

SIKRINGSHØJDER OG HÅNDBTERING AF BAGVAND

Projekt navn **Nakskov Stormflodssikring**
 Projektnr. **1100049996**
 Kunde **Lolland Kommune**
 Notatnr. **NSS-402-003**
 Version **0.1**

Udarbejdet af ---
 Kontrolleret af ---
 Godkendt af ---

Dato 2022/12/01

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	2
2	Vandstand og stormflodshændelser	2
2.1	Klimarelaterede havvandsstigninger	3
2.2	Vandstande	4
2.3	Sammenfatning af designvandspejl	7
3	Højde af sikringskonstruktioner	8
3.1	Bølgeforhold under stormflod	8
3.2	Sikringshøjde for landanlæg	8
3.2.1	Metodik	9
3.2.2	Acceptabelt bølgeoverskyl	9
3.2.3	Fastlæggelse af bølgetillæg til højde af sikringskonstruktioner	10
3.3	Sikringshøjde for portanlægget	11
3.3.1	Metodik og beregnet bølgeoverskyl	11
3.4	Sammenfatning af højder for sikringskonstruktioner	12
4	Lukning af højvandsport og tilstrømning til havnebassin	13
4.1	Tilstrømning til havnebassin	14
4.1.1	Afstrømning fra hydrologiske oplande	15
4.1.2	Afstrømning fra regnvandskloakerede områder	15
4.2	Kombineret højvande og afstrømning - samlet	16
4.3	Lukkevarighed	18
4.4	Lukkescenarier og -hyppighed af højvandsport	20
4.4.1	Lukkehyppighed	21
5	Bestemmelse af vandstandsstigninger i havnen ved lukket port	22
6	Referencer	24
6.1	Rambøll projektreferencer	24
6.2	Litteratur	24

Rambøll
 Hannemanns Allé 53
 DK-2300 København S

T +45 5161 1000
<https://dk.ramboll.com>

1 Introduktion

I forbindelse med udarbejdelse af designbasis for anlægskonstruktionerne indeholdt i projektet Nakskov stormflodssikring (ref. /A1/), er faren for oversvømmelse undersøgt. Designbasis beskriver de designforudsætninger, som er kendt på nuværende stadie i projektet. I det følgende er væsentlige og supplerende projekteringsgrundlag givet, da disse er med til at definere projektets overordnede funktion. I dette forudsætningsnotat diskuteres foruden vandstandsdata og prognoserne for klimaforandringer også resultaterne af de udarbejdede oversvømmelsesberegninger, med afsæt i design-stormflodsvandstande og muligheden for sammenfald med regnhændelser.

2 Vandstand og stormflodshændelser

Højvande i Nakskov Fjord kan forekomme som følge af længerevarende vesten-nordvesten vind, som presser vandet ind i de indre danske farvande, igennem de danske bæltter, helt ind i Østersøen og den Botniske Bugt, som så fyldes med vand, inden vandet igen løber tilbage, som vinden aftager eller østenvind opstår. Der er således flere vejrfænomener som kan resultere i højvande i Nakskov Fjord.

Data for vandstande, gentagelsesperioder og klimarelaterede havvandsstigninger præsenteret i nærværende afsnit kommer fra hhv.:

- Scenarier til oversvømmelsesmodellering – Risikoområde Sydlolland; Udgivet af Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektoratet; Oversvømmelsesdirektivet, december 2019 med revision af oktober 2020 (ref. /B1/)
- DMI's Klimaatlas – Femern Bælt kyststrækning (ref. /B2/)
- Realdania projektet: Byernes udfordring med havvandsstigning og stormflod, hvor højvandsstatistikken genereret af COWI, med fokus på stormfloder fra Østersøen (ref. /B4/).

Med udgangspunkt i udpegningen som risikoområde jf. EU Oversvømmelsesdirektiv tilbage i 2011 og igen i 2018, har Kystdirektoratet og DMI sidenhen arbejdet videre på at kvantificerede fremtidige højvandshændelser og klimaforandringernes påvirkning på stormfloder. DMI har f.eks. siden Kystdirektoratet udarbejdede "Scenarier til oversvømmelsesmodellering" (ref. /B1/) udgivet Klimaatlas og dermed opdateret deres data om det forventede fremtidige klima for Danmark frem til udgangen af dette århundrede.

DMI har modsat tidligere fraveget at angive de forventede nationale havvandsstigninger pr. år frem til 2100, men i stedet oplyst et sandsynligt niveau for havvandsstigning i hhv. midten (år 2041-2070) og slutningen (år 2071-2100) af dette århundrede, hvilket betragtes som et udtryk for den usikkerhed der er i prognoserne. Samtidig er det nu muligt at se DMIs bedste bud på lokale og dermed regionale forskelle i havvandsstigningerne.

Data fra Klimaatlas beror sig på en række forskellige klimamodeller, og medianværdien angives med et tilhørende usikkerhedsinterval. Den nedre grænse (10-percentilen) af usikkerhedsintervallet angiver den værdi, som kun 10% af modellerne ligger lavere end. Tilsvarende er den øvre grænse (90-percentilen) den værdi, hvor resultaterne fra kun 10% af modellerne ligger højere end. DMI Klimaatlas bruger den officielle højvandsstatistik udarbejdet af Kystdirektoratet kombineret med klimaprognoser og beregninger fra DMI's havmodel.

Foruden de statslige aktører har andre aktører lavet dybdegående analyser af højvandshændelser, ved at benytte udenlandske observationer, samt nedfældet historiske skrevne kilder. COWI har eksempelvis

udarbejdet en højvandsstatik med fokus på de større hændelser kommende fra 'syd', betydende højvandshændelser fra Østersøen, svarende til et hændelsesforløb ligesom stormen i 1872 /B3/. Arbejdet har været medvirkende til at sætte fokus på højvande skabt af lavtryk med østlige vindretninger.

Alle oplyste vandstande i nærværende afsnit er i DVR90.

2.1 Klimarelaterede havvandsstigninger

Ved projekter, hvor der er høje krav til robusthed, eller hvis tidshorizonten går ud over år 2050, hvilket er tilfældet for nærværende projekt, anbefaler DMI, at analyser tager udgangspunkt i de høje RCP-udledningsscenarier. Alle de præsenterede klimascenarier tager derfor udgangspunkt i udledningsscenarie RCP8.5 (højt fremtidigt CO2-niveau) ved vurdering af havvandsstigninger. Der er en del usikkerhed forbundet med estimeringen af fremtidige havvandsstigninger, ikke kun i relation til "hvor meget", men også "hvornår". Havvandet vil nemlig fortsætte med at stige uagtet vores indsatser for at nedbringe drivhusgasserne, grundet varmeudvidelsen af verdenshavene.

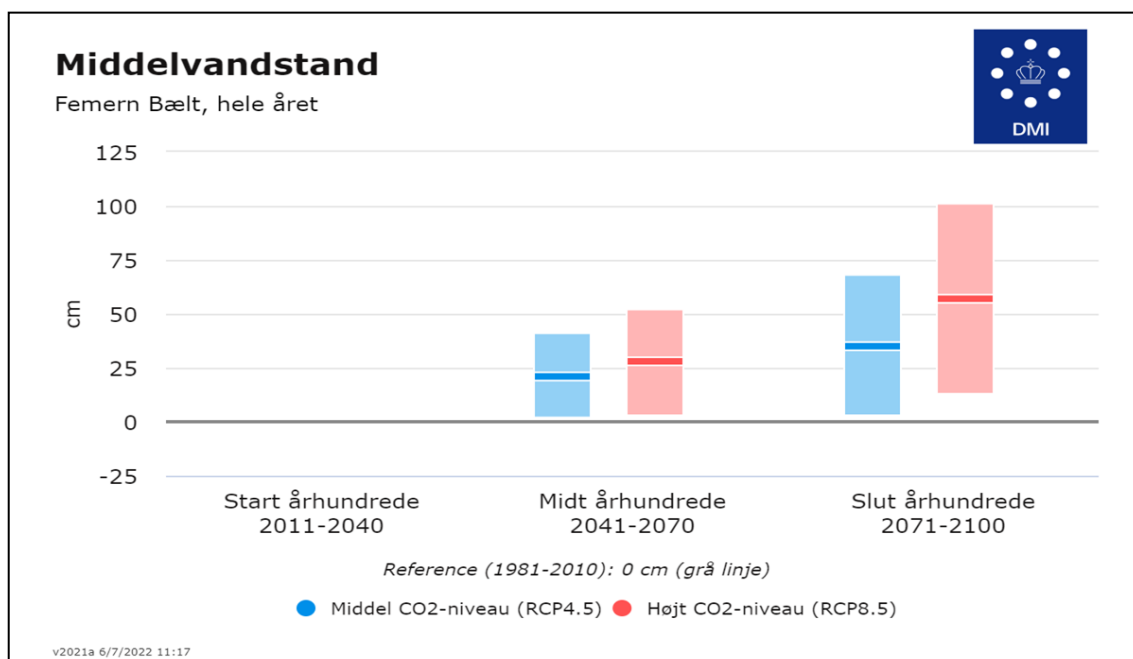
I henhold til Kystdirektoratets indledende arbejde i relation til EUs Oversvømmelsesdirektiv, skal der forventes middel havvandsstigninger i 2065 og 2115, som angivet i Tabel 2-1. Tilsvarende angiver DMI's klimaatlas havvandsstigninger, inkl. effekten af landhævning, som vist i Tabel 2-2.

Tabel 2-1: Kystdirektoratets havvandsstigninger /B1/.

Årstal	Havstigning korrigeret for landhævning [cm]	Landhævning [cm]	Havstigning [cm]
2065	30	2,88	33
2115	77	5,88	83

Tabel 2-2: DMI's Klimaatlas Havvandsstigninger – indeholder effekten af landhævning. jf. ref. /B2/.

Årstal	Havstigning korrigeret for landhævning [cm]	Usikkerhedsinterval	
		10-percentil [cm]	90-percentil [cm]
2041-2070	28	3	52
2071-2100	57	13	101



Figur 2-1: Middelvandstand (havvandsstigning) for Femern Bælt, som omfatter Nakskov Fjord, til forskellige tidspunkter, ref. /B2/.

Ved sammenligning af de to datagrundlag på den korte bane (midt århundrede) ses det, at estimerne ligger relativt tæt, men at der på den længere bane opstår større variation og dermed spredning i estimerne om fremtidige havvandsstigninger.

De fremskrevne vandstande fra Kystdirektoratet (ref. /B1/) for midten af dette århundrede er estimeret til at være ca. 2 cm højere end den seneste fremskrivning foretaget af DMI (ref. /B2/). Ved sammenligning af de fremskrevne resultater på den længere bane (slut århundrede), er de estimerede vandstande fra Kystdirektoratet 20 cm højere end DMI's. Dette dækker dog over, at Kystdirektoratets fremskrivning gælder for år 2115, hvor DMI's fremskrivning er en gennemsnitsværdi for perioden 2071-2100. Det vurderes for dette projekt, at denne forskel ikke er afgørende for udarbejdelse af projektet og dets løsninger til nuværende fastsatte designkriterie. Set i et længere tidsperspektiv og under observation af klimaforandringerne vil en eventuel tilpasning af den samlede højvandssikring komme på tale i takt med voldsommere vejr. Estimerne præsenteret i DMI's KlimaAtlas er nyeste bedste bud på fremtidens ændrende vandstandsforhold og vil opdateres løbende. Prognoserne repræsenterer statens officielle datagrundlag og udmeldinger, hvorfor denne datakilde benyttes til beregning af fremtidige havvandstandsstigninger.

2.2 Vandstande

Kystdirektoratet udarbejder statistikker for ekstreme vandstande baseret på målinger i de danske farvande, og der kommer gennemsnitlig hvert 5. år en revideret statistik. I forbindelse med udpegningen i EU's Oversvømmelsesdirektiv identificerede Kystdirektoratet højvandstande, som havde stor, mellemstor og ringe sandsynlighed for at indtræffe. I ref. /B1/ er stormflodsvandstande for Nakskov præsenteret, hvilke er gengivet i Tabel 2-3. Vandstandene er estimeret via statistiske analyser på baggrund af målte data i Rødbyhavn og er justeret til muligt fremtidigt stormflodsniveau. De ekstreme stormfloder er baseret på historiske data. De angivne vandstande indeholder bidrag fra middel havvandsstigninger og er korrigeret for landhævning.

Tabel 2-3: Kystdirektoratets stormflodsvandstande for Nakskov – indeholder effekten af landhævning og havvandsstigninger jf. ref. /B1/.

Hændelse og årstal	Vandstand [cm]
20 års stormflod i 2019	156
100 års stormflod i 2019	172
Ekstrem stormflod fra syd i 2019 (Stormfloden 1872)	317
Ekstrem stormflod fra vest i 2019 (Stormfloden 1872)	250
100 års stormflod i 2065	201
100 års stormflod i 2115	248
Ekstrem stormflod fra syd i 2115	394
Ekstrem stormflod fra vest i 2115	327

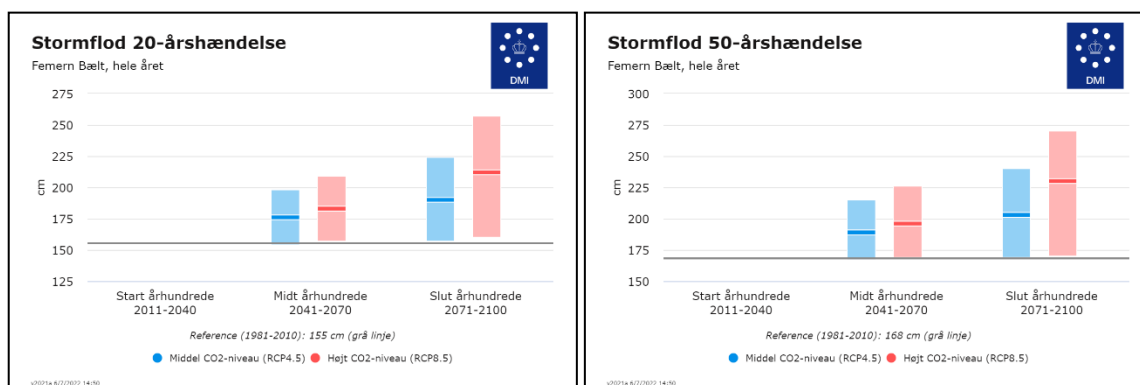
Fra DMI's Klimaatlas (ref./B2/) kan der udtrækkes ekstreme vandstande for forskellige gentagelsesperioder i hhv. midten og slutningen af dette århundrede. Vandstande med tilhørende usikkerhedsinterval er vist i Tabel 2-4 samt i Figur 2-2 og Figur 2-3. Disse tager udgangspunkt i området benævnt Femern Bælt Kyststrækning. DMI angiver det samlede bidrag fra stormflodshændelse og havvandsstigninger korrigeret for landhævning.

Tabel 2-4: DMI's Klimaatlas ekstreme vandstande – indeholder effekten af landhævning og havvandsstigninger. jf. ref. /B2/.

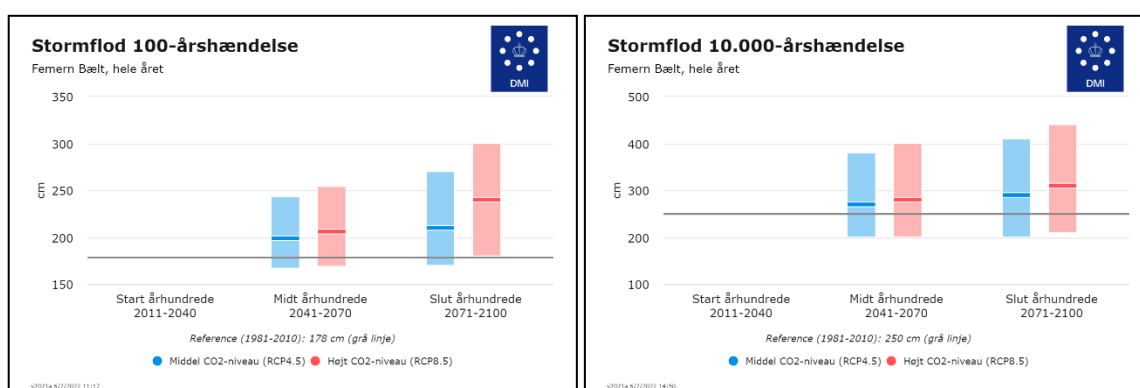
	Årstal	Vandstand [cm]	Usikkerhedsinterval [cm]	
			10-percentil	90-percentil
20-års hændelse	1981-2010	155		
	2041-2070	183	157	209
	2071-2100	212	160	257
50-års hændelse	1981-2010	168		
	2041-2070	196	169	226
	2071-2100	225	169	272
100-års hændelse	1981-2010	178		
	2041-2070	206	169	254
	2071-2100	235	175	303
10.000-års hændelse ¹⁾	1981-2010	253		
	2041-2070	281	201	395
	2071-2100	310	211	444

¹⁾ Tallene for sjældne stormfloder er under opdatering.

Ved en direkte sammenligning af vandstandene fra hhv. Kystdirektoratet (KDI) og DMI synes der kun at være mindre forskelle imellem disse. F.eks. ses det, at forskellen på en 100-års hændelse i midten af dette århundrede (2041-2070) er ca. 5 cm (forskelle = KDI-vandstand - DMI-vandstand = 201 cm - 206 cm = -5 cm). Dette kan relateres til de statistiske usikkerheder, modelfremskrivninger, usammenlignelige årstal samt korrigeret for lokale landhævninger og sætninger. Generelt vurderes de at være sammenlignelige.



Figur 2-2: Ekstrem vandstand 20 og 50-års hændelse for Femern Bælt, som omfatter Nakskov Fjord, til forskellige tidspunkter, ref. /B2/.



Figur 2-3: Ekstrem vandstand 100 og 10.000-års hændelse for Femern Bælt, som omfatter Nakskov Fjord, til forskellige tidspunkter, ref. /B2/. Tal for sjældne stormfloder (10.000-års hændelsen) er under opdatering.

Foruden myndighedernes arbejde med målinger af vandstande og estimering af fremtidige højvandstande har andre aktører lavet dybdegående analyser af højvandshændelser ved at benytte udenlandske observationer samt nedfældet historiske skrevne kilder. COWI har eksempelvis udarbejdet en højvandsstatik med fokus på de større hændelser kommende fra 'syd', betydende højvandshændelser fra Østersøen, svarende til et hændelsesforløb ligesom stormen i 1872 /B3/. Resultaterne af COWIs analyse har resulteret i højere estimer af højvandstande og tilhørende gentagelsesperioder, end tidligere estimeret fra Kystdirektoratet og senest DMI. COWIs estimer fra udarbejdede højvandsstatistik gældende for kyststrækninger særligt påvirket af Østersøstorme, med udgangspunkt i Køge Bugt (ref./B3/) og senere justeret til Nakskov (ref. /B4/), er vist i Tabel 2-5

Tabel 2-5: COWIs Ekstreme vandstande, ref. /B4/.

	Vandstande [cm]		
	2014	2050	2100
20-års hændelse	131	156	200
50-års hændelse	158	182	227
100-års hændelse	193	217	262
1000-års hændelse	360	384	429

Forskellene opstår primært grundet forskelligheder i datagrundlaget, databearbejdning og den benyttede statistiske metode. Generelt kan det bemærkes, at estimer af ekstreme hændelser er

vanskelige at bestemme grundet de relativt korte måletidsserier samt få målte registreringer af ekstreme hændelser, hvorfor ekstrapolering af data oftest betegnes som værende udenfor gyldighedsområdet af den statistiske analyse. Estimering af ekstreme hændelser er derfor oftest behæftet med en betydelig usikkerhed.

Fremskrives DMIs Klimaatlas median-estimerer for højvande og middel havvandsstigninger lineært (ref. /B2/), fremkommer estimerer i samme størrelsesorden som COWIs estimerer (ref. /B4/) for en vandstand på 2,5 m i år 2100. Dog findes der betydelige forskelle i estimererne af ekstreme hændelser, særligt i forhold til nutidige estimerer, se Tabel 2-6.

Tabel 2-6: Estimering af gentagelsesperioden til en vandstand på 250 cm DVR90.

	Vandstand	Estimerede gentagelsesperiode	
	2100	Nutid	2100
DMI Klimaatlas Reference: /B2/	250 cm	~ +10.000	~ 100
COWI Reference: /B3/ og /B4/	250 cm	~ 250	~ 80

Bedre forståelse af fænomener som skaber højvande, forbedring af datagrundlaget, anvendelse af statistiske metoder og mindskning af modelusikkerheder er afgørende, for at opnå et større vidensgrundlag. Det er derfor vigtigt kontinuerligt at registrerer vandstande og udfører statistiske ekstremværdi analyser, som ny viden bliver tilgængelig. De estimerede vandstande og tilhørende gentagelsesperioder er væsentlige at forholde sig til, særligt i relation til den forventede sandsynlighed for højvande og dermed oversvømmelse, hvilket har indflydelse på estimering af risikoen og ikke mindst de samfundsøkonomiske beregninger af projektet.

2.3 Sammenfatning af designvandspejl

I det ovenstående er datagrundlaget for vandstand og stormflodshændelser gennemgået, og det er konkluderet, at en vandstand i kote 2,5 m svarer til en fremtidig 100-års hændelse og en nutidig ekstremhændelse med op til 10.000 års returperiode, jf. Tabel 2-6.

Lolland Byråd har i 2015 besluttet at sikre Nakskov mod et vandspejl i kote +2,5 m og dermed er det besluttet at beskytte byen mod det der svarer til en fremtidig statistisk 100-års hændelse og til en sjældent forekommende ekstremhændelse med nutidigt havvandspejl.

Som grundlag for projektet anvendes således et designvandspejl i kote +2,5 m til dimensionering af sikringsanlæg.

Designvandspejlet for de nye anlæg er højere end den nuværende vedtægtsbestemte digehøjde, som er gældende for digerne langs særligt den nordlige side af Nakskov Fjord. Højden af de nuværende diger er i kote +2,42 m DVR90, hvilket oprindeligt svarede til +2,5 m DNN. Altså planlægges det nye anlæg med en højere sikringshøjde end nuværende beskyttelse, hvorfor det vil være nødvendigt, på sigt, at hæve de omkringliggende diger så disse sikrer til samme højde som digerne i nærværende projekt.

Det er yderligere besluttet, at designvandstanden for portanlægget skal udføres med en større sikkerhed mod overskridelse af sikringsniveauet end det nordlige dige og dermed tilsluttende landløsning. Designvandspejlsniveauet for skydeporten og tilhørende anlægskonstruktioner er derfor fastsat til +3,17 m DVR90, hvilket svarer til en ekstrem stormflod fra syd (år 2019), jf. Tabel 2-3.

Til beregning af ændrede lukkevarighed og -hyppigheder som følge af havvandsstigninger, bruges estimerterne præsenteret i DMI's Klimaatlas (Tabel 2-4) da de er nyeste bedste bud på fremtidens ændrende vandstandsforhold og repræsenterer statens officielle datagrundlag.

3 Højde af sikringskonstruktioner

Kystsikringskonstruktioner, der er eksponeret for bølger, er påvirket både af forhøjet vandspejl under stormflod og af et evt. bølgeopløb på konstruktionen, der kan give anledning til et bølgeoverskyl. Højden af sikringskonstruktionerne (sikringshøjden) fastlægges derfor dels på baggrund af designvandspejlet (inkl. havspejlsændringer som følge af klimaforandringer og landhævning), og dertil af et bølgetillæg, der tillægges højden af sikringskonstruktionerne for at reducere bølgeoverskyllet til et acceptabelt niveau. I det følgende bestemmes den samlede højde (sikringshøjden) af henholdsvis højvandsport og dige på denne baggrund.

3.1 Bølgeforhold under stormflod

Foruden at vandspejlsniveauet foran dige og højvandsport er fastlagt i Afsnit 2, er bølgehøjden foran anlægget i det følgende estimeret, for således at kunne bestemme den samlede sikringshøjde.

For stigende bølgegentagelsesperiode er bølgehøjden foran anlægget estimeret, se Tabel 3-1. Bølgehøjden er beregnet ved hjælp af en fritstræk-beregning, beskrevet i /A3/. For Nakskov Fjord er det forventeligt, at der er en faseforskydning mellem højvande og vindpåvirkning, da større højvande oftest sker under fralandsvind, hvorfor det bemærkes, at der ikke nødvendigvis er sammenfald mellem høje vandstande og store bølger. Bølgehøjden er gældende både for land- og portanlægget

Tabel 3-1: Estimering af bølgehøjder foran højvandssikring, afhængig af gentagelsesperiode jf. /A3/.

Bølge gentagelsesperiode [år]	Signifikant bølgehøjde foran højvandssikring [m]
1	0,42
5	0,49
10	0,57
50	0,62
100	0,67

Da der ikke er nogen direkte korrelation mellem højvande og bølgepåvirkning, vurderes det, at ekstremvandstanden kombineret med en 5 års bølgehændelse, vil være rimeligt at designe kystbeskyttelsen for, og vurderes at være en konservativ antagelse for bølgepåvirkning i forbindelse med en 100-års vandstandshændelse. Dermed fås en signifikant bølgehøjde på $H_s=0,49$ m, som input til vurdering af bølgeoverskyl for hhv. dige og højvandsport inkl. anlægskonstruktioner. I de følgende afsnit 3.2 og 3.3 beskrives fastlæggelse af sikringshøjder for hhv. landanlæg og anlæg på vand.

3.2 Sikringshøjde for landanlæg

For at kunne bestemme sikringshøjden for landanlægget (dige), er der foretaget beregninger af bølgeoverskyllet på baggrund af de estimerede bølgehøjder foran anlægget (Tabel 3-1). Bølgerne, der dannes sydvest for diget, kommer ind med 45 grader på diget, baseret på længste frie stræk, og påvirkes af forlandet mellem kystlinjen og diget før bølgerne når frem til digefoden. Da bølgehøjden er relativ lille

for alle de undersøgte bølgereturperioder, vil forlandet, i forbindelse med en vandstand på +2,5 m, ikke have indflydelse på bølgebrydningen. Derfor er dette udeladt, hvilket vurderes som en konservativ tilgang.

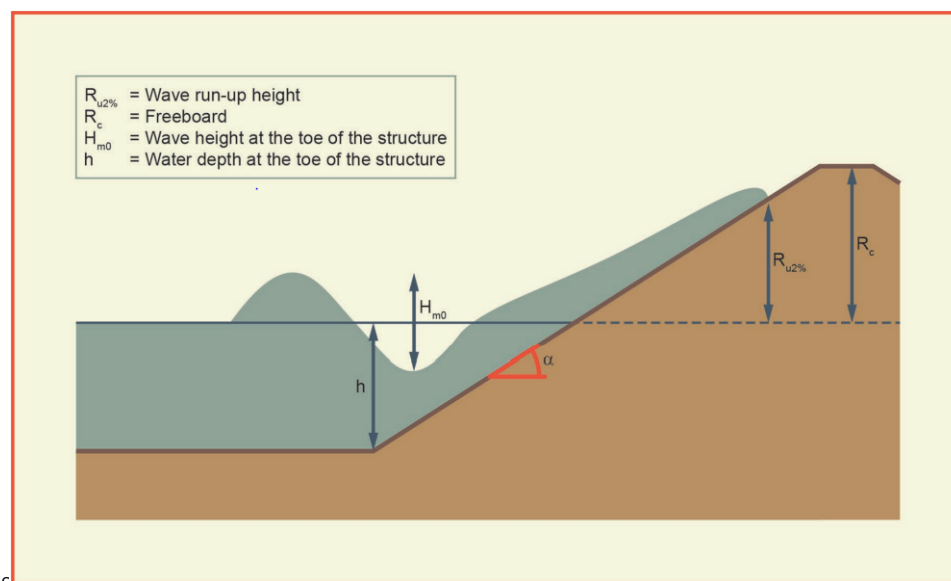
3.2.1 Metodik

Bølgeoverskyllet beregnes ifølge EurOtop Formel (5.12) for bølgeoverskyl for et simpelt dige /B11/:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = \frac{0.026}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_{\beta} * \xi_{m-1.0} * \exp \left[- \left(2.5 \frac{R_c}{\xi_{m-1.0} * H_{m0} * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_{\beta} * \gamma_v} \right)^{1.3} \right],$$

hvor:

- q : bølgeoverskyllet [m³/l/s]
- H_{m0} : bølgehøjden [m]
- α : digehældning i grader dvs. 1:3 = 18.43°
- γ_{β} : indflydelsesfaktor for bølger med vinkel, $\gamma_{\beta} = 1 - 0.0033 * \beta$
- β : bølgevinkel
- $\xi_{m-1.0}$: "breaker" parameter til at fastlægge om bølgerne bryder eller ej når de rammer anlægget. Afhænger af anlæggets hældning, bølgehøjde og -længde
- R_c : crest freeboard
- $\gamma_b, \gamma_f, \gamma_v$ er parametre der anvendes hvis der er tale om hhv. volde, ru elementer på hældningen og hvis der er en væg ved enden af diget. Da dette ikke er relevant for i det omtalte anlæg, sættes disse parametre = 1 (ingen indflydelse)



Figur 3-1: Tværsnit af dige med crest freeboard (R_c), bølgehøjde (H_{m0}), digehældning og vandstand (h) fra EurOtop ref. /B11/.

For hver bølgehøjde bestemmes et *crest freeboard* (R_c), se Figur 3-1, så bølgeoverskyllet ikke overstiger det maksimalt acceptable bølgeoverskyl. Derefter bestemmes den endelige digehøjde ved at summe R_c -værdien med det fastlagte designvandspejlet i kote +2,5 m (se afsnit 3.2.3).

3.2.2 Acceptabelt bølgeoverskyl

Bølgeoverskyl af kystbeskyttelses anlægget i forbindelse med stormflodshændelser kan give skader i området bag anlægget, hvis overskyllet er for stort. Derfor estimeres det acceptable bølgeoverskyl, på

baggrund af bølgehøjde, tæthed til bygninger, terræn, mv. Ydermere, kan selve kystbeskyttelses anlægget tage skade af for stort overskyl og dette skal derfor også tages i betragtning når man fastsætter et acceptabelt bølgeoverskyl.

Generelt gældende for traditionelle diger, vil bølgerne, der skyller over digekronen, løbe relativt glat over diget pga. den relativt lille hældning, hvilket begrænser faren for mennesker, der færdes i umiddelbar nærhed af diget. I det aktuelle tilfælde er der ikke tætliggende bygninger eller andet kritisk bag diget, der kan rammes af et overskyl. Derfor er det primært stabiliteten af selve digeanlægget, i tillæg til sikkerheden for personfærdsel bag diget, der bestemmer det acceptable bølgeoverskyl.

I Tabel 3-2 (ref. /B11/) opsummeres skader på forskellige typer diger samt det acceptable overskyl for forskellige bølgehøjder. Da bølgehøjden af bølgerne, der rammer det aktuelle dige, er mindre end 1 m, anvendes på denne baggrund et acceptabelt bølgeoverskyl på 10 l/s/m.

Tabel 3-2: Skadestabel på for diger jf. /B11/.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V_{max} (l per m)
Rubble mound breakwaters; $H_{m0} > 5$ m; no damage	1	2,000-3,000
Rubble mound breakwaters; $H_{m0} > 5$ m; rear side designed for wave overtopping	5-10	10,000-20,000
Grass covered crest and landward slope; maintained and closed grass cover; $H_{m0} = 1 - 3$ m	5	2,000-3,000
Grass covered crest and landward slope; not maintained grass cover, open spots, moss, bare patches; $H_{m0} = 0.5 - 3$ m	0.1	500
Grass covered crest and landward slope; $H_{m0} < 1$ m	5-10	500
Grass covered crest and landward slope; $H_{m0} < 0.3$ m	No limit	No limit

For portanlægget fastsættes det acceptable overskyl på baggrund af, at der ikke ønskes tilstrømning af vand til havnebassinet, ud over tilstrømningen fra de pumpestationer, der har udløb til havnen, for at begrænse behovet for at skulle pumpe vand ud fra havnebassinet under stormflod. Således er det acceptable bølgeoverskyl fastsat til 0,01 l/s/m, hvilket i praksis betyder at der ikke sker overskyl til havnebassinet fra porten. Dette er et meget restriktivt krav til bølgeoverskyllet, men giver sammen med det forøgede designvandspejl for porten, en sikkerhed i forhold til yderligere accelererende klimaforandringer og deraf følgende behov for at forøge højden af de etablerede sikringskonstruktioner.

Det er således tidligere vurderet, at meromkostningen ved at udføre portanlægget med et designvandstands niveau i +3,17 m i modsætning til +2,5 m andrager ca. 5% af de totale omkostninger. Dette er en meget beskedne meromkostning sammenlignet med, at en ny stålport forventeligt vil koste op mod 100 mio. kr. og hertil kommer omkostninger til forstærkning og forhøjelse af landanlæg mv.

3.2.3 Fastlæggelse af bølgetillæg til højde af sikringskonstruktioner

I Tabel 3-3: ses de beregnede nødvendige digehøjder for tilsvarende estimeret bølgehøjde (iht Tabel 3-1 for to overskylsscenarioer på hhv. 1 l/s/m og 10 l/s/m og for forskellige returperioder af bølgeforholdene.

Tabel 3-3: Estimering af nødvendig digehøjde på jf. /B11/ for to overskylscenarier.

Hvis	Bølgehøjde foran dige [m]	Nødvendig digehøjde ved overskyl på maks. 1 l/s/m [kote m]	Nødvendig digehøjde ved overskyl på maks. 10 l/s/m [kote m]
1	0,42	2,97	2,73
5	0,49	3,06	2,79
10	0,57	3,15	2,86
50	0,62	3,23	2,91
100	0,67	3,26	2,94

Ifølge EurOtops skadestabel (Tabel 3-2), og på baggrund af de estimerede bølgehøjder (< 1 m), vurderes det at et græsdækket dige kan tolerere op til 10 l/m/s overskyl. Der fastlægges dermed at en sikringshøjde (digetopkote) på 2,80 m (afrundet) er tilstrækkelig for beskyttelse mod stormflods vandstand i +2,50 m (designvandspejlet) og med tillæg for et tilsvarende bølgetillæg for en 5 års returperiode (se afsnit 3.1). Det anbefales dermed at digets topkote placeres i kote +2,80 m.

3.3 Sikringshøjde for portanlægget

Det er besluttet, at det samlede portanlæg skal udføres med en større sikkerhed mod overskridelse af sikringsniveauet end det nordlige dige og dermed tilsluttende landløsning. Det skyldes, at omkostningerne til en evt. fremtidig forhøjelse af skydeporten og tilhørende spunsdæmninger, portkammer, anslagskonstruktion mv. vil blive meget større end de meromkostninger, der er forbundet med at etablere det samlede portanlæg med en højere sikringshøjde ved anlæggelsen.

Designvandspejlsniveauet for skydeporten og tilhørende anlægskonstruktioner er derfor fastsat til +3,17 m DVR90, jf afsnit 2.3.. Dertil skal således lægges et bølgetillæg der defineres i de følgende afsnit.

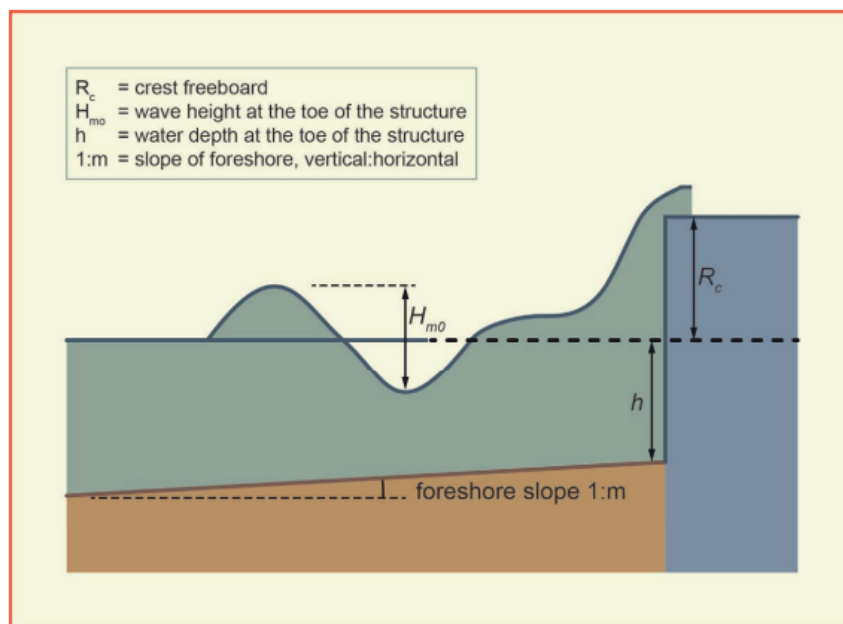
3.3.1 Metodik og beregnet bølgeoverskyl

For at kunne bestemme sikringshøjden for portanlægget, er der foretaget beregninger for bølgeoverskyllet, på baggrund af de estimerede bølgehøjder foran anlægget (se Figur 3-2). Overskyllet ved portanlægget er beregnet ud fra EurOtop Formel (7.2) for lodrette vægge /B11/..:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0.047 * \exp \left[- \left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right],$$

hvor:

- q: bølgeoverskyllet [m/l/s]
- H_{m0} : bølgehøjden [m]
- R_c : crest freeboard



Figur 3-2: Tværsnit af dige med crest freeboard (R_c), bølgehøjde (H_{m0}), digehældning og vandstand (h) fra EurOtop ref. /B11/.

På baggrund af de estimerede bølgehøjder (se Tabel 3-1) udregnes bølgeoverskyllet for en R_c -kote på +4,00 m. De beregnede overskylsmængder kan ses i Tabel 3-4.

Tabel 3-4: Estimering af bølgeoverskyl ved portanlægget på jf. /B11/ for estimerede bølgehøjder.

Returperiode [år]	Bølgehøjde foran port [m]	Overskyl af portanlæg [l/s/m]
1	0,42	0,00
5	0,49	0,00
10	0,57	0,00
50	0,62	0,01
100	0,67	0,01

Det kan ses af tabellen, at et portanlæg med topniveau i kote +4,00 m vil kunne overholde det stillede krav om en acceptabelt overskyl på 0,01 l/s/m. Portanlægget udføres dermed med en sikringshøjde i +4,00 m for at imødegå evt. bølgeoverskyl af porten

3.4 Sammenfatning af højder for sikringskonstruktioner

I Tabel 3-5 ses de besluttede sikringshøjder (designvandspejl + bølgetillæg) for hhv. land- og portanlægget samt de tilsvarende designvandspejl og overskylsmængder. Det er Rambølls anbefaling at der i det videre projekt anvendes disse sikringshøjder, for at sikre et fremtidssikret og robust design af konstruktionerne.

Tabel 3-5: Fastlagt sikringshøjde for land- og portanlægget med tilsvarende designvandspejl og forventet overskyl.

	Sikringshøjde [m]	Designvandspejl [m]	Beregnet bølgeoverskyl [l/s/m]
Landanlæg	2,80	2,50	10
Portanlæg	4,00	3,17	0,01

4 Lukning af højvandsport og tilstrømning til havnebassin

Når højvandsporten lukkes i forbindelse med højvandshændelser i fjorden, kan tilstrømning til havnebassinet fra omgivende bagland ikke ledes videre ud til havet. Dermed kan der ske en opstuvning af vand i havnen som følge af portlukningen. En række pumpestationer leder vand fra baglandet til havnen og Indre Fjord. Oplandet til pumpestationerne kan deles ind i et hydrologisk opland og et regnvandskloakeret opland.

Nedbør der falder i det hydrologiske opland, vil nå pumpestationerne med en forsinkelse på grund af forskellige hydrologiske processer, og afstrømningen fra det hydrologiske opland er derfor væsentlig mere jævn end de enkelte nedbørshændelser. Maksimumtilstrømning til pumpestationerne fra det hydrologiske opland vil typisk være som følge af en længerevarende periode med mange på hinanden følgende regnhændelser. I modsætning dertil, bliver nedbør der falder i det regnvandskloakerede opland ledt direkte til pumpestationerne, og vil således kun være relevant, hvis der er tidsmæssigt sammenfald mellem nedbørshændelsen og en stormflodshændelse der medfører en lukket højvandsport. Maksimumafstrømningen fra det regnvandskloakerede opland vil ske i forbindelse med ekstremregn.

Da højvandsporten og diger etableres for at beskytte mod en vandstand på +2,5 m svarende til en fremtidig 100-års hændelse (se Tabel 2-3), forudsættes det, at den samlede kombination af portlukningen og tilstrømning af bagvand også afgrænses til en returperiode på 100 år.

Der er ikke fundet nogen direkte korrelation mellem regnhændelser og stormflodshændelser på baggrund af indhentede vandstands- og regndata fra hhv. Rødby og Bagenkop. Endvidere er det angivet i, ref. /B7/, at der er fundet at være en årtidsbestemt forskel i hvornår hændelserne forekommer, så selv kombinationen af en 1 års vandstand og en 1 års regnhændelse vil have en returperiode væsentlig længere end 100 år (angivet til 1700 år i ref. /B7/). Der ses således bort fra kombinationer af en ekstrem vandstandshændelse og en ekstrem regnhændelse.

På grund af at afstrømningen fra de hydrologiske oplande er af mere vedvarende karakter end regnhændelserne i sig selv, er det derimod en rimelig antagelse at en 100 års vandstandshændelse og en vintermiddelfafstrømning fra det hydrologiske opland giver en samlet 100-års hændelse (på grund af årtidsmæssigt sammenfald). Endvidere er det i ref. /B7/ angivet, at kombinationen af en 1 års vandstand og 2 års afstrømning (fra hydrologisk opland) vil have en returperiode på 70 år, mens kombinationen af en 5 års vandstand og 2 års afstrømning (fra hydrologisk opland) vil have en returperiode på 350 år.

Selvom det er usandsynligt at der er sammenfald mellem ekstrem vandstand og ekstrem regn, er det undersøgt i afsnit 4.1, hvor stor afstrømningen er fra de regnvandskloakerede områder i forbindelse med mere hyppige regnhændelser, indenfor den samlede returperiode på 100 år.

På baggrund af ovenstående er der opstillet de følgende scenarier (Tabel 4-1), med en returperiode på omkring 100 år, hvor bagvandet skal kunne håndteres, så der ikke sker en oversvømmelse som følge af tilstrømning af bagvand. De opstillede scenarier er primært baseret på, ref. /B7/, hvor der er givet en analyse af sammenfald af statistiske hændelser, samt analysen af regn på de regnvandskloakerede områder i afsnit 4.1.2.

Tabel 4-1: Scenarier for sammenfald af vandstandshændelser og afstrømning fra hhv. det hydrologiske opland og et regnvandskloakeret opland jf. /B7/.

Scenarie	Vandstand	Afstrømning fra hydrologisk opland	Afstrømning fra regnvandskloakeret opland
1	100-års hændelse	Vintermiddel	-
2	10 års hændelse	Vintermiddel	Døgnmiddelnedbør med 10% overskridelsessandsynlighed
3	5 års hændelse	2 års hændelse	-

For analysen af bagvandets betydning er selve maksimumvandspejlet under hændelsen af mindre betydning, idet det er varigheden af portlukningen, der er afgørende for opstuvning af bagvand.

4.1 Tilstrømning til havnebassin

Et større opland afvander til havnen og er tidligere studeret af COWI, ref. /B7/. Området har et relativt stort opland (+15.000 ha), hvorfor håndtering af bagvandet er en central problemstilling ved højvande, som ovenfor beskrevet.

De største dele af oplandet er relateret til vandløbene Ryde Å og Halsted Å, der har udløb til Indre Fjord via to pumpestationer. Fokus har således tidligere været, om der er tilstrækkelige volumener til rådighed i relation til vandløbene Ryde Å og Halsted Ås afstrømninger til Indrefjord, som på nuværende tidspunkt afskæres mod havnen ved Nybro i +0,82 m DVR90, ref. /B7/. Magasinet til oplagring af regnvand og drænvand består således af to dele, havnen og Indrefjord, som er forbundet via slusen ved Nybro. Vandet fra Indrefjord kan således kun reguleres igennem stemmeværket i Nybro slusen, når vandstanden i havnen er lavere end i Indrefjord. I relation til nærværende projekt er det aftalt med Lolland Kommune, at forholdene vedrørende afstrømning fra Indrefjorden til havnen via slusen ved Nybro skal fastholdes så afstrømning er mulig op til højvande i kote +0,82 m. Det betyder, at der fortsat under højvande større end +0,82 m ikke kan strømme vand fra Indrefjorden til havnen, ligesom det er tilfældet i dag.

Tidligere studier (ref. /B7/) indikerer, at de indre diger i relation til Indrefjord vil blive oversvømmet, hvis vandstandene er højere end kote +0,82 m i havnen, hvorfor pumpestationerne Avnede Strand (Halsted Å) og Ryde Å stoppes umiddelbart før denne vandstand nås, så oversvømmelser fra Indrefjord undgås. Der kan dog ligge betydelige volumener vand opstrøms disse pumpestationer med udgangspunkt i Indrefjord-oplandet.

Da pumpestationerne Avnede Strand (Halsted Å) og Ryde Å stoppes i forbindelse med højvande over kote +0,82 m (og der samtidigt ikke afledes vand fra Indrefjord til havnen), ses der i nærværende projekt ikke på afstrømningen fra oplandene til disse to pumpestationer, men udelukkende på afstrømning direkte til havnen. Derfor er det pumpestationerne ved Rosnæsvej/Marienlystvej, Byfogedsøen, Havnegade 19, Havnegade 43, Havnegade 61 og Vingevej (se ref. /B7/), som afvander direkte til havnens vanddækkede areal bag højvandsporten, der indgår i bestemmelsen af bagvandsmængderne. For disse pumpestationer er det regnvandskloakerede opland i henhold til

spildevandsplanen opgjort til ca. 200 ha, ref. /B7/. Afstrømningen fra de hydrologiske oplande er ca. 1000 ha.

I det følgende er afstrømningen til disse oplande sammenfattet.

4.1.1 Afstrømning fra hydrologiske oplande

Afstrømningen fra det hydrologiske opland estimeres typisk på baggrund af arealspecifikke afstrømningsværdier, typisk bestemt ud fra målinger i vandløb i oplandet, der skaleres i forhold til det aktuelle oplandsareal.

Oplandet til havnen ekskluderet den del af oplandet der strømmer til havnen via Indrefjorden, er på ca. 1000 ha, og afstrømningen er angivet i Tabel 4-2. Den arealspecifikke afstrømning er bestemt på baggrund af ref. /B7/.

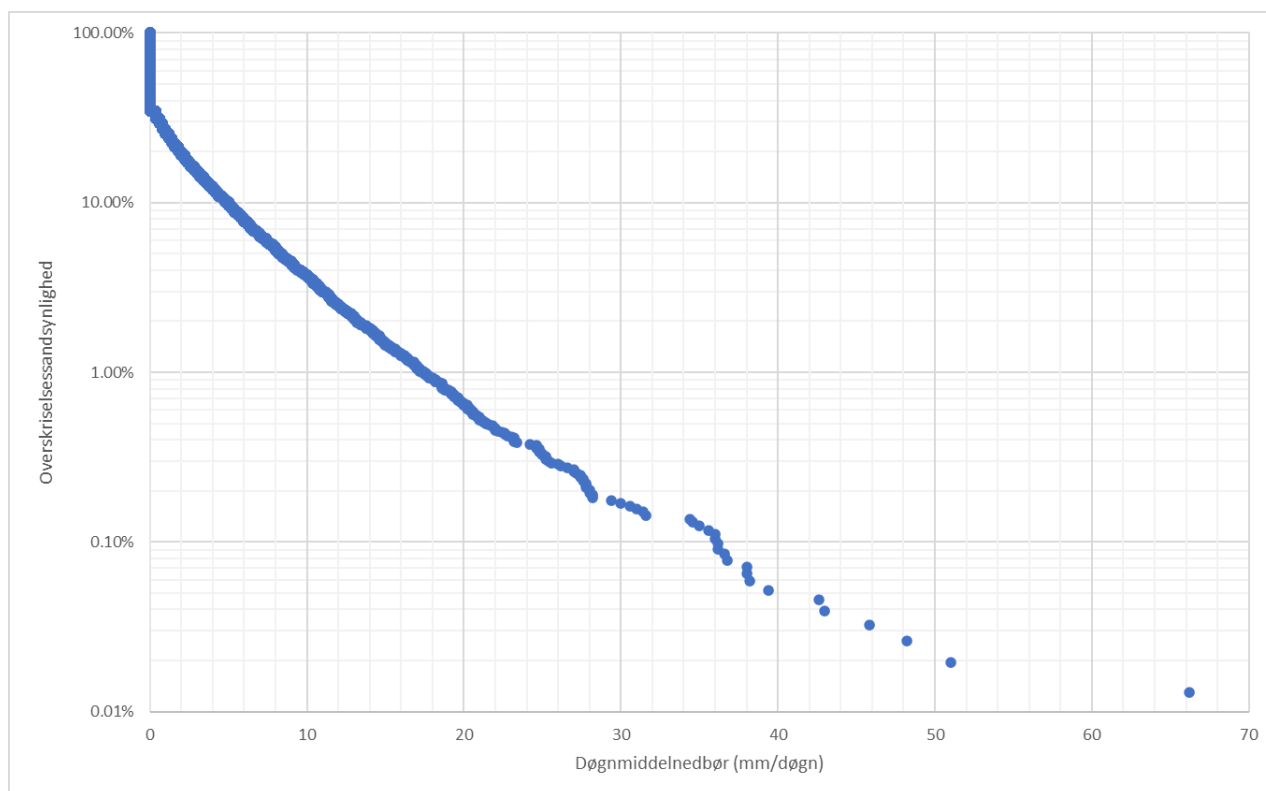
Tabel 4-2: Afstrømning fra hydrologisk opland fra pumpestationer med udløb direkte til havnen.

Hændelse	Areal specifik afstrømning [l/s/ha]	Oplandsareal [ha]	Afstrømning [m ³ /s]
Vintermiddel	0,11	1000	0,11
2 års hændelse	0,55	1000	0,55

4.1.2 Afstrømning fra regnvandskloakerede områder

Hvis der falder nedbør på de befæstede arealer i de regnvandskloakerede områder mens højvandsporten er lukket, vil nedbøren blive ledt videre til havnebassinet. Nedbørsmængderne og den deraf følgende tilstrømning til havnen, er undersøgt på baggrund af en regntidsserie for perioden 1979-2020.

Det er antaget at en stormflodshændelse har et døgn varighed (se afsnit 4.3) og at nedbøren indenfor et døgn dermed er relevant, for på en enkelt måde at kvantificere de relevante vandmængder. På baggrund af nedbørstidsserien er der beregnet en tidsserie af døgnmiddelnedbør for perioden 1979-2020 og disse er rangeret i faldende rækkefølge for at beskrive overskridelsessandsynligheden for samlet nedbør i et givent døgn. Overskridelsessandsynligheden kan ses i Figur 4-1.



Figur 4-1: Overskridelsessandsynlighed for døgnnedbør.

På baggrund af dette er den samlede afstrømning til havnen fra det regnvandskloakerede opland estimeret. Det er konservativt antaget at alt nedbør ledes til havnen, og at der således er en befæstelsesgrad på 100%. Hele oplandsarealet af det regnvandskloakerede opland er derfor anvendt til beregning af den samlede afstrømning. Dette giver en øvre grænse for afstrømningen fra det regnvandskloakerede opland.

Tabel 4-3: Afstrømning til havnen fra regnvandskloakeret opland, under antagelse af befæstelsesgrad på 100%.

Overskridelsessandsynlighed	Nedbør [mm/døgn]	Oplandsareal [ha]	Afstrømning [m ³ /s]
50%	0	200	0,00
20%	2	200	0,05
10%	5	200	0,12
5%	8	200	0,20
1%	17	200	0,42

4.2 Kombineret højvande og afstrømning - samlet

Som beskrevet i starten af Afsnit 4 er det pga. hændelsernes årstidsmæssige sammenfald antaget, at en stormflodshændelse med 100 års returperiode kombineret med vintermiddelfafstrømning fra det hydrologiske opland til havnen, svarer til en samlet 100 års hændelse (hvilket også er gældende for returperioder på 50 år, 20 år, mv.). For det regnvandskloakerede opland er det kun regn der falder samtidigt med at porten er lukket, der skal tages i regning, og afstrømningen fra disse områder afhænger dermed af om det regner på det pågældende tidspunkt. Det er i det følgende derfor estimeret,

hvor meget direkte regnvandstilstrømning fra det regnvandskloakerede opland der skal medtages i tillæg til vintermiddelfafstrømningen når porten er lukket pga. af stormflod.

Idet stormflodshændelser og nedbørshændelserne antages at være statistisk uafhængige, er den samlede sandsynlighed for at nedbøren overskrider en given værdi, under en given stormflodshændelse beregnet som produktet af de to sandsynligheder (sandsynlighed for at stormflodshændelsen indtræffer en given dag x sandsynlighed for at regnhændelsen indtræffer en given dag). Dermed kan der gives et estimat på hvilken nedbør der skal tages i regning i forbindelse med stormflodshændelser med forskellig sandsynlighed, så den samlede sandsynlighed holdes inden for en returperiode på 100 år. Dette er vist i nedenstående Tabel 4-4 sammenholdt med en vintermiddelfafstrømning fra det hydrologiske opland.

Tabel 4-4: Afstrømning fra regnvandskloakeret opland der skal medtages i tillæg til vintermiddelfafstrømningen.

Returperiode for vandstandshændelse	Afstrømning fra regnvandskloakeret opland der giver en samlet sandsynlighed svarende til en 100 års returperiode (m ³ /s)	Vintermiddelfafstrømning fra hydrologisk opland (m ³ /s)
100 år	0,00	0,11
50 år	0,00	0,11
20 år	0,05	0,11
10 år	0,12	0,11
5 år	0,20	0,11
1 år	0,42	0,11

Simplificeret kan det forudsættes, at der i de listede vandstandshændelser, ud over afstrømningen fra de regnvandskloakerede områder, skal medtages vintermiddelfafstrømning fra det hydrologiske opland. Den ovenstående analyse viser (Tabel 4-4), for kombinationen af højvande, afstrømning fra regnvandskloakeret opland og afstrømning fra hydrologisk opland, at den samlede tilstrømning til havnen kan blive på op til 0,53 m³/s, hvilket kan ske i forbindelse med en vandstandshændelse med en returperiode på 1 år. For de lave returperioder for vandstandshændelserne (1 år og 5 år), er den samlede afstrømning fra det regnvandskloakerede og det hydrologiske (vintermiddel) opland dermed mindre end 2 års maksimum for afstrømningen for det hydrologiske opland alene (2 års afstrømning på 0,55 m³/s, se Tabel 4-2).

Idet en kombineret hændelse af 5 års vandstand og 2 års afstrømning fra det hydrologiske opland medtages som et scenarie, der antages at have en samlet sandsynlighed svarende til omkring en 100 års hændelse, (se Tabel 4-1) vil de ovenfor nævnte afstrømningsværdier ikke give yderligere afstrømning for en 1 og 5 års vandstandshændelse, end den kombinerede 5 års vandstand og 2 års hydrologisk afstrømning. Der kan derfor ses bort fra disse.

Da en 10 års vandstandshændelse principielt set kan resultere i en længere lukketid end 1 og 5 års hændelsen, kan kombinationen af 10 års vandstandshændelse, afstrømning fra det regnvandskloakerede opland med 10% overskridelse samt vintermiddelfafstrømning fra det hydrologiske opland, godt være kritisk for opstuvningen i havnebassinet. Dermed fås følgende relevante scenarier for kombineret vandstand og tilstrømning til havnebassin, se Tabel 4-5.

Tabel 4-5: Scenarier for kombineret vandstand og afstrømning med samlet sandsynlighed svarende til 100-års hændelse

Returperiode for vandstandshændelse	Afstrømning fra regnvandskloakeret opland (m ³ /s)	Afstrømning fra hydrologisk opland (m ³ /s)	Samlet afstrømning til havnen (m ³ /s)
100 år	0,00	0,11	0,11
10 år	0,12	0,11	0,23
5 år	0,00	0,55	0,55

Reelt betyder vandstandshændelserne kun noget for lukketiden af højvandsporten. Da der ikke kan opstilles en klar sammenhæng mellem returperiode for vandstandshændelsen og varighed, og dermed lukketid for højvandsporten, anvendes konservativt 2 års afstrømningen fra det hydrologiske opland i vurderingen af opstuvningen i havnen i forbindelse med stormflod og lukket højvandsport (se Tabel 4-2).

I fremtiden forventes nedbøren at blive øget som følge af klimaforandringer og med dette følger en øget vandløbsafstrømning. På baggrund af ref. /B12/, anbefales det at der anvendes faktor 1,64 på afstrømningen til estimering af fremtidige afstrømningsmængder. Dermed fås følgende dimensionerende afstrømning til havnen, se Tabel 4-6.

Tabel 4-6: Dimensionerende afstrømning nu og i slutningen af århundredet

Returperiode for afstrømningshændelse	Afstrømning fra hydrologisk opland med nuværende klima (m ³ /s)	Afstrømning fra hydrologisk opland i slutningen af århundredet (m ³ /s)
2 år	0,55	0,90

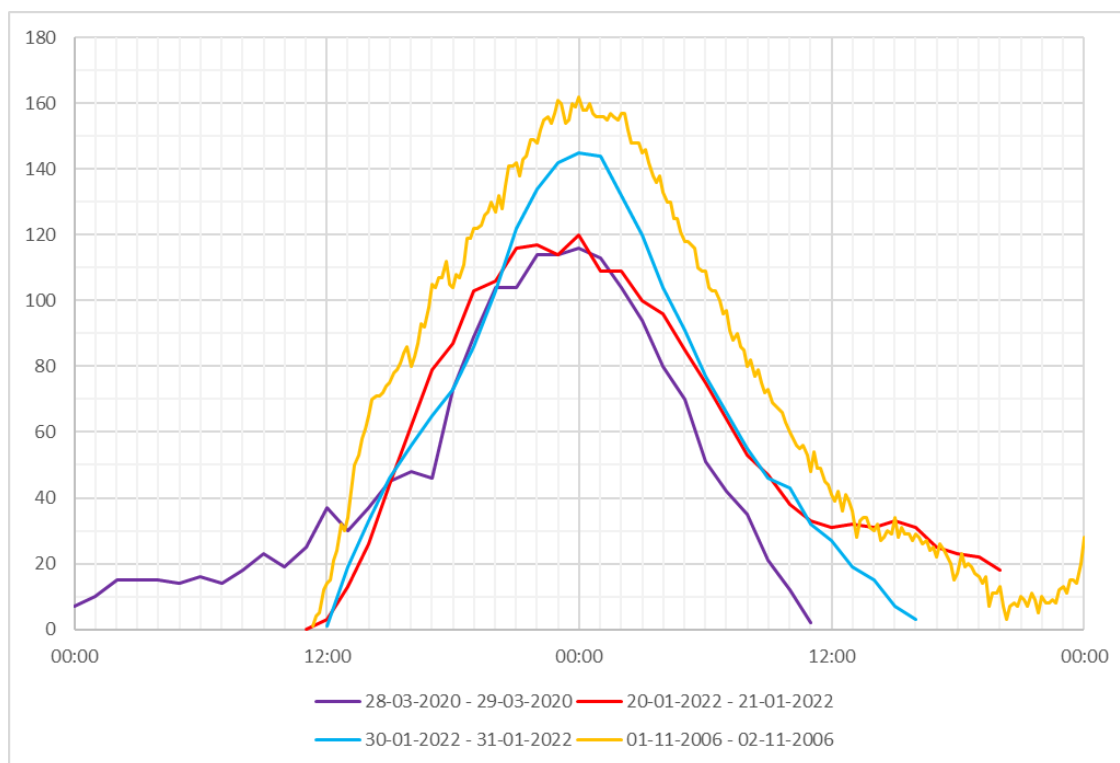
4.3 Lukkevarighed

Varigheden af de enkelte portlukninger er afhængig af det vejrsystem, der giver anledning til højvandet og kan ikke direkte relateres til højeste vandstand under hændelsen. Der er således ikke et datagrundlag for at kunne angive varigheden af højvandet som funktion af vandstandskote eller returperiode for hændelsen.

Generelt er det antaget, at en typisk størrelsesorden for varigheden af en stormflodshændelse er omkring et døgn fra vandstanden, begynder at stige til vandstanden er nede i normalt niveau igen. Dette betyder ikke, at porten skal være lukket i et døgn, da porten først behøver at blive lukket, når vandstanden når et vist niveau. Men da middelvandspejlet forventes at øges i fremtiden, vil tiden, hvor porten skal være lukket for samme stormflodshændelse, stige, alene pga. at porten skal lukkes tidligere i stormflodsforløbet.

Eksempler på højvandshændelser baseret på målerne i Nakskov og Rødby er givet i Figur 4-2. I Nakskov er der målinger fra perioden 2019-2022, hvor der er identificeret 3 hændelser over 110 cm. Den seneste større hændelse fra 2006 er baseret på målingerne fra Rødby.

Ved et lukkeniveau på 110 cm vil der i de viste hændelser være behov for at lukke porten i ca. 9-12 timer for de to største hændelser og i 4-6 timer for de to mindste hændelser. Da der både kan være længerevarende hændelser som følge af andre vejrsystemer og som følge af ovennævnte effekt af stigende middelvandspejl, vurderes der at kunne være behov for at lukke porten i op til 24 timer, alt efter lukkeniveau.

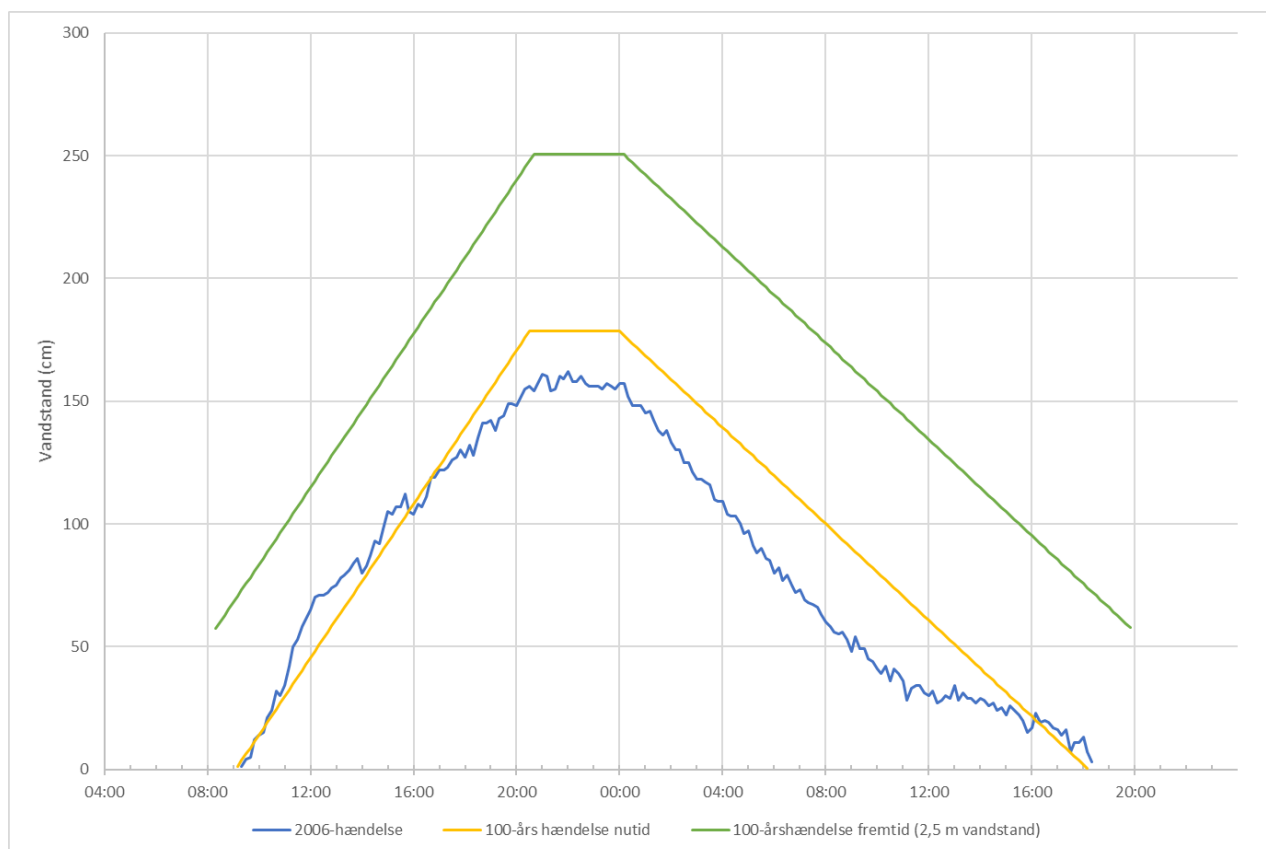


Figur 4-2: Højvandshændelser fra Nakskov samt 2006-hændelse fra Rødby til illustration af varigheder. Vandret akse angiver tiden i timer, mens lodret akse angiver vandstanden i cm.

Den største og længste hændelse på Figur 4-2, som er fra 2006 i Rødby (gul graf), har en samlet længde på ca. 33 timer og en varighed af maxvandstanden på ca. 3 timer.

Kystdirektoratet har, med udgangspunkt i en historisk typehændelse for en storm svarende til en 100-års hændelse, analyseret en varighed omkring 33 timer med et maksimum på 3,3 timer, ref. /B1/, hvilket stemmer overens med ovennævnte hændelse fra 2006 målt i Rødby.

For nærværende projekt er der opstillet en designstormflod, efter samme principper som er anvendt af Kystdirektoratet, ref. /B1/. Med udgangspunkt i 2006-stormen er en skalering foretaget for at få en typisk 100-årshændelse, således maksimum fastholdes til 3,3 timer og den totale hændelse har en varighed på 33 timer. Derefter er denne parallelforskuet til en topkote på 2,5 m. Dette er vist på Figur 4-3. Den fremkomne designstormflodshændelse er benyttet i de efterfølgende analyser i forhold til varighed af portlukning.



Figur 4-3: Stormflodsforløb for designstormflod – skalering med reference til november-2006-stormen

4.4 Lukkescenarier og -hyppighed af højvandsport

Lukningen af højvandsporten kan ske under forskellige forhold, afhængig af behov og prioriteringer. Flere lukkekriterier er således undersøgt, så der evt. kan korrigeres for længere perioder med regn inden stormflod, tilgængelighed mellem havnebassinerne og fjorden, ændringer i prognoser eller hvis problemer med lukning af højvandsporten skulle forsinke lukningsprocessen m.v. De valgte lukkeniveauer i forbindelse med et højvande til kote +2,5 m, der undersøges, er listet i Tabel 4-7.

Tabel 4-7: Undersøgte lukkeniveauer for vandstandene

Vandstand
[cm DVR90]
90
100
110
120
130

Der ønskes at lukke porten så sent som muligt grundet erhvervshavnstrafikken, men heller ikke senere end at der er det nødvendige magasinvolumen til afstrømning af regnvand. Lukkekriterier er tidligere undersøgt ved lavere vandstande, ref. /B8/. Her bemærkes det blandt andet, at hvis der lukkes inden +0,82 m, vil vand fra Indrefjord kunne afvande til havnen. Ved tidlig lukning af højvandsporten forringes muligheden for udpumpning fra bagland således ikke, ref. /B8/.

Med stigende middelhavvandstand, vil lukning af porten forekomme hyppigere i fremtiden end i dag. Middelvandstanden vil således i fremtiden ikke ligge i 0 m DVR90, men ca. +0,28 m DVR90 midt århundrede og +0,57 m DVR90 sidst i århundrede, jf. DMI's Klimaatlas og som beskrevet i Afsnit 2.1.

Den estimerede 'frie afstand' og magasinvolumen til rådighed for bagvand i havnen op til kajkote +1,50 m (oplyst som laveste kajkote bl.a. i ref. /B7/), er listet i Tabel 4-8. Arealet af det vanddækkede areal bag højvandssikringen er beregnet til 312.466 m². Det tilgængelige magasinvolumen i havnen, minimeres kraftigt under stigende lukkevandstand.

Tabel 4-8: Estimerede magasinvolumener op til nuværende kajanlæg i kote +150 cm.

Vandstand ved lukning af port [cm DVR90]	Forhold under blokeret adgang mellem havnen og fjorden	
	'Fri afstand' op til kote +1,50 [cm]	Magasinvolument op til +150 cm [m ³]
90	60	187.480
100	50	156.233
110	40	124.986
120	30	93.740
130	20	62.493

4.4.1 Lukkehyppighed

På nuværende tidspunkt varsler DMI i området ved forhøjet vandstand på +1,05 m (ift. reference periode 1981-2010). Dette indtræffer gennemsnitligt hvert år allerede i dag, men i fremtiden forventes det at indtræffe henholdsvis 6-70 gange årligt for RCP8.5-scenariet, afhængig af middel havvandstandens fremskrivning, se Tabel 4-9. Hyppigheden af denne varsling forventes at øges i takt med klimaforandringer.

Tabel 4-9: DMI-varsling for højvandshændelser i Nakskov. Ref. /B2/.

Vandstand	Forventet antal varslinger for højvande pr. år		
	Nu	2041-2070	2071-2100
+1,05 m	1	6	70

DMI estimerer ligeledes den samlede varighed af vandstandsvarslinger for højvande, hvilket vil stige signifikant med klimaændringerne, hvis nuværende varslingsvandstand fastholdes.

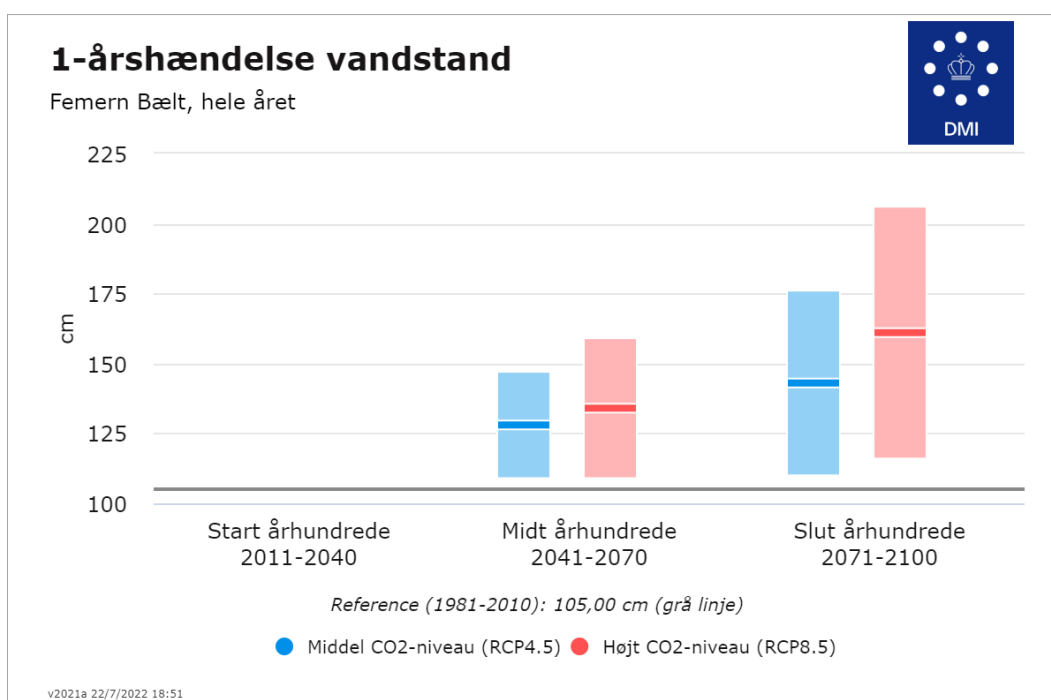
Tabel 4-10: DMI's samlede varighed af vandstandsvarslinger pr. år for højvandshændelser i Nakskov. Ref. /B2/.

Vandstand	Forventet varighed af vandstandsvarslinger pr. år		
	Nu	2041-2070	2071-2100
+1,05 m	4,2 timer	60 timer	800 timer

For de undersøgte lukkeniveauer, er den estimerede lukkehyppighed ikke beregnet. Lukkehyppigheden af højvandsporten vil for prognoser af højvande større end en skadeødelæggende hændelse, varsles. De kritiske områder langs kajen begynder oversvømmet i ca. kote +1,50, hvorfor prognoser med højvande, set i relationen til forventede afstrømning fra baglandet skal varsles, før en forventet lukning af højvandsporten foretages.

Antallet af lukninger er derfor svære at estimere, da en kombination af flere fænomener kan give vandstandsstigninger i havnen bag den lukkede port. Der skal derfor opsættes prognosekriterier i relation til et sæt lukkekriterier. Entydigt kan det dog konkluderes, at lukkehyppigheden stiger med stigende havspejl, og lukkehyppigheden kan kun reduceres ved etablering af yderligere foranstaltninger til at reducere bagvandsproblematikken i havnen.

Det kan yderligere bemærkes at højvandsporten på sigt ikke kun skal lukkes som følge af større højvandshændelser, men også ved mindre hyppige hændelser. En 1-års-vandstand, som ifølge DMI er estimeret til kote +1,05 m i dag (reference-periode 1981-2010), må forventes at stige til kote +1,34 m og kote +1,61 m i henholdsvis midt (2041-2070) og slut århundrede (2071-2100). Højvandsporten forventes således allerede nu at skulle lukke årligt i forbindelse med fremtidigt højvande, Tabel 4-9.



Figur 4-4: 1-års-vandstand for Femern Bælt, som omfatter Nakskov Fjord, til forskellige tidspunkter, ref. /B2/.

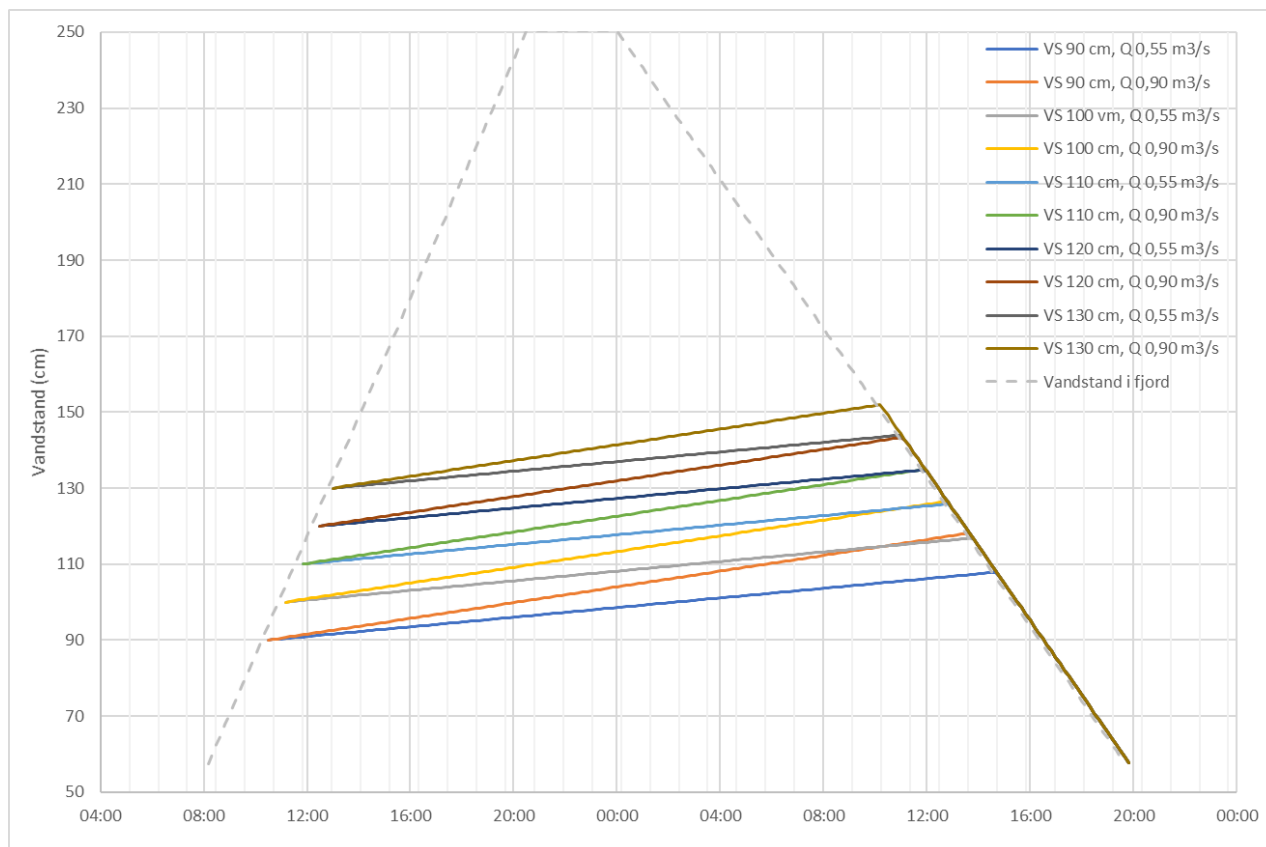
5 Bestemmelse af vandstandsstigninger i havnen ved lukket port

I det følgende er vandstandsstigningen med lukket port, som følge af nuværende og fremtidig afstrømning, bestemt som følge af designstormfloden ved forskellige lukkeniveauer for højvandsporten.

Designstormflodsforløbet er vist i Figur 4-3. Anvendt dimensionerende afstrømning til havnen er vist i Tabel 4-6. De undersøgte lukkeniveauer er vist i Tabel 4-7. Arealet af det vanddækkede areal bag højvandssikringen er beregnet til 312.466 m².

Stigningen af vandstanden i havnen er beregnet ud fra lukketiden, afstrømningen samt det vanddækkede areal (havnen), der modtager afstrømningen. Der er anvendt afstrømning for to forskellige klimascenarier (nuværende og fremtidigt iht. Tabel 4-6). For begge afstrømningsscenarier er den samme stormflodshændelse (designstormflodshændelse iht. Figur 4-3), med topniveau i kote +2,5

m blevet anvendt. For hvert scenarie er den tidlige stigning i vandstanden på denne måde beregnet, idet det forudsættes at højvandsporten lukkes når vandstanden i fjorden kommer over lukkevandstanden og åbnes igen når vandstanden i havnen og i fjorden bliver den samme. Efter portåbning antages vandstand i havn og fjord at være den samme. Resultaterne er vist i Figur 5-1 og er sammenfattet i Tabel 5-1.



Figur 5-1: Beregnede vandstandsstigninger i havnen for forskellige kombinationer af lukkevandstand og afstrømning.

Tabel 5-1: Beregnede vandstandsstigninger i havnen, som følge af afstrømning fra baglandet under stormflod med lukket højvandsport, til forskellige lukkeniveaukriterier.

Vandstand ved lukning af højvandsport [cm DVR90]	Klima	Afstrømning fra baglandet [m ³ /s]	Beregnet maksimum vandstand i havnen [cm]	Samlet lukketid under stormflodshændelsen [Timer]
90	Nuværende	0,55	108	28,2
	Slutning af århundredet	0,90	118	27,2
100	Nuværende	0,55	117	26,5
	Slutning af århundredet	0,90	126	25,5

110	Nuværende	0,55	126	25,0
	Slutning af århundredet	0,90	135	24,0
120	Nuværende	0,55	135	23,3
	Slutning af århundredet	0,90	143	22,3
130	Nuværende	0,55	144	22,0
	Slutning af århundredet	0,90	152	21,0

Som beskrevet i afsnit 4.4 er laveste kajkote i havnen angivet til 1,50 m DVR90, hvilket således er kritisk niveau for vandstanden. Denne ses af Tabel 5-1 at blive overskredet i det fremtidige afstrømningsscenarie ved en lukkevandstand i 130 cm. I øvrige scenarier er højeste vandstand i havnen under kote 1,50 m. Det vurderes dog, at der bør være 10 cm fribord mellem laveste kajkote og den beregnede største vandstandskote som sikkerhedsmargin. Med baggrund i dette anbefales at der som udgangspunkt anvendes en lukkevandstand i kote 1,20 m, og at dette evt. justeres i fremtiden som følge af den større afstrømning der forventes med tiden.

Det skal bemærkes, at forudsætningen for det ovenstående er, at der ikke strømmer vand fra Indrefjord til havnen, idet slusen ved Nybro holdes lukket, som beskrevet i afsnit 4.1.

6 Referencer

6.1 Rambøll projektreferencer

- /A1/ NSS-40-001 Nakskov Stormflodssikring – Design Basis for Anlægskonstruktioner, rev. 1.0, Rambøll, Juli 2022
- /A2/ 1100042783-002 Portløsning, rev. 2.0, Rambøll, 27. september 2020
- /A3/ NSS-402-001 Nakskov Stormflodssikring - MemoPreliminary wave, wind and current conditions for Nakskov storm surge protection, rev. 0.5, Rambøll, Juli 2022

6.2 Litteratur

- /B1/ Scenarier til oversvømmelsesmodellering – Risikoområde Sydlolland; Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektoratet; Oversvømmelsesdirektivet, december 2019 med revision af oktober 2020
- /B2/ DMI KlimaAtlas: Femern Bælt kyststrækning <https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimateatlas/?paramtype=sea&maptype=kyst>
- /B3/ Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København. Udarbejdet af COWI for Københavns Kommune, juni 2016
- /B4/ Byernes udfordring med havvandsstigning og stormflod. Udarbejdet af COWI for Realdania
- /B5/ DMI Kunderapport: Kommentering af rapportering "Designgrundlag for beskyttelse mod oversvømmelse af København" samt alternativ beregning af ekstremstatistik for stormfloder i Køge Bugt; 2017.
- /B6/ Shoreline Management Guidelines; DHI; Februar 2017

- /B7/ Pumpestationer og overfladevand i sammenhæng med højvandsbeskyttelse i Nakskov; COWI; December 2015
- /B8/ Stormflodssikring af Nakskov. COWI, December 2015
- /B9/ Indledende analyse af sammenhængen mellem ekstremnedbør og høj vandstand i havet omkring Lolland. Birgit Krogh Paludan, september 2014.
- /B10/ Regnrækker. Excel ark, version 4.2. Spildevandskomiteen.
- /B11/ EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com
- /B12/ [Klimaeffekter på hydrologi, afstrømning – klimaekstremvandføring. Hans Jørgen Henriksen, Martin Olsen og Lars Trolborg, GEUS. Naturstyrelsen, Februar 2013.](#)