

JUNI 2021
SUND & BÆLT HOLDING A/S

KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

DESIGN BASIS

FAGNOTAT



COWI

JUNI 2021
SUND & BÆLT HOLDING A/S

KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

DESIGN BASIS

FAGNOTAT

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-A-REP-001

VERSION

1.0

UDGIVELSESDATO

24. juni 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

TSH, TOOL, HSV

KONTROLLERET

JGIM

GODKENDT

PTR

INDHOLD

1	Indledning	7
1.1	Generelt	7
1.2	Enheder og benævnelser	8
1.3	Koordinatsystem	8
1.4	Forkortelser	9
2	Funktionskrav	10
2.1	Generelt	10
2.2	Innovation og fremtidens krav	10
2.3	Levetid	11
2.4	Sikkerhedskrav	11
2.5	Linjeføring	12
2.6	Vejgeometri	15
2.7	Jernbanetrafik	15
2.8	Drift og vedligehold	16
2.9	Beliggenhedskrav	17
2.10	Ledninger	18
2.11	Komfortkriterier	19
3	Tværsnit og fritrumsprofiler	21
3.1	Vej	21
3.2	Jernbane	22
3.3	Navigationsgennemsejling	24
4	Hydraulisk projekteringsgrundlag	25
4.1	Vind	29
4.2	Bølger	29
4.3	Nuværende vandstandsforhold	37
4.4	Havspejlsstigning	50
4.5	Designvandstand	53
4.6	Strømforhold	54

5	Laster og lastkombinationer	57
5.1	Generelt	57
5.2	Permanente laster	58
5.3	Variable laster	59
5.4	Ulykkeslaster	63
5.5	Lastkombinationer	63
6	Materialer	68
6.1	Beton	68
6.2	Konstruktionsstål	68
6.3	Kabelstål og forspændingsstål	68
7	Referencer	69

1 Indledning

1.1 Generelt

Formålet med denne design basis er at definere de anlægstekniske krav og beskrive de eksisterende forhold som projekteringsgrundlag for anlægstekniske forundersøgelser af en Kattegatforbindelse kyst til kyst. Krav knyttet til natur-, miljø- og planforhold er ikke indeholdt i denne design basis, som projekteringsgrundlag for kyst-kyst løsningerne. Krav til ilandføringspunkter og information om grænseflader til landanlæg er ikke indeholdt. Denne design basis er derfor på ingen måder dækkende for alle aspekter af projektering af en Kattegatforbindelse.

Kyst til kyst forbindelse inkluderer følgende anlæg:

- Bro, tunnel eller kombineret bro og tunnel fra Sjælland til Jylland;
- Kunstig ø for kombineret bro og tunnel løsning;
- Vej og bane på Samsø for korridorer over Samsø.

Der udføres som udgangspunkt ikke detaljerede strukturelle, geotekniske, hydrauliske og installationsmæssige beregninger i nuværende fase, og et fyldestgørende grundlag herfor er således ikke præsenteret. For efterfølgende faser antages det, at Eurocodes med danske nationale annekser, tilpasset store anlægsprojekter, vil være gældende.

Designkrav og koncepter for broer, tunneller og marine konstruktioner antages baseret på danske regler og normer suppleret med vejledninger for større broer og tunneller for vej og jernbane udarbejdet af bl.a. ITA (International Tunnel Association) og PIARC (World Road Association).

Nærværende version af design basis indeholder hovedsageligt funktionskrav herunder vej- og jernbaneregler, kapacitetskrav, sikkerhedskrav, henvisning til krav til arbejdsmiljø, krav/ønsker til driftspålidelighed, krav/ønsker til anlægspålidelighed (tid og risici for længere tids lukning af anlæg) og eventuelle krav/ønsker til omkostningseffektivisering.

Design basis for infrastrukturen indeholder ligeledes et overblik over information om de eksisterende forhold i området i og omkring de specifikke korridorer bl.a. vanddybder, havbundsforhold, marine forhold såsom vandstande, bølger og strøm, samt i meget korte træk jordbundsforhold med henvisning til mere detaljerede beskrivelser.

Der er p.t. ikke identificeret UXO, eksisterende ledninger og konstruktioner til havs i landføring, som vil kunne udgøre bindinger og begrænsninger i de områder hvor korridorer tænkes placeret.

1.2 Enheder og benævnelser

SI-enheder skal anvendes. Hvor muligt skal benævnelser givet i Eurocodes anvendes.

Projektspecifikke benævnelser:

- > Ilandføringspunkt: Punkt hvor linjeføringen skærer kystlinjen;
- > Konstruktionsgrænse: Punkt hvor konstruktioner som f.eks. cut & cover tunnel, trug eller broudfletningsanlæg slutter og vej/bane går over til at anlægges i terræn;
- > Ilandføringszone: Område mellem ilandføringspunkt og konstruktionsgrænse.
- > Korridor: Område indenfor hvilket linjeføringer kan blive placeret.
- > Linjeføring: En eksemplificeret linje inden for en korridor, som kan afbildes både i plan og profil, og som anvendes til udregning af økonomi.
- > Konstruktionstype: Hængebro, skråstagsbro, højbro, lavbro, boret tunnel, sænketunnel, cut & cover tunnel, trug, udfletningsanlæg, dæmning.

1.3 Koordinatsystem

Parametre for koordinatsystem anvendt i forundersøgelserne er:

- > Geodætisk datum: Dansk, EUREF89
- > Projektion: UTM, zone 32N
- > Vertikal datum: DVR90

1.4 Forkortelser

Følgende forkortelser anvendes:

Forkortelse	Betydning
AIS	Automatic Identification System (system til registrering af skibstrafik)
BT	Boret tunnel
C&c	Cut and cover tunnel
CL	Centerlinje
DKCPC	Danish Cable Protection Committee
DVR90	Dansk Vertikal Reference
DWT	Dead Weight Tons (enhed til benævnelse af skibsstørrelser)
DS	Dansk Standard
EPB	Earth Pressure Ballance – En type TBM
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITA	International Tunnel Association
KKN	Kyst-Kyst Nord (korridorer imellem Sjælland og Jylland med udgangspunkt i ilandføringspunkt på Sjælland på Sj. Odde)
KKV	Kyst-Kyst Vest (korridorer imellem Jylland og Samsø)
KKØ	Kyst-Kyst Øst (korridorer imellem Sjælland og Samsø)
KP	Kilometerpunkt
LM1	Eurocode lastmodel 1 for vejtrafik
LM71	Eurocode lastmodel for tog
NA	Nationalt Anneks til Eurocodes
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PIARC	World Road Association
SLR	Sea Level Rise (vandstandsstigning)
SLS	Serviceability Limit State (anvendelsesgrænsetilfælde)
SO	Skinneoverkant
ST	Sænketunnel
TBM	Tunnel Boring Machine
TOR	Top of Rail (=SO)
TS	Tandem System (2 aksellaster som indgår i LM1)
UDL	Uniformly Distributed Load (jævnt fordelt last)
ULS	Ultimate Limit State (brudgrænsetilfælde)
UIC	International Union of Railways
UTM	Universal Transverse Mercator
UXO	Unexploded Ordnance (ueksploderet ammunition)
VTS	Vessel Traffic Service (system til alarmering af skibe på afveje)

2 Funktionskrav

2.1 Generelt

En fast forbindelse over Kattegat planlægges at indeholde:

- > Motorvej med 2 vognbaner og et nødspor i hver retning;
- > En elektrificeret jernbane med 2 spor eller 1 spor.

Både en ren vejløsning og en kombineret vej-/baneløsning undersøges. Ren vejløsning refereres til som 4+0, hvor 4 angiver antal vognbaner og 0 angiver antal jernbanespor. For en kombineret løsning skal der også føres to jernbanespor over. Denne løsning refereres til som 4+2, hvor 4 angiver antal vognbaner og 2 angiver antal jernbanespor. For den kombinerede løsning undersøges et alternativ med kun ét jernbanespor. Denne løsning refereres til som 4+1, hvor 4 angiver antal vognbaner og 1 angiver antal jernbanespor.

Løsninger skal opfylde gældende regler og praksis, samt tilstræbe minimering af byggeomkostninger, D&V omkostninger, byggetid, miljøbelastning og risiko.

En Kattegatforbindelse skal som udgangspunkt opfylde de samme funktionskrav som Storebæltsforbindelsen (broløsninger) og Femernforbindelsen (tunnelløsninger). Det vil blandt andet sige, at vejdelen skal være en tosporet motorvej uden restriktioner på adgang for farligt gods. Dog forudsættes togforbindelsen udelukkende at skulle betjene persontog og ikke godstog.

2.2 Innovation og fremtidens krav

Som udgangspunkt anvendes kendte løsninger fra Storebæltsforbindelsen, Øresundsforbindelsen og tilsvarende udførte store transportanlæg på verdensplan.

Det kan ikke udelukkes, at der i fremtiden vil være krav til en Kattegatforbindelse, som vil kræve ny teknologi for at blive opfyldt.

Alle større faste forbindelser udført i Danmark gennem tiderne: Lillebæltsbroen fra 1935, Storstrømsbroen fra 1937, Ny Lillebæltsbro, Farøbroerne, Storebæltsforbindelsen, Øresundsforbindelsen og nu Femernforbindelsen, er kendetegnet ved at ny teknologi blev anvendt, størrelsen af projekterne brød med hvad man tidligere havde bygget og krav omkring miljøbeskyttelse er gradvist forøget og håndteret fra projekt til projekt. Det må derfor forventes at en Kattegatforbindelse tilsvarende vil skulle imødekomme nye krav, som vil kræve innovative løsninger. Dette forhold er dog ikke omfattet af nærværende Design Basis, som refererer til kendte krav og tilhørende teknologiske løsninger.

2.3 Levetid

Den overordnede levetid af konstruktioner skal være 120 år. Levetid er defineret som perioden, for hvilke bro og/eller tunnelkonstruktioner kan bruges til deres påtænkte formål med forventet vedligeholdelse som defineret i drifts- og vedligeholdelsesmanualer (ikke udarbejdet i nuværende fase), uden tab af sikkerhed, strukturel og æstetisk integritet.

Visse specifikke elementer som f.eks. brolejer, brofuger, kabler, rækværker, mekaniske og elektriske installationer etc. vil have kortere levetid end angivet ovenfor og skal derfor projekteres så de kan udskiftes uden væsentlige trafikrestriktioner.

2.4 Sikkerhedskrav

2.4.1 Trafik- og brugersikkerhed

Sikkerhedsmålsætningen for brugerne af en bro eller en tunnel i forbindelse med Kattegatforbindelsen antages at være den samme, som på andre større faste forbindelser i Danmark; "Sikkerheden på en vejstrækning på bro og tunnel skal være den samme som en tilsvarende type vej i det åbne terræn."

Sikkerheden defineres i sikkerhedskonceptet og dokumenteres blandt andet ved hjælp af en driftsrisikoanalyse og ved accept af forudsætninger fra relevante myndigheder (bl.a. brandfolk, redning, ambulance og politi), dette gennemføres i en senere fase.

Bro, sænketunnel og boret tunnel skal opfylde den samme sikkerhedsmålsætning. I forhold til broløsninger vil tunnelløsningerne have en mindre risiko forbundet med trafikuheld på grund af vejforhold (f.eks. grundet vind, regn, sne og tåge), mens bidrag fra konsekvenser af brand til den samlede risiko er større for tunnelløsningerne. Det forventes at tunnelsikkerheden vil være den samme som tilsvarende strækning på land og på en bro.

2.4.2 Konstruktioners driftspålidelighed

Generelt

Risikoniveauet for at bro og tunnel beskadiges i en sådan grad, at den lukkes i en længere periode, vil være lav og fastlægges ud fra pålidelighedskrav svarende til Eurocode.

Sænketunnel sikres imod påsejling og projekteres for lasten fra et sunket skib, skulle et sådant synke og lægge sig på oversiden af sænketunnellen. Sænketunneler projekteres ligeledes for mulighed for et tabt anker på tunneltaget eller et "slæbt anker".

Boret tunnel forventes at lægges i tilpas dybde til at skibsstød og sunket skib ikke vil være dimensionsgivende for konstruktioner af den borede tunnel.

Flytrafik

Sikkerhed for flytrafik ved indflyvning til lufthavne skal tages i betragtning ved broløsninger. Dette betyder at bro for en nordlig linjeføring med landgang i Djursland, tæt på Tirstrup lufthavn, vil være pålagt højderestriktioner.

Farligt gods

Vejbro og vejttunneller skal projekteres uden begrænsninger på transport af farlig gods. For vejttunneller henvises til OECD dokument, "*Safety in Tunnels, Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels*", Gruppe A trafik (ingen restriktioner).

Farligt gods på jernbane kan ikke passere anlæggene, da forbindelsen kun skal dimensioneres for passagertog.

Brand og Eksplosion

Vejttunneller projekteres med hensyn til konstruktioners brandsikkerhed i henhold til vejledning PIARC. Det antages at risikoanalyse vil foreskrive en brandkurve svarende til modificeret hydrocarbon brand med op til 2 timers varighed.

2.4.3 Arbejdsmiljø

Gældende regler for arbejdsmiljø skal indtænkes i løsningerne, både med hensyn til udførelse og drift og vedligehold.

For sænketunnelløsninger vil arbejde på vand i dårligt vejr og dårligt sigt udgøre den største risiko, for udførelsen og der skal foretages restriktioner evt. midlertidig flytning af sejlrenden under sænkning af elementer.

For boret tunnel vil arbejde med tunnelboremaskine (TBM) foretages i mindre lukkede rum "confined space", hvortil specifikke byggemetoder er udviklet. Ligeledes udskiftning af "cutter" på borehovedet vil også kræve specialisterfaring.

For både sænketunnel og boret tunnel antages et separat servicegalleri til placering af installationer, herved minimeres andelen af tid hvor tunnelen er lukket til reparation og vedligehold, da grundet arbejdsmiljø regler forventes at intet arbejde på tunnel foretages mens tunnel er i brug.

Udover længden og størrelsen af tunnelløsningerne er der intet knyttet til arbejdsmiljø, som foreskriver specielle løsninger.

2.5 Linjeføring

Definition af linjeføring:

- > Linjeføring = Horisontal linjeføring
- > Længdeprofil = Vertikal linjeføring

2.5.1 Stationering

Stationering går fra øst mod vest og starter ved kystlinje i følgende stationering:

- > KKØ-1.1, -2.2, -2.4 og -2.6 (fra Nyby Øst) og KKV-1.1, -1.2 og -2.2 (fra Onsbjerg Nord/Syd): 10.000 m
- > KKØ-2.1, -2.3 og -2.5 (fra Nyby Vest/Røsnæs Syd) og KKV-2.1 (fra Onsbjerg Syd): 20.000 m
- > KKØ-3 og KKV-3.1, -3.2 og -3.3 (Fra Kolby Kås/Samsø Syd): 30.000 m
- > KKØ-4 og KKV-2.3, -3.3 og -3.5 (fra Fogedmark): 40.000 m
- > KKN-1.1: 100.000 m
- > KKN-1.2: 200.000 m
- > KKN-1.3: 300.000 m
- > KKN-1.4: 400.000 m
- > KKN-1.5: 500.000 m
- > KKN-2.1-bro: 500.000 m
- > KKN-2.1-brotun: 600.000 m
- > KKN-2.2-brotun: 700.000 m

Stationering er fælles for bro, tunnel og kombineret bro/tunnel (brotun) løsninger medmindre andet er anført.

2.5.2 Horisontal linjeføring

Forhold omkring den horisontale linjeføring som gør sig gældende for hver af de tre konstruktionstyper er beskrevet nedenfor.

Horisontal linjeføring skal opfylde gældende regler for vej og jernbane sammenfattet i afsnit 2.6 og 2.7. Linjeføringen består af rette linjer, cirkelslag og klotoider.

Bro

Linjeføringen ved hovedbroer (hængebroer og skråstagsbroer) skal så vidt muligt være en ret linje.

Sænketunnel

For meget lange sænkettunneller f.eks. Øresund og Femern støbes elementer under fabrikslignende forhold. Anlægsomkostningerne minimeres ved at linjeføringen for sænkettunnelen gøres retlinet over den længst mulige strækning.

Boret tunnel

Horisontal linjeføring for borede tunneller kan i modsætning til sænketunnel lettere laves krumme. Der er p.t. ikke tilstrækkelig detaljerede oplysninger til at optimere på linjeføringen af den borede tunnel. Dette forhold forventes dog ikke at have større indflydelse på anlægsomkostningen i denne fase, men kan være med til at reducere udførelsesrisikoen under hensyntagen til geologi og vanddybder.

2.5.3 Længdeprofil

Længdeprofil skal opfylde gældende regler for vej og jernbane sammenfattet i afsnit 2.6 og 2.7. Længdeprofil er sammensat af rette linjer og cirkelslag under hensyn til maksimum og minimum længdegradienter.

Afvanding

Vejregler for vejes geometri over og under broer angiver et langsgående minimumsfald på 1,0%. Dette krav er vanskeligt at opfylde for meget lange broer og tunneler og derfor er det vurderet rimeligt at fravige det i et projekt som en Kattegat-forbindelse. I stedet er langsgående gradient defineret til minimum 0,3% både på bro og i tunnel for at sikre afvanding. Ved overgangsstrækninger er vejbanen tilnærmelsesvis vandret. Her må man for vej etablere kunstigt fald i nødsporet (kuvertfald).

For sammenligning har Storebælt Vestbro vertikal kurve med radius 500.000 m og maksimalt langsgående gradient 0,68% hhv. 0,63% ved de to landfæster Sprogø og Knudshoved. For den centrale del er faldet under 0,3% over en strækning på 2,9 km. Dette er vurderet acceptabelt også for Kattegatforbindelsen.

Afvanding bro

For broer over vand forudsættes, at overfladevand kan bortledes direkte til havet.

Afvanding sænketunnel

For at minimere udgravningsmængderne placeres den vertikale linjeføring så tæt på havbunden, som muligt. For at minimere påvirkningen af havbunden placeres sænketunnel under havbunden. Koncept fra Femerntunnel med special element og dybdepunkt for per 2,2 km anvendes ligeledes for sænketunnel løsning for Kattegatforbindelsen.

Afvanding boret tunnel

Den vertikale linjeføring for de borede tunnellsøsninger lægges optimalt i forhold til anlægssomkostningerne, hvor geologien er mest velegnet til boring med en stor tunnelboremaskine (TBM). Det sikres at dybden af den borede tunnel ikke placeres dybere end erfaring fra tidligere undersøiske borede tunneller evt. ved at flytte den horisontale linjeføring.

Generelt for tunneller etableres pumpesumpe ved overgang mellem åben rampe og tunnel, samt i alle dybdepunkter hvor vand bl.a. fra tunnelvask og sprinklersystem samles.

Frihøjde på broer

Underside af brodrager skal være minimum i kote +5 for at beskytte lejer mod bølgesprøjt og overisning.

2.6 Vejgeometri

Motorvejen udføres for bro med 2 spor i hver retning og nødspor svarende til vejreglernes basistværprofil for 4-sporede motorveje i åbent land.

Motorvejen udføres for henholdsvis sænketunnel og boret tunnel med 2 spor i hver retning, i to separate vejår, det vil sige med ensrettet trafik. Vejgeometrien følger vejreglernes basistværprofil for 4-sporede motorveje i åbent land, og det forudsættes af nødspor tilføjes i begge vejår i henhold til sikkerhedskoncept for Femern. Se under afsnit 2.4.1 Trafik- og brugersikkerhed.

Motorvej på bro/i tunnel dimensioneres for 110 km/t (skiltet hastighed).

Vejgeometrien skal som udgangspunkt følge relevante vejregler fra Vejdirektoratet. Enkelte væsentlige parametre er beskrevet nærmere herunder.

- > min. hor. radius 950 m
- > min. hor. radius ved kø 1900 m
- > overhøjde 25 ‰
- > min. hor. radius uden overhøjde 4000 m
- > min. vert. kurve, konveks 6500-7500 m
- > min. vert. kurve, konkav 1600-1800 m
- > normal max. gradient 30 ‰ (slæbespor undgåes)
- > max. gradient 40 ‰ (slæbespor bør anlægges)

Der er ikke udarbejdet prognoser for trafikvolumen i nærværende forundersøgelser.

Laster fra vejtrafik, inklusiv dynamiske bidrag, skal være i overensstemmelse med lastmodeller beskrevet i afsnit 5.3.1.

Krav/ønsker til fremtidssikring:

- > El- og brintkøretøjer
- > Semi-selvkørende biler (sikkerhed/kapacitet)
- > Klima og tilsvarende bæredygtighedskrav
- > Innovation og SMART teknologier

2.7 Jernbanetrafik

For løsninger indeholdende jernbane dimensioneres anlæg på hav alene for passagertog.

Bane på bro/i tunnel dimensioneres for en hastighed på 200 km/t. Desuden undersøges mulighed for hastighed 250 km/t.

Forudsætningen for banens tracering er Banedanmarks Sporregler, og har følgende geometriske parametre:

- > Horisontalt
 - > for radius og anvendelse af normalbestemmelserne fås
 - > 1888/2950 (200/250 km/t)
- > Vertikalt
 - > for radius og anvendelse af normalbestemmelserne
 - > 14000/22000 (200/250 km/t)
 - > for radius og anvendelse af undtagelsesbestemmelserne
 - > 10000/16000 (200/250 km/t)
 - > for stigningsforhold og anvendelse af normalbestemmelserne
 - > $p \leq 12,5 \text{ ‰}$ for fri bane, uanset hastighed
 - > $p \leq 2,5 \text{ ‰}$ langs perron, uanset hastighed
 - > for stigningsforhold og anvendelse af undtagelsesbestemmelserne
 - > $p \leq 25,0 \text{ ‰}$ - for del strækninger $\leq 10 \text{ km}$
 - > $p \leq 35,0 \text{ ‰}$ - for del strækninger $\leq 6 \text{ km}$
 - > $p \leq 10,0 \text{ ‰}$ - Spor langs perron

Der er ved en hurtig vurdering af længdeprofilerne, for de valgte nybygningsløsninger og en hastighed på 250km/t, ikke fundet forhold i de vertikale parametre, som ikke kan overholdes ved at bruge:

- > Undtagelsesbestemmelserne ved længdegradienterne $p \leq 35,0 \text{ ‰}$
- > Normalbestemmelserne ved afrundingskurver $RL \geq 0,35 \cdot V^2$

For at få en hastighed over 250 km/t, skal der dog også anvendes undtagelsesbestemmelser ved de vertikale kurveforhold.

Der er ikke udarbejdet prognoser for trafikvolumen i nærværende forundersøgelser.

Laster fra jernbanetrafik, inklusiv dynamiske bidrag, skal være i overensstemmelse med lastmodeller beskrevet i afsnit 5.3.2.

2.8 Drift og vedligehold

Der skal sikres adgang til alle konstruktionsdele for inspektion og vedligehold, på nær fundamenter og på den udvendige side af tunneller. Muligheder for let adgang til kritiske brokomponenter som lejer og dilatationsfuger skal sikres, f.eks. vha. platforme og trapper. For sænketunneller og cut & cover tunnel skal der sikres god adgang til elementfuger og for en boret tunnel generel god adgang til alle overflader og fuger eksponeret for vandtryk. For begge tunnelloesninger indarbejdes separat

Vedligeholdelsesarbejde skal være muligt med minimum afbrydelse af vej- og jernbanetrafik.

Stålbroer skal udstyres med inspektionsvogne for adgang til underside af brodrager.

Sænkettunneller forsynes med special element, hvortil driftspersonel kan køre til i bil, parkere i nødspor og udføre nødvendige arbejder. Boret tunnel forsynes ligeledes med område hvor driftspersonel kan køre til, parkere og udføre nødvendige arbejder

Stålbroer og kabelsystem (eksklusive hængere i en hængebro) for kabelbårne broer skal beskyttes indvendigt med affugtningsanlæg.

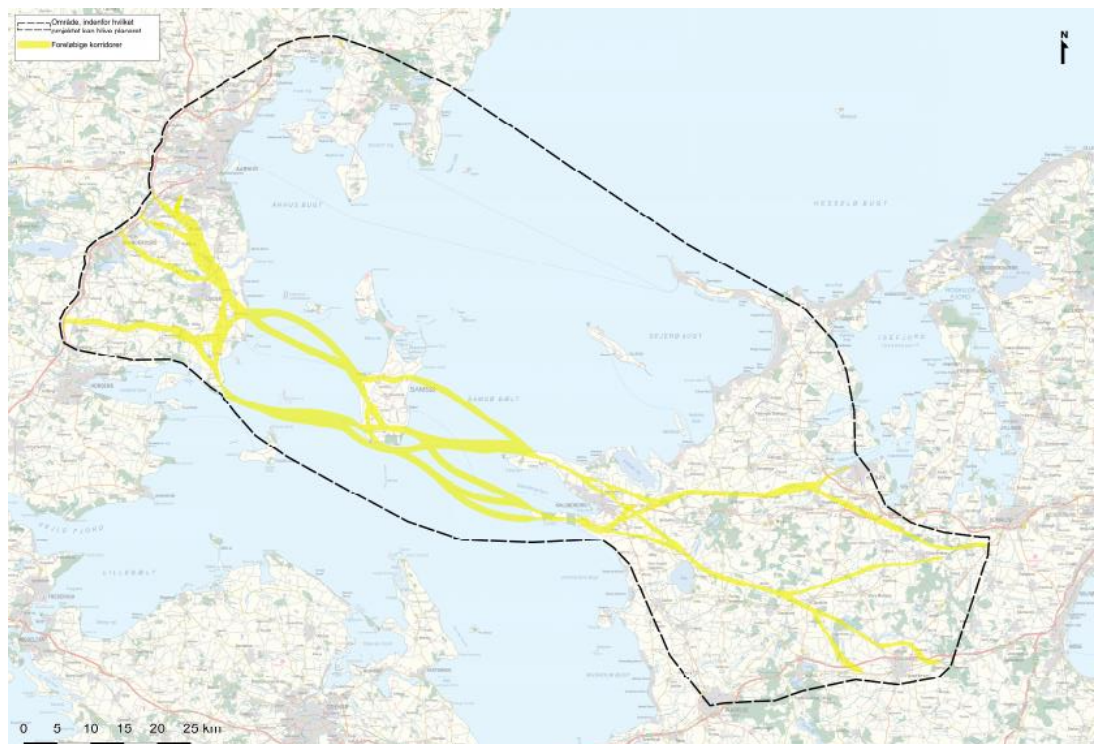
Stålrammer for sænkettunnel forsynes med katodisk beskyttelse.

2.9 Beliggenhedskrav

2.9.1 Projektområde

Projektområdet defineret af Vejdirektoratet, Sund & Bælt og Trafik-, Bygge- og boligstyrelsen er et udtryk for det geografiske område, inden for hvilket en fremtidig korridor for en Kattegatforbindelse mest sandsynligt kan placeres. Det udvalgte projektområde er ikke ensbetydende med, at der ikke kan være andre relevante projektområder. Foreløbige korridorer er vist inden for projektområdet.

Afgrænsningen af projektområdet ses på Figur 2-1 fra COWI (2020).



Figur 2-1 Afgrænsning af projektområdet er vist med de indledende overvejelser om korridorer. (FORELØBIG , opdateres)

2.9.2 Ilandføringspunkter

Ilandføringspunkt i hver ende af kyst-kyst forbindelser, på Sjælland og Jylland, skal koordineres med forundersøgelser for landanlæg. Definition og beskrivelse af ilandføringspunkter fremgår af dokumentet "*Tværgående grænsefladekoordinering, generelle forhold*"

2.9.3 Betalingsanlæg

Ikke behandlet.

2.9.4 Adgangsveje

Adgangsveje til alle brolandfæster og tunnel portalbygninger skal etableres.

2.10 Ledninger

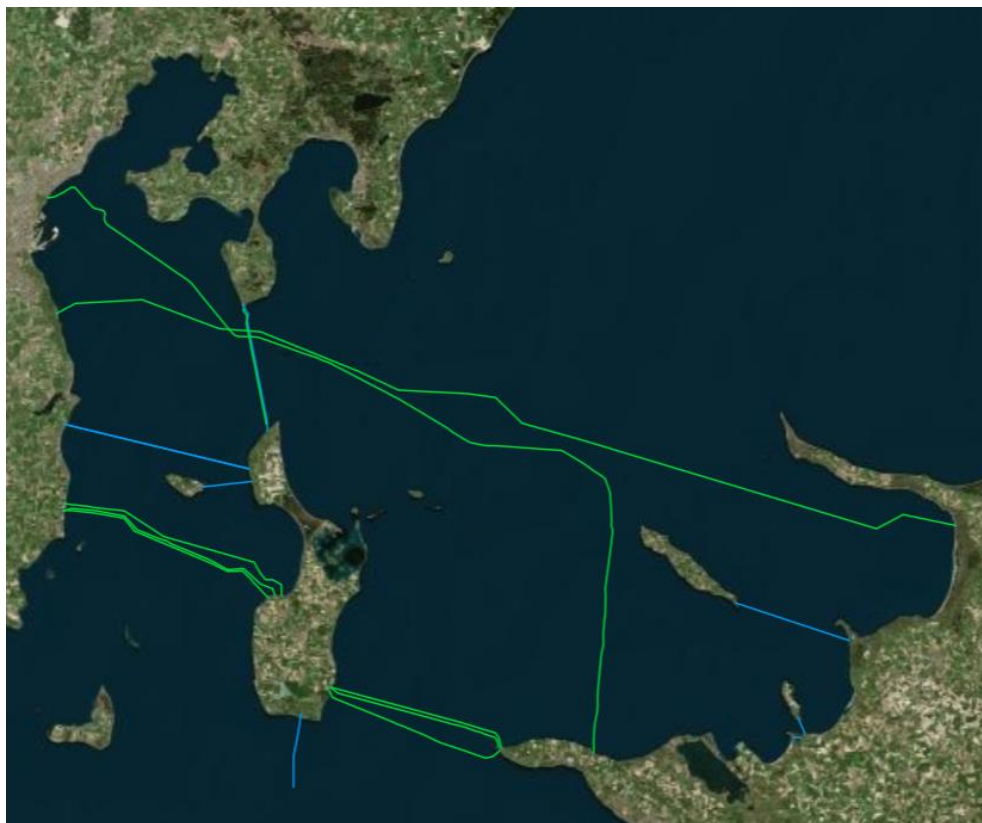
Ledninger omfatter elkabler, telekommunikationskabler, gasledninger og vandledninger.

2.10.1 Eksisterende ledninger

Søkort angiver kabler som følger:

- > Kabelkorridor mellem Røsnæs og Hjalmarsgård på Samsø, over store dele sammenfaldende med korridor KKØ-2;
- > Kabelkorridor mellem Sælvig på Samsø og Hou, over store dele sammenfaldende med korridor KKV-2;
- > Kabler til 2 havvindmølleparker.

Større ledninger er kortlagt af Danish Cable Protection Committee ([DKCPC](#)) og gengivet i Figur 2-2.



Figur 2-2 Ledninger offshore (grøn: kommunikation, blå: el transmission)

Der er to havvindmølleparker nær Samsø men de er beliggende nord hhv. syd for valgte KKØ og KKV korridorer og udgør derfor ikke nogen forhindring. Havvindmølleparken ved Tunø Knob er beliggende nord for den nordligste vestlige korridor. Kabler fra denne vindmøllepark til land går til Jylland, og forløber parallelt med, og nord for KKV-1 korridoren (mangler i Figur 2-2). Dermed udgør disse kabler ikke en forhindring. Havvindmølleparken syd for Samsø, ved Paludans Flak, er beliggende syd for de sydligste korridorer. Kabler fra denne vindmøllepark til land går til Samsø, og krydser dermed korridorerne. Da kablerne krydser korridorerne vinkelret, udgør de ikke en forhindring, som ikke kan håndteres ved placering af bropiller. Hvis der i en senere fase vælges at undersøge en sænketunnelløsning til Vesborg Fyr vil det kræve ledningsomlægning.

Ledninger på land i ilandføringszonen er ikke kortlagt på nuværende stadie men skal kortlægges og tages hensyn til i en efterfølgende fase.

2.10.2 Ledninger på ny fast forbindelse

Der skal ikke føres ledninger over en ny forbindelse, udover hvad der er behov for af hensyn til driften af forbindelsen herunder vand til brandbekæmpelse.

2.11 Komfortkriterier

I denne fase forudsættes samme komfortkriterier som anvendt ved Ny Storstrømsbro og Femerntunnel. Det afgørende krav af hensyn til togpassagerernes

komfort er kravet til maksimalt vinkelknæk i lodret plan ved ekspansionsfuger, se Figur 2-3 og Tabel 2-1.



Figur 2-3 Vinkeldrejninger.

Tabel 2-1 Krav til vinkeldrejninger.

Hastighed [km/t]	En dragerende Maks. rotation [mrad]	To dragerender Maks. rotation [mrad]
200	$\theta \leq 3,0$	$\theta_1 + \theta_2 \leq 4,0$
250	$\theta \leq 2,5$	$\theta_1 + \theta_2 \leq 3,0$

3 Tværsnit og fritrumsprofiler

3.1 Vej

3.1.1 Bro

For broløsninger skal vejens opbygning mellem inderside af ydre autoværn være som vist i følgende tabel svarende til Storebæltsbroen. Ydre autoværn er ikke medtaget. Bredde hertil skal lægges til.

Tabel 3-1 Vejopbygning bro

Element	Delelement	Bredde [m]
Kørebane nord (← vestgående trafik)	Rabat	0,5
	Nødspor	2,5
	Kantstribе	0,5
	Vognbane	3,5
	Vognbane	3,5
	Kantstribе	0,5
	Rabat	0,5
Midterautoværn		0,6
Kørebane syd (østgående trafik →)	Rabat	0,5
	Kantstribе	0,5
	Vognbane	3,5
	Vognbane	3,5
	Kantstribе	0,5
	Nødspor	2,5
	Rabat	0,5
I alt		23,6

Den samlede bredde af lantbaneareal med belægning er 23,0 m.

Vertikal frihøjde for motorveje skal være 4,5 m i hele broens levetid. Tolerance for at tage hensyn til evt. sne på kørebane og fremtidig øget tykkelse af belægning skal være 0,1 m. Tolerance på udførelse er 0,03 m. Minimum vertikal frihøjde skal være 4,7 m ved anlæg.

3.1.2 Tunnel

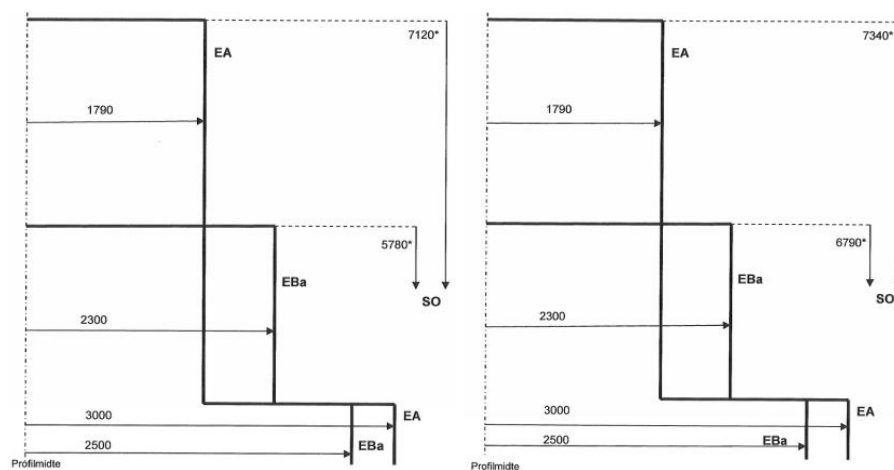
Sænketunnel og boret tunnel

Element	Delelement	Bredde [m]
Rør 1 – Kørebane nord (← vestgående trafik)	Betonautoværn	0,5
	Nødspor	2,5
	Kantstribe	0,5
	Vognbane	3,5
	Vognbane	3,5
	Kantstribe	0,5
	Rabat	0,5
Rør 2 - Kørebane syd (østgående trafik →)	Rabat	0,5
	Kantstribe	0,5
	Vognbane	3,5
	Vognbane	3,5
	Kantstribe	0,5
	Nødspor	2,5
	Betonautoværn	0,5
I alt		23,6

Vertikal frihøjde for motorveje skal være 4,5 m. Det forudsættes at ny belægning placeret efter fjernelse af den gamle. Minimum vertikal frihøjde skal være x,x m.

3.2 Jernbane

Jernbanen skal opfylde fritrumsprofil jf. Fritrumsprofiler [1]. Der skal anvendes profil EBa svarende til nyanlæg og større broombygninger. Fritrumsprofil er vist i Figur 3-1.



Figur 3-1 Fritrumsprofiler jernbane, til venstre hastighed til og med 200 km/t, til højre for hastighed over 200 km/t til og med 250 km/t (EBa anvendt, mål i mm)

Vertikale mål er i forhold til skinneoverkant (SO). Den krævede højde afhænger af design hastighed V og er sammenfattet i Tabel 3-2. Det er antaget at sporskifter ikke er placeret på broer og i tunneler og der kan derfor ses bort fra tillæg 3 angivet i parentes.

Tabel 3-2 Krav til frihøjde (mål i mm)

Frihøjde over skinneoverkant	$80 < V \leq 200 \text{ km/t}$	$200 < V \leq 250 \text{ km/t}$
EBa profil	5780	6790
Tillæg 1, sporvedligeholdelse	100	100
Tillæg 2, tunneler over 100 m længde	50	50
Tillæg 3, ved veksel-, adskillelsesfelt og transversaler	(400)	(500)
I alt bro ekskl. tillæg 3	5880	6890
I alt tunnel ekskl. tillæg 3	5930	6940

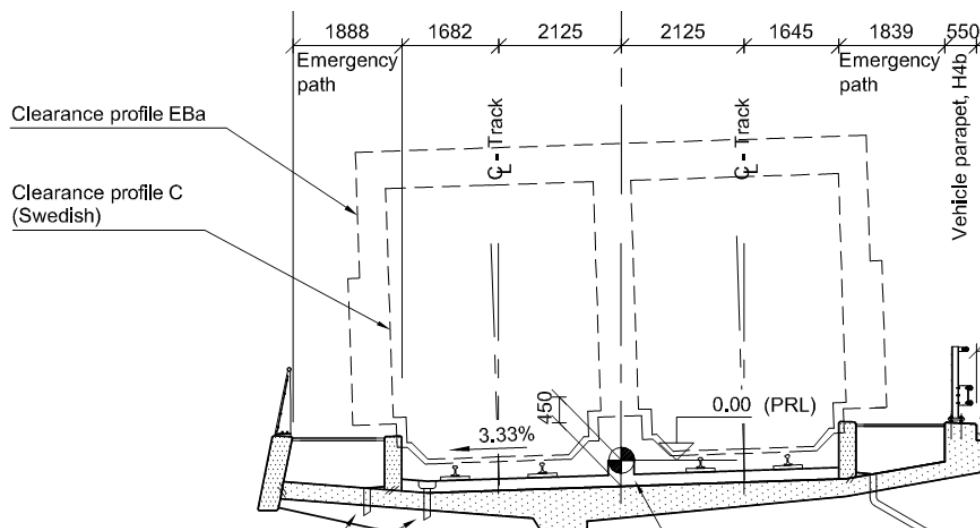
Ovennævnte frihøjder er generelle normkrav og bør aftales nærmere med Banedanmark i en senere fase.

Nødvendig konstruktionshøjde afhænger af dimensioner på valgt sporsystem. Der er i nuværende fase antaget direkte sporbefæstelse (slab track) og at højden på sporsystem er 615 mm.

Horisontalt mål fra profilmidte til yderside af bredeste del af fritrumsprofil er 2550 mm for bro og 2600 mm for tunnel, både for hastighed 200 og 250 km/t, forudsat at horisontal kurveradius er større end 1500 m.

Afstand mellem centerlinjer af to parallelle spor skal være minimum 4250 mm for hastighed $160 < V \leq 250 \text{ km/t}$ forudsat at horisontal kurveradius er større end 300 m jf. Banenorm BN1-154 [2].

Afstand fra jernbane fritrumsprofil til vej fritrumsprofil for broløsninger med vej- og banetrafik i samme niveau skal være som vist i Figur 3-2 svarende til Ny Storstrømsbro. Detailmål afhænger af Banedanmarks krav til tværfald, men totalbredden er uafhængig heraf.



Figur 3-2 Fritrumsprofil jernbane mod vej

Afstand fra centerlinje spor (CL-Track) til faste genstande som f.eks. inderside af gitterdiagonal skal minimum være 4,0 m.

For tunnelløsningerne antages fritrumsprofiler som anvendt for den nye Femern-tunnel

Femern sænketunnel tværsnit:



3.3 Navigationsgennemsejling

Sejladundersøgelserne har defineret følgende gennemsejlingshøjder:

- > KKØ T-rute: 65 m
- > KKV nær Samsø: 26 m
- > KKØ nær Samsø og KKV nær Jylland: 18 m

Der er lagt 2 m til disse frihøjder for at tage hensyn til fremtidige vandstands-stigninger for en antaget design levetid af konstruktionerne på 120 år.

Til sammenligning er frihøjden på Storebælt Østbro 65 m.

4 Hydraulisk projekteringsgrundlag

Dette afsnit beskriver overslagsmæssigt hydraulisk projekteringsgrundlag (vind, vandstand, bølger og strøm) for forbindelsen og udformning. Resultaterne skal verificeres ved numerisk modellering, f.eks. ved brug af MIKE 21, i en senere fase i projektet, hvor udvalgte situationer undersøges.

Der er i det følgende fokuseret på en ca. 1.000 års bølgesituation og samtidig vandstand inkl. global havspejlsstigning (Sea Level Rise, SLR) til år 2150. Desuden anbefales det at der projekteres for en meget sjælden vandstand, en 10.000 års hændelse, af hensyn til at undgå oversvømmelse af tunnelen. Hvis der fra starten designs for SLR til år 2150 for marine konstruktioner der senere kan forhøjes, vil der være indbygget en meget stor sikkerhed med hensyn til designvandstand i starten af forbindelsens levetid, og man bør om mange år genbesøge designet af konstruktionerne når SLR har opnået en størrelse på mere end 0,5 m.

Særlig fokus er på projekteringsgrundlag for de kunstige øer mellem bro og tunnel (sænketunnel eller boret tunnel). Disse konstruktioner er foreløbig placeret på 5 lokaliteter for de kunstige øer enten lidt syd for Thunø, midt imellem Samsø og Asnæs eller mellem Sjællands Odde og Aarhus hhv. Djursland (mellem Glattved og Grenå), se Figur 4-1 til Figur 4-4. I det følgende er angivet en oversigt, for lokaliteterne:

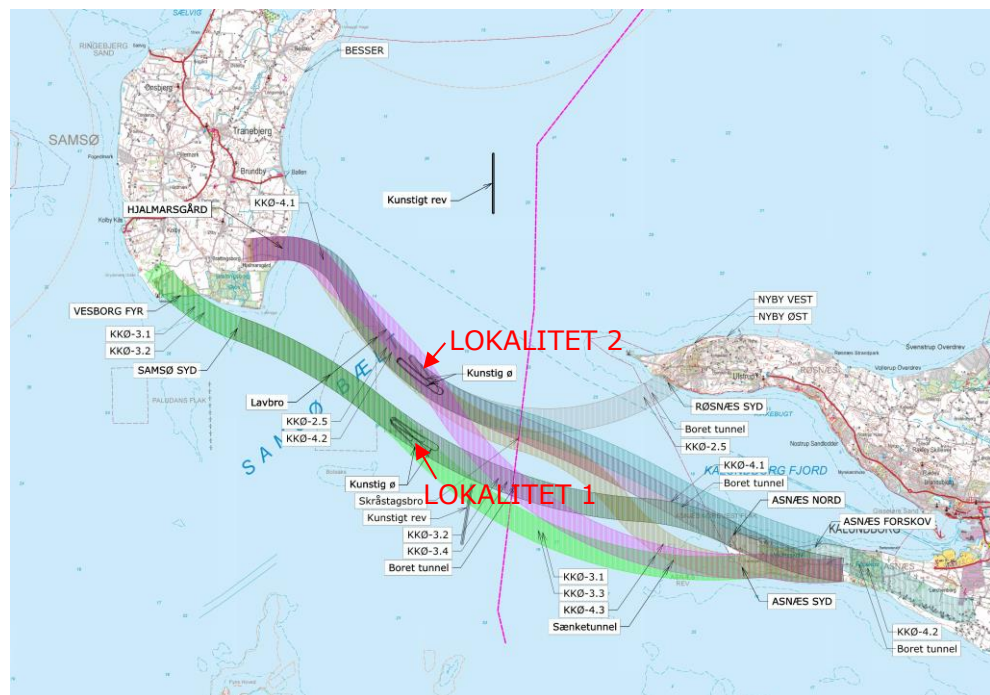
- > **Midt mellem Samsø og Asnæs (2 lokaliteter):**
 - > **Lokalitet 1:** Beliggende ved Falske Bolsaks – se Figur 4-1
 - > **Lokalitet 2:** Beliggende nord for Falske Bolsaks – se Figur 4-1
- > **Syd for Thunø (1 lokalitet):**
 - > **Lokalitet 3:** Beliggende ved Kirkegrund – se Figur 4-2
- > **Mellem Sjællands Odde og Aarhus hhv. Djursland (2 lokaliteter):**
 - > **Lokalitet 4:** Beliggende ved Marthe Flak – se Figur 4-3
 - > **Lokalitet 5:** Beliggende vest for Yderflak – se Figur 4-4

Konstruktionerne udformes således, at kronekoten eventuelt senere kan forhøjes, og stenbeskyttelsen forstærkes, jf. ovenfor beskrevet potentielle ændringer i forudsætningerne om SLR.

I nærværende afsnit beskrives også de kunstige rev til skibsstødsbeskyttelse til fartøjer der har bevæget sig uden for den normale vandvej/sejlrute, samt en undersøisk dæmning til sænketunnel, alle placeret mellem Samsø og Sjælland. Placering af disse rev og dæmning er vist på henholdsvis Figur 4-5 og Figur 4-6.

For nærværende er der ikke planer om dæmninger ved ilandføringerne, men designbølgeforhold for 5 udvalgte ilandføringslokaliteter er medtaget i tilfælde af at dette vil ændre sig. Disse lokaliteter er Nyby ved Røsnæs, Asnæs, Vesborg Fyr og Hjalmarsgård, se Figur 4-1, samt Onsbjerg, se Figur 4-2.

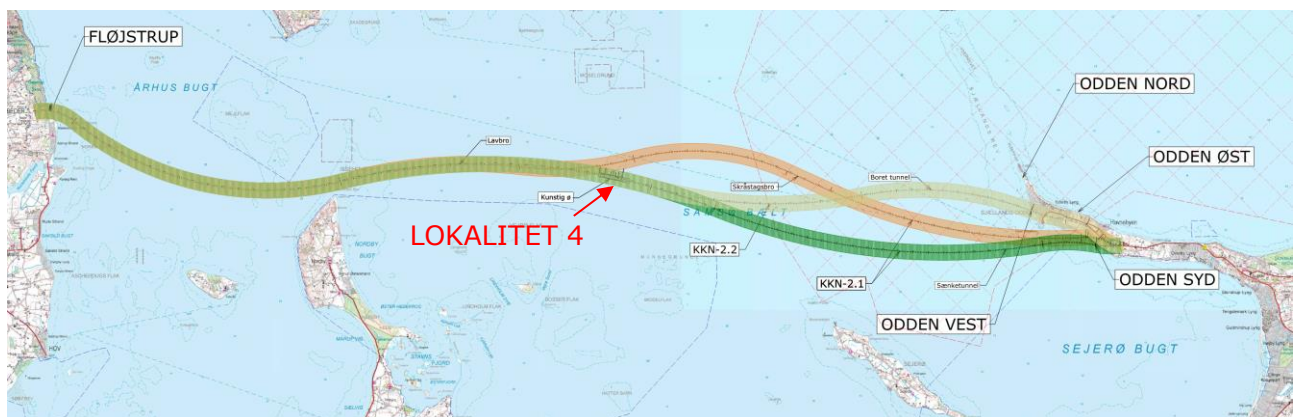
I det efterfølgende er alle koter og vandstande refereret til DVR90, medmindre andet er angivet.



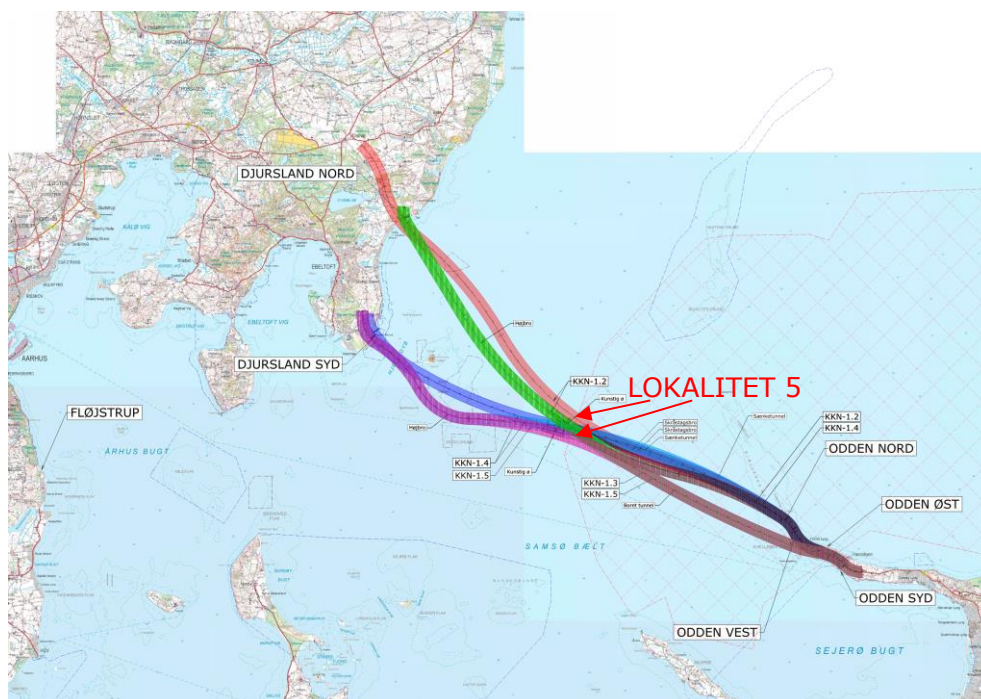
Figur 4-1 Oversigt over Lokaltet 1 og 2 for mulige kunstige øer, samt linjeføringer for tilhørende korridorerne.



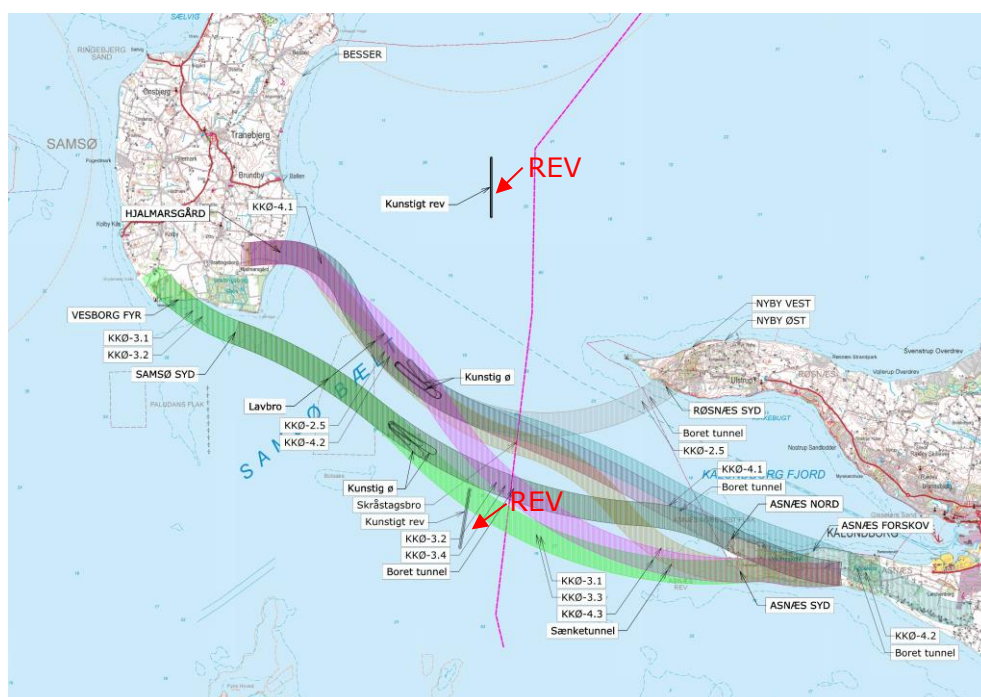
Figur 4-2 Oversigt over Lokaltet 3 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorerne.



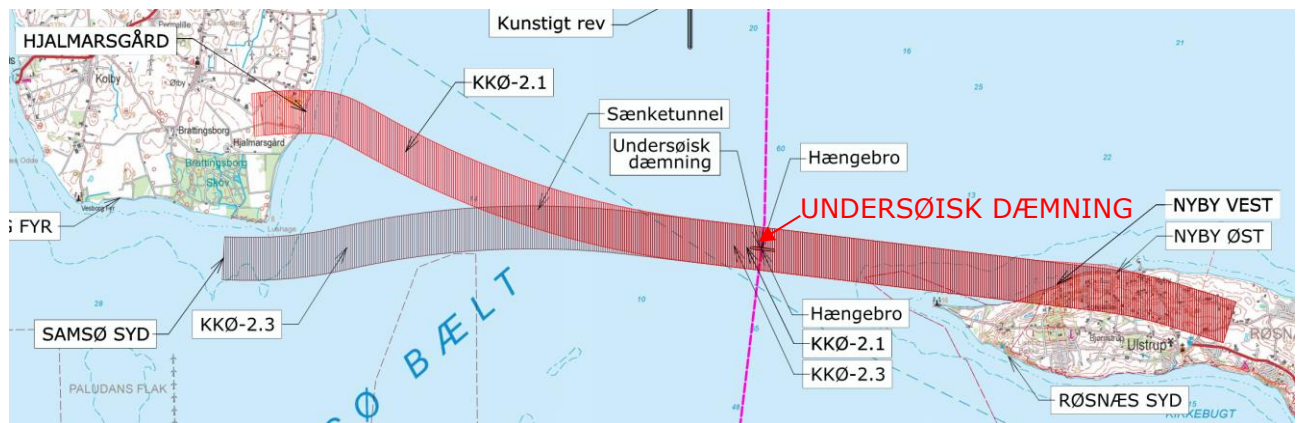
Figur 4-3 Oversigt over Lokaltet 4 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorerne.



Figur 4-4 Oversigt over Lokaltet 5 for mulig kunstig ø, samt linjeføringer for tilhørende korridorene.



Figur 4-5 Oversigt over lokaliteter med kunstige rev.



Figur 4-6 Oversigt over lokalitet med undersøisk dæmning.

4.1 Vind

Det for forbindelse relevante område er Kattegat mellem Vestsjælland og Jylland syd for Aarhus samt kysten ved Djursland. Der er ikke lavet detaljerede vindstatistikker, da bølger beregnet med numerisk metode (hindcast) ud fra vinddata, vil være under stærk påvirkning af land i disse områder. Vindmålinger fra stationer vil kun være gældende i et mindre området ved stationen, da målingerne også er påvirkede af land. Designvinden estimeres på baggrund af foreløbige vurderinger af vind ved ekstreme storme, dvs. storme med kraftigere vind end orkanstyrke (der er defineret som vind over 32 m/s). Designvindene vil dermed have en **gentagelsesperiode på 1.000 år** eller mere, og vil danne grundlag for en vurdering af tilhørende genererede bølger.

I mange retninger fra de påtænkte placeringer af de marine konstruktioner (kunstige øer mv.), vil vinden over havet i de indre danske farvande også være påvirket af nærheden til land. Der regnes derfor med **en designvind på ca. 35 m/s for alle retninger, dog med undtagelse af retningerne fra NØ til S, hvor der regnes med 30 m/s.**

4.2 Bølger

Bølgerne ved de 5 aktuelle lokaliteter for potentielle kunstige øer samt de 5 ilandføringslokaliteter bliver estimeret på baggrund af en simpel "bølge-hindcast", dvs. ud fra antagelsen om et fast frit stræk i vindens retning, konstant vanddybde og konstant vindhastighed. Bølgerne skal derfor ses som værende overslagsmæssige og de skal verificeres ved numerisk modellering i en senere fase af projektet. Det i vurderingen anvendte frie stræk er vurderet på baggrund af det fulde frie stræk uden eventuelle mindre øer mv., samt den faktiske tilstedeværelse af eventuelle små øer, flak, rev og andre lavvandede områder, hvor der sker stor dissipation af energien i bølgen. Dvs. det anvendte frie stræk er en skønsmæssig vurdering ud fra søkort. Vanddybden er vurderet på en gennemsnitlig betragtning langs det anvendte frie stræk. Der benyttes en varighed af vinden på 6 timer, hvilket svarer til fuldt udviklet sø i disse områder.

I det følgende beskrives de frie stræk og bølger ved de forskellige lokaliteter for ekstreme storme med en **gentagelsesperiode på 1.000 år** eller mere. Bølger ved de to rev til skibsstødsbeskyttelse (skibsstødsrev) er sammenlignelige med bølgerne på Lokalitet 1 og 2. Den undersøiske dæmning er placeret på 55 m vanddybde og bølger er derfor ikke relevant for design for denne.

For Lokalitet 1 og 2 (øer mellem Samsø og Asnæs) varierer det frie stræk mellem 5 og 35 km, med det korteste stræk mod NV og de længste mod SØ og NØ. Vanddybden er overvejende 20 m langs de frie stræk, med 15 m mod V og SV. Designbølgeforhold for Lokalitet 1 og 2 fremgår af Tabel 4-1.

For Lokalitet 3 (ø syd for Thunø) varierer det frie stræk fra 2 km mod N, 10 km mod Ø og V og 15 km mod S. Vanddybden varierer gennemsnitlig mellem 8 m og 20 m langs de frie stræk. Designbølgeforhold for Lokalitet 3 fremgår af Tabel 4-2.

For Lokalitet 4 og 5 (øer mellem Sjællands Odde og Aarhus hhv. Djursland) varierer det frie stræk fra ca. 100 km mod N og NØ og 15-35 km for de resterende retninger. Vanddybden er primært i omegnen af 20 m og 15 m og for Lokalitet 4 ned til 10 m for N og S. Designbølgeforhold for Lokalitet 4 og 5 fremgår af henholdsvis Tabel 4-3 og Tabel 4-4.

Sammenligner man de forskellige ø-lokaliteter er området syd for Thunø (Lokalitet 3) klart mindst udsat, med en designbølgehøjde på ca. $H_s=3,4$ m, mens der for Lokalitet 1 og 2 mellem Samsø og Asnæs er tale om $H_s=5,2$ m. Hvis traceen er længere oppe i Kattegat mellem Sj. Odde og Aarhus eller Djursland (Lokalitet 4 og 5) er der et langt frit stræk mod N og NØ helt til Sverige, og designbølgehøjden vurderes til ca. $H_s=5,8$ m hhv. $H_s=6,6$ m.

Der vil være en del usikkerhed om designbølgerne, da der er usikkerhed om detaljer af vindfeltet og vindhastigheden og varighed for de mest ekstreme storme, der skal til for at genere de ekstreme bølgeforhold. Derfor, vil det efterfølgende foreløbige design af perimeterkonstruktionerne blive foretaget konservativt med ekstra sikkerhed indbygget mod uacceptabel beskadigelse/dæmningsbrud. I en senere fase vil disse designbølger skulle verificeres ved numerisk modellering, som nævnt tidligere, hvilket vil reducere denne usikkerhed/konservatisme.

Designbølgeforhold ved 5 udvalgte ilandføringslokaliteter (Nyby ved Røsnæs, Asnæs, Vesborg Fyr, Hjalmarsgård, og Onsbjerg) er desuden bestemt på tilsvarende måde som designbølgerne (**~1.000 år gentagelsesperiode**) for de kunstige øer beskrevet ovenfor. Disse er vist i Tabel 4-5 til Tabel 4-9.

Tabel 4-1 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for Lokalitet 1 og 2, baseret på frit stræks beregninger.

Designbølgeforhold for Lokalitet 1 og 2 (øer mellem Samsø og Asnæs)					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed og bølger	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				H _s (m) /Tp (s)	H _s (m) /Tp (s)
N	6	20	15	-	4,0/6,1
NØ	6	20	35	4,7/7,6	-
Ø	6	20	15	3,3/5,8	-
SØ	6	20	35	4,7/7,6	-
S	6	20	25	4,1/6,8	-
SV	6	20	30	-	5,2/7,7
V	6	15	30	-	4,7/7,7
NV	6	15	5	-	2,3/4,3

Tabel 4-2 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for Lokalitet 3, baseret på frit stræks beregninger.

Designbølgeforhold for Lokalitet 3 (ø syd for Thunø)					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed og bølger	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				H _s (m) /Tp (s)	H _s (m) /Tp (s)
N	6	10	2	-	1,5/3,1
NØ	6	10	2	1,2/2,9	-
Ø	6	20	10	2,7/5,0	-
SØ	6	20	10	2,7/5,0	-
S	6	20	15	2,7/5,0	-
SV	6	10	15	-	3,4/6,1
V	6	10	10	-	3,1/5,4
NV	6	8	10	-	2,9/5,4

Tabel 4-3 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for Lokalitet 4, baseret på frit stræks beregninger.

Designbølgeforhold for Lokalitet 4 (ø mellem Sj. Odde og Aarhus)					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	10	35	-	3,8/7,9
NØ	6	20	110	5,8/10,6	-
Ø	6	20	25	4,1/6,8	-
SØ	6	20	35	4,7/7,6	-
S	6	10	25	3,3/6,7	-
SV	6	15	15	-	3,8/6,1
V	6	20	25	-	4,9/7,3
NV	6	20	25	-	4,9/7,3

Tabel 4-4 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for Lokalitet 5, baseret på frit stræks beregninger.

Designbølgeforhold for Lokalitet 5 (ø mellem Sj. Odde og Djursland)					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	15	100	-	5,1/10,6
NØ	6	25	100	6,6/10,5	-
Ø	6	20	15	3,3/5,8	-
SØ	6	20	35	4,7/7,6	-
S	6	20	25	4,1/6,8	-
SV	6	20	20	-	4,5/6,7
V	6	20	35	-	5,5/8,1
NV	6	20	20	-	4,5/6,7

Tabel 4-5 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for ilandføringen ved Nyby v. Røsnæs, baseret på frit stræk beregninger. Bølgehøjden svarer til den mindste værdi af frit stræk beregningen og $0,5 \cdot h$, hvor $h = 10$ m er den forudsatte vanddybde ved ilandføringen.

Designbølgeforhold ved ilandføringen ved Nyby v. Røsnæs					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	20	120	-	5,1 / 9,4
NØ	6	15	20	3,6 / 6,3	-
Ø	6	5	10	2,0 / 5,0	-
SØ	6	-	-	-	-
S	6	-	-	-	-
SV	6	-	-	-	-
V	6	12,5	35	-	4,0 / 6,7
NV	6	20	20	-	4,5 / 6,7

Tabel 4-6 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for ilandføringen ved Asnæs, baseret på frit stræk beregninger. Bølgehøjden svarer til den mindste værdi af frit stræk beregningen og $0,5 \cdot h$, hvor $h = 5$ m er den forudsatte vanddybde ved ilandføringen.

Designbølgeforhold ved ilandføringen ved Asnæs					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	-	-	-	-
NØ	6	-	-	-	-
Ø	6	-	-	-	-
SØ	6	10	17,5	2,8 / 5,7	-
S	6	15	75	2,5 / 7,9	-
SV	6	15	20	-	2,8 / 6,7
V	6	20	70	-	2,9 / 10,0
NV	6	15	20	-	3,2 / 6,6

Tabel 4-7 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for ilandføringen ved Onsbjerg, baseret på frit stræk beregninger. Bølgehøjden svarer til den mindste værdi af frit stræk beregningen og $0,5 \cdot h$, hvor $h = 5$ m er den forudsatte vanddybde ved ilandføringen.

Designbølgeforhold ved ilandføringen ved Onsbjerg					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	20	20	-	3,4 / 6,7
NØ	6	5	5	1,7 / 4,0	-
Ø	6	-	-	-	-
SØ	6	-	-	-	-
S	6	-	-	-	-
SV	6	15	30	-	2,8 / 7,7
V	6	10	17,5	-	2,9 / 6,4
NV	6	20	10	-	3,3 / 5,4

Tabel 4-8 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~1.000 år) for ilandføringen ved Vesborg Fyr, baseret på frit stræk beregninger. Bølgehøjden svarer til den mindste værdi af frit stræk beregningen og $0,5 \cdot h$, hvor $h = 5$ m er den forudsatte vanddybde ved ilandføringen.

Designbølgeforhold ved ilandføringen ved Vesborg Fyr					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	-	-	-	-
NØ	6	-	-	-	-
Ø	6	15	17,5	3,0 / 6,0	-
SØ	6	15	40	2,8 / 7,9	-
S	6	17,5	25	2,5 / 6,8	-
SV	6	20	20	-	2,8 / 6,7
V	6	10	15	-	2,9 / 6,1
NV	6	-	-	-	-

Tabel 4-9 Designbølgeforhold (gentagelsesperiode: ~ 1.000 år) for ilandføringen ved Hjalmarsgård, baseret på frit stræk beregninger. Bølgehøjden svarer til den mindste værdi af frit stræk beregningen og $0,5 \cdot h$, hvor $h = 10$ m er den forudsatte vanddybde ved ilandføringen.

Designbølgeforhold ved ilandføringen ved Hjalmarsgård					
Retning	Varighed	Dybde	Frit stræk	Vindhastighed	
	(t)	(m)	(km)	30 m/s	35 m/s
				Hs (m) /Tp (s)	Hs (m) /Tp (s)
N	6	10	7,5	-	2,7 / 4,9
NØ	6	10	100	3,4 / 9,2	-
Ø	6	17,5	40	4,1 / 7,2	-
SØ	6	10	40	3,4 / 7,1	-
S	6	20	20	3,8 / 6,3	-
SV	6	-	-	-	-
V	6	-	-	-	-
NV	6	-	-	-	-

4.3 Nuværende vandstandsforhold

4.3.1 Generelt

Der er tale om øer beliggende ude i Kattegat og langt fra land. De er derfor udsat for bølgepåvirkning for alle vindretninger. Grundet det frie stræk i forskellige retninger, designvindhastigheder for de forskellige vindretninger, og det faktum at den samtidige designvandstand er meget forskellig afhængig af typen af storm og vindretningen, er det komplekst at bestemme en designvandstand for de marine konstruktioner. Det er derfor vigtigt for alle retninger at vurdere samhørende værdier af designvind, -bølger og -vandstand.

Udover bølgeforholdene er den aktuelle vandstand der forekommer samtidigt med de ekstreme designstorme af stor betydning for påvirkningen af ø-konstruktionerne, og vandstanden vil derfor blive behandlet i detaljer i det følgende.

4.3.2 Kystdirektoratets højvandsstatistik fra 2017

Kystdirektoratet (KDI) beregner løbende statistikker for vandstanden for en lang række lokaliteter langs de danske kyster. Disse er oftest baseret på data for de sidste 30 til 40 år. De omhandler derfor ikke ældre historiske ekstreme storme; og det kan i visse tilfælde være af betydning. Kystdirektoratets højvandsstatistikker forholder sig udelukkende til analyse af historiske hændelser, som er

blevet korrigeret for historiske vandspejlsstigninger frem til 2019 og isostatiske landbevægelser (hævninger/sænkninger).

Der er fire stationer af interesse for projektet, nemlig: Grenå, Aarhus, Ballen Havn (Samsø) og Havnebyen/Sjællands Odde. Højvandsstatistikker for disse stationer er vist på Figur 4-7 til Figur 4-10.

Grenå Havn

33
Datablad

Hændelse [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	160	167	171

Stationsnummer: DMI 22121
Måleperiode: 01.01.1976 - 01.03.2017
Datalængden: 39,7 år

Datagrundlag for ekstremanalyse

Afskæringsniveau [cm]: 116
Detrending faktor ift. middelvandstand i 2017 [cm]: 4,32

Bemærkninger

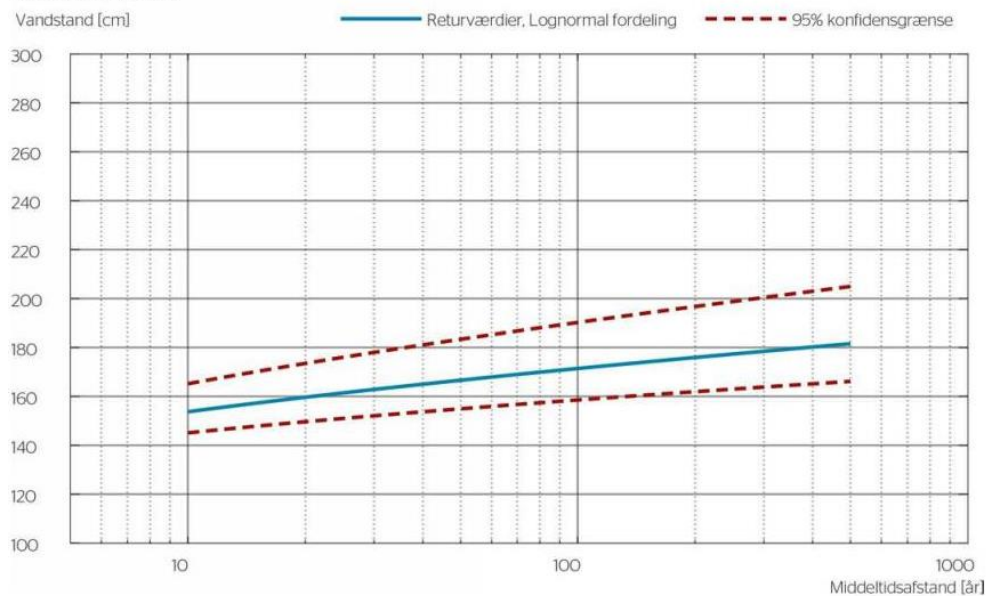
Manglende data: 29.09.1992 til 08.03.1993, 27.05.2001 til 19.01.2002 samt mindre huller.

Modelparametre

Lognormal fordeling, μ : 4,874 σ : 0,106



Middeltidshændelser



Højeste registrerede vandstande [cm] i DVR90

6. november 1985	170	2. marts 2008	151	12. januar 2007	140	30. november 2015	127
10. januar 1995	168	1. november 2006	147	26. februar 2016	135	10. januar 2015	126
6. december 2013	165	27. februar 1990	146	2. april 2016	133	9. januar 2005	124
14. februar 1989	161	10. december 2011	142	27. december 2016	130	4. december 1999	124
25. november 1981	156	9. november 2007	142	11. april 2016	129	30. januar 2000	123

Figur 4-7 Højvandsstatistik fra 2017 for Grenå Havn fra Kystdirektoratet, ref. [3]. Vandstande er angivet i DVR90, men er korigeret for havspejlsstigninger og landhævninger fra år 1990 og frem til 2019.

34

Datablad

Aarhus Havn

Hændelse [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	150	158	163

Stationsnummer: DMI 22331
Måleperiode: 01.01.1888 - 01.01.2017
Datalængden: 128,3 år

Datagrundlag for ekstremanalyse

Afskæringsniveau [cm]: 119
Detrending faktor ift. middelvandstand i 2017 [cm]: 4,86

Bemærkninger

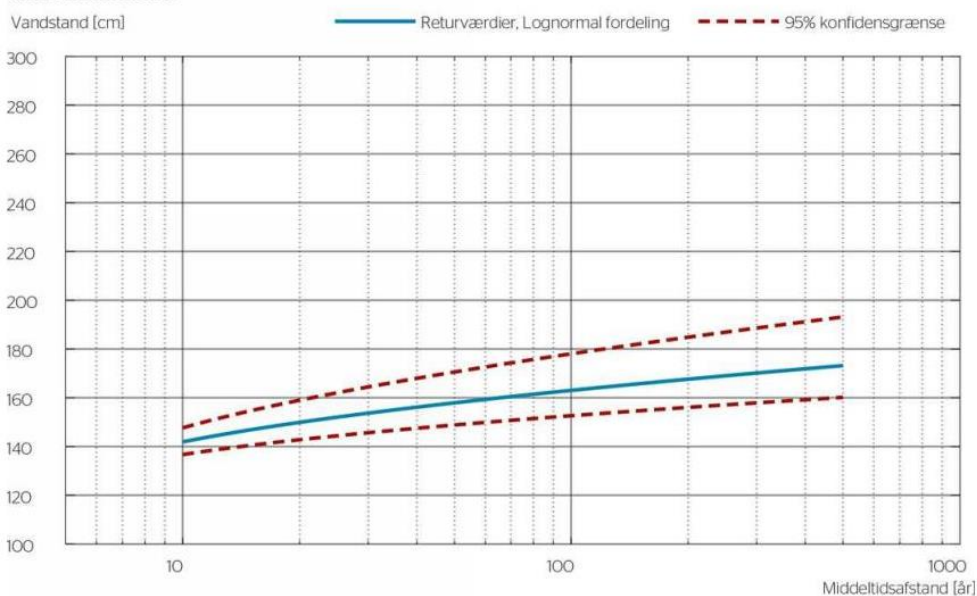
Ingen

Modelparametre

Lognormal fordeling, μ : 4,902 σ : 0,094



Middeltidshændelser



Højeste registrerede vandstande [cm] i DVR90

1. november 2006	163	14. januar 1955	148	20. november 1973	135	03. februar 1898	128
7. november 1985	162	31. december 1921	143	4. december 1999	133	18. december 1921	128
2. marts 2008	157	12. januar 2007	142	30. januar 2000	131	27. februar 1990	128
22. december 1954	153	9. november 2007	141	10. december 2011	130	21. februar 1993	127
15. februar 1989	153	02. oktober 1890	140	22. januar 1956	129	19. januar 2007	127

Figur 4-8 Højvandsstatistik fra 2017 for Aarhus Havn fra Kystdirektoratet, ref. [3]. Vandstande er angivet i DVR90, men er korigeret for havspejlsstigninger og landhævninger fra år 1990 og frem til 2019.

Ballen Havn

45
Datablad

Hændelse [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	154	161	165

Stationsnummer: DMI 27084
Måleperiode: 15.01.1991 - 01.03.2017
Datalængden: 24,4 år

Datagrundlag for ekstremanalyse

Afskæringsniveau [cm]: 115
Detrending faktor ift. middelvandstand i 2017 [cm]: 5,13

Bemærkninger

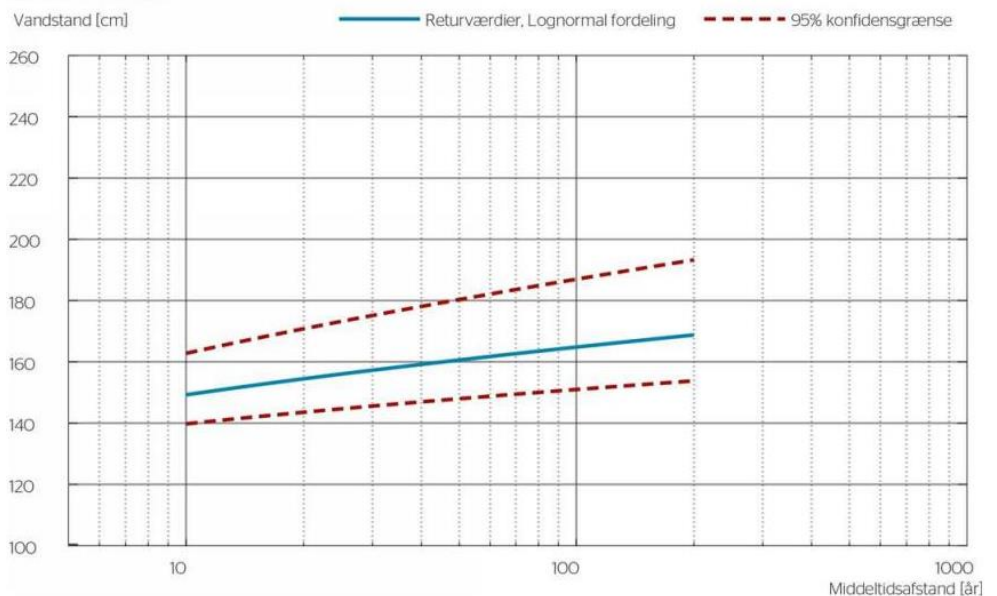
Ingen.

Modelparametre

Lognormal fordeling, μ : 4,845 σ : 0,098



Middeltidshændelser



Højeste registrerede vandstande [cm] i DVR90

1. november 2006	170	30. januar 2000	124	14. marts 1992	120	22. oktober 2014	115
9. november 2007	143	30. oktober 1996	124	29. oktober 2014	119	28. september 1995	115
2. marts 2008	139	10. december 2011	122	25. januar 2015	118	20. december 1993	114
11. januar 1995	136	12. januar 2007	122	26. november 2007	117	13. februar 2005	114
3. november 1995	132	27. december 2016	121	19. januar 2007	116	6. januar 2012	112

Figur 4-9 Højvandsstatistik fra 2017 for Ballen Havn fra Kystdirektoratet, ref. [3]. Vandstande er angivet i DVR90, men er korigeret for havspejlsstigninger og landhævninger fra år 1990 og frem til 2019.

Havnebyen/ Sjællands Odde

53
Datablad

Hændelse [år]	20	50	100
Vandstand [cm]	151	161	168

Stationsnummer: DMI 29002
Måleperiode: 09.12.1991 - 01.03.2017
Datalængden: 23,5 år

Datagrundlag for ekstremanalyse

Afskæringsniveau [cm]: 97
Detrending faktor ift. middelvandstand i 2017 [cm]: 4,86

Bemærkninger

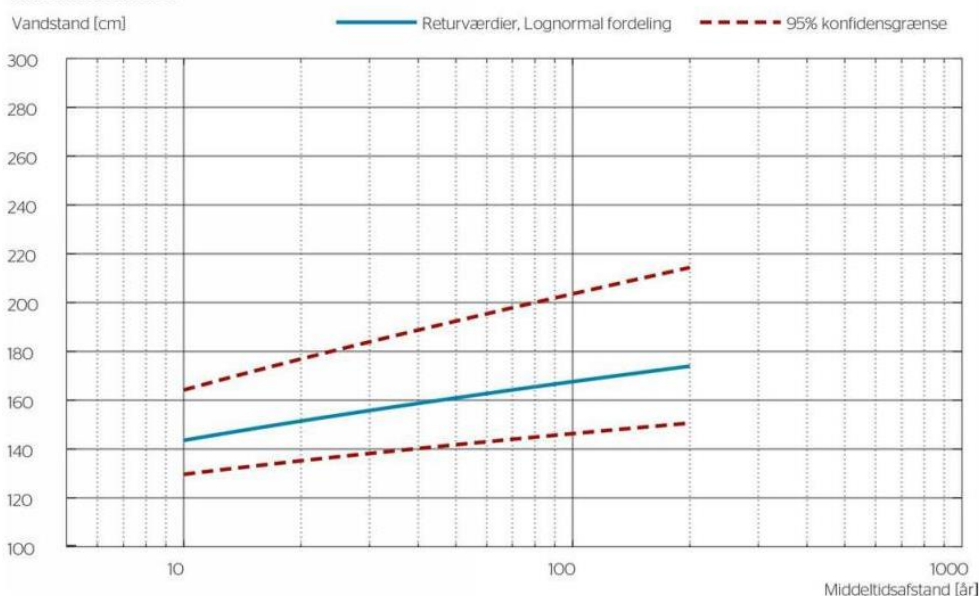
Manglende data: 05.08.2003 til 25.03.2004 samt 2,5 måneds udfald 2013 til 2017.

Modelparametre

Lognormal fordeling, μ : 4,731 σ : 0,154



Middeltidshændelser



Højeste registrerede vandstande [cm] i DVR90

6. december 2013	163	10. december 2011	132	30. oktober 1996	111	28. september 1995	104
27. december 2016	152	11. januar 1995	130	26. november 2007	111	3. januar 2015	104
1. november 2006	143	30. januar 2000	125	11. januar 2015	111	25. december 2016	104
9. november 2007	135	26. januar 2016	116	12. januar 2007	110	19. januar 2007	103
2. marts 2008	134	27. november 2011	113	21. februar 1993	104	30. november 2015	103

Figur 4-10 Højvandsstatistik fra 2017 for Havnebyen/Sjællands Odde fra Kystdirektoratet, ref. [3]. Vandstande er angivet i DVR90, men er korregeret for havspejlsstigninger og landhævninger fra år 1990 og frem til 2019.

De ovenfor viste vandstandsstatistikker er meget sammenlignelige, og der er ikke megen forskel på dekadehældningen for de fire stationer, se Tabel 4-10.

Tabel 4-10 50, 100 og 500 års vandstande på udvalgte lokaliteter plus dekadestigning (fra 50 til 500 år), efter KDI vandstandsstatistikker 2017, ref. [3].

Sted	R ¹⁾ =50 år	R=100 år	R=500 år	Stigning
	(m)	(m)	(m)	1 dekade (m)
Grenå	+1,67	+1,71	+1,81	+0,14
Aarhus	+1,58	+1,63	+1,75	+0,17
Ballen	+1,61	+1,65	+1,75	+0,14
Havnebyen/Sj. Odde	+1,61	+1,68	+1,83	+0,22

¹⁾ R: returperiode

Det noteres, at man kan antage at 100 års vandstanden i området er ca. +1,7 m og at man kan antage en dekade-hældning på ca. +0,20 m. Under antagelse af at vandstanden er eksponentielt fordelt, fås en vandstand for returperiode R=10.000 år ved at tillægge 2 gange dekadehældningen til 100 års vandstanden. Herved fås overslagsmæssigt at en 10.000 års vandstand (år 2019) kan estimeres til ca. $1,7 + 2 \cdot 0,2 = \mathbf{+2,1\ m}$.

4.3.3 COWIs højvandsstatistik

I COWIs rapport for Realdania om byernes udfordringer med havvandsstigning og stormflod fra 2017, ref. [4], har COWI fremskrevet en højvandsstatistik for Aarhus. Udgangspunktet er data fra KDI og statistisk behandling samt klimafremskrivning fra CRES¹ (som er anvendt i København men korrigeret for forskellig landhævning på de forskellige lokaliteter). Disse værdier er gengivet i Tabel 4-11. Heraf ses, at en 100 års stormhændelse i år 2015 giver en vandstand på +1,7 m og at en 10.000 års stormhændelse vil give en vandstand på +2,0 m. +2,0 m svarer til 1.000 års vandstanden fra 2015 tillagt +en dekadehældning på 0,15 m (100 og 1.000 år fra 2015). Det noteres at en 10.000 års vandstand estimeret på baggrund af Kystdirektoratets højvandsstatistikker og COWIs Realdania rapport giver henholdsvis +2,1 m og +2,0 m, hvilket er en acceptabel forskel for en vurdering af en hændelse med en returperiode på 10.000 år.

¹ CRES: "Centre for Regional Change in the Earth System" under dansk Klimacenter ved DMI.

Tabel 4-11 Fremtidige stormflodshændelser i Aarhus korrigeret for fremtidige havspejlsstigninger, ref. [4]. Værdierne er i m relativ til DVR90.

By	Hændelse (returperiode)	2015	2065	2090	2120
Aarhus	10 år	1,45	1,80	2,01	2,35
	20 år	1,55	1,90	2,11	2,44
	50 år	1,64	1,99	2,20	2,53
	100 år	1,70	2,05	2,26	2,59
	250 år	1,76	2,11	2,32	2,65
	500 år	1,81	2,16	2,37	2,70
	1.000 år	1,85	2,20	2,41	2,74
	2.000 år	1,89	2,24	2,45	2,78

4.3.4 Ekstreme vandstande

Det astronomiske tidevand er meget begrænset i de indre danske farvande. De største variationer i vandstanden skyldes vejret, herunder vinden og det barometriske tryk. De største højvande skyldes således vindstuvning og lavtryk. Middeltrykket er 1013 mbar (svarende til ca. 10 m vandsøjle). Så et lavtryk på f.eks. 963 mbar forårsager 0,50 m højvande.

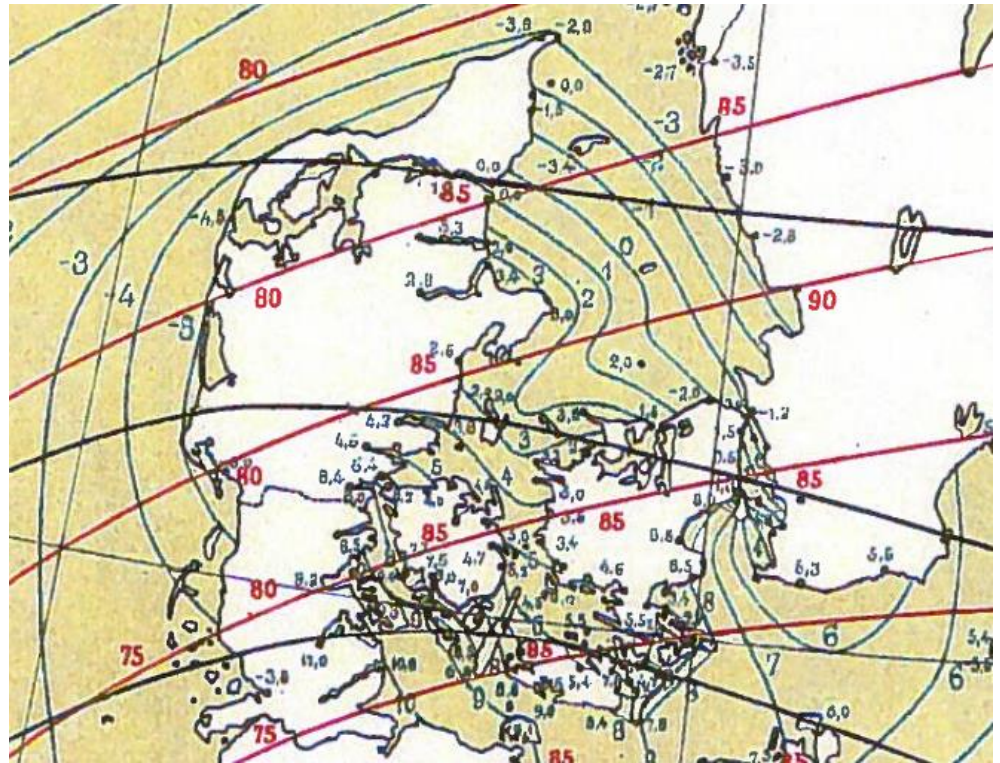
De største højvande i projektområderne skyldes storm/orkan fra NV til NNØ-lige retninger. Gode eksempler er stormen Bodil d. 6/12 2013 og stormene d. 14/10 1921 og d. 1/1 1922.

Den 24/10 1921 med vind på B11 (~28,5-32,6 m/s, dvs. ca. 30 m/s), målt en vandstand på +1,73 m i Hou på Samsø. Hvilket ca. kan betragtes som en 100 års storm med hensyn til vandstanden.

Den 1/1 1922 målt henholdsvis +1,52 m i Juelsminde og +1,67 m i Kolby Kaas på sydspidsen af Samsø. Vejr og vandstandssituationen er vist på Figur 4-12. Denne storm kan således ca. betragtes som en 100 års storm med hensyn til vandstanden, mens stormen, Bodil d. 6/12 2013 kan vurderes som lidt værre ud fra bl.a. vandstandsobservationer på Nordsjællands kyst og i Roskilde mm. Så vidt det kan vurderes er de to storme meget sammenlignelige med hensyn til den meteorologiske situation over hele Danmark. Der findes desværre, så vidt vides ikke tilsvarende kort som Figur 4-12, for de mest ekstreme storme som Bodil og andre ekstreme hændelser der er medtaget til udarbejdelse af KDIs vandstandsstatistikker.

Til sammenligning opgiver kystdirektoratet, ref. [3], at 100 års vandstand er følgende: Kalundborg +1,58 m, Juelsminde +1,62 m og Ballen Havn (Samsø) +1,65 m.

En anden kendt ekstrem storm med tilhørende stormflod i Danmark er stormen fra øst i november 1872. Denne meget ekstreme storm gav anledning til ekstremt højvande i Østersøen og andre lokaliteter som Køge, og værst på Falster og Lolland. I projektområderne var vandstanden mindre og ca. +1 m til +1,2 m under samtidig vind fra Ø på 90 fod/s (ca. 27 m/s), se Figur 4-11.



Figur 4-11 Fra Coldings rapport, 1881, d. 13. november kl. 14.00, ref. [5].
Vandstand med blåt i fod, og vind med rødt i fod/s.

Det konkluderes derfor, at de største vandstande i projektområdet forekommer under storme fra NNV til NNØ-lige retninger. **En 100 års vandstandshændelse i dag i 2020 antages herefter at være +1,7m.**

4.3.5 Vandstandens afhængighed af vindretning

På grund af de kunstige øernes positioner er de i princippet udsat for bølger fra alle retninger. Men udover bølgerne er den aktuelle vindretning af stor betydning for vandstanden. Som nævnt ovenfor forekommer de største vandstande for vind fra nordlige retninger. Figur 4-12 viser som redegjort for en tidligere situation for nytårsstormen 1/1 1920, som ca. svarer til en 100 års storm med hensyn til vandstand. Hovedvindretningen er ca. NNV over hele Kattegat og i projektområdet.

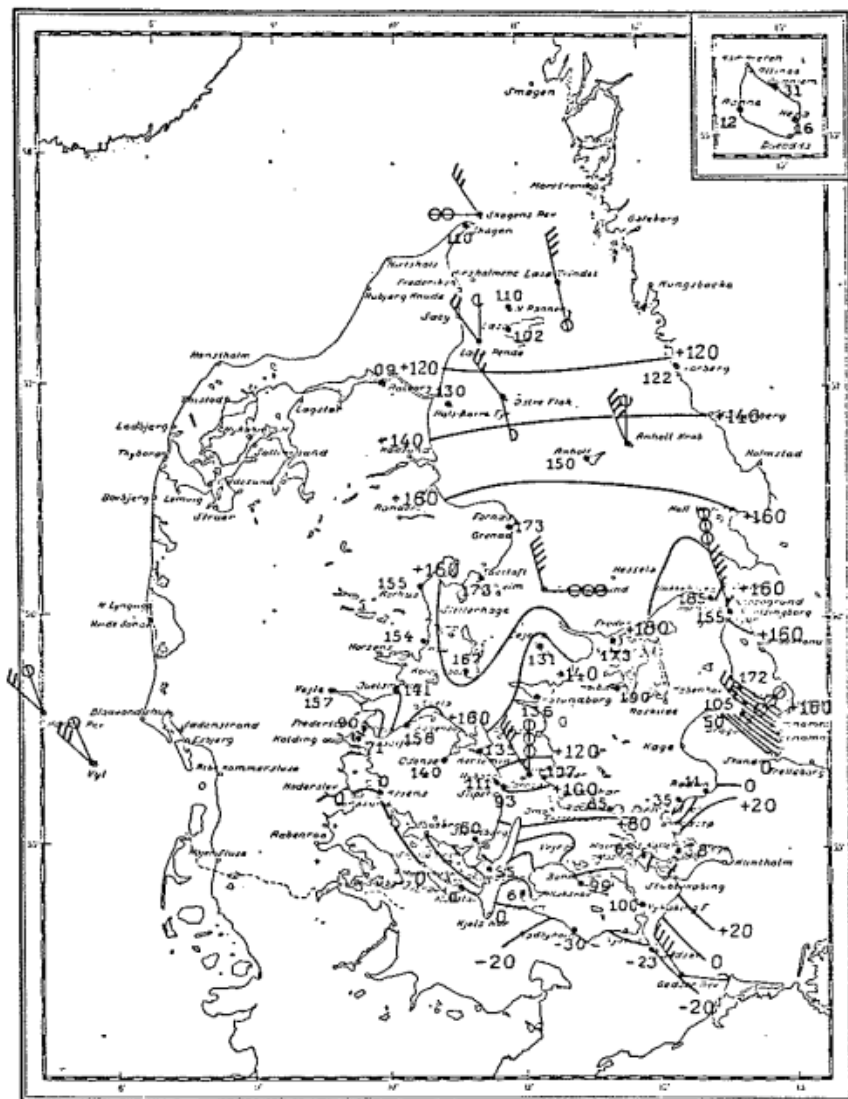


Fig. 8. Vind-, Strøm- og Vandstandsforhold Kl. 0
den 1. Jan. 1922.

Figur 4-12 Vejrsituationen d. 1. januar 1922 mod storm fra NNV og medførende et ca. 100 års højvande i projektområdet, ref. [6].

Tilsvarende vises på Figur 4-13 en ekstrem storm fra retning NNØ. Der er tale om stormen d. 24/10 1921. Vandstanden i projektområdet er her ca. + 1,6 m.

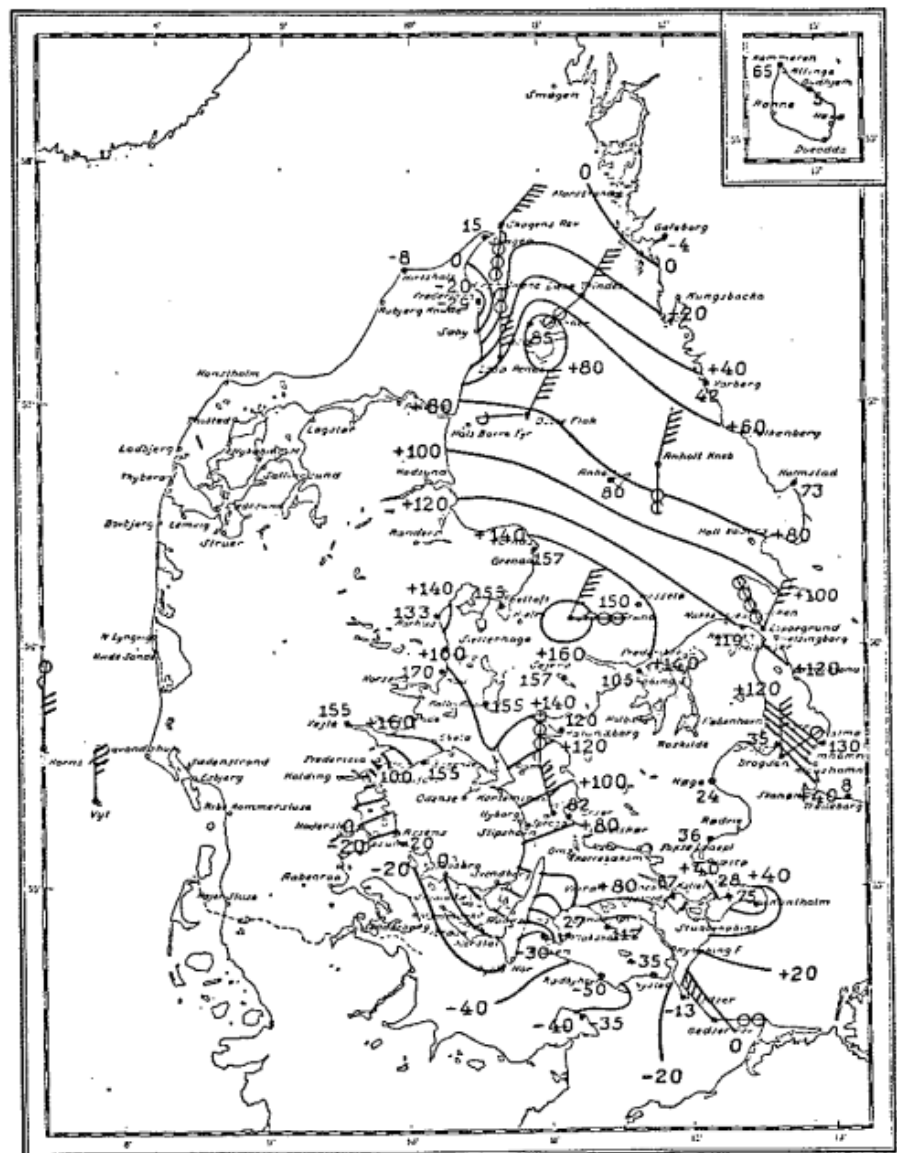


Fig. 6. Vind-, Strøm- og Vandstandsforhold Kl. 4 den 24. Okt. 1921.

Figur 4-13 Vejrsituationen d. 24. oktober 1921 med storm fra NNØ og også medførende et næsten ca. 100 års højvande i projektområdet, ref. [6].

Når vinden er mere vestlig, når vandstanden for den samme vindhastighed ikke helt den samme højde i projektområdet. Figur 4-14 viser en meget kraftig storm d. 16(1 1916, hvor vandstanden når ca. +0,9 til +1,0 m, ved vind fra NV.

Ved vind fra vest er der tale om en mindre stigning i vandstanden. Der regnes i det følgende med +0,75 m for en 100 års storm.

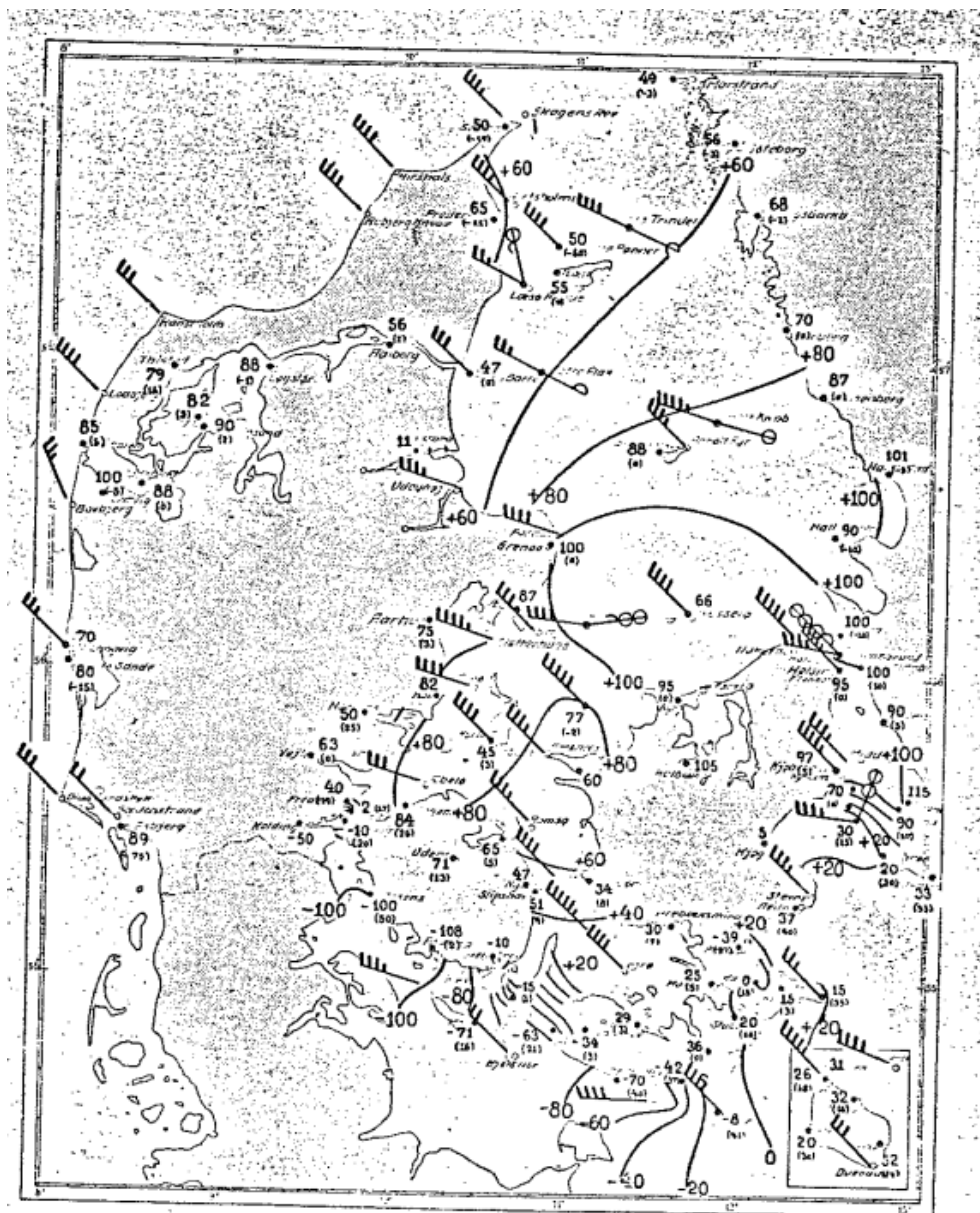


Fig. 25. Vind-, Strøm- og Vandstandsforhold den 16' Januar 1916 Kl. 8 Morgen.

Figur 4-14 Vejsituationen d. 16. januar 1916 mod storm fra NV, ref. [7]

Ved vind fra SV er der tale om en tendens til mindre stigning i vandstanden, se Figur 4-15. Der regnes med en 100 års vandstand i 2020 på +0,50 m.

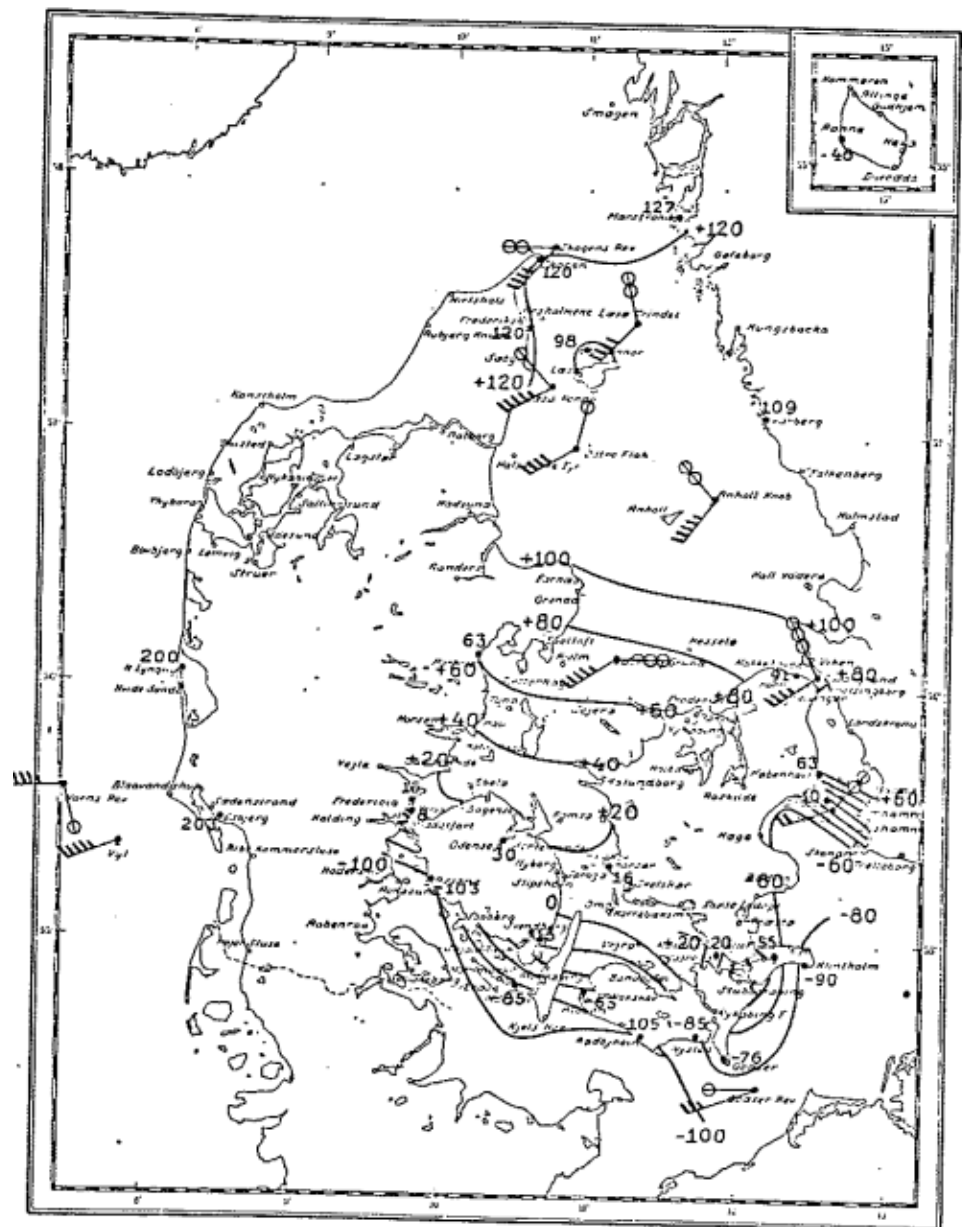


Fig. 5. Vind-, Strøm- og Vandstandsforhold Kl. 4
den 16. Nov. 1920.

Figur 4-15 Vejsituationen d. 16. november 1920 mod storm fra SV, ref. [6].

Ved vind fra syd er der tale om en tendens til lavvande. Der regnes i det følgende med en vandstand på 0,0 m. Ved vind fra sydøst er der tale om en tendens til begrænset højvande. Der regnes i det følgende med en vandstand på +0,50 m. Ved vind fra syd og sydøst er vurderingerne foretaget på baggrund af data fra ref. [6].

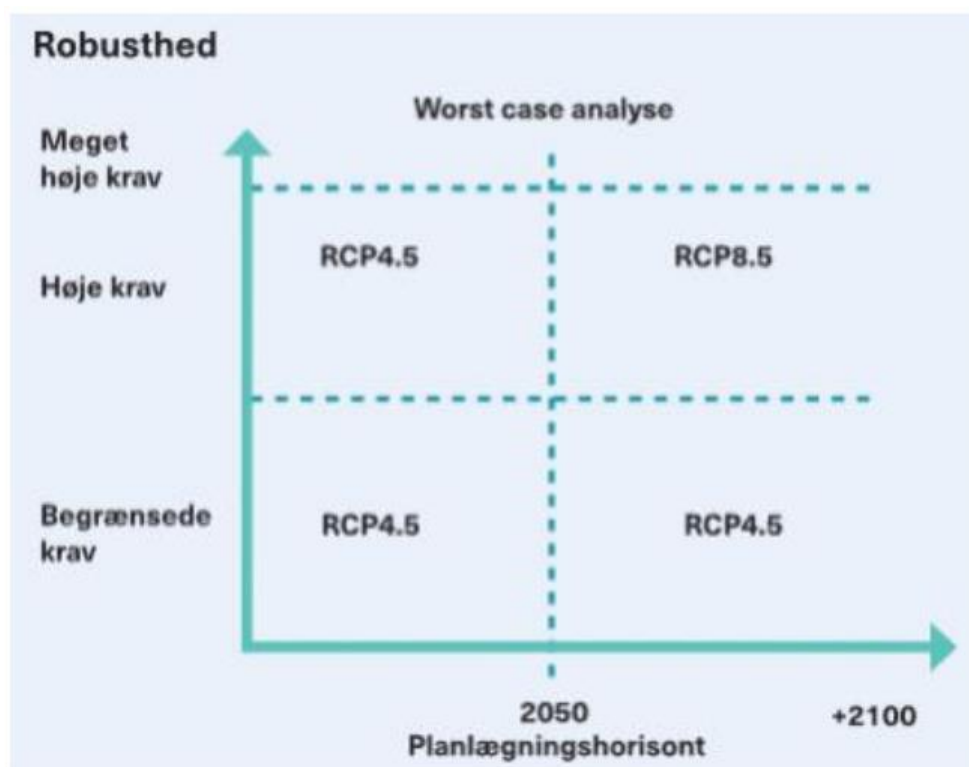
De ovennævnte belyst værdier og interpolationer derimellem er benyttet i det følgende til estimering af design vandstande, se afsnit 4.5.

4.4 Havspejlsstigning

4.4.1 Generel anbefaling

Ved fastlæggelse af dimensionsgivende vandstand, skal der tages højde for den forventede globale havspejlsstigning (Sea Level Rise, SLR) som følge af global opvarmning inden for projektets levetid.

Højvandstande skal ses i sammenhæng med den forventede globale havspejlsstigning. Ved generelt at vælge et meget konservativt estimat, risikerer man alt andet lige, at fordyre etablering af nye områder og infrastruktur unødigt. Ved anlæg af særligt sårbare, værdifulde eller risikobetonede byggeri og ved lange planlægningshorisonter, bør det dog overvejes at basere sig på mere konservative scenarier, som ligeledes er DMI's anbefalinger i ref. [8], se Figur 4-16. På grund af planlægningshorisont frem mod år 2150 og det meget risikobetonede byggeri, vælges det at benytte udledningsscenarioet RCP8.5 beskrevet nærmere i IPCC's 2019 rapport, ref. [9].

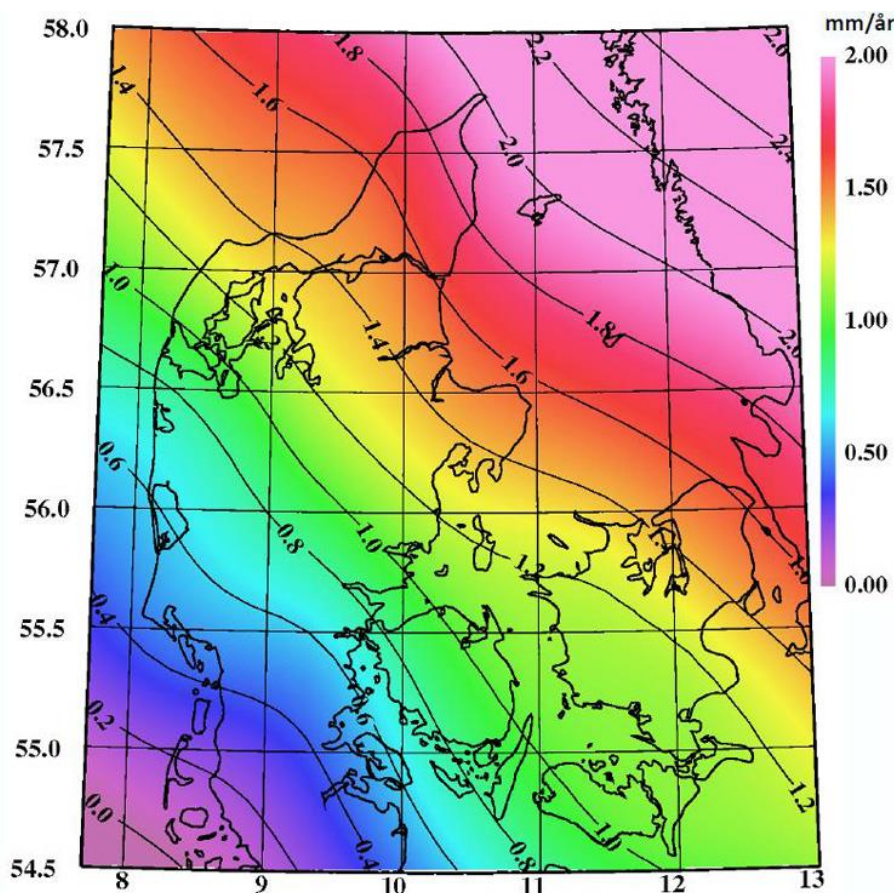


Figur 4-16 DMI's anbefalede scenarier afhængig af robusthed og planlægningshorisont, ref. [8].

4.4.2 Landhævning

Landhævningen (isostatisk landhævning) efter istiden foregår stadigvæk i hele Danmark. Denne skal fraregnes den fremtidige vandstandsstigning som følge af havspejlsstigninger.

Figur 4-17 viser at for projektområdet er der tale om ca. 1,2 mm per år eller 12 cm på 100 år. Tidligere var havspejlsstigningen i havet ca. af samme størrelsesorden som landhævningen, men det er ikke tilfældet mere.



Figur 4-17 Isostatisk landhævning i Danmark, ref. [10].

4.4.3 Havspejlsstigning

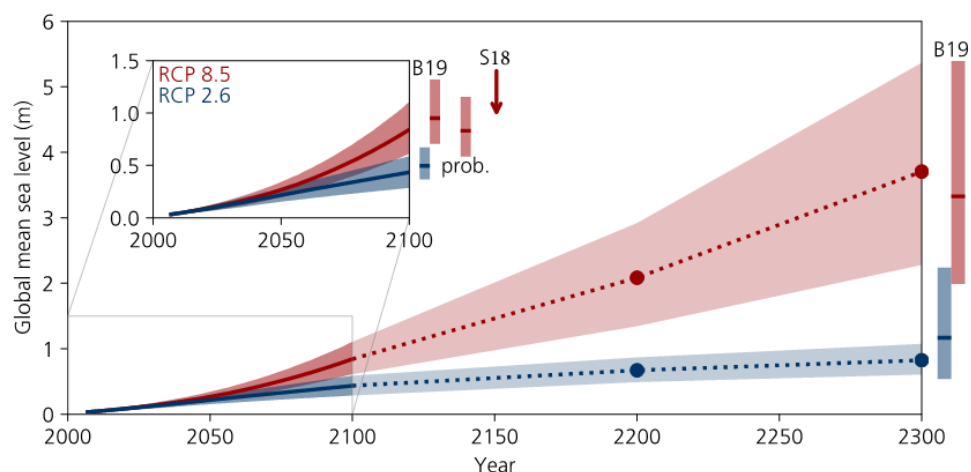
På baggrund af IPCC's seneste anbefalinger fra 2019, ref. [9], har DMI præsenteret deres anbefalinger for global havspejlsstigning i Danmark i et opdateret Klimaatlas udgivet i oktober 2019, ref. [11] og [12]. Anbefalingen er vist i Tabel 4-12. Det bemærkes at DMI's bedste estimat baseret på det sandsynlige scenarie RCP8.5 er i intervallet 19-108 cm med en centralværdi på 63 cm i 2071-2100.

Tabel 4-12 DMI's centralestimer og sandsynlige spænd for havspejlsstigninger, Tabel fra ref. [12].

Table 5: Absolute mean sea level for Denmark [cm]. The values with brackets denote best estimate and 10 to 90 percentile ranges, while the values for 2300 give the likely range.

	Present day 1981-2010	Mid century 2041-2070	End century 2071-2100	2300 likely range
RCP4.5		26 [7-45]	42 [10-74]	
RCP8.5	0	32 [8-57]	63 [19-108] 95-percentile 240	230 - 540

DMI's Klimaatlas, ref. [11], beskriver ikke nærmere om udviklingen af den globale havspejlsstigning efter år 2100. Med projektet, der regnes at have en levetid på 120 år og som antages udført i 2030 til 2040, er det en tidshorisont frem til år 2150, som der bør fokuseres på. Det er derfor besluttet at benytte resultater og fremskrivning af SLR fra IPCC's rapport fra 2019, ref. [9], i nærværende rapport. Resultaterne sammenholdes og vurderes med tidligere fremskrivninger behandlet af Danmarks Klimacenter.



Figur 4-18 Fremskrevet global havspejlsstigning frem til år 2300 jf. seneste IPCC-rapport, [9]. Havspejlsstigninger efter år 2100 er forbundet med høje usikkerheder. Emissionsscenarioer angivet for blå kurve: RCP2.6, rød kurve: RCP8.5. Reference niveau er 1985-2005 (1995).

På baggrund af Figur 4-18 er der aflæst centrale estimater for den globale havspejlsstigninger frem til år 2200 for udledningsscenarie RCP8.5. Disse fremgår af Tabel 4-13. For år 2150 er der aflæst et interval på 1 m til 2 m med en centralværdi på 1,5 m. Til vurderinger i denne foreløbige projektfase er det valgt at benytte en SLR på 1,5 m til design af dæmningskonstruktioner for øerne.

4.4.4 Havspejlsstigning i levetiden

Der benyttes i det følgende en relativ konservativ værdi for SLR (RCP8.5) for de valgte vurderede år, 2020, 2050, 2100, 2150 og 2200 fra IPCCs seneste rapport, [9]. De aflæste værdier af SLR svarer til centralestimatet for den globale havspejlsstigning.

Tabel 4-13 viser centrale estimater for havspejlsstigningen frem til år 2200. Der er regnet havspejlsstigninger fra år 1990 og frem til år 2020, 2050, 2100, 2150, 2200 og fortsat konstant landhævningsrate (1,2 mm/år), som giver en resulterende havspejlsstigning ift. m DVR90.

Tabel 4-13 Centrale estimater for havspejlsstigning (Sea Level Rise (SLR)) frem til år 2050, 2100, 2150, 2200, 2250 og 2300, jf. seneste IPCC rapport, [9].

År	SLR (m DVR90)	Landhævning (m)	Havspejlsstigning (m DVR90)
2020	0,1	0,04	0,06
2050	0,3	0,07	0,23
2100	0,9	0,13	0,77
2150	1,5	0,19	1,31~1,3
2200	2,1	0,25	1,85

Det er vigtigt at fremføre, at SLR vil foregå langsomt, og man vil være i stand til i god tid at tage hensyn til det, hvis det i praksis skulle vise sig, at stigningen bliver mindre eller større end forudsat. Det er vigtigt, at der skelnes mellem kystbeskyttelseskonstruktioner der kan udbygges etapevis og så konstruktioner, som det vil være overordentligt problematisk og kostbart, hvis man fra starten vælger en for lav kote. Perimeter/dige-konstruktionerne på øen kan eventuelt udføres, så man senere kan foretage en forhøjelse af kronekoten, hvis det tænkes ind allerede ved projekteringen. Dette bør undersøges nærmere i en senere fase af projektet.

4.5 Designvandstand

Designvandstanden vil, som forklaret ovenfor i afsnit 4.3.1, være ens på de forskellige lokaliteter (kunstige øer, skibsstødsrev, undersøisk dæmning og ilandføringspunkter). I Tabel 4-14 er angivet designvanden afhængig af vindretningen for projektet for de marine konstruktioner, der er baseret på en 10.000 års hændelse i år 2150. Vandstanden for en 100 års hændelse i 2020 er også angivet, således at ønskes en 100 års vandstandshændelse i år 2150 kan denne også udledes af tabellen.

Tabel 4-14 Designvandstande.

Vindretning	Vandstand (2020)	Vandstand (2020)	SLR (2150)	Vandstand + SLR (2150)
	R=100 år (m)	R=10.000 år, design (m)	(m)	design (m)
N	1,7	2,1	1,3	3,4
NØ	1,6	2,00	1,3	3,3
Ø	1,0	1,40	1,3	2,7
SØ	0,5	0,90	1,3	2,2
S	0,0	0,40	1,3	1,7
SV	0,6	1,00	1,3	2,3
V	0,75	1,15	1,3	2,5
NV	1,5	1,90	1,3	3,2

4.6 Strømforhold

I den nuværende fase af projektet foreligger ikke detaljeret information om strømforhold i projektområdet. Der vil derfor være behov for nærmere analyser af dette i en senere fase af projektet.

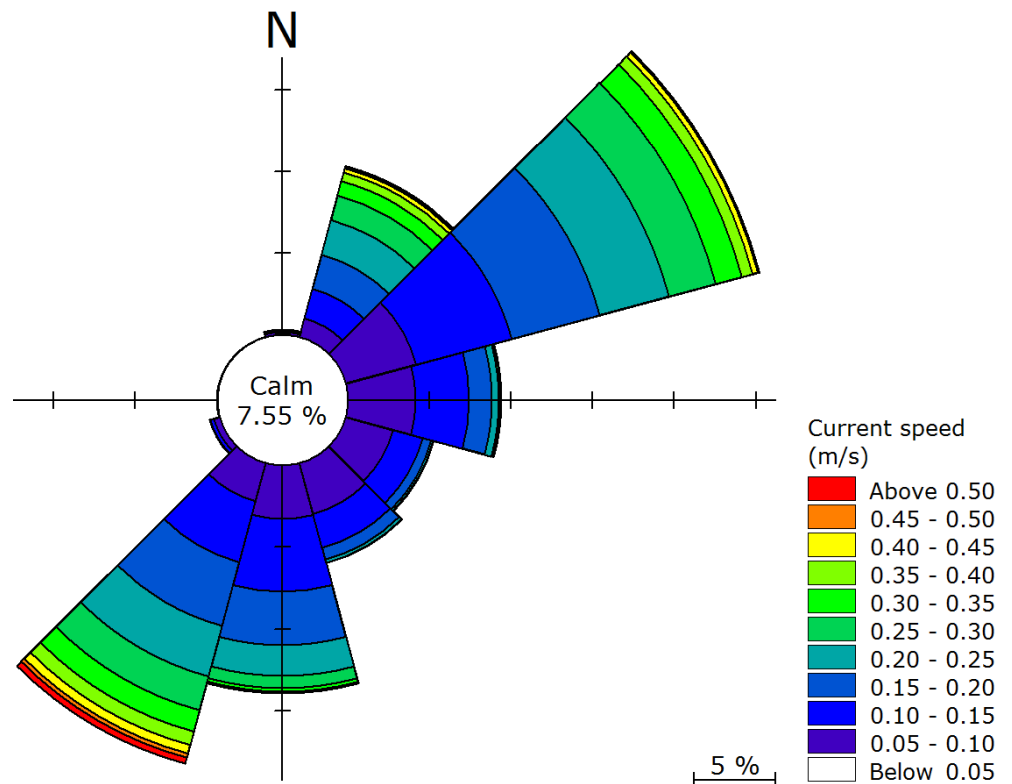
Strømmen igennem de indre danske farvande og projektområdet er forårsaget af ud og indstrømningen til Østersøen. Det astronomiske tidevand er begrænset og de største strømhastigheder forekommer i forbindelse med stormfloder hvor der optræder meget store højvande i den vestlige del af Østersøen, som f.eks. det skete ved stormfloden i 1872, især da de store vandmængder skulle løbe ud igen gennem bælteerne. Generelt vil strømmen i Kattegat samt omkring Samsø være kraftigst i de dybere render. Fra Storebæltsprojektet er oplyst at normale strømme i de dybere dele af Storebælt i de øvre lag varierer mellem 0,4 m/s (5 % fraktilen) og 0,9 m/s (95 % fraktilen), og i de nedre lag mellem 0,15 m/s (5 % fraktilen) og 0,5 m/s (95 % fraktilen). Strømmen udenfor de dybe områder vil typisk være mindre. På Figur 4-19 ses en strømrose fra et punkt i Sejerø Bugt fra DMI-HRMs model, 2003 til 2013. Figur 4-20 viser en typisk udstrømnings- hhv. indstrømningssituation i Storebælt baseret på en model fra området. Begge disse figurer er fra et tidligere projekt i området. Det ses at strømmingen typisk er kraftigere ved udstrømning end indstrømning, og kraftigst i de dybe render.

Der foreligger ikke yderligere oplysning strømhastighederne nær bunden i renderen ved T-ruten, hvor der potentielt skal anlægges en undersøisk dæmning. Det vurderes for nuværende kan blive op til ca. 1,5 m/s i en designsituation og med en "tærskel" i form af dæmningen vurderes strømmen at kunne blive ca. 40 % højere på grund af indskrænkning af tværsnittet i renderen, altså i

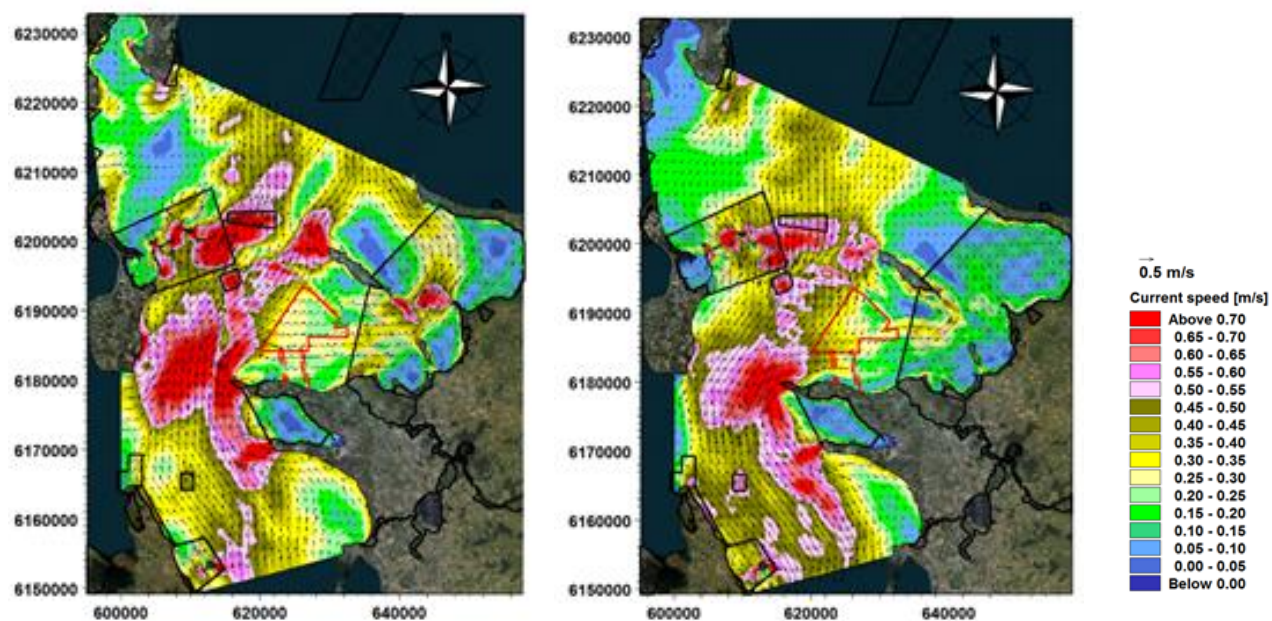
størrelsesordenen 2 m/s. Til sammenligning kan det oplyses, at de allerstørste kendte strømhastigheder i indre danske farvande på ca. 4 m/s optræder i Lillebælt nær broerne hvor bredden af bæltet er mindst.

Strømhastigheder på ca. 2 m/s udgør ingen større udfordring for dimensionering af konstruktionerne på forbindelsen, hvor de nødvendige stenbeskyttelser mm. til kunstige øer og/eller ilandføringer primært er dikteret af bølgeforholdene. Konstruktionerne sikres mod strøm og scour (erosion) ved en udbygning af en fodsikring ved "tåen" af konstruktionerne.

Men som nævnt ovenfor skal der i forbindelse med næste faser af projektet frem mod detailprojektering, og når en linjeføring mm. er valg, foretages mere detaljerede studier og vurderinger af dimensionsgivende strømhastigheder for projektet.



Figur 4-19 Strømrose fra DMI-HRM model, 2003 til 2013, fra et punkt i Sejerø Bugt.



Figur 4-20 Strømning gennem Storebælt.
TV: Typisk udstrømning (nord). TH Typisk indstrømning (syd).

5 Laster og lastkombinationer

5.1 Generelt

Laster og lastkombinationer skal være i henhold til gældende Eurocodes EN 1990 og EN 1991 inklusiv danske nationale annekser:

/EC0/

Eurocode 0: Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner
EN 1990/A1 DK NA:2017, Application for bridges (Vejdirektoratet)

- > DS/EN 1990 DK NA:2019 (General rules)DS/EN 1990/A1/AC:2010
- > DS/EN 1990/A1:2006 (Application for bridges)
- > DS/EN 1990/A1 DK NA:2015
- > DS/EN 1990:2007 (General rules)

/EC1-1-1/

Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-1: Generelle laster - Densiteter, egenlast og nyttelast for bygninger

- > EN 1991-1-1 DK NA:2015, Application for bridges (Vejdirektoratet)
- > DS/EN 1991-1-1 DK NA:2013
- > DS/EN 1991-1-1/AC:2009
- > DS/EN 1991-1-1:2007 (General rules)

/EC1-1-2/

Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-2: Generelle laster - Brandlast

- > DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014
- > DS/EN 1991-1-2/AC:2013
- > DS/EN 1991-1-2:2007

/EC1-1-3/

Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-3: Generelle laster - Sne-
last

- > DS/EN 1991-1-3 DK NA:2015
- > DS/EN 1991-1-3/AC:2009
- > DS/EN 1991-1-3:2007

/EC1-1-4/

Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-4: Generelle laster - Vind-
last

- > EN 1991-1-4 DK NA:2015 Application for bridges (Vejdirektoratet)
- > DS/EN 1991-1-4 DK NA:2010 addendum 1:2010
- > DS/EN 1991-1-4 DK NA:2015
- > DS/EN 1991-1-4/A1:2010
- > DS/EN 1991-1-4/AC:2010
- > DS/EN 1991-1-4:2007

/EC1-1-5/

Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-5: Almindelige laster - Ter-
miske laster

- > EN 1991-1-5 DK NA:2015 Application for bridges (Vejdirektoratet)
- > DS/EN 1991-1-5 DK NA:2012
- > DS/EN 1991-1-5/AC:2009
- > DS/EN 1991-1-5:2007

/EC1-1-6/	Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-6: Generelle laster - Last på konstruktioner under udførelse > EN 1991-1-6 DK NA:2010 Application for bridges (Banebanemark, Vejdirektoratet) > DS/EN 1991-1-6 DK NA:2007 > DS/EN 1991-1-6/AC:2013 > DS/EN 1991-1-6:2007
/EC1-1-7/	Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-7: Generelle laster - Ulykkeslast > EN 1991-1-7 DK NA:2016 Application for bridges (Vejdirektoratet) > DS/EN 1991-1-7 DK NA:2013 (Actions on bearings) > DS/EN 1991-1-7 DK NA:2013 > DS/EN 1991-1-7/AC:2010 > DS/EN 1991-1-7/A1:2014 > DS/EN 1991-1-7:2007
/EC1-2/	Eurocode 1: Last på bygværker - Del 2: Trafiklast på broer > EN 1991-2 DK NA:2017 including Annex A > DS/EN 1991-2/AC:2010 > DS/EN 1991-2:2003
/EC1-ICE/	Danish addendum for ice loads: 2015 (only in DK) – revision on-going

5.2 Permanente laster

For nuværende er kun egenvægt inkluderet.

5.2.1 Egenvægt

Karakteristisk egenvægt er defineret i følgende tre tabeller. For jernbane antages direkte sporbefæstelse. Dog er last for spor i ballast også inkluderet for sammenligning.

Tabel 5-1 Egenvægt konstruktioner

Element	Vægt [kN/m ³]	Linjelast [kN/m]	Kommentar
Armeret beton	25,0	-	
Uarmeret beton	24,0	-	
Grovbeton (ballast)	22,0	-	
Stål	77,0	-	
Sandfyld drænet	19,0	-	
Sandfyld under vand	9,0-12,0	-	

Tabel 5-2 Egenvægt vejelementer

Element	Vægt [kN/m ³]	Linjelast [kN/m]	Kommentar
Belægning og membran, ståldæk	23,0	31,7	Antaget 60 mm tykkelse og 23,0 m bredde af kørebane
Belægning og membran, betondæk	23,0	42,3	Antaget 80 mm tykkelse og 23,0 m bredde af kørebane
Autoværn (3 stk.)	-	3,0	1,0 kN/m per autoværn
Rækværker (2 stk.)	-	2,5	
Udstyr	-	1,0	
Vindskærme (hvis anvendt)	-	2,0	1,0 kN/m per vindskærm

Tabel 5-3 Egenvægt banelementer

Element	Linjelast 2 spor [kN/m]	Linjelast 1 spor [kN/m]	Kommentar
Skinner (UIC60)	2,4	1,2	1,2 kN/m per spor
Skinner mod afsporing	2,4	1,2	1,2 kN/m per spor
Ballast (hvis ballasterede spor)	80,0	40,0	0,5 m ballast med vægt 18,0 kN/m ³ og sveller
Direkte sporbefæstelse (hvis ikke ballasterede spor)	45,0	22,5	22,5 kN/m per spor
Sikkerhedsbarrierer	6,0	4,0	2,0 kN/m per barrierer
Nødfortov	3,0	1,5	1,5 kN/m per spor
Udstyr	2,0	1,0	
Køreledninger	0,1	0,05	Inkl. ophæng
Elektriske installationer	2,0	1,0	1,0 kN/m per spor
Afvanding	2,0	1,0	1,0 kN/m per spor

5.3 Variable laster

For nuværende er kun trafiklaster inkluderet. Øvrige variable laster er antaget at være sammenlignelige med laster anvendt for Storebæltsforbindelsen, Øresundsbroen og konceptdesign for en Femernbælt broløsning (fravalgt til fordel for tunnel).

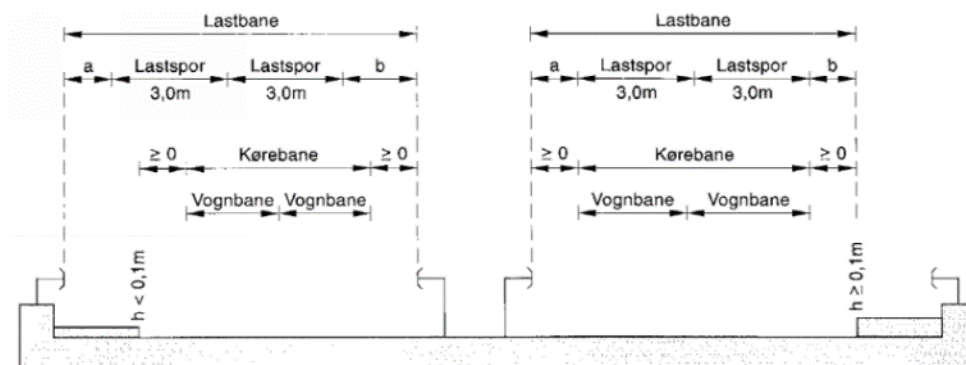
Trafiklaster skal være i henhold til Eurocode 1 del 2 "Trafiklast på broer" (DS/EN 1991-2:2003) og Dansk nationalt annekst (DS/EN 1991-2 DK NA:2017).

5.3.1 Vejtrafiklast

Lastbaner

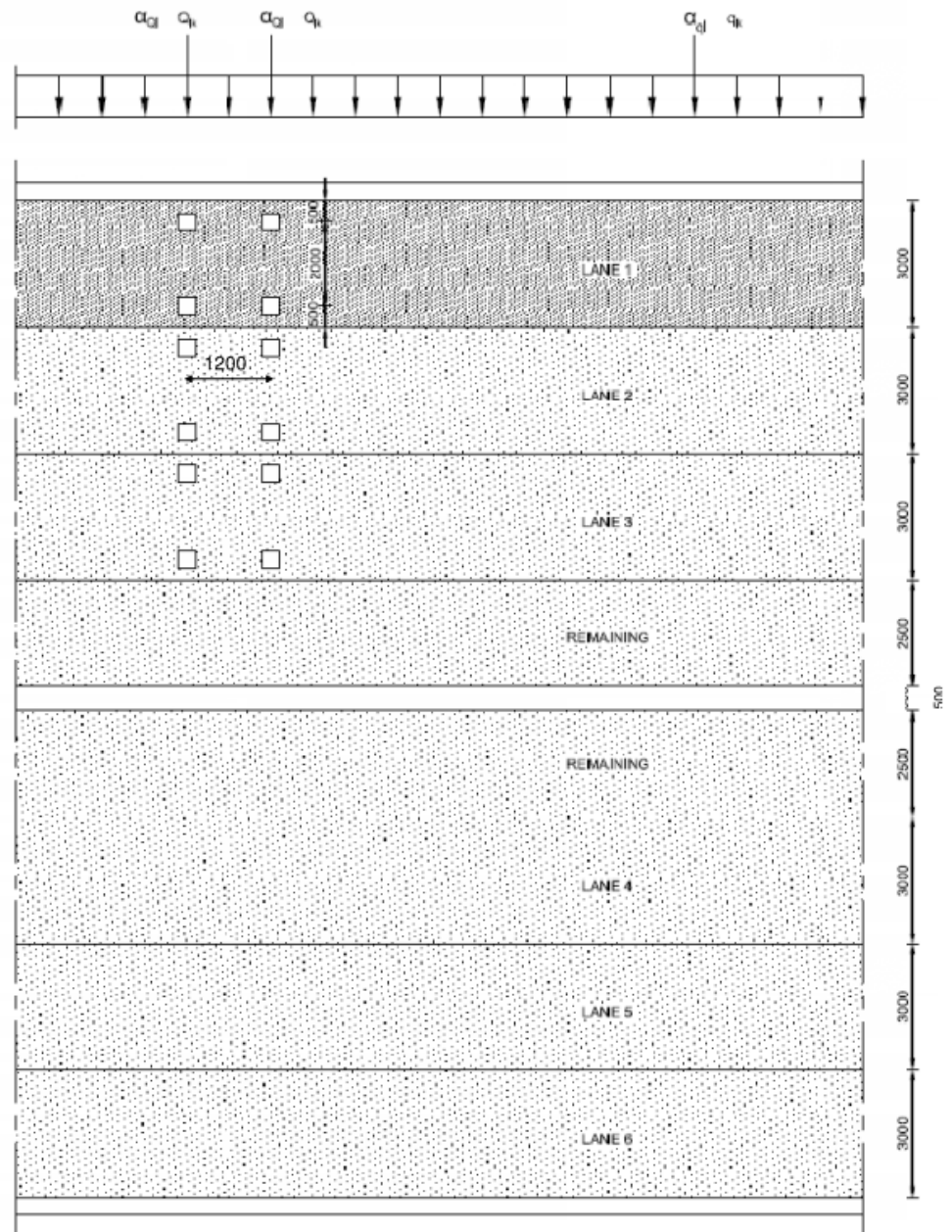
Lastbane er mellem inderside af autoværn, dvs. bredden er 11,5 m i hver retning.

Definition af baner og spor fra DS/EN 1991-2 DK NA er vist i Figur 5-1.



Figur 5-1 Definition af lastbaner, lastspor, kørebaner og vognbaner

Dette eksempel viser 2 lastspor i hver retning. Dimensionerne a og b angiver resterende bredde som også skal påføres last. For en Kattegatforbindelse vil der være 3 lastspor i hver retning og resterende bredde (a+b) som vist i Figur 5-2.



Figur 5-2 Definition af 6 lastspor (lane 1-6), resterende bredde (remaining) samt lastmodel 1

Lastmodel 1

Lastmodel 1 (LM1) er dimensionsgivende for globale effekter. LM1 består af aksellaster (Tandem Systems, TS) og jævnt fordelt last (UDL), se eksempel i Figur 5-2.

Lasterne skal kun påføres lastspor hvor effekten er ugunstig for det betragtede element.

UDL-lasten er $q_i = \alpha_{qi} q_{ik}$ i lastspor i . For lastspor 1 er $q_{ik} = 9 \text{ kN/m}^2$ mens q_{ik} er $2,5 \text{ kN/m}^2$ for øvrige lastspor. Faktorerne α_{q1} er $6/9 = 0,67$ og α_{qi} er $1,0$ for øvrige baner. Herved fås:

- > Lastspor 1: $q_1 = 6.0 \text{ kN/m}^2$
- > Resterende lastspor: $q_i = 2.5 \text{ kN/m}^2$
- > Resterende areal: $= 2.5 \text{ kN/m}^2$

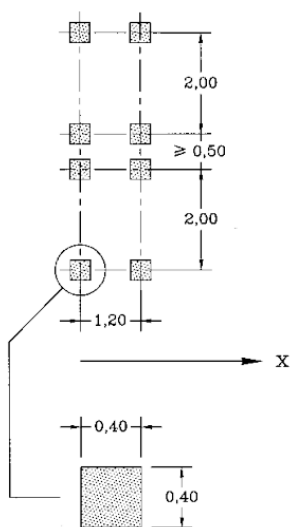
Den samlede jævnt fordelte vejtrafiklast er:

$$q = 3 \text{ m} \times 0,67 \times 9 \text{ kN/m}^2 + (2 \times 11,5 \text{ m} - 3 \text{ m}) \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 68 \text{ kN/m}$$

Tandemlasten er $Q_i = \alpha_{Qi} Q_{ik}$ i lastspor i og skal påføres i maksimalt 3 lastspor. Faktoren α_{Qi} er 1,0 for alle lastspor. Herved fås følgende aksellaster:

- > Lastspor 1: $Q_1 = 300 \text{ kN}$
- > Lastspor 2: $Q_2 = 200 \text{ kN}$
- > Lastspor 3: $Q_3 = 100 \text{ kN}$
- > Øvrige lastspor $Q = 0 \text{ kN}$

Tandemlast er vist i Figur 5-3.

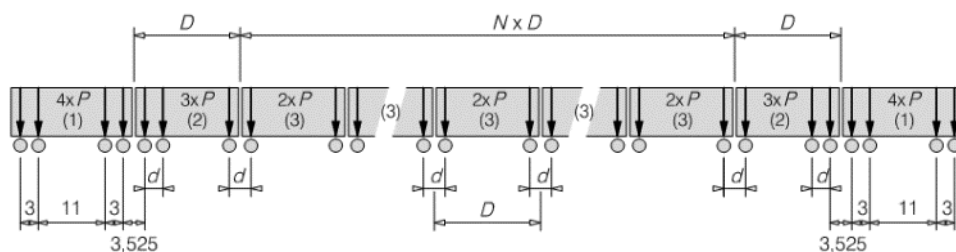


Figur 5-3 Akselkonfiguration for TS (last i kun 2 lastspor vist)

Afstanden mellem de to køretøjer er her angivet som $\geq 0,50 \text{ m}$. Da aksellaster skal placeres i midten af 3 m brede lastspor bliver afstanden mellem de to køretøjer 1,0 m som vist i Figur 5-2.

5.3.2 Jernbanetrafiklast

Kattegat skal kun dimensioneres for passagertog. Eurocode EN 1991-2 har ikke specifikke passagertog. Dog er der defineret ni HSLM-A tog for passagertog med



Aksellaster er omregnet til jævnt fordelt linjelast på 24.1 kN/m per spor eller 48.2 kN/m i alt for 2 spor for det afgørende type A2, se følgende tabel.

Type	Antal indre vogne N	Vogn-længde D	Bogie akselaf-stand d	Enkelt-kraft P	Tog-længde L	Samlet last P	Jævnt fordelt last p
		[m]	[m]	[kN]	[m]	[kN]	[kN/m]
A1	18	18	2	170	397,5	8500	21,4
A2	17	19	3,5	200	398,5	9600	24,1
A3	16	20	2	180	397,5	8280	20,8
A4	15	21	3	190	394,5	8360	21,2
A5	14	22	2	170	389,5	7140	18,3
A6	13	23	2	180	382,5	7200	18,8
A7	13	24	2	190	397,5	7600	19,1
A8	12	25	2,5	190	387,5	7220	18,6
A9	11	26	2	210	375,5	7560	20,1

Maksimal længde af passagertog skal være 400 m.

Ulykkeslaster skal defineres i en efterfølgende fase.

Lastkombinationer skal være i henhold til EN 1990/A1 som beskrevet i følgende afsnit. EN 1990 definerer følgende dimensioneringstilfælde:

- > **SLS karakteristisk**
- > **SLS hyppig**
- > SLS kvasi-permanent
- > **ULS**
- > Ulykke og seismisk
- > SLS byggeri
- > ULS byggeri

I nuværende fase er kun dimensioneringstilfælde markeret med fed defineret og undersøgt.

For vejtrafiklast er lastgrupperne 1a og 2 svarende til LM1 betragtet. For jernbanetrafiklast er lastgrupperne 11 og 21 relevante da kun HSLM tog skal anvendes og der ses bort fra tværlaster.

I det følgende er $K_{FI} = 1,1$ antaget svarende til konsekvensklasse CC3 jf. DK NA. For et meget stort projekt som en Kattegatforbindelse vil omfattende tiltag tages for at reducere risiko i både projekteringsfasen og under byggeri hvorfor konsekvensklasse kan reduceres til CC2 hvorved K_{FI} er 1.0. Dette blev opnået ved forundersøgelserne for en Femern Bælt bro og i Design Basis for Ny Storstrømsbro.

For ULS skal vælges formelsæt (6.10a)+(6.10b).

Tabel 5-5 Lastkombinationer SLS karakteristisk

SLS characteristic combination	Road load ID Rail load ID	1 1a gr11+21	2 2 gr11+21	3 1a gr11+21	4 1a gr11+21
		Leading road / companion rail		Leading rail / companion road	Leading temperature
<u>Permanent Load:</u>					
Dead load					
Weight general (structural ele- ments, pavement, equipment)					
Unfavourable ($\gamma_{Gj,sub}$)		1.00	1.00	1.00	1.00
Favourable ($\gamma_{Gj,inf}$)		1.00	1.00	1.00	1.00
Pre-stressing		1.00	1.00	1.00	1.00
Differential settlement		1.00	1.00	1.00	1.00
<u>Variable Loads¹⁾:</u>					
Road traffic					
LM1 (TS)		1.00	0.75	0.75	0.75
LM1 (UDL)		1.00	0.40	0.40	0.40
Traction, braking, centrifugal		-	1.00	-	-
Rail traffic, groups 11, 21					
HSLM Real trains		0.80	0.80	1.00	0.80
Traction and braking		0.80	0.80	1.00	0.80
Other loads					
Wind		0.75	0.75	0.75	0.75
Temperature		0.60	0.60	0.60	1.00
Ice		0.60	0.60	0.60	0.60
Other		0.75	0.75	0.75	0.75

¹⁾ shall be taken as 0.0 when favourable

Tabel 5-6 Lastkombinationer SLS hyppig

SLS frequent com- bination	Road load ID Rail load ID	1 1a gr11	2 1a gr21	3
		Leading rail and road	Leading rail and road	Leading temperature
<u>Permanent Load:</u>				
Dead load				
Weight general (structural ele- ments, pavement, equipment)				
Unfavourable ($\gamma_{Gj,sub}$)		1.00	1.00	1.00
Favourable ($\gamma_{Gj,inf}$)		1.00	1.00	1.00
Pre-stressing		1.00	1.00	1.00
Differential settlement		1.00	1.00	1.00
<u>Variable Loads¹⁾:</u>				
Road traffic				
LM1 (TS)		0.75	0.75	-
LM1 (UDL)		0.40	0.40	-
Traction, braking, centrifugal		-	-	-
Rail traffic, groups 11-21				
HSLM Real trains		0.80	0.70	-
Traction and braking		0.80	0.70	-
Other loads				
Wind		-	-	-
Temperature		0.50	0.50	0.60
Ice		-	-	-
Other		-	-	-

¹⁾ shall be taken as 0.0 when favourable

Tabel 5-7 Lastkombinationer ULS – STR/GEO

ULS	Road load ID Rail load ID	STR/GEO Set B ¹⁾					
		0 6.10a ²⁾	1 1a gr11+21	2 2 gr11+21	3 1a gr11+21	4 1a gr11+21	5 1a gr11+21
			Leading road / companion rail		Leading rail / companion road		Leading temperature
<u>Permanent Load:</u>							
Dead load							
Weight general (structural elements, pavement, equipment)							
Unfavourable ($\gamma_{Gj,sub}$)		1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Favourable ($\gamma_{Gj,inf}$)		1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Pre-stressing		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Differential settlement		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<u>Variable Loads³⁾:</u>							
Road traffic							
LM1 (TS)		-	1.40	1.05	1.05	1.05	1.05
LM1 (UDL)		-	1.40	0.56	0.56	0.56	0.56
Traction, braking, centrifugal		-	-	1.40	-	-	-
Rail traffic, groups 11-21							
HSLM Real trains		-	1.12	1.12	1.40	1.12	1.12
Traction and braking		-	1.12	1.12	1.40	1.12	1.12
Other loads							
Wind		-	1.05	1.05	1.05	1.05	1.50
Temperature		-	0.90	0.90	0.90	1.50	0.90
Ice		-	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Other		-	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

¹⁾ All loads when unfavourable shall be multiplied with $K_{FI}=1.1$.

When favourable the load shall not be multiplied by K_{FI} .

²⁾ The load combination shall also be verified where all factors on the permanent loads are 1.00 while the partial safety factor on all strength parameters are multiplied by $1.25 \cdot K_{FI}=1.38$

³⁾ If favourable the factor is equal to 0.00.

6 Materialer

6.1 Beton

Betonstyrke (cylinderstyrke) i intervallet C35 til C50 påregnes anvendt.

Klorid migration koefficient skal være højst $3,0 \cdot 10^{-12}$.

Betonens dæklag skal være som angivet i Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Betondæklag

Konstruktionselement	Minimum dæklag [mm]
Fundament i jord	60
Søjle i bølgezone	80
Overbygning i atmosfæren	60
Kassedrager indvendig	50
Kantbjælke udsat for saltning	80
Brodæk under fugtisolering	60

Af praktiske grunde påregnes samme dæklag i hele brosjøjlens højde.

Blød armering skal være i klasse B eller C i henhold til EC2-1-1, annex C.

6.2 Konstruktionsstål

Stålkvalitet skal være S355, S420 eller S460, dog kan for ikke-bærende konstruktioner anvendes S275.

6.3 Kabelstål og forspændingsstål

Stålwirer skal have en nominel diameter på 15,7 mm og et nominelt tværsnit på 150 mm². Brudstyrken skal være 1860 MPa og elasticitetsmodulet skal være 195000 MPa.

7 Referencer

- [1] DSB infrastruktur, Fritrumsprofiler, Revision 4, 2014.
- [2] Banedanmark, »Banenorm BN1-154-3 Sporafstand og frispormærker,« Juli 2018.
- [3] Kystdirektoratet, »Højvandsstatistikker 2017,« 2019.
- [4] COWI, »Byernes udfordringer med havvandsstigning og stormflod,« For Realдания, 2017.
- [5] A. Colding, »Nogle Undersøgelser over Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12. - 14. Nov. 1872 og over den derved fremkaldte Vandflod i Østersøen. Med 23 planer og Kort.,« 1881.
- [6] J. Egedal, »Abnorme Vandstandsforhold i de Danske Farvande II,« DMI publikation Nr. 11, 1949.
- [7] D. L. Cour, »Abnorme Vandstandsforhold i de Danske Farvande I,« DMI publikation nr. 4, 1916.
- [8] DMI, »Vejledning i anvendelse af udledningsscenarier,« 2018.
- [9] IPCC, »IPCC SR Ocean and Cryosphere. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities,« 24th 24th September 2019.
- [10] P. A. K. S. E. K. a. S. C. Knudsen, »An uplift model for Denmark - and work ahead,« 2016.
- [11] DMI, »Klimaatlas-rapport, Danmark,« Oktober 2019.
- [12] DMI, »Methods used in the Danish Climate Atlas,« DMI Report 19-17, October 2019.
- [13] COWI A/S, »Sejerø Bugt Offshore Windfarm, Metocean Report,« 2015.
- [14] J. Egedal, »Abnorme Vandstandforhold i de Danske Farvande. II af J. Egedal,« 1949.
- [15] Kystdirektoratet, »Højvandsstatistikker 2017,« Kystdirektoratet, 2019.
- [16] P. D. A. Colding, »Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12th -14th November 1872,« *Videnskabelig Selskab Skr*, 6. række, 1881.
- [17] IPCC, »IPCC SR Ocean and Cryosphere. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities,« September 2019.
- [18] DMI, »Klimaatlas-rapport, Danmark,« Oktober 2019.
- [19] DMI, »Methods used in the Danish Climate Atlas,« October 2019.
- [20] IPCC, »IPCC , The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Summary for Policymakers,« 24th 24th September 2019.