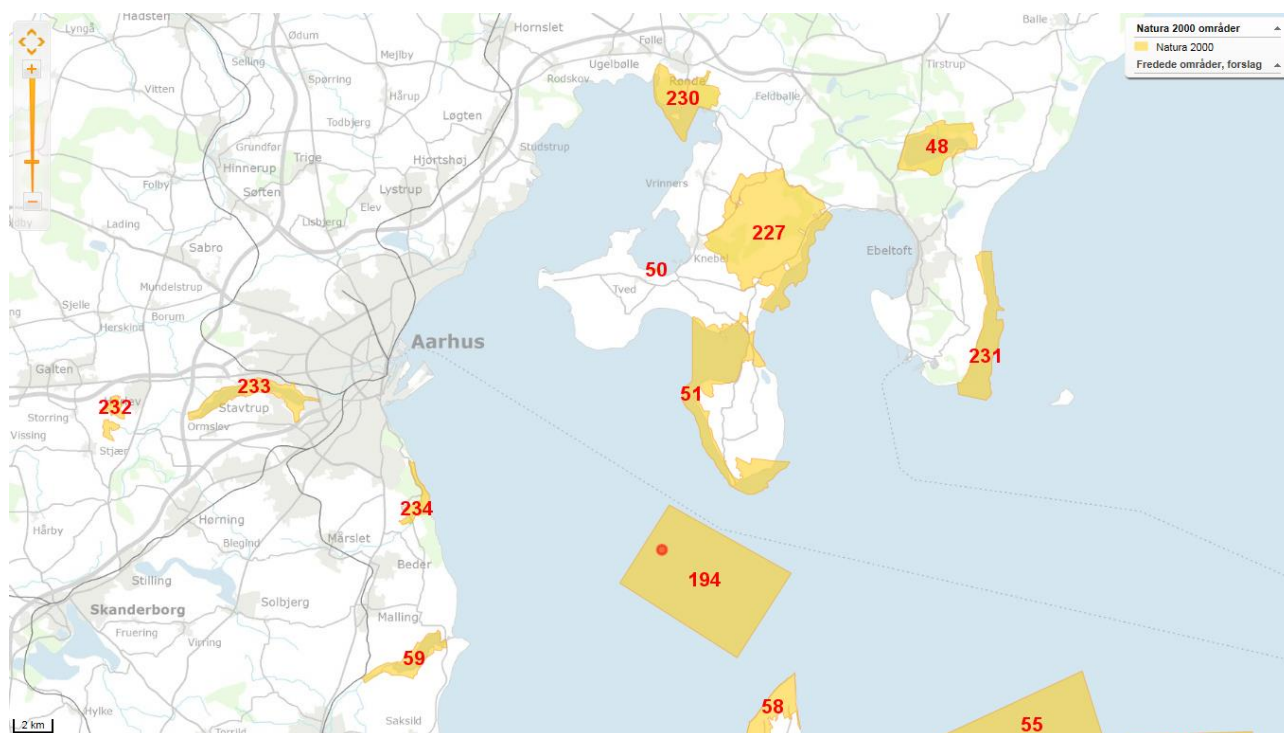
Kyststudiet er baseret på en besigtigelse af kysten foretaget i oktober 2018, samt på numerisk modellering af bølge- og strømforholdene omkring den eksisterende og fremtidige havn (se ref. /3/ og ref. /4/). Endvidere er der i forbindelse med kyststudiet foretaget analyser af såvel den historiske udvikling af kysten nord og syd for havnen, samt af sedimenttransporten langs kysten.

Studiet beskæftiger sig med kysten fra Ørnereden syd for havnen til Egå Marina nord for havnen. Udenfor dette område forventes ingen påvirkning af kysten som følge af Yderhavnen og Helhedsplanen for Tangkrogen

2 Naturbeskyttelsesområder

En del af kysten og havet i og omkring Aarhusbugten er omfattet af Natura 2000 naturbeskyttelse, se Figur 2-1. Af disse områder er Natura 2000 område 234, *Giber Å, Enemærket og Skåde Havbakker* det område, som ligger nærmest havnen.

Modellering af strøm og bølgeforhold i [ref. /4/ og /3/] viser ingen eller kun marginal ændring af strøm og bølgeforhold langs kysten i Natura 2000 områderne. Set i forhold til den naturlige variation i bølge og strømpåvirkning fra år til år vil kyst og strandtypen i disse områder ikke påvirkes som følge af havneudvidelsen. Det forventes derfor ikke at Yderhavnen vil have indflydelse på kysten i Natura 2000 områderne.

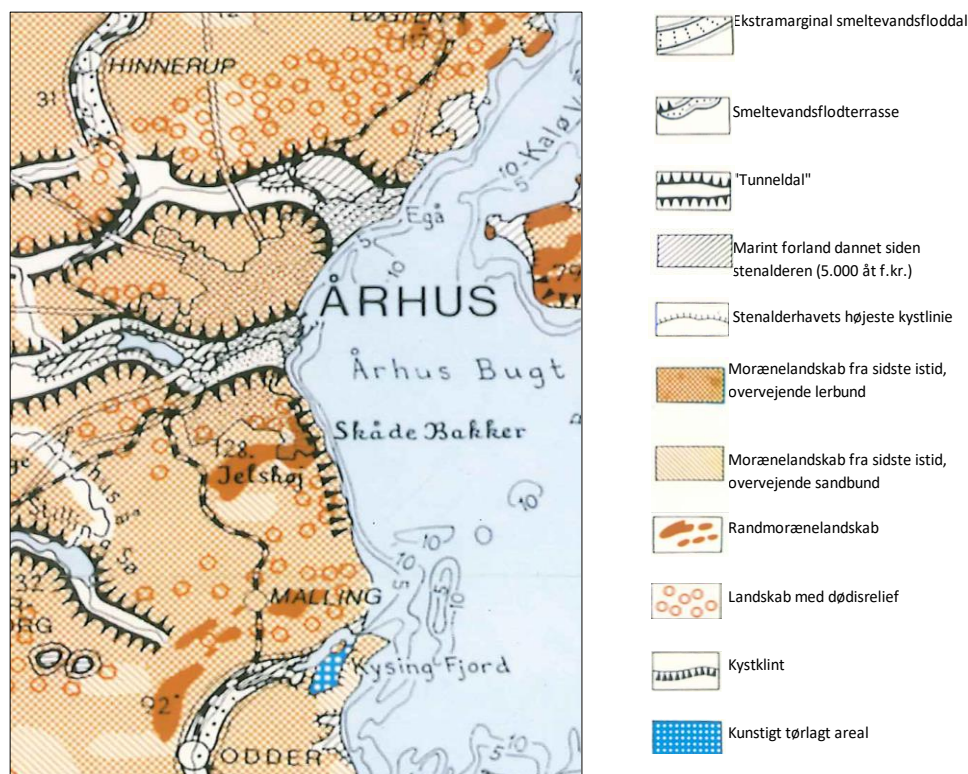


Figur 2-1 Natura 2000 områder i og omkring Aarhus bugten, [ref. /5/].

3 Geologi og geomorfologi

Kyststrækningen fra Ballehage i syd til Vejlbj Hage i nord er overvejende karakteriseret af morænelandskaber dannet ved Det Ungbaltiske fremstød under indlandsisens afsmeltning i den sidste istids afslutning – Senglaciertiden for ca. 17 – 19.000 år siden.

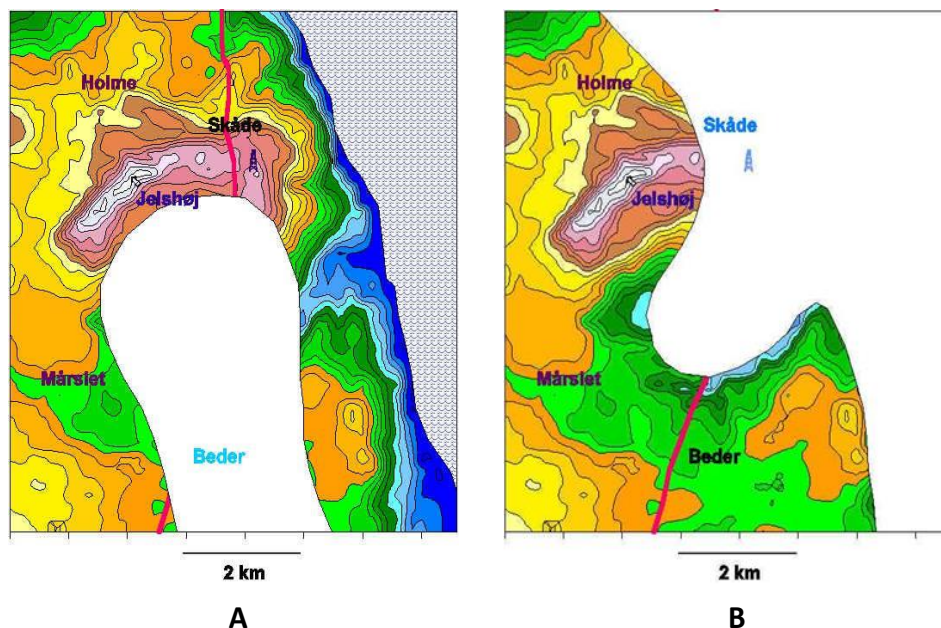
Morænelandskaberne er gennemskåret af to markante tunneldale – Aarhus Dalen mod syd og Egå Dalen mod nord (se Figur 3-1).



Figur 3-1 Landskabskort af de kystnære områder syd og nord for Aarhus [ref. /6/].

Tunneldalene opdeler morænelandskaberne i tre områder; Det sydlige, mellemste og nordlige morænelandskab.

Det sydlige morænelandskab er domineret af Jelshøjbuerne, som antages dannet som en fremstøds moræne foran en gletcher kommende fra syd (se Figur 3-2-A). Gletscheren har presset tertiære aflejringer 50 – 100 m op. Miocænt glimmerholdigt kvartssand indgår således i morænenes materialer og er ført op til højder omkring 100 m. Det antages, at de østlige dele af Jelshøjbuerne sammen med de kystnære landskaber syd herfor senere er blevet overskredet af gletcheris, som har deformeret sedimenterne under stress fra øst og presset de tertiære aflejringer op som flager i gletscheraflejringerne (se Figur 3-2-B). (Oligocænt ler i det nu nedlagte Emiliedal Teglværks grav ca. 90 m o. h. og oligocænt ler under den nordøstlige del af Det nye Moesgård Museum samt smeltevandssand i kystklinten). Nord for Jelshøjbuerne falder tertiæroverfladen ned mod Aarhusdalen, ved Brabrand Sø til koter mindre end -170 m.



Figur 3-2 A. Tidlig gletscherfremstød fra syd med oppresning af Jelshøjbuene.
B. Senere gletscherfremstød fra øst. Efter H. Lykke Andersen 1967.

Det mellemste morænelandskab er i kystzonen karakteriseret af højtliggende fede eocæne (Søvind Mergel) og oligocæne lerer (Viborg Ler), som er dækket af en tynd moræne. På stejle skrånninger i den nordlige del af Risskov mellem Den Permanente Badeanstalt og Stationsgade skrider de tertiære lerer stadig langsomt nedad mod kysten.

Det nordlige morænelandskab ligger væsentlig lavere ud mod kysten. Kun mod vest ind mod Egå lavningen findes en udglattet kystskrænt. Det glacial landskab består ud mod kysten af 3-4 m senglacial ler, som overlejrer moræneler.

Bølgepåvirkning har med tiden udlignet kyststrækningen. Den tidligere fjord ind i Egå Lavningen er næsten lukket med Vejlbj Fed ved nordgående materialetransport af sand ind i Kalø Vig. Det sydlige morænelandskabs kystfremspring er næsten borte. Kun hvor mere modstandsdygtige partier af glacialt oppressede flager af moræneler og tertiære lerer står tilbage, bevares mindre fremspring i kysten.

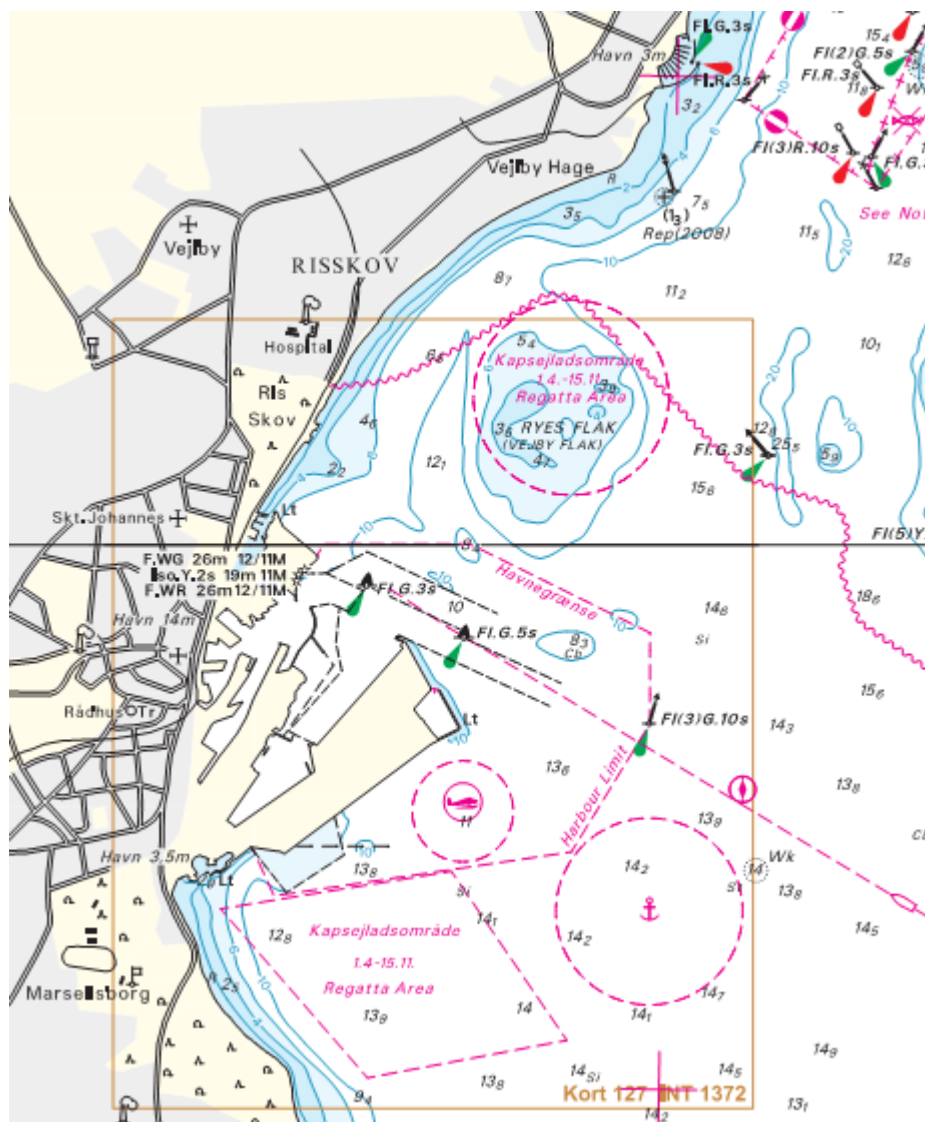
4 Hydrografiske forhold

4.1 Vandstand og vanddybder

Den normale vandstandsvariation ved Aarhus Havn er i henhold til Den danske Havnelods, [ref. /7/], 0,3 m værende forskellen mellem middel høj- og lavvande. Større udsving i vandstanden er meteorologisk styret og oplyses til at være 1-2 m over normalen ved vestlige vinde, samt op til 1 m under normalen ved østlige vinde.

Tidevandet ved Aarhus Havn er derved i størrelsesordenen $\pm 0,15$ m. Ifølge Kystdirektoratets Højvandsstatistik fra 2012, [ref. /8/] er ekstremt højvande for en returperiode på 100 år bestemt til +1,62 m DVR90 i Aarhus Havn.

Vanddybder i området fremgår af Figur 4-1, der viser uddrag af søkort 112 for området omkring Aarhus Havn.



Figur 4-1 Uddrag af søkort 112 for Aarhus Bugt. © Geodatastyrelsen

4.2 Strøm

I forbindelse med miljøkonsekvensvurdering af Yderhavnen er der foretaget numerisk modellering af strømforholdene i Aarhus Bugt og omkring Aarhus Havn. Modelleringen er baseret på DHI's MIKE 3 HD FM model, og der er modelleret typiske perioder med nordgående og sydgående strøm, samt en periode med nærmest stillestående vand. Endvidere er stormen "Gorm" modelleret for at få et indtryk af strømforholdene omkring havnen under ekstreme forhold. Strømmodelleringen er afrapporteret i [ref. /4/]

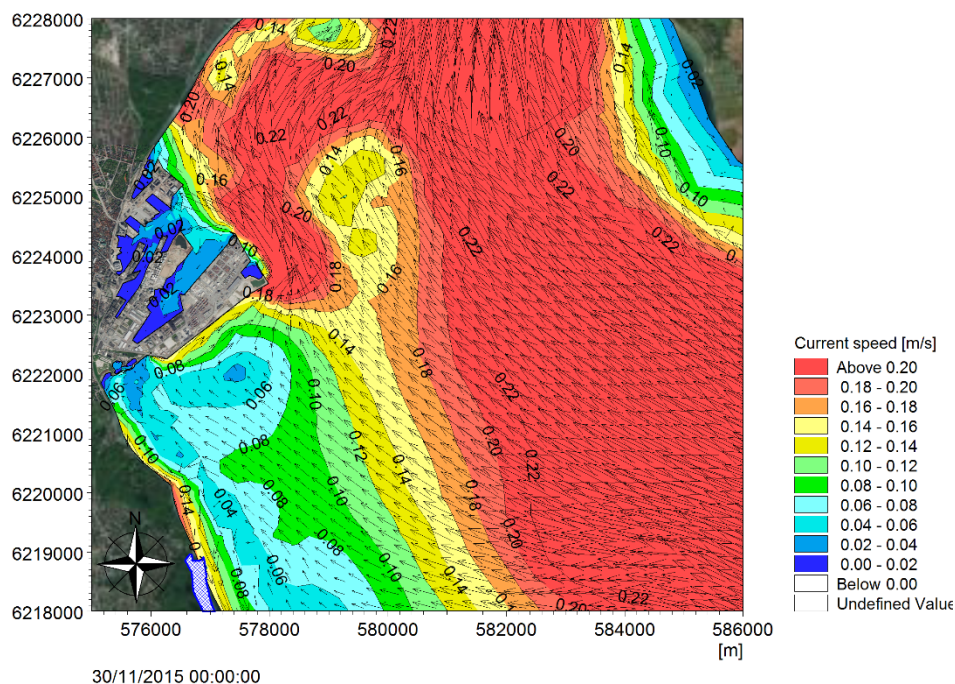
Strømmodelleringen viser, at strømforholdene omkring Aarhus Havne er meget milde og typisk i størrelsesordenen mindre end 0,1 m/s. Det skyldes havnens beliggenhed i Aarhus Bugt, som er stort set upåvirket af vandudvekslingen mellem Nordsøen og Østersøen, som kan give anledning til kraftig strøm i bl.a. Storebælt og Lillebælt.

I Aarhus Bugt og omkring Aarhus Havn er strømforholdene fortrinsvist påvirket af tre processer:

- > **Vandstandsvariationer i Kattegat:** Stigende og faldende vand i Kattegat forplanter sig i Aarhus Bugt, og medfører indstrømmende og udstrømmende vand.
- > **Vind over Aarhus Bugt:** Vind virker drivende på overfladestrømmen, som typisk kan opnå strømhastigheder på ca. 2% af vindhastigheden.
- > **Densitetsstrømninger:** Kattegat og Aarhus bugt er lagdelt som følge af ferskvandsudstrømning fra Østersøen og saltvandsindstrømning fra Nordsøen. Skillefladen mellem de to lag varierer, men ligger i ca. 15 m dybde.

Udover ovenstående påvirkes strømforholdene lokalt af bølgegenereret litoralstrøm, afstrømning af regnvand (f.eks. Aarhus Å) og udledninger af rensset (under ekstrem nedbør også urensset) spildevand, men dette er ikke inkluderet i strømmodellen.

Modellen viser, at strømmen langs kysten nord for havnen i gennemsnit er nordgående og i størrelsesordenen 0,05-0,1 m/s. Syd for havnen er strømmen langs kysten i gennemsnit sydgående, og i størrelsesordenen 0,01-0,02 m/s. I forbindelse med storm kan der forekomme en nordgående strøm langs kysten nord for havnen på i størrelsesordenen 0,2 m/s (se Figur 4-2).



Figur 4-2 Øjebliksbillede af strømforholdene i overfladen omkring Aarhus Havn under stormen 'Gorm', 30-11-2015 00:00.

Som håndregel kan man antage, at der skal en strømhastighed på 0,3 m/s til for at suspendere og transportere strandsand. Strømforholdene i Aarhus Bugt må derfor antages at have en underordnet betydning for sedimenttransportforhold og kystmorfologi nord og syd for Aarhus Havn.

4.3 Bølger

4.3.1 Normale bølgeforhold

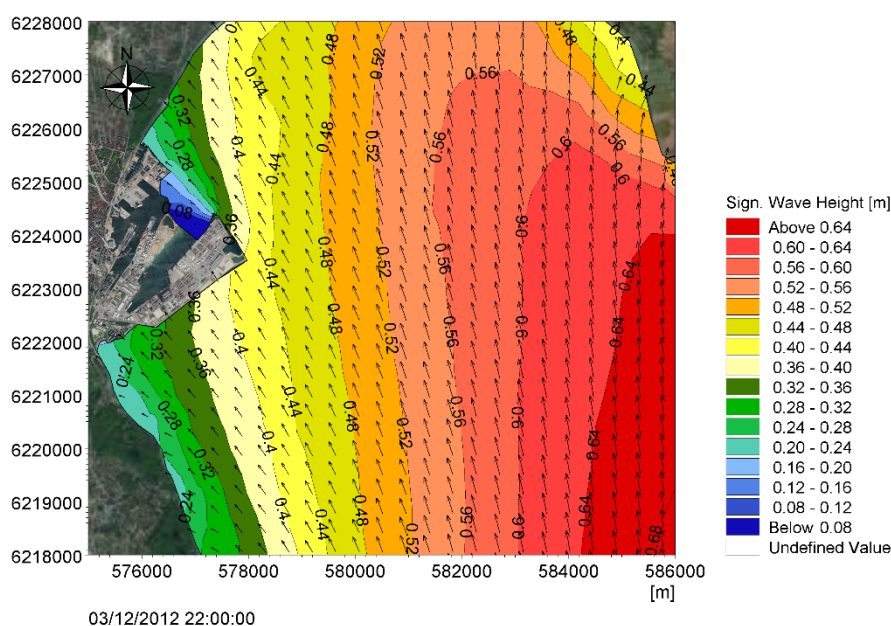
I forbindelse med miljøkonsekvensvurdering af Yderhavnen er der foretaget numerisk modellering af bølgeforholdene omkring havnen. Modelleringen er baseret på DHI's MIKE 21 SW bølgemodel, og der er modelleret 11 års bølgeforhold i perioden 2003-2014 med og uden den fremtidige udvidelse. Bølgemodelleringen er afrapporteret i [ref. /3/].

Bølgestudiet viser, at bølgeklimaet omkring Aarhus Havn er forholdsvis mildt, og at den gennemsnitlige signifikante bølgehøjde er i størrelsesordenen $H_{m0} = 0,2\text{m}$. Dette skyldes dels at Aarhus ligger i en semi-lukket bugt, og at der er fra-landsvind i forbindelse med de dominerende vinde fra vest. Men i forbindelse med lavtrykspassager og kraftig vind fra sydøst kan der forekomme bølger foran havnen med $H_{m0,12h} = 1,75$ (12 timer pr år) fra SSE-ESE. De største bølger har bølgeperioder på $T_p \sim 5\text{s}$. I forbindelse med de 11 års modellering er den maksimale signifikante bølgehøjde $H_{m0} = 2,2\text{ m}$ foran havnen. Den maksimale enkeltbølge i løbet af en storm er på dybt vand ca. 2 gange H_{m0} .

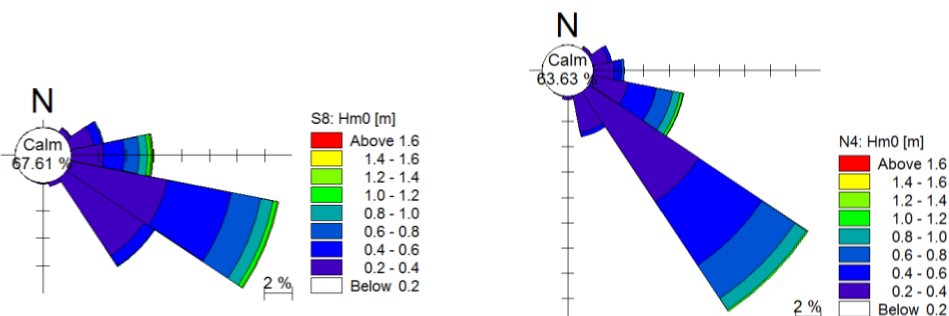
Bølgefeltet under en typisk situation med sydøstenvind ses i Figur 4-3 og viser variationen i bølgefeltet nord og syd for havnen:

- > Nord for havnen løber bølgerne mere vinkelret på kysten end syd for havnen. Derfor er ændringen (bølgetransformationen) af bølgeretningen (refraktion) fra dybt vand til lavt vand meget begrænset. Bølgerne langs kysten er under normale forhold nærmest upåvirkede af dybden og kommer primært fra SSØ.
- > Syd for havnen løber bølgerne stort set parallelt med kysten, og derfor sker der en betydelig refraction af bølgerne på lavt vand. Bølgerne fra SSØ refrakterer således ind mod kysten og kommer fortrinsvist fra SØ.

Bølgeforholdene nord og syd for havnen er illustreret i form af bølgeroser ved badeanstalten "den Permanente" (N4) og ved "Hotel Marselis" (S8) i Figur 4-4.



Figur 4-3 Typisk fordeling af bølgehøjder (H_{m0}) ved øst-sydøstlig vind. Den 03-12-2012 kl. 22:00. Eksisterende forhold uden havneudvidelse.



Figur 4-4 Bølgerose i punkt S8 (ved Hotel Marselis) og N4 (ved den permanente). Vanddybde: ca. 4 m. Placeringen af punkterne fremgår af Figur 6-1.

4.3.2 Hurtigfærgebølger

Udover naturlige vindgenererede bølger forekommer der ligeledes bølger genereret af hurtigfærger. Der har gennem årene været en del debat om bølgerne fra hurtigfærgerne som sejler på ruten Aarhus-Odden og tidligere Aarhus-Kalundborg.

Umiddelbart efter hurtigfærgernes indtog i Danmark i midten af 1990'erne afstedkom de stor offentlig debat, idet de flere steder gav anledning til voldsomme bølger ved kysten. Bølger der hævdedes at kunne være til fare for både badegæster og jollesejlere. Også ved kysten i Vejlbj-Risskov afstedkom de nye hurtigfærgebølger visse gener og stor debat.

Pga. af generne fra hurtigfærgeruter i indre danske farvande blev Dansk Hydraulisk Institut (DHI) i 1996 bedt af Søfartsstyrelsen om at gennemføre en detaljeret teknisk analyse af fænomenet. Dels ved en detaljeret kortlægning af hurtigfærgebølgenes egenskaber (bl.a. måling af færgebølgerne i Kalundborg Fjord) og en redegørelse for hvordan problemet med hurtigfærgebølgerne kunne afhjælpes. Et resumé af denne omfattende undersøgelse er præsenteret i [ref. /9/].

Efter DHI's undersøgelse blev der indført krav om miljøgodkendelse af hurtigfærger inden de blev indsat på ruter i Danmark. Som en del af denne miljøgodkendelse skal der nu foreligge dokumentation for at færgets hastighed, rute, navigationsforhold mm. er tilpasset de lokale forhold og optimeret med henblik på at mindske generne fra færgebølgerne inde ved kysten. Dette har i stor udstrækning elimineret 90'ernes problemer med hurtigfærgebølger langs de danske kyster.

Der er dog stadig i dag betydelige bølger fra hurtigfærgerne, som ruller ind på strandene nord og syd for Aarhus Havn, såvel som på andre kyststrækninger i nærheden af en hurtigfærgerute. Dette skyldes at hurtigfærgebølgerne er principielt forskellige fra de vindgenererede bølger i indre danske farvande og fra bølger genereret af konventionelle (og langsommere sejlene) skibe.

Hurtigfærgebølgerne adskiller sig primært ved at være mere langperiodiske. Ifølge [ref. /9/] er bølgeperioden for hurtigfærgebølger typisk i størrelsesordenen 9-10s, hvorimod den er i størrelsesordenen 4-5s for konventionelle færger og under normale forhold 3-4s for vindgenererede bølger i Aarhusbugten.

Hurtigfærgernes længere bølgeperiode (og dermed bølgelængde) betyder, at bølgerne har karakterer som de dønninger der normalt kendes fra langt mere udsatte kyststrækninger end de indre danske farvande. Bølgerne har indflydelse længere ned i vandsøjlen og de bryder mere voldsomt på kysten end de naturlige bølger i indre danske farvande. Med hensyn de kystmorfologiske forhold har sådanne bølger ifølge [ref. /10/] en tendens til at transportere sand fra revlerne ind mod kysten. De kan med andre ord bidrage til transport af sand på tværs af kysten - fra dybere vand ind på lavere vand.

5 Kystbeskrivelse

5.1 Tidligere undersøgelser

I forbindelse med udarbejdelse af VVM for Aarhus Havns seneste udvidelse blev der i 1997 udført et omfattende kyststudie af strækningen fra Ballehage syd for havnen og til Vejlbj hage nord for havnen [ref. /11/].

5.2 Generelt

Kyststrækningen nord og syd for Aarhus Havn beskrives fra Blommelyst Camping syd for Ballehage mod syd til Egå Marina mod nord, i alt en strækning på ca. 13 km inklusive havnens udstrækning.

Beskrivelsen tager udgangspunkt i en besigtigelse af kysten, foretaget i oktober 2018. Endvidere er der foretaget en undersøgelse af kystlinjens historiske udvikling baseret på luftfotos fra 1954, 1995, 1999, 2004 og 2017. Observationerne sammenholdes med DHIs studie fra 1997 [ref. /11/].

Generelt er der stor forskel på forholdene nord og syd for Aarhus Havn, hvilket bl.a. fremgår af de historiske luftfotos. Aarhus Havn strækker sig i dag ca. 2,5 km ud fra den historiske kystlinje, og fungerer derfor reelt som en barriere for den naturlige sedimenttransport langs kysten. Aarhus bugten er domineret af bølger fra SØ og kysten nord og syd for havnen er østvendt, hvilket medfører at netto sedimenttransporten er nordgående. Dette medfører, at kysten nord for havnen ikke får tilført sediment fra syd, mens kysten syd for havnen er mindre påvirket af havnens blokering.

5.3 Kysten syd for Aarhus Havn

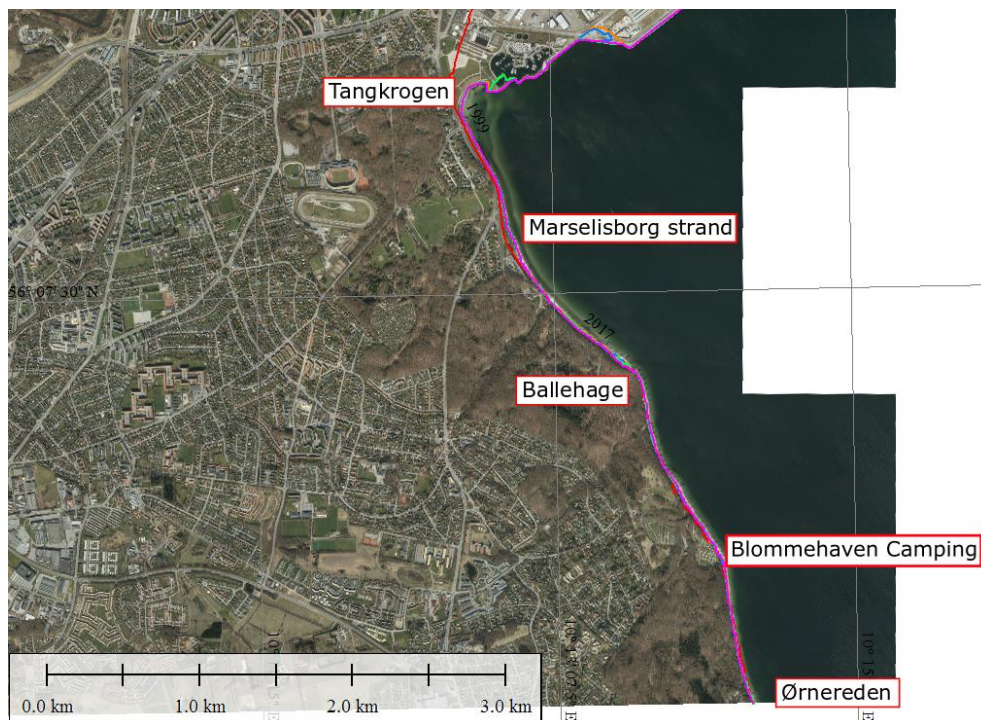
Et oversigtskort over strækningen fremgår af Figur 5-1 og Figur 5-2.

Kyststrækningen fra Ørnereden mod nord indtil Tangkrogen udgøres af en gammel moræne kystklint som i dag er bevokset, foran hvilken der er en forstrand af varierende bredde. På længere strækninger er kysten massivt beskyttet med høfder, men der er også længere strækninger hvor forstranden fremstår naturlig og uden kystkonstruktioner.

Nærmere havnen omkring Hotel Marselis flader baglandet ud og forstranden bliver stedse smallere frem mod den kunstigt anlagte strand Tangkrogen mellem Lystbådehavnen og den historiske kystlinje lige syd for Aarhus Havn.



Figur 5-1 Kyststrækningen syd for Aarhus Havn. © Geodatastyrelsen



Figur 5-2 Oversigtskort over udvalgte sammenligningsstrækninger syd for Aarhus Havn. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.3.1 Blommehaven Camping

3,6 km syd for
Aarhus Havn

Ved Blommehaven Camping er kysten konveks, hvilket medfører at bølgeindfaldet på kysten er stejlere nord for campingpladsen end syd for. Ændringen i bølgeindfald medfører, at sedimenttransportkapaciteten stiger mod nord, hvilket er ensbetydende med erosion. Som konsekvens heraf ses det på Foto 1 at forstranden er bred og sandet syd for campingpladsen, mens Foto 2 viser at stranden er stenet og smal mod nord, samt at man har anlagt høfder pr. ca. 40 m.

Af Figur 5-3 ses, at høfderne er etableret allerede på luftfotoet i 1954, og Figur 5-4 viser, at bevoksningslinjen har flyttet sig op til 30 m frem fra 1954 til 1995, samt at høfderne har været i stand til at holde på kysten i den efterfølgende periode.

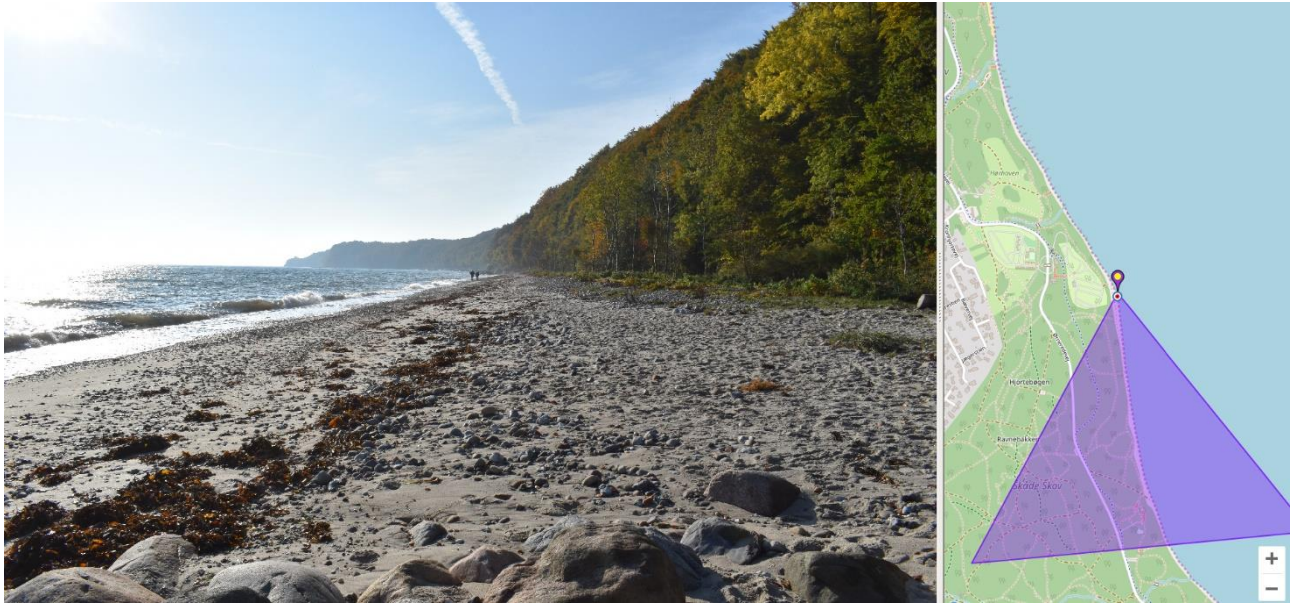


Foto 1 Ubeskyttet kyststrækning, med bred og sandet forstrand syd for Blommehaven Camping (12-10-2018).

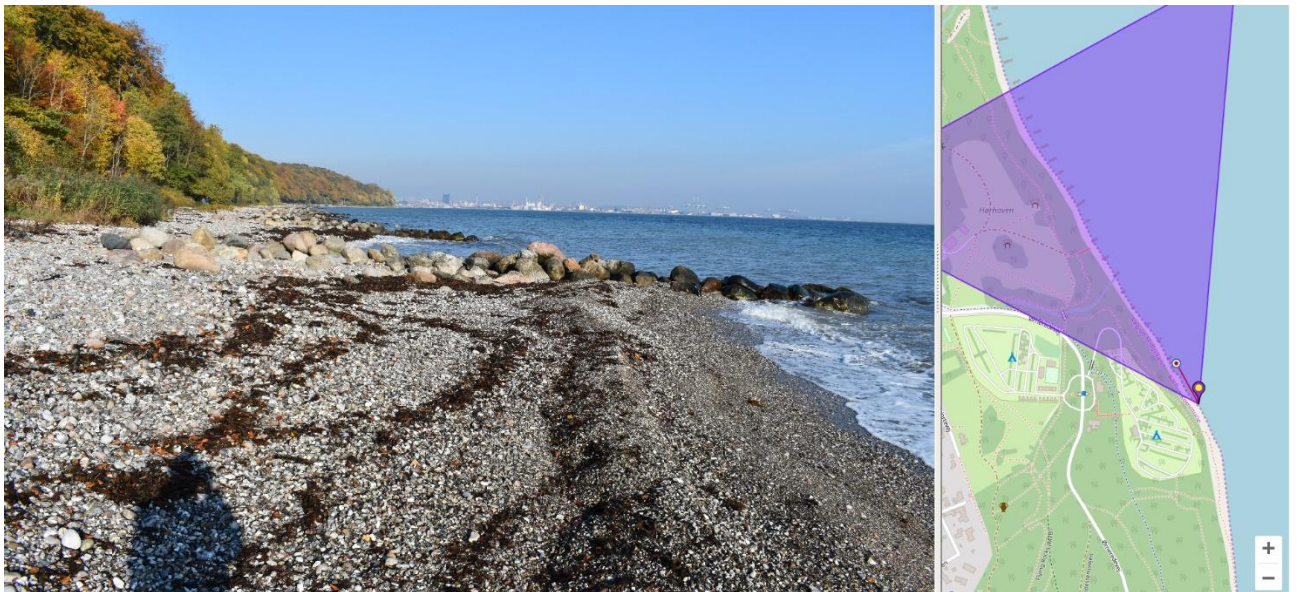
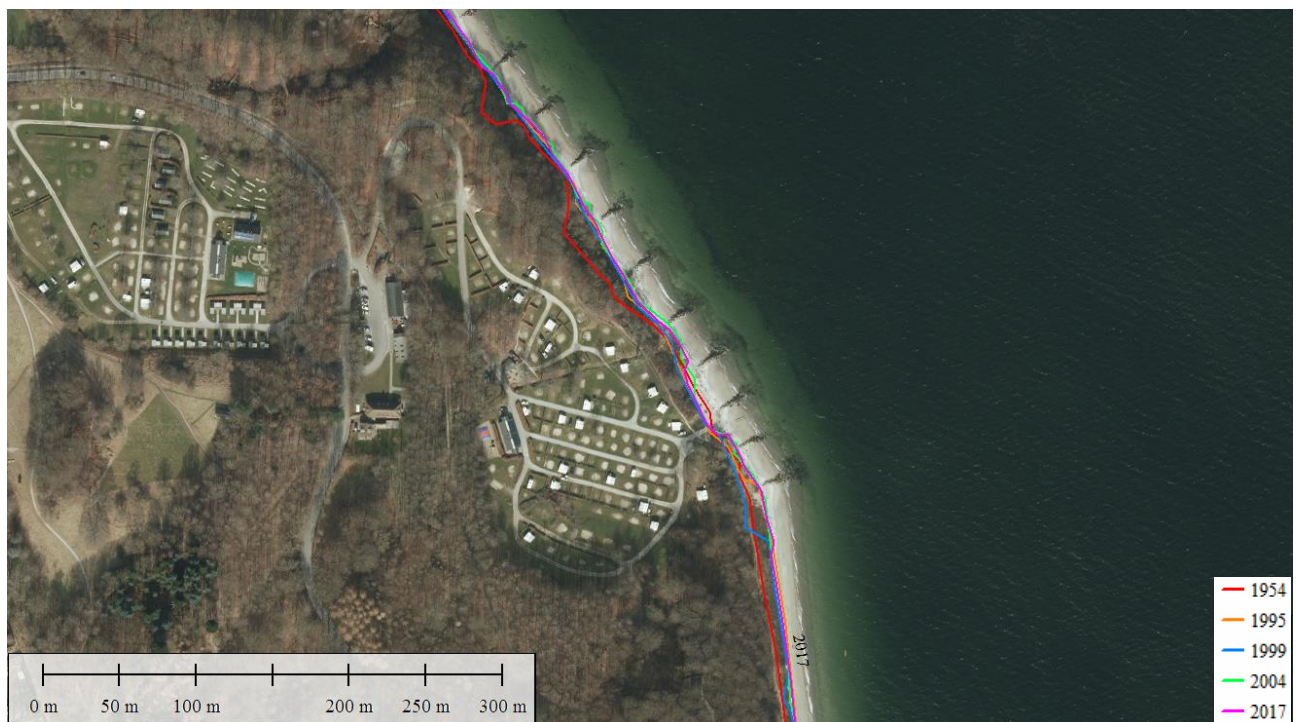


Foto 2 Smal og forholdsvis stejl forstrand. Høfder pr. ca. 40 m. Stenet strand. Mod nord set fra Blommehaven Camping.



Figur 5-3 Blommehaven Camping. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-4 Blommehaven Camping. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.3.2 Ballehage

2,2 km syd for
Aarhus Havn

Ved Ballehage er der et andet konvekst fremspring på kysten. Stranden syd for Ballehage er forholdsvis smal, og beskyttet med høfder. Enkelte høfder udgøres af en betonvæg inderst med ca. 10m stenhøfder i forlængelse heraf (se Foto 3 og Foto 4). Dette område blev fotograferet og beskrevet i forbindelse med DHIs undersøgelse i 1997, og som det fremgår af Foto 4 og af luftfotos (Figur 5-5 og Figur 5-6) er der ikke sket den store udvikling syd for Ballehage siden dengang.



Foto 3 Kysten syd for Balle hage (12-10-2018).

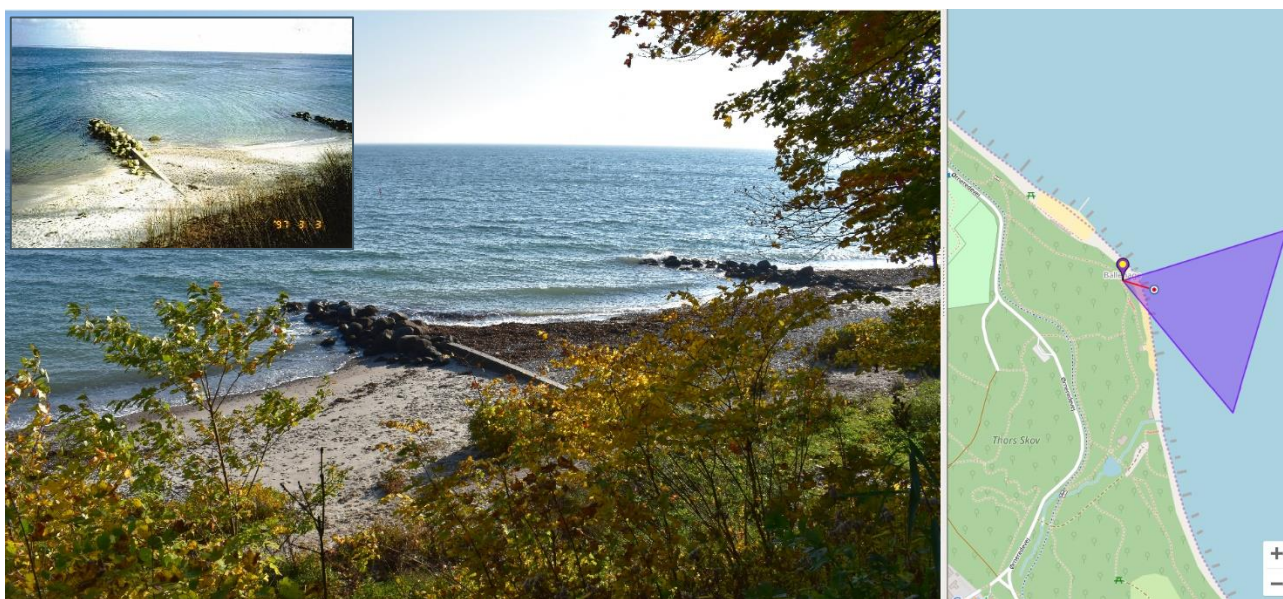


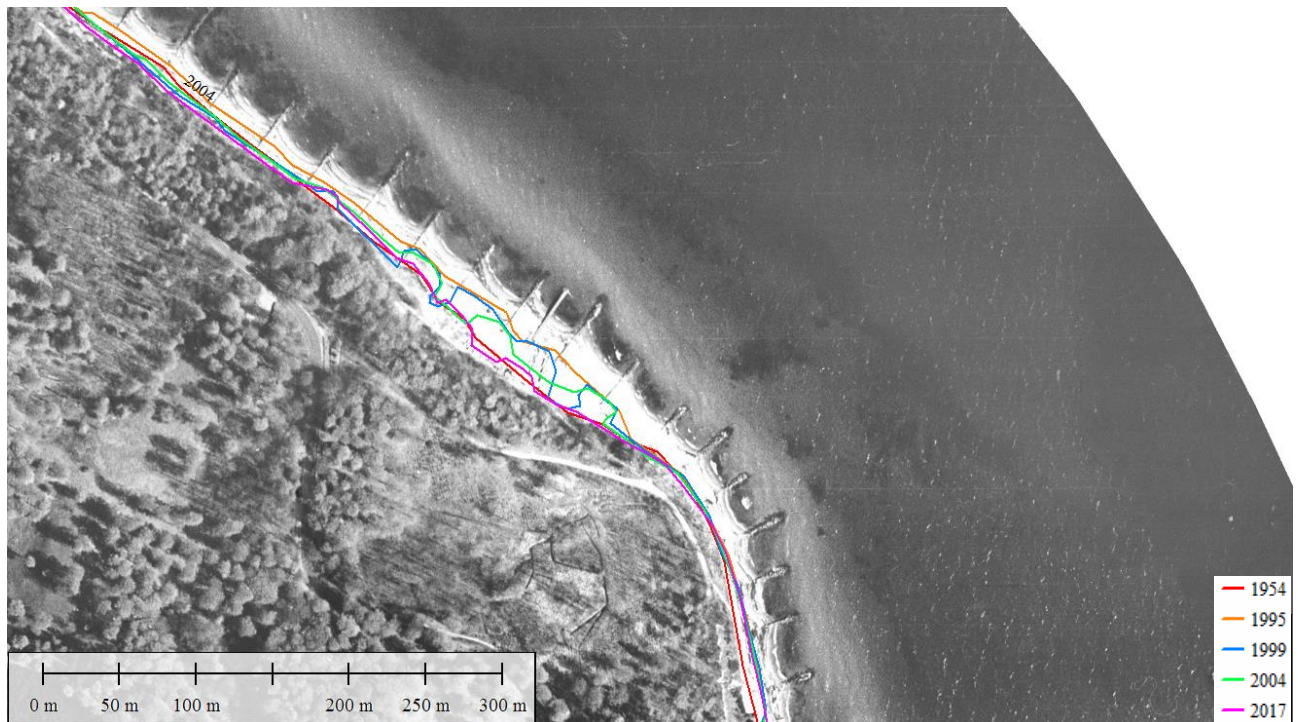
Foto 4 Kysten ved Ballehage (12-10-2018). Øverst til venstre et foto fra samme position fra DHIs kystmorfologiske undersøgelse i 1997 [ref. /11/].



Foto 5 Ballehage strand. Bred sandet forstrand som følge af tilbagetrukket kystkint. Høfder pr. 40m.

Ca. 100 m NV for Ballehage ligger Ballehage Strand. Her er den gamle kystkint lokalt tilbagetrukket, hvilket har skabt en op til 50m bred og sandet forstrand. Stranden er beskyttet med stenhøfder pr. 40 m og midt på stranden ligger en offentlig badebro.

Luftfotos viser på Figur 5-5 og Figur 5-6, at vegetationsgrænsen flytter sig land-værts fra år til år i dette område, hvilket indikerer, at stranden er under erosion og at den eksisterende høfdebeskyttelse ikke er i stand til at holde på kysten. Men klitskråningen synes ikke at være udsat for bølgepåvirkning.



Figur 5-5 Ballehage. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-6 Ballehage. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.3.3 Varna og Hotel Marselis

1,5 km syd for
Aarhus Havn

På strækningen mellem restaurant Varna og Hotel Marselis er forstranden forholdsvis smal. Specielt på en strækning nedenfor restaurant Varna, hvor der er anlagt stenglacis langs kystkanten, forekommer stranden smal (se Foto 7). Denne strækning blev også dokumenteret i forbindelse med DHIs kyststudie i 1997, og billeder såvel som luftfotos viser, at kysten er stort set uforandret og dermed stabil med den nuværende kystbeskyttelse.

På strækningen nord for Hotel Marselis ses en signifikant fremrykning af kysten i perioden mellem 1954 og 1995, se Figur 5-7 til Figur 5-9. Kystfremrykningens størrelse tyder på, at man aktivt har fyldt området op, før man anlagde nye høfder langs den fremskudte kyst og en stenkastning langs baglandet.

På hele strækningen mellem Ballehage og Hotel Marselis har kysten været stort set stabil i perioden 1995-2017.



Foto 6

Kysten mellem Varna og hotel Marselis i retning mod Aarhus havn. Høfder ligger med ca. 40 m afstand i forstranden er forholdsvis bred og sandet.



Foto 7 Kysten foran Varna nær 'den uendelige bro'. Et foto fra DHIs kyststudie i 1997 fremgår øverst til venstre. Langs skræntfoden er der over en ca. 200 m strækning etableret et stenglacis ligesom kysten er beskyttet med høfder pr. ca. 40 m. Forstranden forekommer meget smal på denne strækning, men der er ikke tegn på erosion eller underminering af stenglaciset.



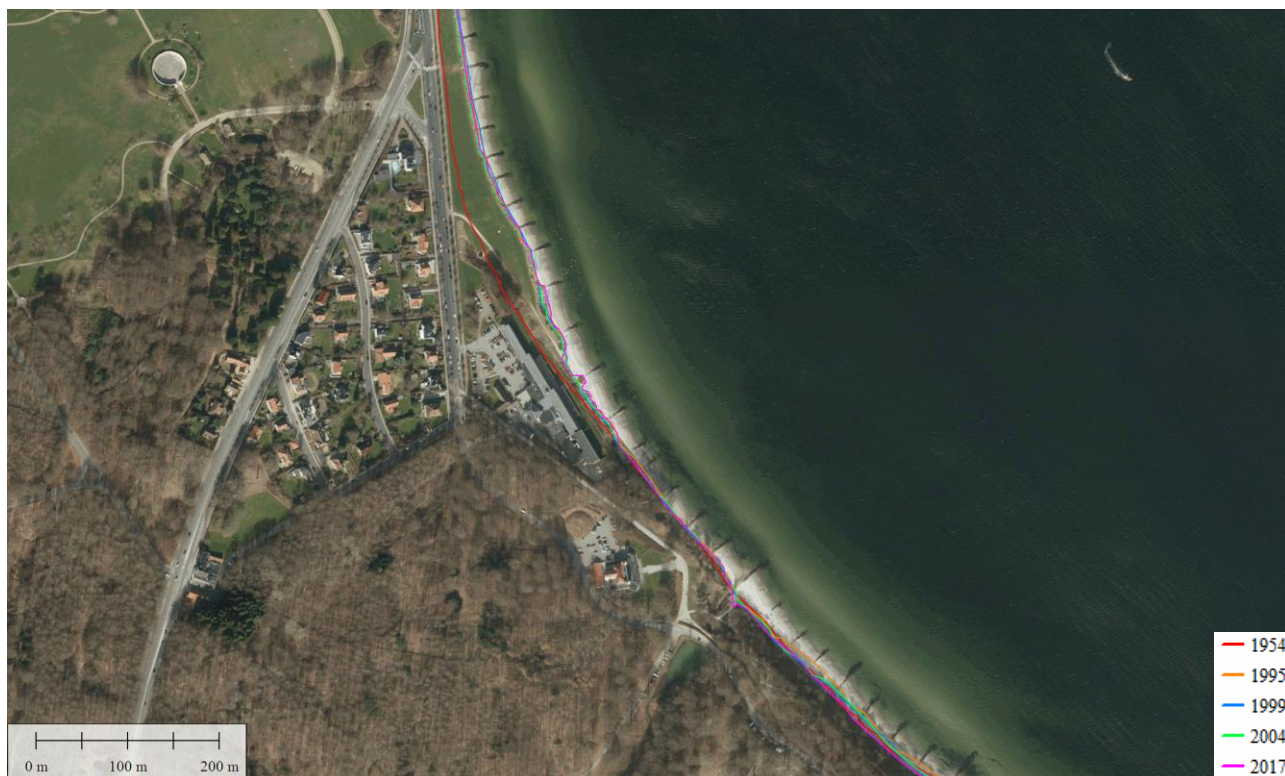
Foto 8 Kysten nord for Hotel Marselis. Et foto fra DHIs kyststudie i 1997 fremgår øverst til venstre. Forstranden er sandet og beskyttet med høfder pr. ca. 30-40 m. Langs bevoksningslinjen starter der ca. her en skræntfodsbeskyttelse, som bliver stadig mere massiv frem mod Tangkrogen.



Figur 5-7 Kysten ved Varna og Hotel Marselis. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-8 Kysten ved Varna og Hotel Marselis. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1995. © COWI



Figur 5-9 Kysten ved Varna og Hotel Marselis. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.3.4 Strandvejen og Tangkrogen

Kyststrækningen fra Hotel Marselis og frem mod Tangkrogen er beskyttet med høfder med en afstand på ca. 15-20 m. Langs bevoksningslinjen er der etableret en skræntfodsbeskyttelse, som bliver stadig mere massiv frem mod Tangkrogen. På strækningen langs Strandvejen er forstranden helt borte/roderet, og her er der ingen sand foran skræntfodsbeskyttelsen (se Foto 9).



Foto 9 Skræntfodsbeskyttelse langs strandvejen.

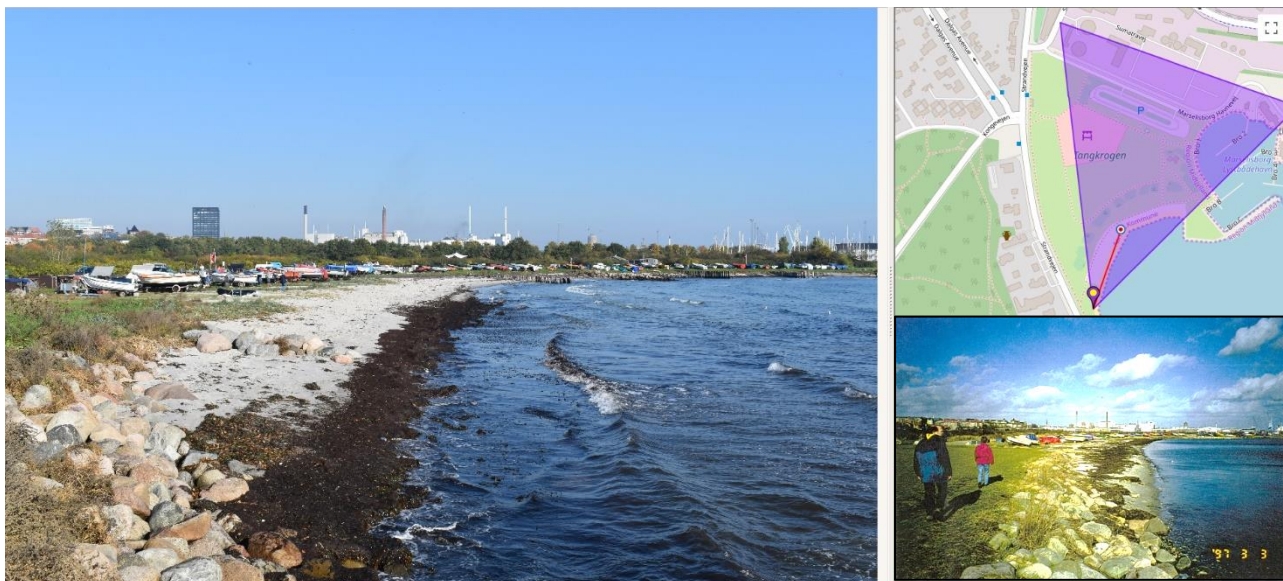


Foto 10 Tangkrogen. Et foto fra DHIs kyststudie i 1997 fremgår nederst til højre.

Tangkrogen er en ca. 250 m lang strand afgrænset af en stenkastning mod Marselisborg Lystbådehavn i øst. Området er anlagt efter havneudvidelsen i 1981-1983 og stranden er etableret kunstigt ved indpumpning af sand. Baglandet er fladt og anlagt med græs, mens den ca. 10 m brede strand adskilles fra dette af lavere bevoksning og mindre bådpladser på land, se Foto 10. Der er enkelte uvirksomme sten- og pælehøfder på stranden og en enkelt større længere stenhøfde 80 m fra lystbådehavnens mole. Tangkrogen er afgrænset på både den ene og anden side af hhv. lystbådehavnens mole og stenkastningen parallelt med Strandvejen. Stranden ved Tangkrogen vurderes at være i nogenlunde ligevægt med den dominerende bølgepåvirkning fra SØ og det sand, som føres til kysten fra syd. Den kystparallelle sedimenttransport som ikke kan passere omkring Aarhus Havn, må for en stor dels vedkommende antages at lægge sig i kystprofilet ved Tangkrogen, hvilket også fremgår af luftfotos (f.eks. Figur 5-13). Denne gradvise tilsanding gav i 2008 anledning til, at lystbådehavnen måtte lukke den vestlige indsejling og Marselisborg Lystbådehavn oplyser, at tilsandingen nu har nået et stade, hvor havnens nordlige indsejling sander til med ca. 10-20 cm pr. år, og dermed snart skal oprenses [ref. /2/].

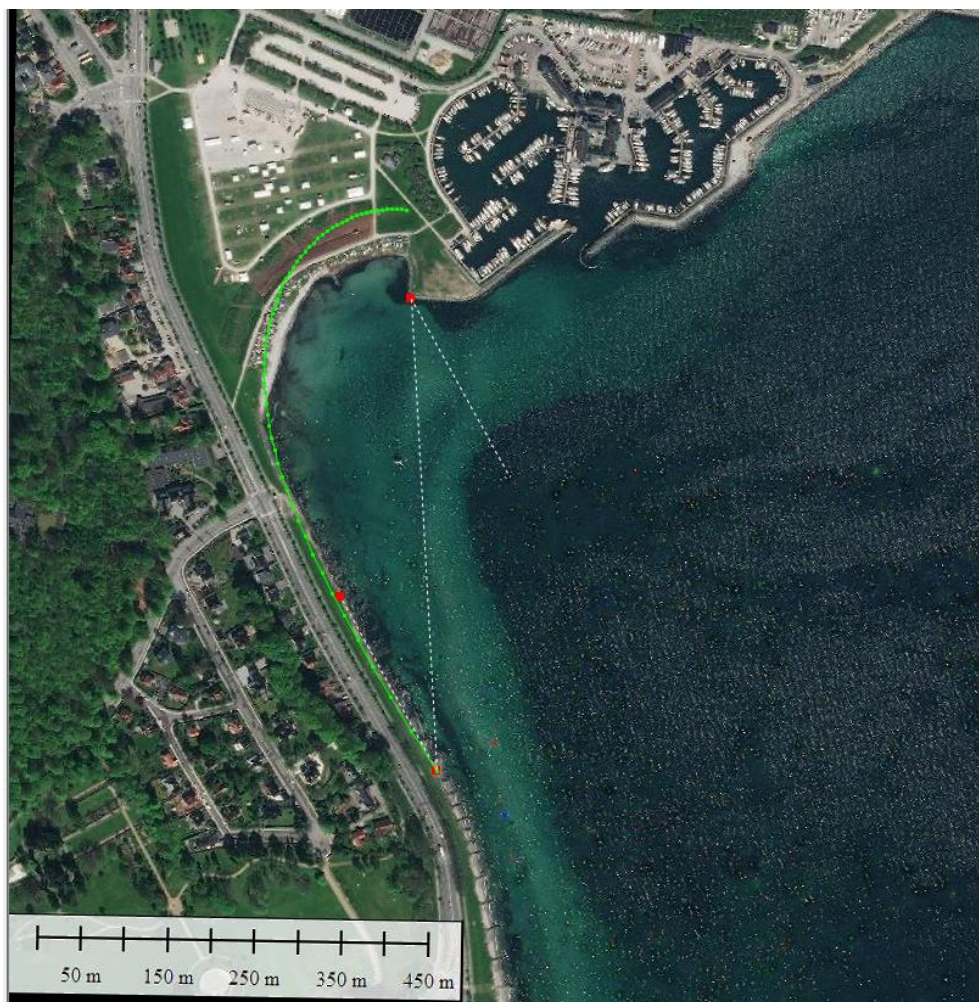
På samme måde som der aflejres sand, så aflejres der også tang i området, hvoraf Tangkrogen har fået sit navn.

Kysten har stort set form som en logaritmisk spiral, og dens form kan delvist forklares med Hsu & Evens (1989) [ref. /12/] *Parabolic bay shape equation* (PBSE). Hsu & Evens formeludtryk er udviklet på baggrund af studier af 27 bugter som er i statisk ligevægt, idet man har tilpasset et polær andenordens ligning til kystens form. Bugter som er i statisk ligevægt er kendetegnet ved, at bølgerne diffrakterer om en klippe eller en mole, og at bølgerne bryder samtidigt langs hele stranden, så sedimenttransporten langs kysten bliver nul. Hvis der til stadighed tilføres sediment til en bugt (bay beach) siges den at opnå en *dynamisk ligevægt* som ligger fremskudt i forhold til den *statiske ligevægt*. Hvis man

afbryder sedimenttilførslen til en kyst i dynamisk ligevægt, vil den søge imod sin statiske ligevægt.

Metoden for bugter i statisk ligevægt er indarbejdet i kystværktøjet Mepbay 3 [ref. /13/], og resultatet af denne beregning fremgår af Figur 5-10.

Mepbay-beregningen viser, at Kysten ved tangkrogen ikke helt er i statisk ligevægt. Den stadige tilførsel af sedimenter og sand fra syd bevirker, at stranden er fremskudt i forhold til den statiske ligevægtskyst, og at den har indfundet en *dynamisk* ligevægtsorientering. I teorien betyder det, at stranden over en år-række ville rykke tilbage til den statiske ligevægtsretning på Figur 5-10, hvis man blokerer for sedimenttilførslen fra syd, ved f.eks. at forøge kystbeskyttelsen langs kysten syd for Aarhus Havn. Omvendt vil kysten rykke frem i forhold til sin nuværende position hvis man udvider lystbådehavnen og flytter diffraktionspunktet længere væk fra stranden.



Figur 5-10 Statisk ligevægtsorientering af Tangkrogen bestemt med Mepbay 3.



Figur 5-11 Tangkrogen. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-12 Tangkrogen. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1995. © COWI



Figur 5-13 Tangkrogen. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4 Kysten nord for Aarhus Havn

Et oversigtskort over strækningen nord for Aarhus havn indtil Egå Marina ses på Figur 5-14.

Kyststrækningen fra Aarhus Havn og ud til Egå Marina er meget uensartet og til forskel fra kysten syd for havnen, er der på det meste af strækningen anlagt private matrikler helt ud til kysten. På strækningen fra havnen og langs Risskov skov udgøres baglandet af en gammel moræneklint, som flader ud langs kysten hvor Grenåbanen og Risskovstien er anlagt. Længere mod nord langs Risskov og Vejlbj fed flader landskabet ud. Her udgøres baglandet af marine aflejringer som pga. sedimenttransporten fra syd har lukket den tidligere fjord ind i Egå Lavningen.

Hele kyststrækningen langs Vejlbj Fed (fra Risskov Strandpark og til Vejlbj hage) krummer kysten svagt mod øst, hvilket bevirker at kysten nærmer sig en ligevægtsretning vinkelret på de dominerende bølger fra SØ på den nordlige del af strækningen ved Vejlbj hage. Langs Risskov er bølgeindfaldet omvendt meget ensidigt, hvilket bevirker, at kysten ved Risskov Strandpark er smal og stenet, og betydeligt mere påvirket af kysterosion end stranden længere mod nord som er bred og sandet.



Figur 5-14 Oversigtskort over udvalgte sammenligningsstrækninger nord for Aarhus Havn. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4.1 Risskovstien frem mod "Den Permanente"

Strækningen langs Risskovstien indtil "Den Permanente" badeanstalt er i dag beskyttet af en stenkastning, som beskytter Grenåbanen samt Risskovstien, der løber parallelt med kysten. Som det fremgår af Foto 11, er der ingen strand foran stenkastningen nærmest Aarhus Havn.

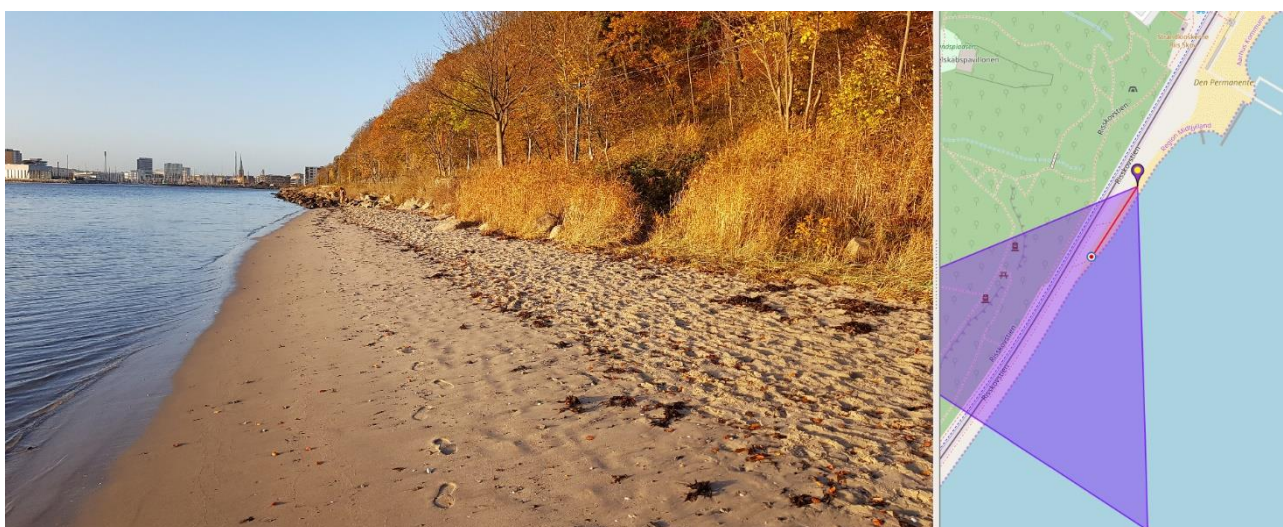
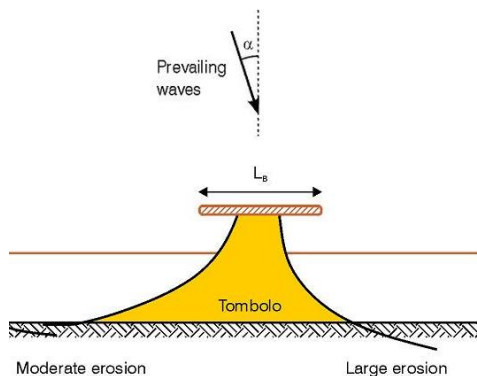


Foto 11 Kysten syd for "Den Permanente" badeanstalt i retning mod Aarhus Havn. Stenkastningen langs Grenåbanen skimtes i horisonten og i bevoksningen til højre i billedet. Nærmere Aarhus Havn er der ikke sand foran stenkastningen, men nær badeanstalten er der sandaflejringer på forstanden.

5.4.2 "Den Permanente"

Badeanstalten "Den Permanente" er opført i 1930'erne og udgøres af et system af betonspunsvægge både vinkelret på og parallelt med kysten. De kystparallelle beton-spunsvæggene er opført på ca. 3 m vanddybde, bag hvilke der er *tombolo*-formede sandaflejringer hvorpå selve badeanstalten er opført (se Figur 5-15).

Området kan opdeles i tre områder; syd for badeanstalten, nord for badeanstalten og selve badeanstalten, se Figur 5-16 og Figur 5-17. Sandaflejringerne bag betonspunsvæggene består af fint sand og stranden er grundet beskyttelsen af spuns og stenkastning ret flad.



Figur 5-15 Tombolo-formet aflejring [ref. /14/]

Grundet det skrå bølgeindfald fra sydøst strækker sandaflejringerne bag betonspunsvæggene sig længere mod syd på stranden syd for badeanstalten, end mod nord, se Foto 12 og Foto 13.

Spunsvæggene udgør grundet deres udstrækning fra kysten og vanddybden en effektiv barriere for sedimenttransporten, og stranden indenfor badeanstalten og nord hhv. syd herfor vurderes derfor at være stabile, hvilket også fremgår af luftfotos på Figur 5-16 og Figur 5-17.

Som det fremgår af Foto 12 blev kysten ligeledes besigtiget i forbindelse med DHIs kyststudie i 1997, som viser at en hofde på stranden syd for badeanstalten er blevet forstærket med flere sten og beton i den mellemliggende periode. Det vurderes dog ikke at være gjort pga. erosion.



Foto 12 Aflejringer af sand syd for badeanstalten. Et foto fra DHIs kyststudie i 1997 fremgår øverst til venstre.



Foto 13 Aflejringer af sand nord for badeanstalten.

Strækningen indtil Risskov strandpark er dels beskyttet med en langsgående stenkastning og med høfder. Generelt er stranden smal og stenet foran stenkastningen på det meste af strækningen (se Foto 14), hvilket givetvis skyldes, at sedimenttransportkapaciteten er uudnyttet. Den manglende tilstedeværelse af sand tilskrives derfor, at havnen igennem årene effektivt har blokeret for sedimenttilførslen fra syd og at det sand, som før havnens etablering har været tilgængeligt i kystprofilen, er eroderet bort. Stranden udgøres derfor primært af ral og sten, der er så store, at bølger og strøm ikke kan transportere dem. En del af kystens belastning på denne strækning skyldes givetvis også bølger fra hurtigfærger, som påvirker kysten i forbindelse med Mols-linjens anløb 10-12 gange dagligt.



Figur 5-16 Den Permanente. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-17 Den Permanente. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4.3 Risskov Strandpark ('Hospitalsgrunden')

Langs Risskov Strandpark (også kaldet 'Hospitalsgrunden') er stranden meget smal og stenet. På et tidspunkt mellem 2004 og 2017 har man valgt at anlægge en stenkastning langs den sydlige del af strandparken og langs bådhuset midt på stranden (se Foto 14). Bådhuset tilhører en af byens kajakklubber og er at finde på alle luftfotos helt tilbage til 1954. På et tidspunkt har man givetvis været nødt til at beskytte huset for at undgå, at det blev undermineret som følge af kysterosion.

Over en strækning på ca. 200 m lige nord for Risskov Strandpark mellem Strandvænget og Platanvej forekommer kysten af være udfordret. Luftfotoet fra 1954 (se Figur 5-19) viser, at der tidligere har ligget en markant hofde/mole udfor Platanvej, som har kunnet fastholde en fremskudt kystlinje over en strækning på ca. 200 m. Bag den fremskudte strand er der blevet anlagt nogle mindre byggefelt, som uheldigvis ligger udenfor den historisk naturlige kystlinje på stedet og udenfor strandbeskyttelseslinjen (se Figur 5-18).



Figur 5-18 Matrikelkort ved Vejlbj fed, lige nord for Risskov Strandpark.

Engang mellem år 1954 og 1995 er hofden udfor Platanvej blevet fjernet, hvilket har givet anledning til at hofdens luvsidaeaflejringer og læsideerosion er aftaget, og at forstranden er blevet meget smal på strækningen mellem Strandvænget og Platanvej. Udfor Platanvej 8 hvor den tidligere hofde var anlagt, har man derfor været nødt til at etablere en meget bastant stenkastning yderst på forstranden, som har lidt samme effekt som den tidligere hofde, idet den (sammen med udløbsledningen lige ved siden af) ser ud til at fastholde kysten kunstigt fremskudt (se Foto 15).

Figur 5-19 til Figur 5-21 viser en generel tendens til at kysten syd for Platanvej har været under erosion, mens kysten nord for Platanvej er rykket frem i perioden 1954-1995. Denne tendens kan givet vist tilskrives, at hofden udfor Platanvej 8 i denne periode er blevet nedbrudt eller fjernet. I perioden fra 1995 til

2017 har kysten været stabil, hvilket givetvis skyldes, at sandet er eroderet bort og at erosionen af den nu stenede forstrand går meget langsomt. Endvidere er kystens position blevet fastholdt af, at man i den mellemliggende periode har vedligeholdt og forstærket den med bl.a. stenkastninger langs Risskov Strandpark og foran Platanvej.



Foto 14 Kysten nord langs Risskov strandpark. Midt på stranden ses kajakklubben Njordhavkajaks bådhus, som er beskyttet med en stenkastning.

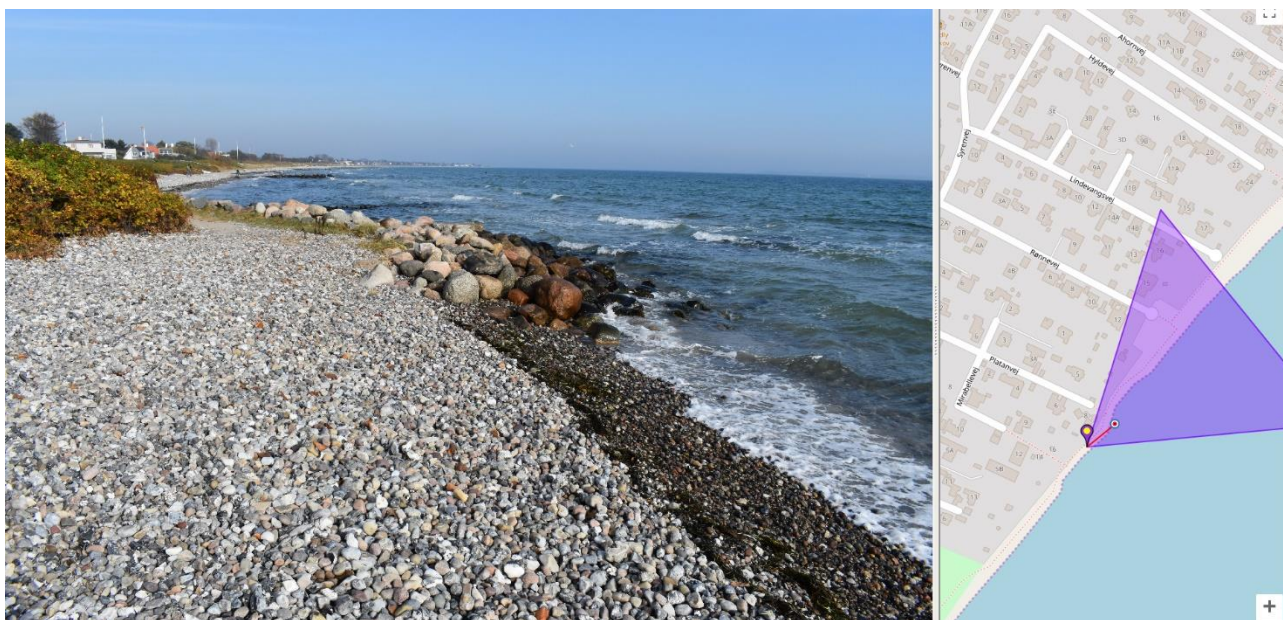


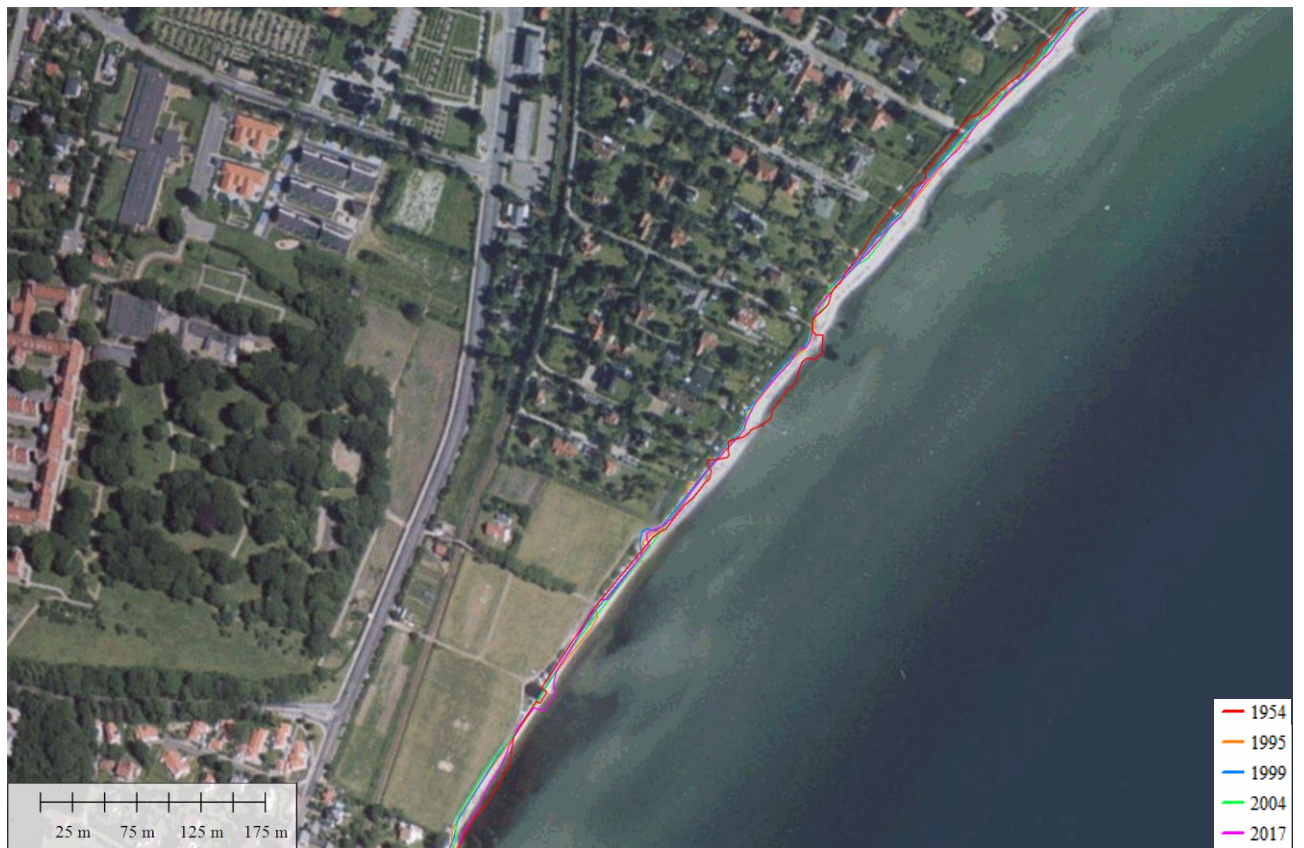
Foto 15 Stenkastning foran Platanvej 8.



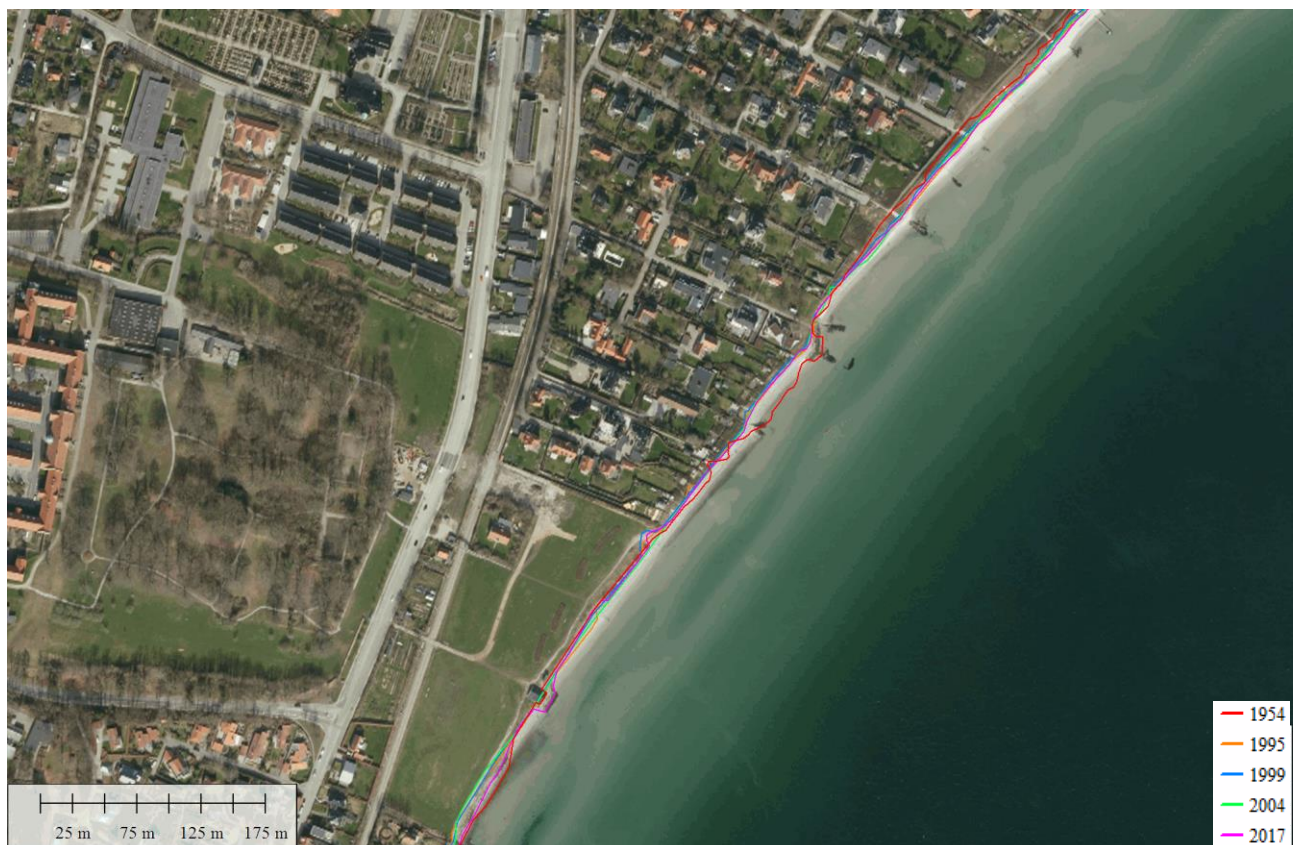
Foto 16 Kysten udfor Lindevangsvej. Stranden er smal og stenet, og beskyttet med uvirksomme træhøfder pr. 30-40 m.



Figur 5-19 Risskov strandpark. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



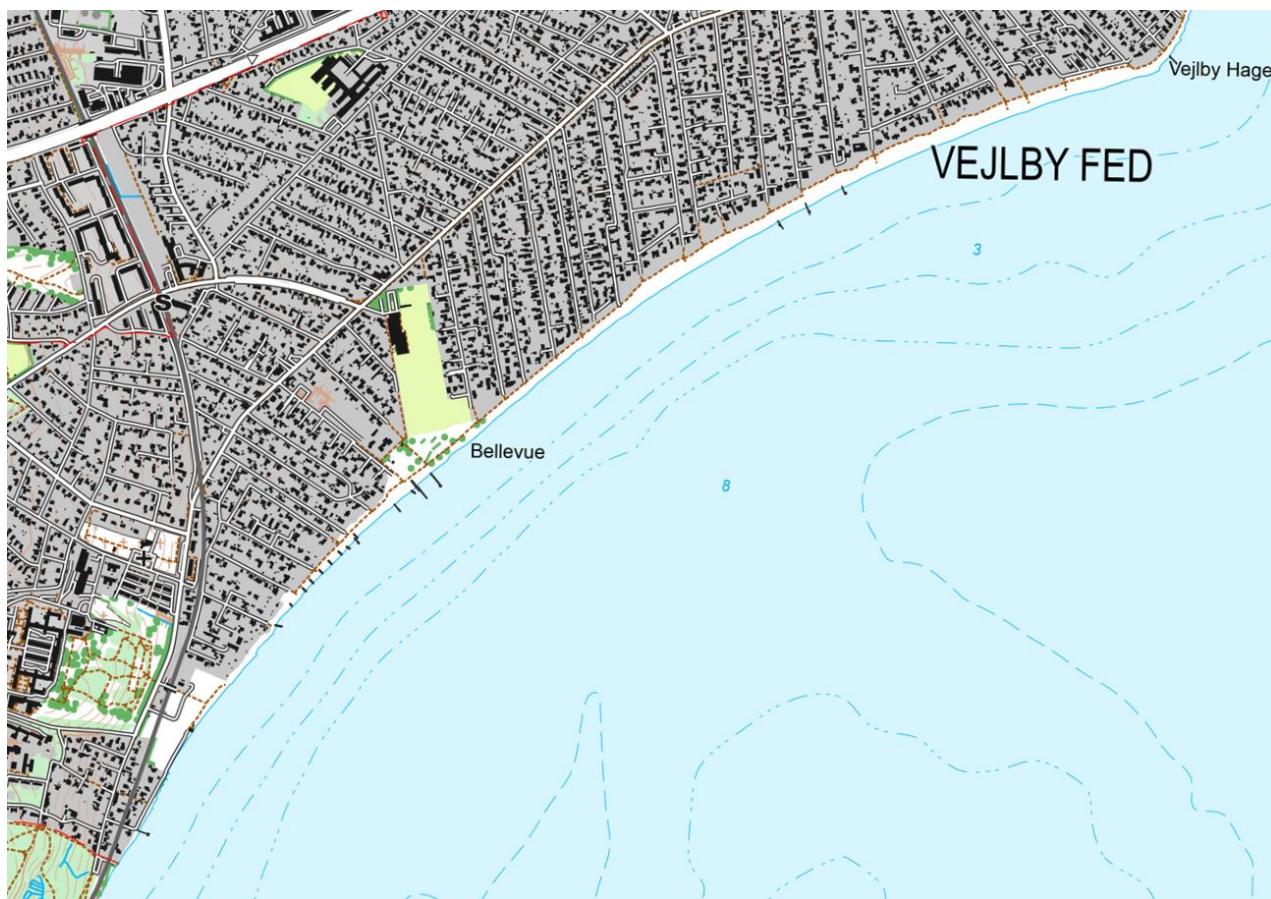
Figur 5-20 Risskov strandpark. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2004. © COWI



Figur 5-21 Risskov strandpark. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4.4 Vejlbys Fed og Bellevue Strand

Stranden langs Vejlbys Fed strækker sig over ca. 3 km fra Risskov Strandpark til Vejlbys Hage, se Figur 5-14 og Figur 5-22. Den offentlige strand 'Bellevue' er placeret ca. midt på strækningen nedenfor Bellevuehallen og Vejlbys Risskov Idrætsforenings fodboldanlæg. Kyststrækningen langs Vejlbys Fed er uden kystbeskyttelse, omend der findes rester efter træhøfder, som ifølge DHI's kyststudie i 1997 er etableret frem til omkring 1980 (se Foto 16 og Foto 17).



Figur 5-22 Kyststrækningen langs Vejlbys Fed. © Geodatastyrelsen

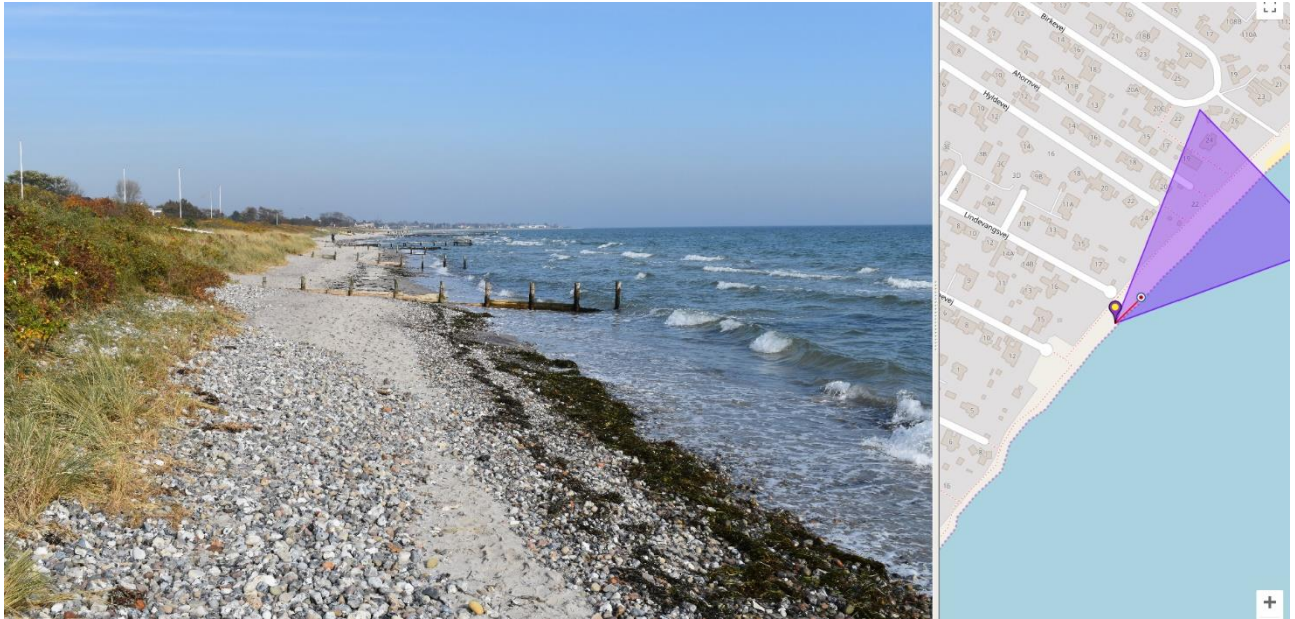


Foto 17

Kysten udfor Lindevangsvej. Stranden er smal og mere sandet end mod syd. Kysten er beskyttet med uvirksomme træhøfder pr. 30-40m.

Den naturlige sandstrand med fint sand er de fleste steder 10-20 m bred og forholdsvis flad. Mellem stranden og det flade bagland finder man *Vejlby-fed diget*, som beskytter baglandet i forbindelse med stormflod. Der er etableret trappeovergange over diget flere steder, for at lette adgangen til stranden og beskytte diget imod slitage fra strandens mange besøgende.

Langs Vejlby Fed krummer kysten over en ca. 3,5 km strækning fra retning 30°N ved Den Permanente badeanstalt og Risskov Strandpark til 70°N syd for Vejlby Hage. Bølgenes skrå indfaldsvinkel vil dermed være gradvist aftagende når man bevæger sig fra Risskov Strandpark og i retning af Vejlby Hage, og på en stor del af strækningen må man forvente at kysten stort set er i ligevægt med bølgepåvirkningen.

Aftagende sedimenttransportkapacitet langs en kyst medfører normalt, at den kystparallelle strøm, som transporterer sediment (litoralstrømmen), vil afsætte sit sediment og skabe en kystfremrykning. Dette er ligeledes, hvad man observerer langs Vejlby Fed, og specielt nord for Bellevue, hvor kysten er rykket op til 20 m frem i perioden fra 1999 til 2017 (se Figur 5-23 til Figur 5-25). I perioden fra 1954 til 1999 er kystfremrykningen betydeligt mindre, og i denne årrække skyldes fremrykningen fortrinsvist, at man i den mellemliggende periode har anlagt *Vejlby fed-diget* bagerst på forstranden. På nogle steder har man bygget diget foran bevoksningslinjen, og dermed er digets fod kommet til at definere en kunstig fremrykket kystlinjen.

Fordi kystfremrykningen var betydeligt mindre fra 1954 til 1999 er det svært at forestille sig, at kystfremrykningen alene skyldes kystparallel sedimenttransport (long-shore transport). I stedet vurderes det, at størstedelen af kystfremrykningen skyldes *cross-shore transport*, altså at det sediment som årligt aflejres langs Vejlby Fed, er transporteret fra dybt vand til lavt vand (vinkelret på kysten).

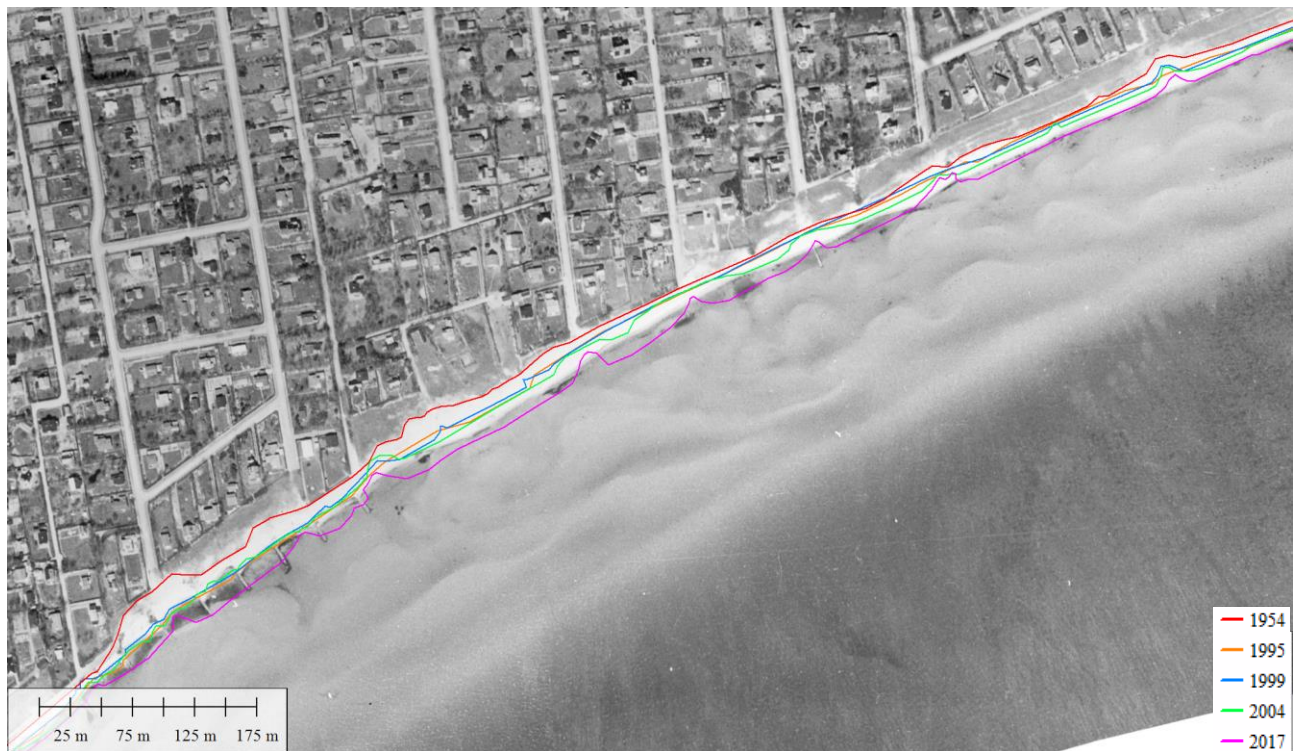
Denne sedimenttransport kan med stor sandsynlighed tilskrives bølger fra hurtigfærger, som blev introduceret i Aarhus i midten af 1990'erne. Ifølge studier af bl.a. DHI [ref. /10/] kan de langperiodiske bølger fra hurtigfærger give anledning til netop sedimenttransport fra dybt til lavt vand.



Foto 18 Bellevue strand. Bred og sandet. Der er flere badebroer på den offentlige strand og trappeadgang over Vejlbj-fed diget.



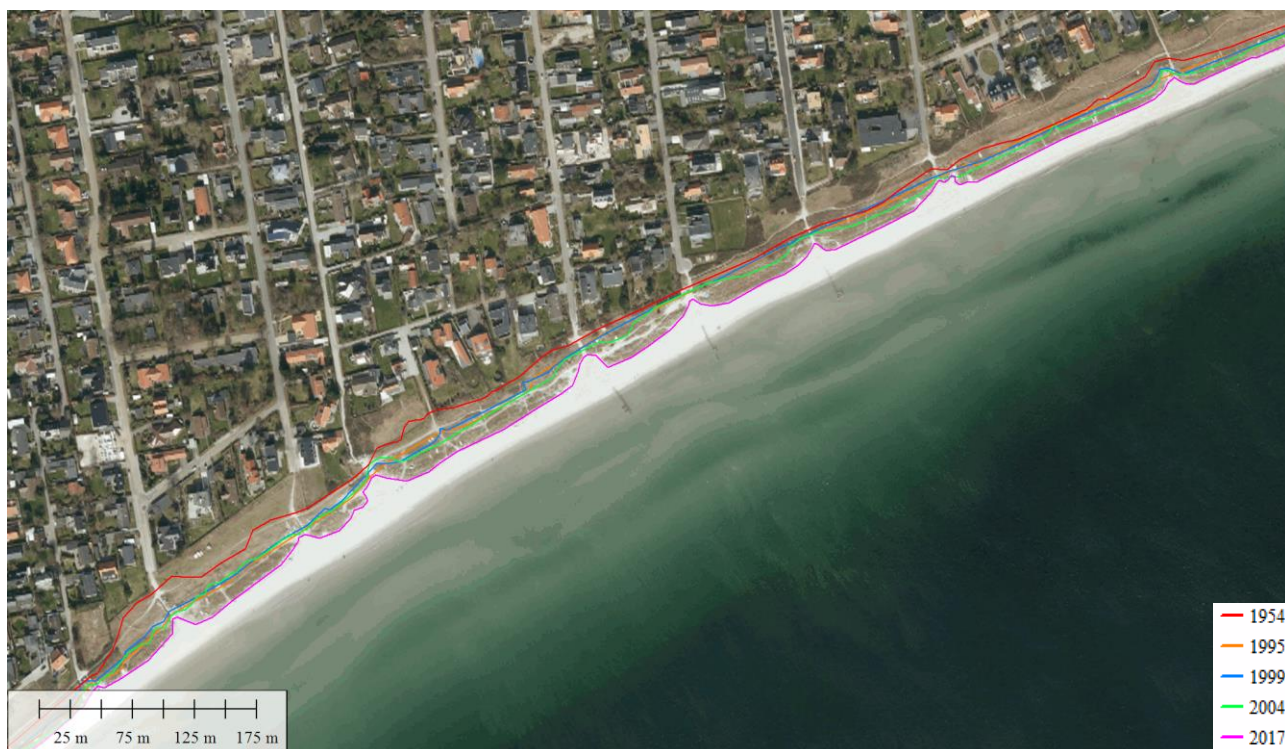
Foto 19 Bellevue strand



Figur 5-23 Bellevue Strand. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-24 Bellevue Strand. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2004. © COWI



Figur 5-25 Bellevue Strand. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4.5 Vejlbys Hage

Vejlbys hage er et konvekst kystfremspring, hvor kysten drejer ca. 30°. Syd for Vejlbys Hage er stranden orienteret mere eller mindre vinkelret på den dominerende bølgepåvirkning fra SØ, hvorfor den langsgående sedimenttransport vurderes at være lav (se Foto 20). Sammenlignet med billedet fra DHI's kyststudie i 1997 ses det tydeligt, at stranden siden da er blevet væsentlig bredere pga. sandaflejring. Nord for Vejlbys Hage er bølgeindfaldet skråt, og her har det været nødvendigt at etablere seks stenhøfder for at fastholde kysten (se Foto 21).

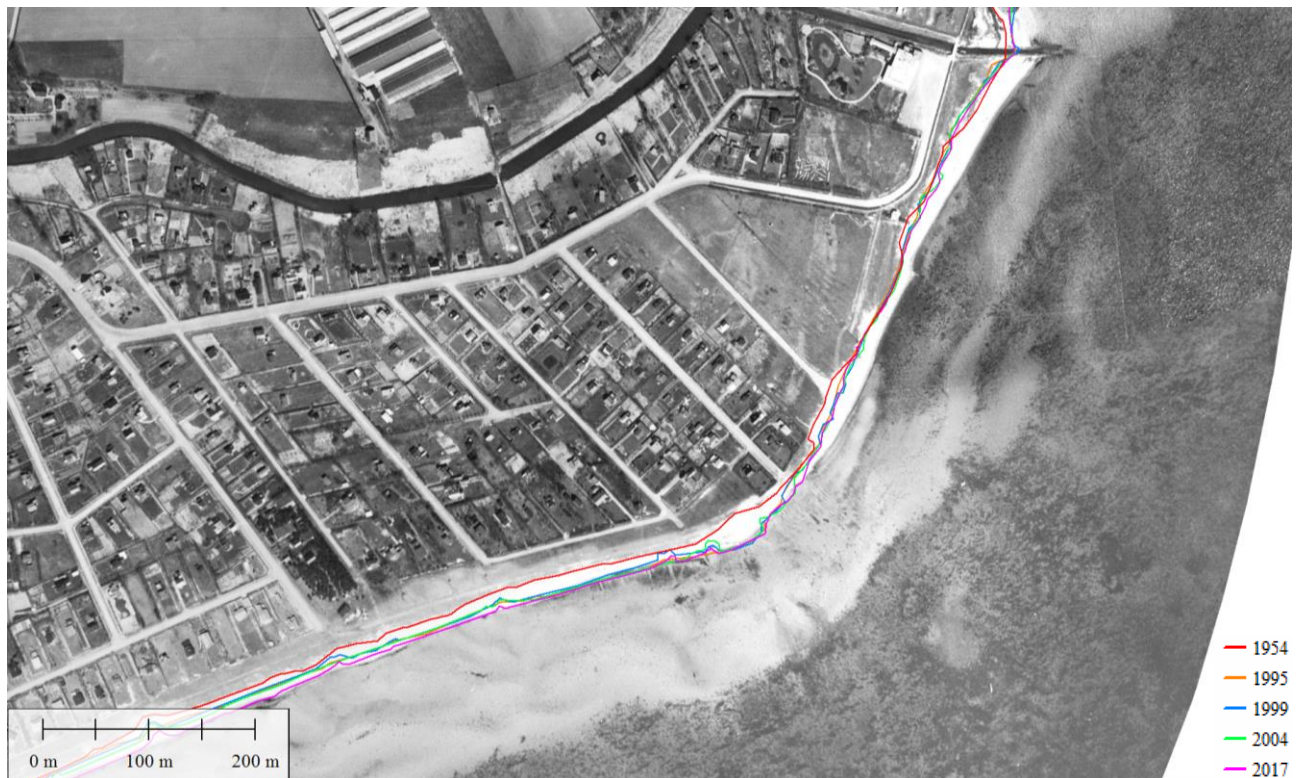


Foto 20 Kysten syd for Vejlbj Hage. Et foto fra DHIs kyststudie i 1997 fremgår nederst til højre, og viser tydeligt en noget smallere strand end den nuværende.



Foto 21 Kysten nord for Vejlbj Hage er beskyttet med hølfer.

Konvekse kystformer er morfologisk ustabile og vil derfor normalt erodere bort over tid, medmindre kystfremspringet er mere modstandsdygtigt end den tilstødende kyst som følge af f.eks. en anden geologi (sten, kalk eller lignende). Luftfotos på Figur 5-26 til Figur 5-28 viser, at Vejlbj Hage tidligere lå 20-30 m længere tilbage, end det gør i dag, hvilket kan have givet anledning til, at man i perioden mellem 1954 og 1995 har etableret hølfer udfor Vibe og Rylevej. Men siden man etablerede hølferne, ser det ud til, at Vejlbj Hage og den tilstødende kyst har været stabil.



Figur 5-26 Vejlbys Hage. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



Figur 5-27 Vejlbys Hage. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1995. © COWI



Figur 5-28 Vejlbys Hage. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 2017. © COWI

5.4.6 Åkrogen Strand og Ny Egå

Området syd for Egå Marina omkring udløbet af Ny Egå er i dag præget af grønne arealer uden kystnær bebyggelse helt ned til kysten. Høfderne startende ved Vejlbys Hage fortsætter forbi Åkrogen Strand mod Egå Marina med voksende afstand. Stranden på strækningen er præget af en del større sten spredt i den naturlige sand. Dette bevirker, at stranden er forholdsvis smal og stejl. Stranden afskæres fra det flade grønne bagland af lav bevoksning, se Foto 23.

Mod udløbet af Ny Egå ved Egå Marina er stranden bredere og med finere sand. Strækningen er forventeligt opstået som resultat af luvside aflejringer opstrøms Egå Marina. Det må forventes, at fremrykningen af kysten i umiddelbar nærhed af Egå Marina vil fortsætte så længe der tilføjes sand fra syd eller indtil sandet begynder at passere omkring havnen (by-passe). Allerede i dag kan havnen oplyse, at man oprenser i størrelsesordenen 1500-2000 m³ pr år.

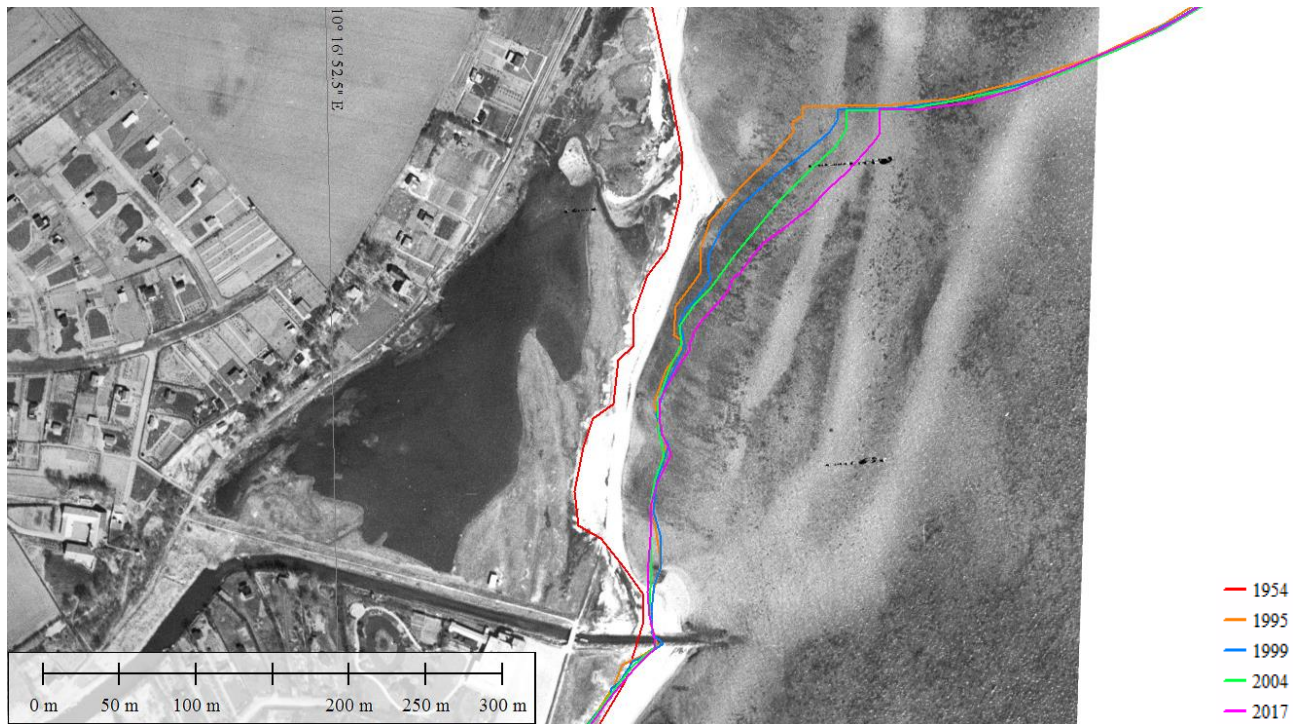
Den historiske udvikling af området omkring Ny Egås udløb er vist i Figur 5-29 til Figur 5-31.



Foto 22 Kysten ved Åkrogen Strand i retning med Egå Marina.



Foto 23 Kysten ved Åkrogen Strand.



Figur 5-29 Ny Egå udløb. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI



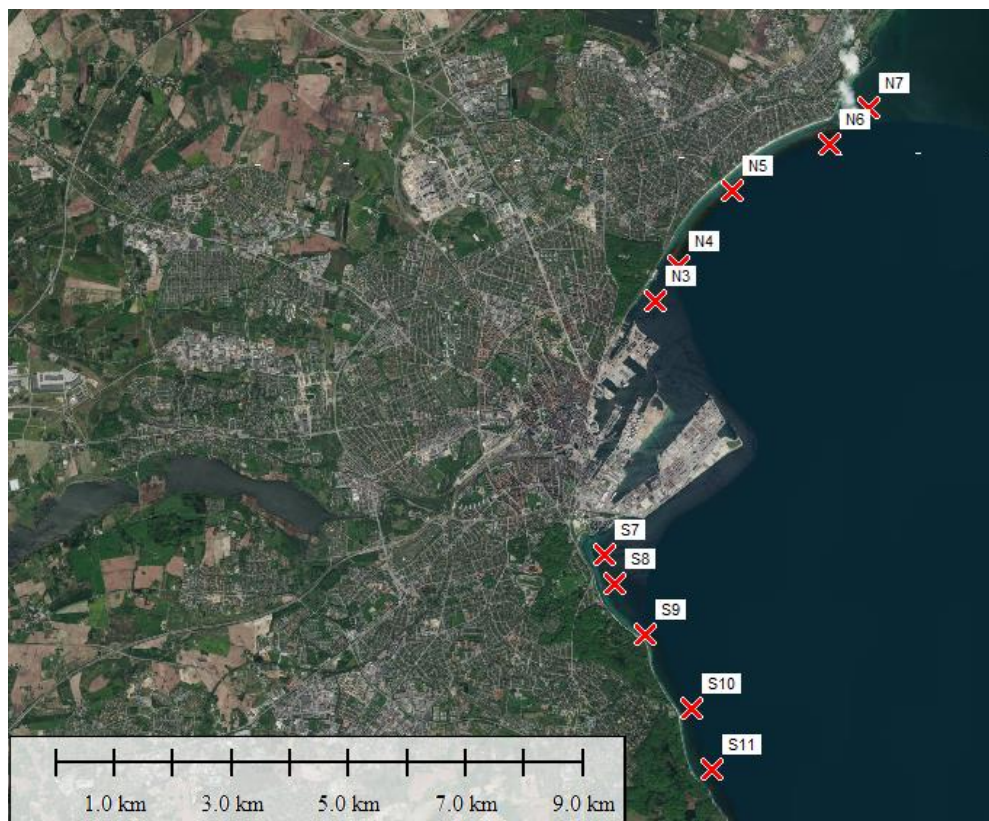
Figur 5-30 Ny Egå udløb. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1995. © COWI



Figur 5-31 Ny Egå udløb. Kystudvikling 1954 til 2017. Luftfoto fra 1954. © COWI

6 Sedimenttransport

For at kunne vurdere den morfologiske påvirkning af kysten som følge af Yderhavns etablering, er der foretaget en analytisk beregning af sedimenttransportkapaciteten forskellige steder langs kysten. Beregningerne er udført med udgangspunkt i 11 års bølgedata fra bølgemodelleringen med MIKE 21 SW beskrevet i kapitel 4.3.1. Bølgeforholdene er trukket ud i 11 punkter langs kysten på ca. 4 m vanddybde. De 11 punkter fremgår af Figur 6-1.



Figur 6-1 Udtrækspunkter for bølgeforhold langs kysten nord og syd for Aarhus Havn.

Til beregning af sedimenttransportkapaciteten anvendes Kamphuis' formel fra 1991 [ref. /15/]:

$$Q = 7,3 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b)$$

Hvor,

H_{sb} Er brydningsbølgehøjden [m]

T_p Er peak bølgeperioden [s]

m_b Er bundhældningen i brydningszonen [-]

d_{50} Er middelkorndiameteren [m]

α_b Er bølgeindfaldsretningen ved brydning [°]

Bølgetransformationen fra ca. 4 m vanddybde, hvor bølgeforholdene er trukket ud af MIKE 21 SW modellen, og ind til brydningszonen (brændingen) foretages

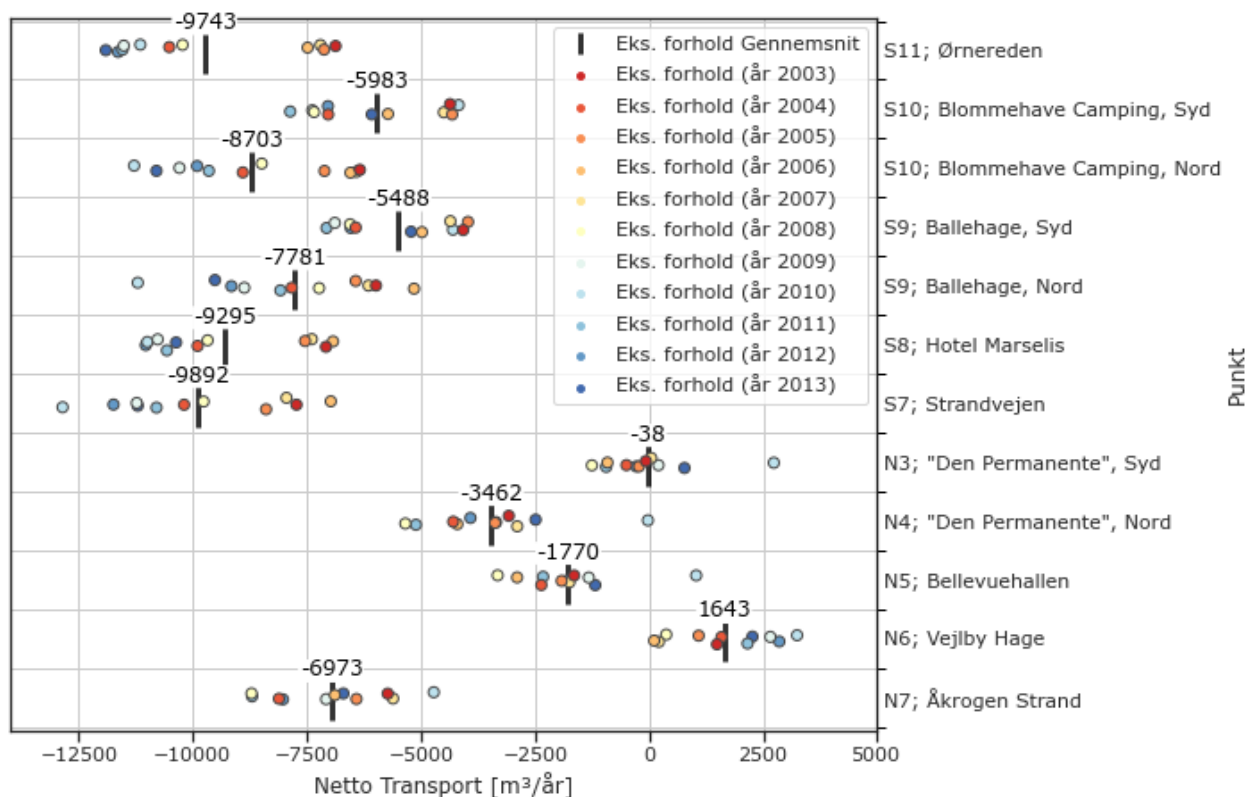
analytisk med 1. ordens bølgeteori. Brydningsbølgehøjden, H_{sb} , og dennes retning, α_b , bestemmes som foreskrevet af Kamphuis iht. [ref. /16/].

Der er ikke foretaget sedimentanalyser eller opmålt kystprofilen i forbindelse med nærværende kyststudie, men de analytiske beregninger er baseret på måleresultater fra DHI's kyststudie i 1997 [ref. /11/].

Af [ref. /11/] fremgår, at sedimentet i profilerne nord for havnen kan beskrives med en middeldiameter på 0,308 mm, hvorimod sedimentet syd for havnen er lidt grovere og kan beskrives med en middeldiameter på 0,416 mm.

Af [ref. /11/] fremgår det ligeledes, at kystprofilen er betydeligt stejlere syd for havnen og på strækningen langs Risskov stien og Risskov Strandpark nord for havnen end langs Vejlbj Fed, hvilket stemmer fint overens med de observerede erosions- og aflejringstendenser. Det antages derfor, at kysten har en hældning på 1:50 i punkt S3-S11 samt N3-N4, mens der i punkt N5-N7 antages en bundhældning på 1:100.

Resultatet af beregningen fremgår af Figur 6-2, samt af Tabel 6-1 og Tabel 6-2, og bekræfter mange af de observationer og analyser, som er gengivet i afsnit 5.3. Endvidere stemmer resultatet godt overens med resultatet af DHIs analyser fra 1997 [ref. /11/].



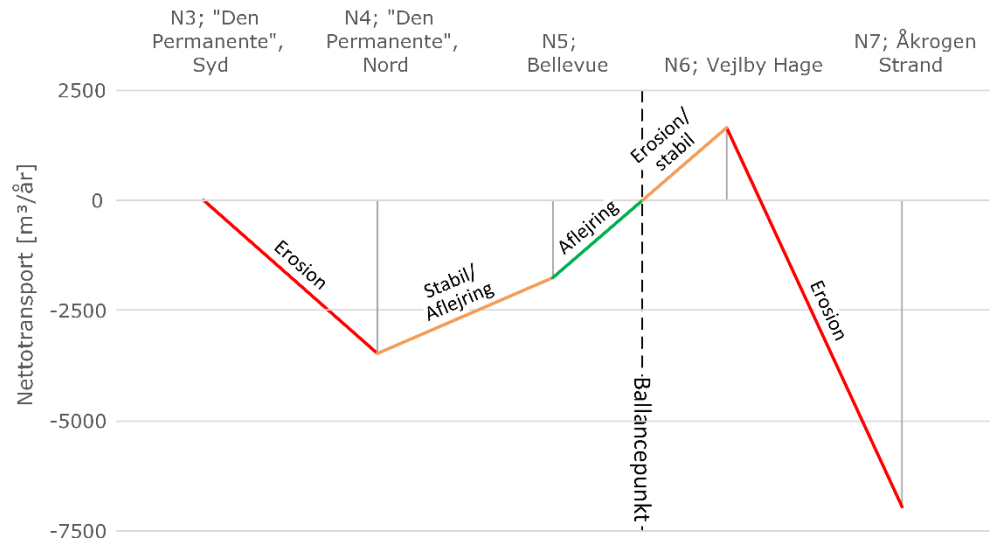
Figur 6-2 Nettosedimenttransportkapacitet langs kysten nord og syd for Aarhus Havn bestemt ved Kamphuis (1991) [ref. /15/]. Positiv nettotransport er sydgående og omvendt. Teksten viser den gennemsnitlige nettotransport over 11 år, mens punkterne viser den beregnede nettotransport individuelle år.

Syd for havnen viser DHIs studie nettotransporter på mellem -4.600 og -7.400 m³/år, mens nærværende studie viser -5.500 og -9.900 m³/år. Men som det også fremgår af Figur 6-2, er der en stor variation fra år til år, og forskellen mellem de to studier ligger indenfor denne variation. Nord for havnen viser DHIs studie -3000 og 400 m³/år, mens nærværende studie viser -3500 og 1600 m³/år (Åkrogen Strand er ikke indeholdt i DHIs studie).

Det skal bemærkes, at beregningerne alene beskriver *transportkapaciteten* og ikke den reelle transport. Dvs. at beregningerne beskriver hvor meget sediment den bølgegenererede litoralstrøm er i stand til at transportere pr. år forudsat at der er sediment til rådighed i kystprofillet. Den reelle sedimenttransport er faktorer mindre, da Aarhus Havn og de mange høfder og kystkonstruktioner blokerer strømmen og holder på sedimentet. Beregning af sedimenttransport er derfor forbundet med stor usikkerhed og skal primært anvendes til sammenligning af tendenser for forskellige udformninger.

Tabel 6-1 Sedimenttransportkapacitet langs kysten nord for Aarhus Havn bestemt ved Kamphuis (1991) [ref. /15/]. Positiv nettotransport er sydgående og omvendt.

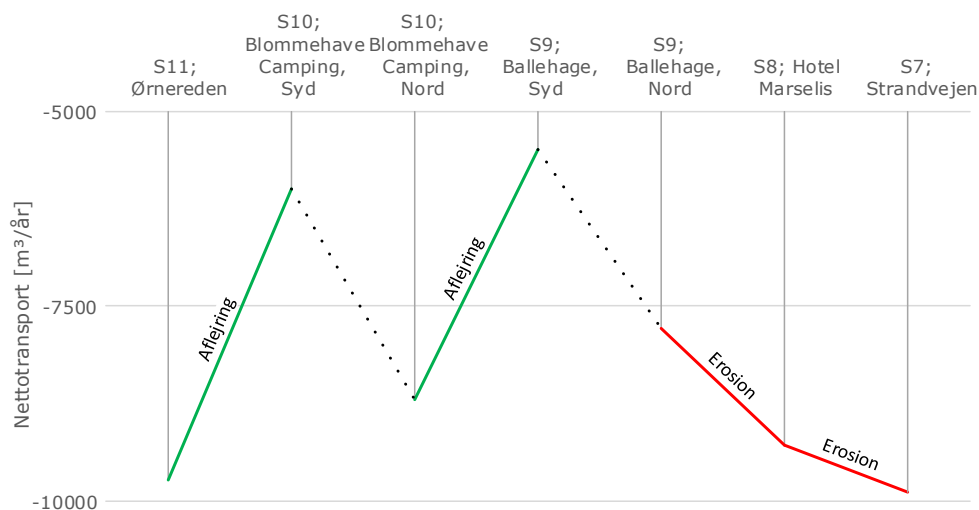
Beskrivelse	Åkrogen Strand	Vejlby Hage	Bellevue	"Den Permanente", Nord	"Den Permanente", Syd
Punkt	N7	N6	N5	N4	N3
Easting (UTM 32)	580118	579445	577788	576862	576476
Northing (UTM 32)	6229279	6228641	6227864	6226579	6225969
Kystnormal [°]	112	163	140	122	123
D50 [mm]	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308
Strandhældning [-]	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Nettotransport (m ³ /år)	-6973	1643	-1770	-3462	-38
Bruttotransport (m ³ /år)	7677	4790	4888	6801	4577
Nordgående (m ³ /år)	-7325	-1574	-3329	-5132	-2308
Sydgående (m ³ /år)	352	3216	1559	1670	2269



Figur 6-3 Variation in nettotransport nord for Aarhus Havn, samt oveordnede tendenser for erosion og aflejrning mellem de undersøgte punkter.

Tabel 6-2 Sedimenttransportkapacitet forskellige steder langs kysten syd for Aarhus Havn bestemt ved Kamphuis (1991) [ref. /15/]

Beskrivelse	Ørnere- den	Blomme- have Cam- ping, Syd	Blommehave Camping, Nord	Balle- hage, Syd	Balle- hage, Nord	Hotel Marselis	Strand- vejen
Punkt	S11	S10	S10	S9	S9	S8	S7
Easting (UTM 32)	577430	577086	577086	576297	576297	575789	575604
Northing (UTM 32)	6217997	6219025	6219025	6220299	6220299	6221149	6221655
Kystnormal [°]	71	85	58	85	40	73	62
D50 [mm]	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
Strandhældning [-]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Netto transport (m ³ /år)	-9743	-5983	-8703	-5488	-7781	-9295	-9892
Brutto transport (m ³ /år)	11612	8490	9586	7266	7848	9576	9894
Nordgående (m ³ /år)	-10678	-7237	-9145	-6377	-7814	-9435	-9893
Sydgående (m ³ /år)	935	1254	442	889	33	141	1



I det følgende beskrives konklusionerne af analysen:

- > Langs hele kysten nord for Aarhus Havn er nettotransporten mod NØ, med undtagelse af kysten lige syd for Vejlbhage, hvor kysten drejer så meget mod øst, at bølgerne fra SØ giver anledning til nettotransport mod SV. Der vil således være et balancepunkt mellem punkt N5 og N6, hvor transporten er nul, og hvor kystfremrykningen vil være mest signifikant. Dette stemmer

godt overens med de historiske luftfotos, som viser at kysten er vokset mest frem på strækningen mellem Sejrsallé og Ryvangs Allé. Samme tendens ses af Foto 20.

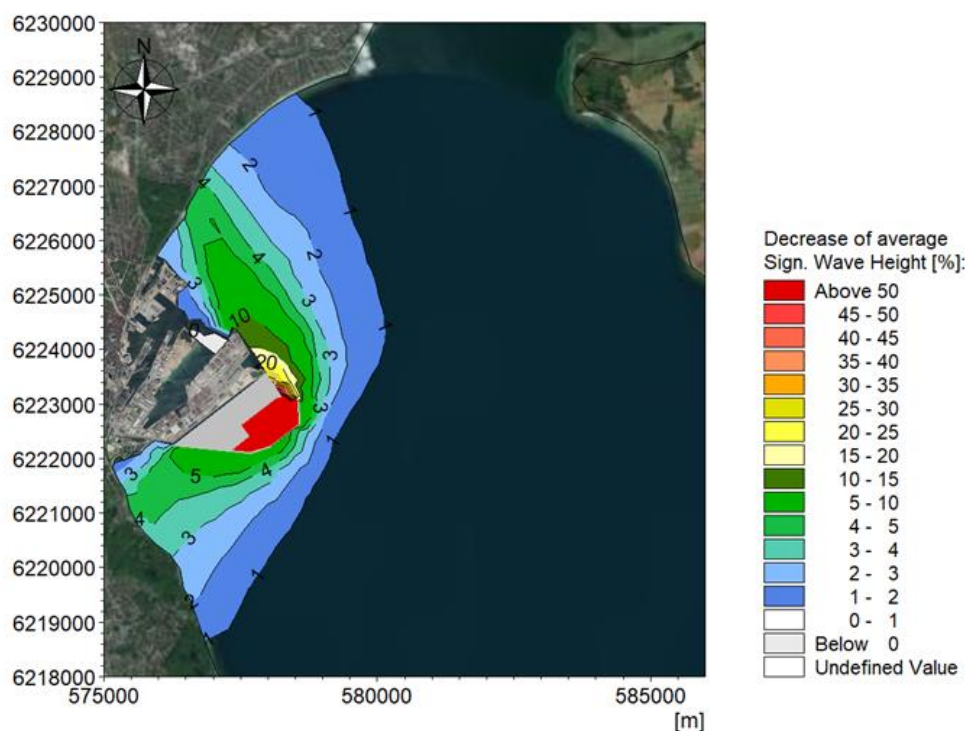
- > Syd for badeanstalten "Den Permanente" afskærmer Aarhus Havn så meget for bølgerne fra sydøst, at nettotransporten stort set er nul. Der er dog en svag transport mod nordøst.
- > Syd for Aarhus Havn er kysten generelt orienteret imod ØNØ, mens den nord for havnen generelt er orienteret imod ØSØ og SØ. Dette bevirker, at bølgepåvirkningen fra SØ er mere skrå på kysten syd for havnen, end nord for havnen, og at sedimenttransporten derved er næsten dobbelt så stor syd for havnen.
- > Syd for havnen er der stort set ingen forskel på nettotransporten og bruttotransporten, fordi stort set al den sedimenttransport som forekommer, er nordgående. Som det fremgår af Tabel 6-2, udgør den sydgående transport sjældent mere end 10% af bruttotransporten.
- > Lige syd for havnen omkring Strandvejen og Tangkrogen er der stort set ingen forskel på nettotransporten og bruttotransporten, fordi havnen blokerer for bølger fra nordlige retninger.

7 Havneudvidelsens indvirkning på kysterne

Den forventede indvirkning af Yderhavns etablering på kystudviklingen nord og syd for Aarhus Havn beskrives i dette afsnit. Analysen er baseret på bølgemodellering og sedimenttransportberegninger, som er foretaget med og uden den planlagte udvidelse af havnen.

Som nævnt tidligere har Aarhus Havn en udstrækning på ca. 2,5 km i forhold til den historiske kystlinje ved Aarhus, og vanddybden ved det mest østlige punkt på den eksisterende Østmole er ca. 10 m. Bølger og strøm udfor Aarhus Havn har ikke en størrelsesorden, så de er i stand til at transportere sand på denne vanddybde. Ved brug af gængse empiriske formler findes, at den såkaldte *closure depth*¹ er $d_c = 3,1$ m for en signifikant bølgehøjde på $H_{m0,12h} = 1,75$ m.

Havnen forhindrer derfor effektivt al sedimenttransport omkring havnen, og den fremtidige udvidelse, som strækker sig ud til ca. 14 m vanddybde vil således ikke forringe sedimenttilførslen til de tilstødende kyststrækninger.



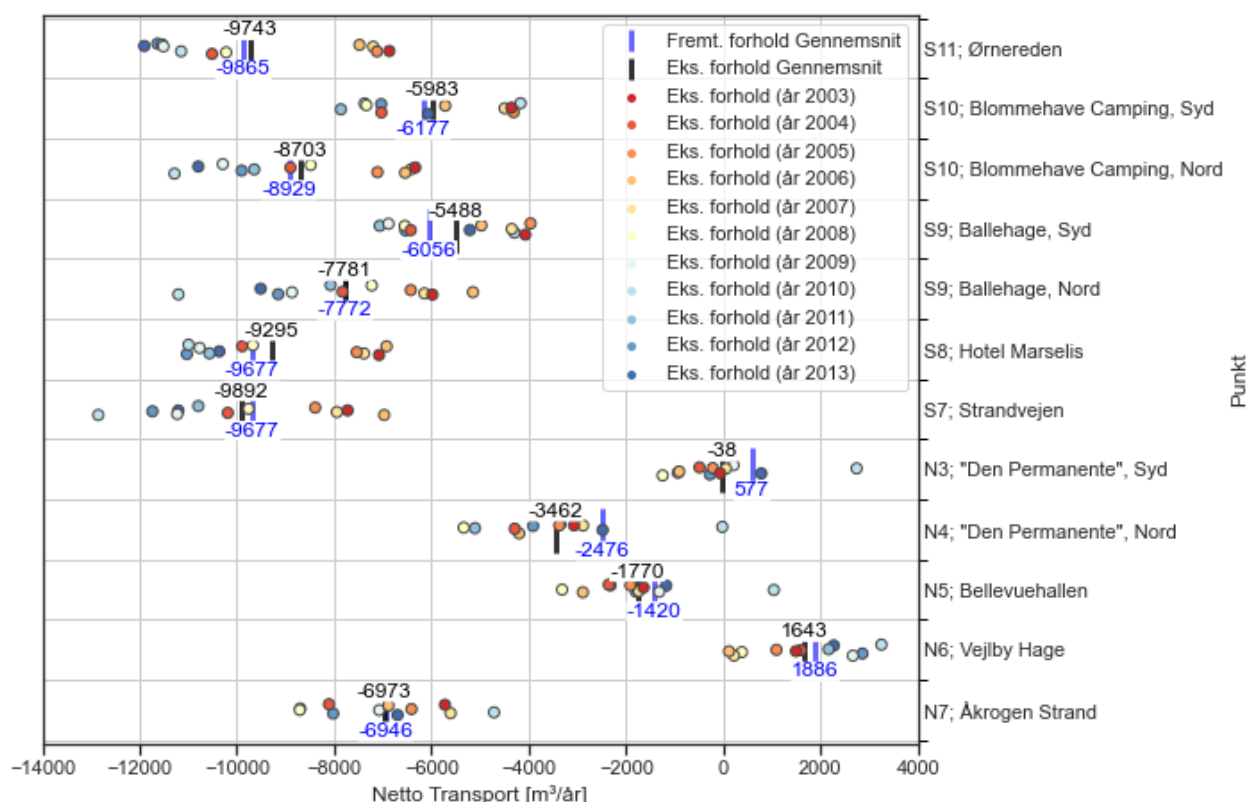
Figur 7-1 Reduktion (i %) af den gennemsnitlige signifikante bølgehøjde (H_{m0}) langs kysten som følge af udvidelsen af Aarhus Havn. 2003-2014 [ref. /3/].

Havnens påvirkning af bølgeforholdene langs kysten fremgår af Figur 7-1, og viser at Yderhavnen giver anledning til en reduktion af den gennemsnitlige bølgehøjde langs kysten på op til 4-5%.

¹ *Closure depth* angiver grænsen for bølgenes brydningszone også benævnt *litoralzonen*, hvor den bølgeinducerede sedimenttransport finder sted.

Påvirkningen af bølgeforholdene er som vist på Figur 7-1 aftagende med afstanden til havnen. Syd for Blommehaven Camping og nord for Vejlbj Hage er reduktionen af gennemsnitsbølgehøjden således mindre end 1%.

Påvirkningen af nettosedimenttransportkapaciteten langs kysten er beregnet på baggrund af bølgeforholdene i 2003-2014 for eksisterende forhold (jf. kapitel 6) samt med Yderhavns hovedalternativ. Beregningerne for hovedalternativet er udført på samme måde som beskrevet i kapitel 6 for eksisterende forhold. Sammenligningen fremgår af Figur 7-2.



Figur 7-2 Nettosedimenttransportkapacitet langs kysten nord og syd for Aarhus Havn bestemt ved Kamphuis (1991) [ref. /15/] under eksisterende forhold og fremtidige forhold med Yderhavns hovedalternativ. Positiv nettotransport er sydgående og omvendt.

Sammenligningen af sedimenttransportforhold for eksisterende forhold og Yderhavns hovedalternativ viser følgende:

- > Påvirkningen af sedimenttransportforholdene er af samme størrelsesorden som variationen fra et år til et andet, men markant mindre end den variation man ser over 11 år. Beregningerne viser således at man ikke vil kunne afgøre om de ændrede forhold et givet år i fremtiden skyldes udvidelsen eller de årlige variationer i bølgeforholdene.
- > Sammenligningen bekræfter, at påvirkningen på sedimenttransportforholdene er faldende med afstanden til havnen. Ved S11 "Ørnereden" syd for havnen og N7 "Åkrogen Strand" nord for havnen er sedimenttransporten stort set ikke påvirket af Yderhavnen. Man må således forvente, at Yderhavnen fortrinsvist påvirker kysten nord for S11 og syd for N7.

- > Syd for havnen har Yderhavnen stort set ingen indflydelse på sedimenttransporten. Sedimenttransporten er domineret af bølgerne fra syd, og 85-95% af bruttotransporten er nordgående. Ifølge beregningerne er den nordgående transport stort set upåvirket af Yderhavnen, mens den sydgående transport bliver reduceret der hvor kysten ligger mest i læ af Yderhavnen. Når den sydgående transport falder, så kommer den nordgående transport til at udgøre en større procentdel af den totale sedimenttransport (bruttotransporten) og derfor kan man observere at nettotransporten stiger med 0-10% syd for havnen. Beregningerne viser således, at udvidelsen potentielt kan give anledning til en marginalt forøget belastning af kysten (erosion).
- > Lige nord for havnen i punkt N3 viser beregningerne, at kysten ligger så meget i læ af de dominerende bølger fra SØ, at sedimenttransporten bliver sydgående, i modsætning til i dag hvor den er nordgående. Transportkapaciteten er meget lav ($577 \text{ m}^3/\text{år}$), men over tid vil det muligvis kunne give anledning til øget aflejring af sediment i hjørnet mellem Nordre Mole og stenkastning langs Risskovstien.
- > Mellem badeanstalten "den Permanente" og Risskov Strandpark (punkt N4), har Yderhavnen ligeledes en indflydelse på de dominerende bølger fra SØ. Her viser beregningerne, at nettotransporten, som er sydgående, falder med 25-30%. På denne strækning af kysten, må man derfor forvente at udvidelsen potentielt kan have en gunstig virkning. Kysten er imidlertid en erosionskyst, og det vil den ifølge beregningerne vedblive med at være.
- > Langs Vejlbøved (mellem N5 og N6) er reduktionen af den nordgående sedimenttransport mindre end lige nord for havnen. Ifølge beregningerne medfører Yderhavnen, at strandens ligevægtsorientering ændres med ca. $1-2^\circ$ fra ca. 54° til ca. 55° , og at balancepunktet, hvor nettotransporten er nul, vil flytte sig nogle få hundrede meter mod nord. Dette fremgår ligeledes af Figur 7-2, som viser, at den sydgående nettotransportkapacitet i punkt N6 stiger fra ca. 1650 til ca. $1900 \text{ m}^3/\text{år}$, mens den nordgående sedimenttransportkapacitet i punkt N5 falder fra ca. 1800 til ca. $1400 \text{ m}^3/\text{år}$. Dette vil i praksis betyde en omlejring af sediment fra den nordlige del af stranden, til den sydlige del stranden. Men da den nordlige del af stranden generelt er bredere end den sydlige del, vil påvirkningen sandsynligvis ikke blive betragtet som negativ.

7.1.1 Tangkrogen

Som beskrevet ovenfor vil forholdene i Tangkrogen være stort set identiske med og uden havneudvidelse.

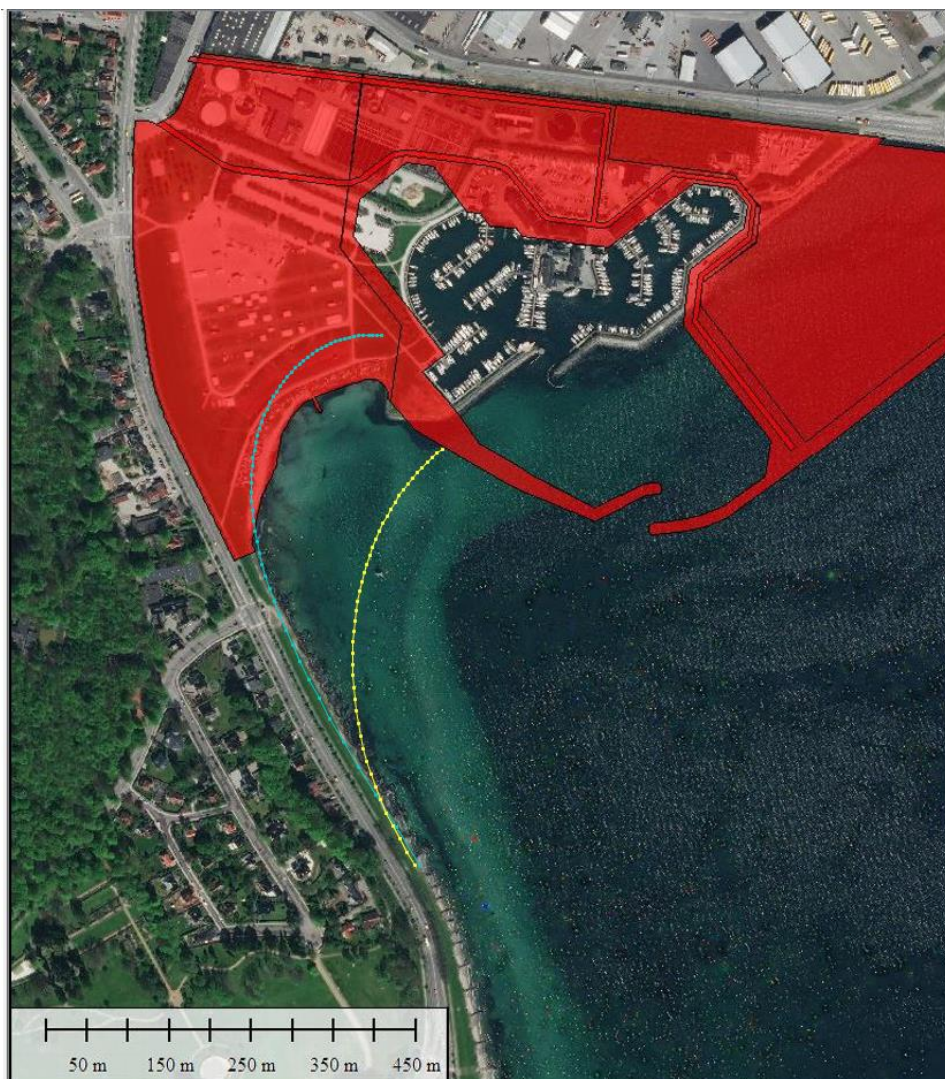
Kysten ved Tangkrogen er i nogenlunde ligevægt med den dominerende bølgepåvirkning fra sydøst og det sand, som føres til kysten fra syd.

Den stadige tilførsel af sedimenter og sand fra syd bevirker, at stranden er fremskudt i forhold til den statiske ligevægtskyst, og at den har indfundet en dynamisk ligevægtsorientering. I teorien betyder det, at stranden over en årrække ville rykke tilbage til den statiske ligevægtsretning, hvis man blokerer for sedimenttilførslen fra syd, ved f.eks. at forøge kystbeskyttelsen langs kysten syd for Aarhus Havn.

Yderhavnen ligger nord for Tangkrogen og medfører ikke en reduktion af sandtilførslen fra syd. Tværtimod viser Figur 7-2, at der vil ske en marginal forøgelse af transportkapaciteten fra syd. Udvidelsen forventes derfor ikke at give anledning til påvirkning af kystmorfologien ved Tangkrogen.

Tilsvarende vil aflejringen af tang i Tangkrogen fortsætte. Tangkrogen udgør en tangfælde pga. rolige bølgeforhold og begrænset strøm, og dette forhold ændres der ikke på. Desuden ligger Yderhavnen nord for Tangkrogen og medfører derfor ikke en reduktion af tangtilstrømningen fra syd.

Derimod må Tangkrogen forventes at blive påvirket af den planlagte udvidelse af Marselisborg Lystbådehavn, som indgår i hovedalternativet for Helhedsplanen for Tangkrogen. I forbindelse med hovedalternativet for helhedsplanen føres indsejlingen ca. 250 m mod SSØ og ud på dybere vand, hvilket vil forhindre yderligere tilsanding af indsejlingen i mange år frem. Dette vil imidlertid også medføre, at det tilstrømmende sediment aflejres mere eller mindre permanent langs Tangkrogen, hvor det vil akkumuleres og give anledning til at kysten gradvist rykker frem.



Figur 7-3 Tangkrogen – Statisk ligevægtsretning af kysten beregnet med Mepbay 3. Den cyan-farvede linje er kystens eksisterende statiske ligevægtsretning, og den gule linje er baseret på fremtidige forhold, hvor bølgerne vil diffraktere omkring et punkt nær den fremtidige havneindsejling [ref. /12/].

For at undersøge kystens nye statiske ligevægtsorientering er der foretaget en Mepbay beregning (cf. beskrivelse i afsnit 5.3.3), med de fremtidige forhold inkl. helhedsplanens hovedalternativ.

Beregningerne, som er vist i Figur 7-3, viser, at stranden foran Tangkrogen må forventes at rykke frem og etablere sig med en ny ligevægtsorientering, når Helhedsplanen er gennemført. Ifølge beregningerne vil der blive dannet et nyt areal på 25-30.000 m², hvilket vil kræve, at der tilføres 50-75.000 m³ sediment.

Sedimenttransportkapaciteten langs kysten er ifølge Figur 7-2 på i størrelsesordenen 9-10.000 m³/år, men grundet kystbeskyttelsen langs kysten vurderes den reelle transport til i størrelsesordenen kun 500-2.000 m³/år. Med disse antagelser, vil det således tage i flere årtier, før kysten har indfundet sig i sin nye ligevægt.

8 Referencer

- /1/ **COWI A/S**
Masterplan for udvidelse af Aarhus Havn - Yderhavnen 2020-2060
2018.
- /2/ **COWI A/S**
Helhedsplan for Tangkrogområdet
2016.
- /3/ **COWI** for Aarhus Havn
Numerisk Modellering af Bølgeforhold
A104076-PD-014, Doc. no. A104076-PD-014, November 2019.
- /4/ **COWI** for Aarhus Havn
Numerisk Modellering af Strømforhold
A104076-PD-013, Doc. no. Baggrundrapport til VVM, November 2019.
- /5/ **Miljøstyrelsen, M.- o. F.-**
Miljøgis
Online: <http://miljoegis.mim.dk/cbkort?profile=miljoegis-natura2000>,
10 July 2018.
- /6/ **Smed, P.**
Landskabskort over Danmark
Geografforlaget, Blad 2 Midtjylland, 1981.
- /7/ **Geodatastyrelsen**
Den danske Havnelods - Århus Havn
Online: <http://www.danskehavnelods.dk/#HID=680>, 01 June 2018,
accessed 11 July 2018.
- /8/ **Kystdirektoratet**
Højvandsstatistikker
2012.
- /9/ **DHI**
Technical Investigation of Wake Wash from Fast Ferries
Report for Danish Maritime Authority, October 1996, 1996.
- /10/ **Kirkegaard, J., Kofoed-Hansen, H. and Elfrink, B.**
WAKE WASH OF HIGH-SPEED CRAFT IN COASTAL AREAS
COASTAL ENGINEERING, 1998.
- /11/ **DHI** for Aarhus Havn
Århus Havn, VVM - Kystmorfologisk undersøgelse
Baggrundrapport, 15 April 1997.
- /12/ **Hsu, J. R. C. and Evans, C.**
Parabolic bay shapes and applications
in *Proc. Instn. Civ Engrs, Part 2*, pp. 557-570, Paper 9477, 1989.
- /13/ **André L.A. Raabe, A. H. d. F. K. M. G. R. M.**
MEPBAY and SMC: Software tools to support different operational levels of headland-bay beach in coastal engineering projects
Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838390900146X>, 2009.
- /14/ **Mangor, K. . D. N. K. . K. K. H. a. K.**
Shoreline management guidelines.
2017.

- /15/ **Kamphuis, J. W.**
Alongshore sediment transport of sand
Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 117,
no. No.6, pp. 624-641, ASCE,.
- /16/ **Kamphius, J. W.**
Introductiuon to Coastal Engineering and Management
Queen's University : Canada : World Scientific, 2010.