

JUNI 2016
KØBENHAVNS KOMMUNE

DESIGNGRUNDLAG FOR BESKYTTELSE MOD OVERSVØMMELSE AF KØBENHAVN

TEKNISK UDREDNING

JUNI 2016
KØBENHAVNS KOMMUNE

DESIGNGRUNDLAG FOR BESKYTTELSE MOD OVERSVØMMELSE AF KØBENHAVN

TEKNISK UDREDNING

PROJEKTNR.

A076789

DOKUMENTNR.

A076789-hojvand-001

VERSION

0.7

UDGIVELSES DATO

2016-06-22

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

ABH, MOV,

KONTROLLERET

JIJ

GODKENDT

SNS

INDHOLD

1	Baggrund	7
2	Anbefaling og resume	8
2.1	Anbefaling	8
2.2	Resume	9
3	Karakteristika for Københavnsområdet	15
3.1	Topografi og byudvikling/opfyldning	15
3.2	Strømningsforhold omkring København	16
3.3	Højvande	16
3.4	Vandløb	17
3.5	Regn	17
3.6	Grundvand	17
4	Strømningsforhold	18
5	Højvandsstatistik	21
5.1	Data indsamling	21
5.2	Behandling af data	25
5.3	Metode	31
5.4	Udvikling i højvandsstatistik	46
5.5	Udvikling i havvandsstand	46
5.6	Samlet udvikling i højvandsstatistik	48
6	Øvrige forhold	50
6.1	Vandløb og regn	50
6.2	Sammenfald af ekstreme – højvande/regn	51
6.3	Grundvand	51

7	Illustrationer af udbredelse af udvalgte højvande	52
7.1	Beregningsmodel	53
7.2	Stormflod fra nord	57
7.3	Stormflod fra syd	61
7.4	Stormflodskoter for udvalgte lokaliteter	65
8	Økonomiske konsekvenser ved de udvalgte højvande	71
9	Diskussion af problemstilling og anbefaling	76
10	Referencer	85
11	Bilag 1. Kilde beskrivelser	87
11.1	National Archive	88
11.2	Eyewitness reports	93

1 Baggrund

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med udredningen i foråret 2016 om mulighederne for fremtidig deponering af overskudsjord i København, hvor det har været vigtigt at få et første og foreløbigt samlet overblik over truslen fra højvande i københavnsområdet og hvordan denne trussel vil udvikle sig. Udredningerne om højvande og havvandsstigninger kan ses som et supplement til Københavns Kommunes Klimatilpasningsplan. Rapporten kan danne baggrund for diskussioner og oplæg til hvor, hvordan og hvor meget forskellige interessenter i området ønsker at beskytte sig for at bevare eksisterende værdier og skabe nye værdier i forbindelse med sikringen mod højvande, for eksempel ved anvendelse af overskudsjord fra københavnsområdet. Målet er endvidere at medvirke til en koordineret indsats og sikring til ensartede niveauer i området.

Alle vandstande er til et roligt vandspejl uden bølger

Alle vandstande i denne rapport er vandstands niveauet uden bølgetillæg. Når der her tales om et sikringsniveau eller højvande til f.eks. 2,50 meter, er der således ikke tale om højden på et eventuelt dige, men om den maksimale højvandstand man skal sikre sig imod, under forudsætning af at der ikke er bølger (maksimal højvandsstand er den gennemsnitlige maksimale vandstand under et højvande, hvis vandet holdes i ro uden bølger). Ved dimensionering af diger, dæmninger, sluser mv. skal der derfor tillægges en højde, svarende til beskyttelse mod overskyld fra bølger mv.

2 anbefaling og resume

Denne rapport har til hovedformål at belyse den forventelige udvikling i højvande i området omkring København og vurdere skadesomfanget af udvalgte højvands-hændelser, under forudsætning af at der ikke ændres på arealanvendelsen eller højvandsbeskyttelsen af København. Rapporten er udarbejdet i forbindelse med vurderingerne om mulighederne for fremtidig deponering af overskudsjord, og skal ses som et supplement til Københavns kommunes klimatilpasningsplan.

2.1 anbefaling

Sikring mod et
1.000 års højvande

Umiddelbart foreslås at der nu, ud fra et økonomisk synspunkt, laves en sikring op til et højvande svarende til et højvande der forekommer ca. hvert 1.000 år i 2050 og at alle aktiviteter i området tager højde for en fremtidig sikring, svarende til et 1.000 års højvande, som det forventes at forekomme i år 2100.

En sådan sikring reducerer den nuværende årlige økonomiske risiko fra højvande fra syd fra ca. 23 mio. kr./år til kun ca. 4 mio. kr./år i år 2015. Risikoen fra syd vil dog stige til ca. 6 mio. kr./år frem til 2050, men ville være steget til ca. 35 mio. kr./år, hvis der ikke var foretaget en sikring mod højvande. Hvis der omkring år 2050 yderligere sikres op til niveauet for et 1.000 års højvande, som det forventes i år 2100, vil risikoen i frem til 2100 holdes under 10 mio. kr./år, mens risikoen vil udgøre ca. 200 mio. kr./år, hvis der ikke bliver gennemført nogen form for sikring mod højvande fra syd. Ses på højvande fra nord vil sikringen mod et 1.000 års højvande i 2100, kunne reducere risikoen til under 10 mio. kr./år frem til år 2100, mens risikoen ville udgøre ca. 675 mio. kr./år i år 2100, hvis der ikke bliver gennemført nogen form for sikring mod højvande fra nord.

Der bør disponeres med fleksible løsninger i forbindelse med alle planer og anlægsarbejder i området, så der tages højde for at sikringen skal øges yderligere i højden i fremtiden. Derved kan anlæggene gennem god planlægning integreres i by og natur så beskyttelsesplanlægningerne indgår som en naturlig del af byen/naturen. Sikringen bør i første omgang koncentrere sig om højvande fra syd, mens udførelsen af sikringen i den nordlige del kan forberedes og udføres løbende inden 2040, så man får imødegået den meget eksplosive stigning i trusselsbilledet fra højvande fra nord om få år.

Fifty-fifty sandsynlighed for at vi har skudt for højt eller for lavt

Niveauerne for sikringen kan tage udgangspunkt i de højvandstabeller, der er udarbejdet for de enkelte kyststækninger, og den hyppighed af oversvømmelse man vælger at sikre sig imod og på hvilket tidspunkt. Ved fastsættelse af koter for digekroner mv. skal der endvidere tages hensyn til en lang række andre faktorer, som sætninger, erosion, bølgepåvirkning mv. De udarbejdede højvandsstatistikker er middelværdier, hvor der er lige stor sandsynlighed for at koten er sat for lavt som for højt. Ønsker man en højere sandsynlighed end 50% for at sikringskoten er høj nok, kan der anvendes højvandsstatistikker, hvor kurven ligger højere og sandsynligheden for at vi ikke har bygget for lavt er f.eks. 80%.

Sikring til kote 270 cm i nord og 450 cm i syd.

Den anbefalede sikring mod et 1.000 års højvande svarer til vandstandskoterne i Tabel 2-1 for kyststrækningerne ved Nordhavn/Oceankaj og Avedøre Holme. Niveauerne for højden af højvandsbeskyttelse for kyststrækningen mellem de to stationer skal afpasses i henhold til de udarbejdede højvandsstatistikker for udvalgte punkter langs kysten.

Kote til 1.000 års højvande	År 2015 cm (DVR90)	År 2050 cm (DVR90)	År 2100 cm (DVR90)
Nordhavn/Oceankaj	180	205	270
Avedøre Holme	355	380	450

Tabel 2-1 Koten til et 1.000 års højvande som det i middel forventes i perioden frem til 2100 for to udvalgte kystpunkter i nord og syd

For Metroen har der været anvendt en sikring op til et 10.000 års højvande som det forventes i år 2100. I Tabel 2-2 er derfor angivet de omtrentlige koter for dette meget sjældne højvande, svarende til de beregnede for et 1.000 års højvande som angivet i Tabel 2-1.

Kote til 10.000 års højvande	År 2015 cm (DVR90)	År 2050 cm (DVR90)	År 2100 cm (DVR90)
Nordhavn/Oceankaj	260	290	355
Avedøre Holme	490	525	610

Tabel 2-2 Koten til et 10.000 års højvande som det i middel forventes i perioden frem til 2100 for to udvalgte kystpunkter i nord og syd

2.2 Resume

Største højvande fra syd.

Højvande som kommer fra nord og fra syd er meget forskellige i styrke. Højvande fra nord er mindst, da indsnævringen mellem Helsingør og Helsingborg begrænser mulighederne for at højvandene fra Kattegat kan nå København. Højvande fra syd er væsentlig højere. De kommer direkte fra Østersøen, hvor vandet presses op mod den sydlige del af København. Højvandet forstærkes af den lavvandede tær-

skel, der ligger mellem København og Malmø. Denne tærskel begrænser dog også højvandet i at brede sig til den nordlige del af København.

Smal havn og sluse giver stor forskel på vandstand i nord og syd

Vandgennemstrømningen gennem den smalle Københavns Havn er begrænset i forhold til gennemstrømningen gennem Øresund. Gennemstrømningen begrænses bl.a. af stemværket og slusen ved Sluseholmen ved de mindre højvande. Under kraftigt højvande kan der være over en meters forskel i vandstanden mellem den sydlige og nordlige del af havnen.

Ny bedre statistik

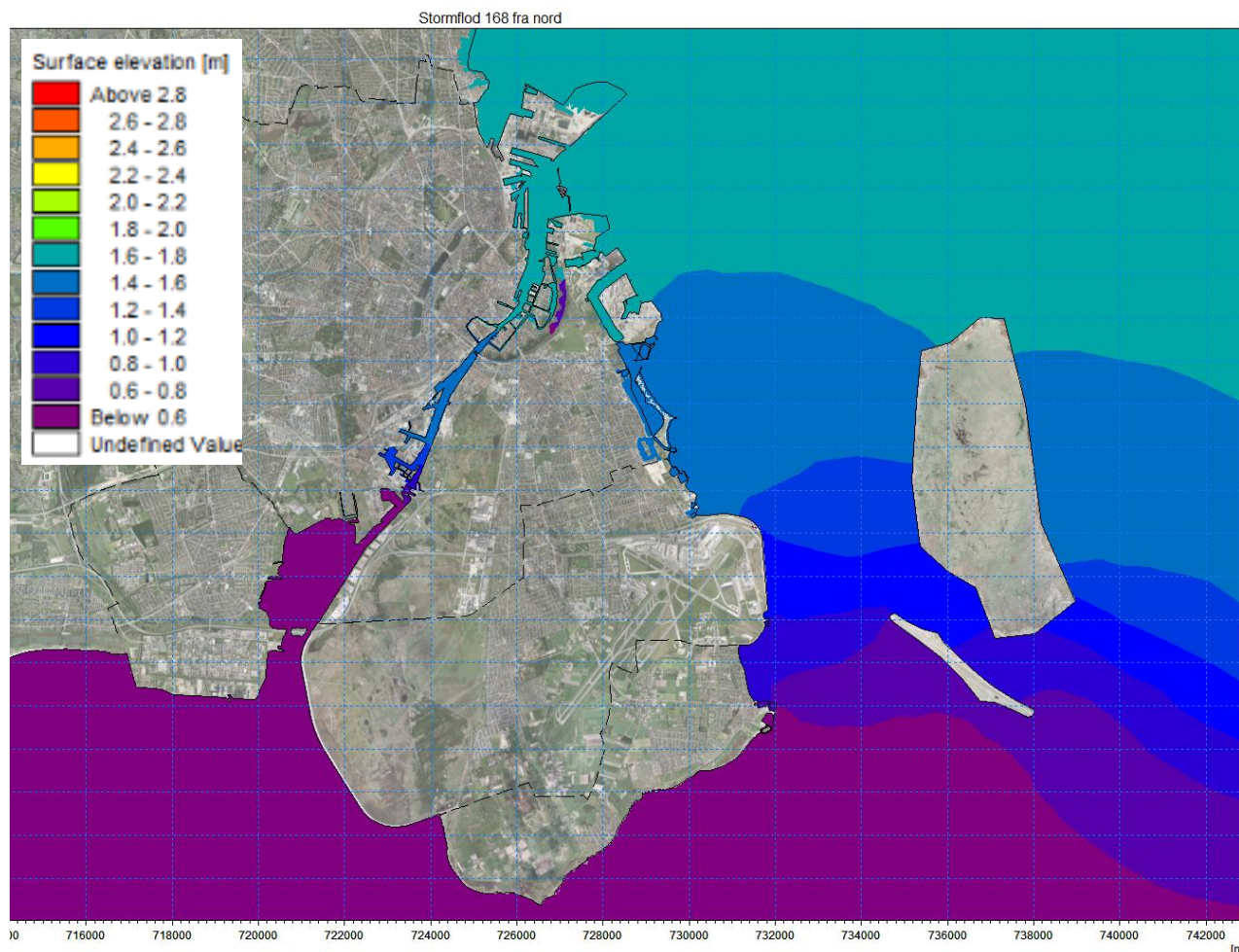
Den her udarbejdede højvandsstatistik er baseret på det meget omfattende udredningsarbejde som COWI har udført for Metroselskabet i 2015-16, hvor der er set på observerede højvande helt tilbage til år 1044. Se Figur 5-9 og Figur 5-10 for Køge og Ndr. Toldbod. Denne statistik viser lidt højere ekstreme vandstande for de helt sjældne højvande fra syd, end den tidligere statistik, da den længere tidsserie med ældre historiske observationer indeholder forholdsvis mange meget ekstreme hændelser, som ikke kan forudses ved anvendelse af den normale fordelingsfunktion ud fra en kort tidsserie med få ekstremer.

Klimaændringernes betydning

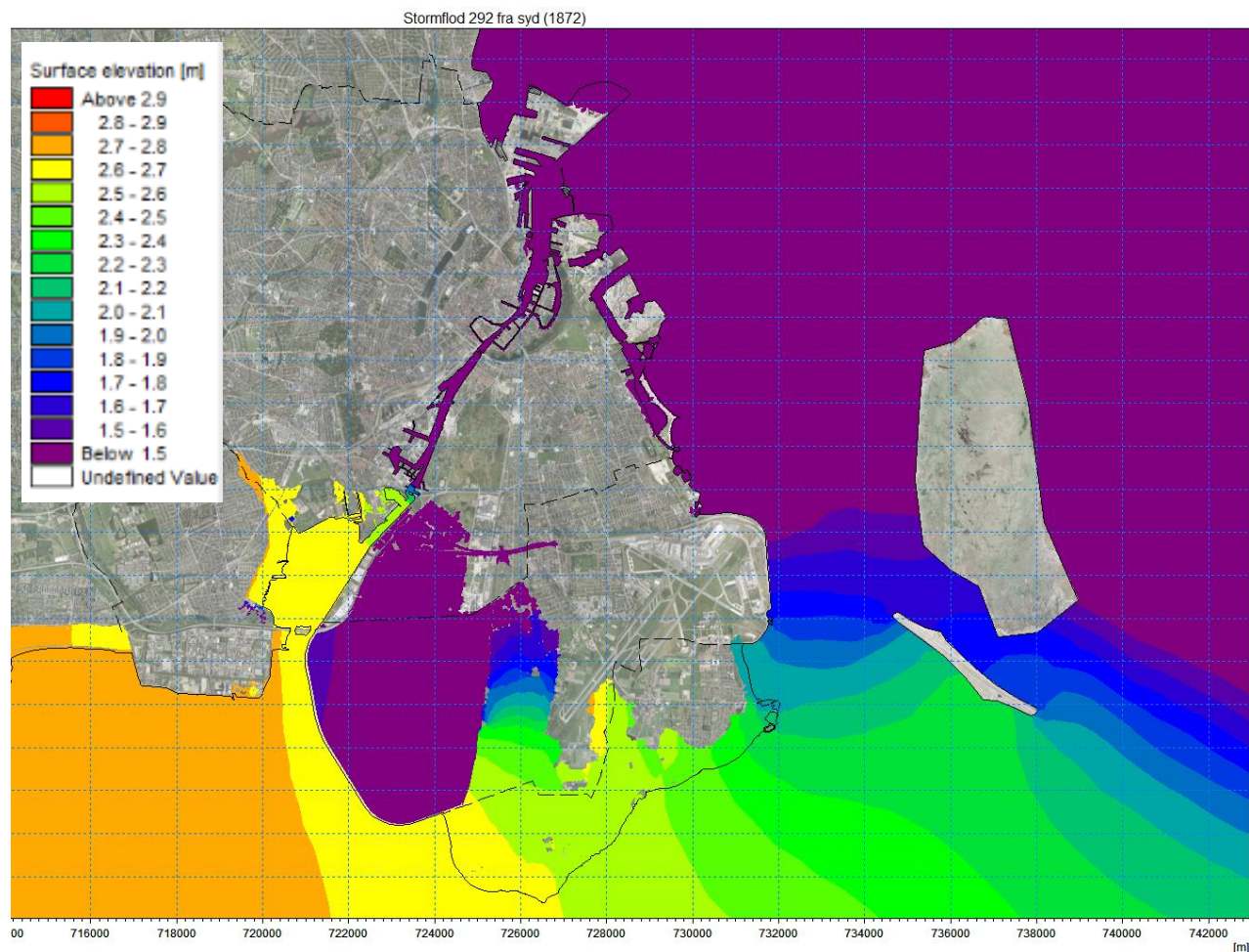
I denne rapport er det i overensstemmelse med klimatilpasningsplanen antaget at klimaændringerne vil medføre en forøgelse af den generelle havvandsstand på 1 meter fra 1990 til 2100. Det skal dog bemærkes, at de nyeste vurderinger af stigningen i havvandsstanden viser at der er størst sandsynlighed for en stigning omkring 65 cm i løbet af 100 år, men at der også er en lille sandsynlighed for at vandet kan stige mere end 2 meter. Se Figur 5-11.

Det forventes ikke at de ændrede vindforhold vil medføre nogen reel ændring i højvandsstatistikken i de indre danske farvande. Vindforholdene vil dog få indflydelse på bølgerne. De fremskrevne højvandsstatistikker med hensyntagen til den generelle havvandsstigning er vist på Figur 5-13 og Figur 5-14.

Der er analyseret 10 udvalgte højvande. Eksempler på udbredelsen af oversvømmelser og højeste vandstand er vist på Figur 2-1 og Figur 2-2, dels fra et højvande fra nord og dels et højvande fra syd.

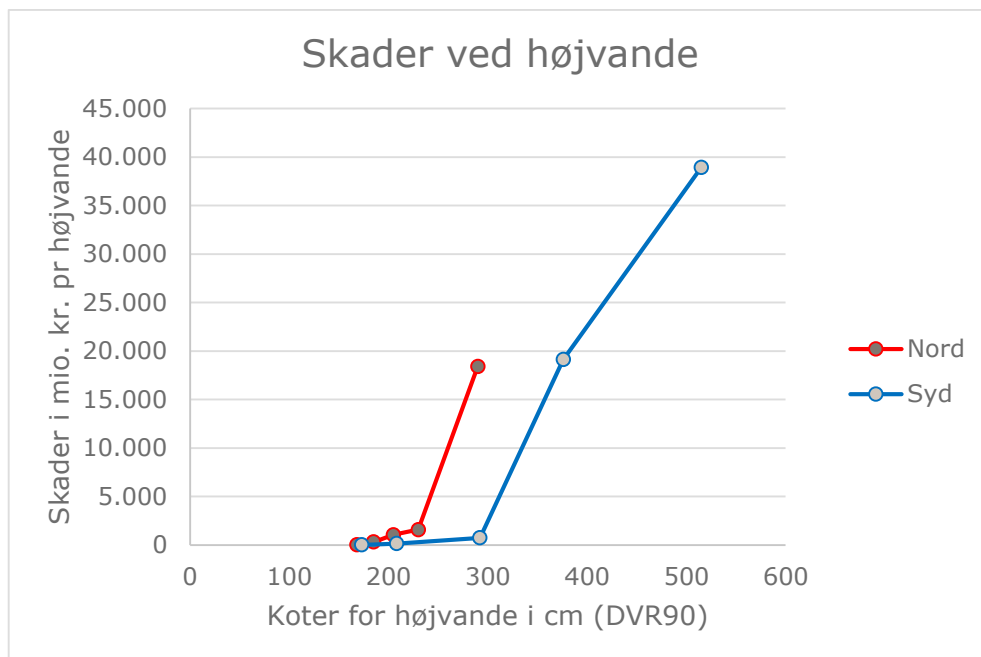


Figur 2-1 Højvande fra nord på 168 cm, svarende til "Bodil" i 2013. Maksimal stormflods-udbredelse og vandstand. Stort fald i vandspejlet over tærsklen mellem Dragør/lufthavnen og Saltholm. Stort fald i vandspejlet igennem Københavns Havn. Oversvømmelser i meget begrænset omfang.



Figur 2-2 Højvande fra syd på 292 cm svarende til højvandet i 1872. Maksimal stormflods-udbredelse og vandstand. Stort fald i vandspejlet over tærsklen mellem Dragør/lufthavnen og Saltholm. Stort fald i vandspejlet i den sydlige del af Københavns havn. Oversvømmelser ved Harrestrup Å og hele Vestamager oversvømmes via Dragør og Tårnby Kommune.

De samfundsmæssige økonomiske konsekvenser er opgjort for hver af de undersøgte højvandssituationer. Resultatet fremgår af Figur 2-3.



Figur 2-3 Omkostninger ved gener og skader som følge af forskellige størrelser af højvande fra nord og syd. Skader er opgjort i mio. kr. og dækker kun skader i Københavns Kommune og større transportanlæg i nærområdet.

Det ses at der opstår skader ved væsentligt lavere højvande fra nord end fra syd. Der er imidlertid forskel på, hvor hyppigt højvandene optræder fra nord og syd, hvorfor der må ses på, både hvor hyppigt de forekommer, og hvor stor skade de medfører. Dette giver den reelle økonomiske risiko, der er forbundet med højvande. I Figur 2-4 er vist hvordan den årlige økonomiske risiko vil udvikle sig over tid fra højvande fra nord og fra syd.



Figur 2-4 *Årlig økonomisk risiko relateret til forekomsten af højvande fra nord og syd i forskellige årstal. Risikoen er angivet i mio. kr. pr år. De fuldt optrukne grafer viser den statistisk set mest sandsynlige graf, mens de stiplede linjer viser de værdier vi med 95% sandsynlighed vil holde os under – eller vi med 5% sandsynlighed vil overskride.*

Det ses at der i dag er størst økonomisk risiko forbundet med højvande fra syd, og at der efter 2050 vil ske en meget kraftig stigning i risikoen fra nord. Dette skyldes, at den generelle havvandsstigning medfører, at selv almindelige små højvande vil flyde ind over kajkanten og hyppigt oversvømme de lave områder langs havnen.

For at illustrere konsekvenserne af højvande er der gennemført beregninger for nogle udvalgte historiske højvande. Konsekvenserne ved de historiske højvande, er gennemført med den nuværende udformning og anvendelse af arealerne i Københavnsområdet. Omkostningerne dækker kun Københavns Kommune, samt omkostninger for de større transportanlæg – metroen, jernbanen, motorvejene, lufthavnen og Øresundsbroen/tunnelen. Det historiske højvande fra syd i 1760 var på ca. 3,66 m og ville medføre en skade på ca. 13 mia. kr. i København fra vand der strømmer ind fra syd, hvis det skete i dag. Hertil kommer ca. 29 mia. kr., hvis dette højvande havde holdt sig meget længe og nået at brede sig til den nordlige del af København også. Det veldokumenterede højvande fra syd i 1872 på 2,86 meter i Køge ville give en skade på ca. 0,75 mia. kr. hvis det skete i dag, plus ca. 15 mia. kr. hvis højvandet havde holdt sig meget længe og bredt sig til nord.

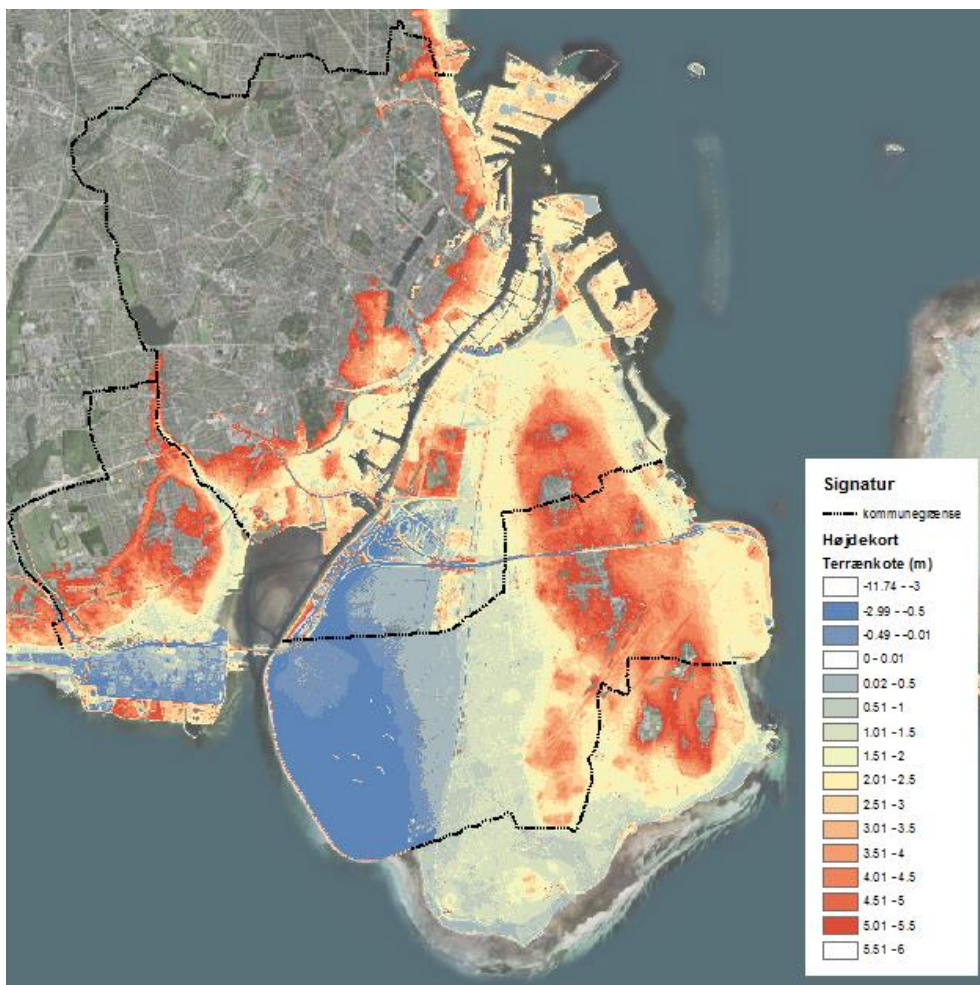
3 Karakteristika for Københavnsområdet

3.1 Topografi og byudvikling/opfyldning

København er på Sjællandssiden karakteriseret ved nogle få lavtliggende områder tæt ved havnen og nogle få mindre vandløb, der løber gennem kommunen, mens terrænet hurtigt hæver sig ved den gamle kystlinje. Områderne ved Christianshavn og Amager ligger meget lavt og kun den centrale del af Amager har en rimelig højde set i relation til højvande. Se Figur 3-1.

Alle områder omkring havnen er præget af opfyldninger som gennem tiderne er sket for at få mere land og en smallere dyb havn. Store dele af Vestamager ligger dog stort set i niveau med havet og er beskyttet af et 5,9 meter højt dige mod vest og syd.

Størstedelen af de områder, der vil kunne blive truet af oversvømmelse fra havet, ligger på Amager, mens det kun er mindre og havnenære områder der er truet på Sjælland. Til gengæld er der flere meget sensitive bygninger og infrastrukturer i dette område.



Figur 3-1 Topografi for København. Højdemodel for terræn baseret på nyeste opmåling fra 2014.

3.2 Strømningsforhold omkring København

Ved højvande fra nord eller syd strømmer det meste vand gennem Øresund uden om København, mens kun en mindre del strømmer gennem den meget smalle havn, der har karakter af en bred kanal. Strømningen gennem havnen er desuden reduceret og reguleret af et stemværk og sluse ved Sluseholmen.

Strømningen i Øresund er påvirket af den tærskel der ligger på tværs fra Amager via Saltholm til Malmø. Her er vanddybden beskeden og bevirker en kraftig strøm i de smalle render og en stor forskel i vandstand mellem nord og syd ved højvande i Kattegat eller Østersøen. Det er ikke ualmindeligt med forskelle på 1 meter mellem vandstanden ved Kalvebod motorvejsbroen og vandstanden ved Nordhavn i forbindelse med højvande.

3.3 Højvande

Der er stor forskel på om højvandet kommer fra nord og fra syd. Højvande fra nord er mindst da de begrænses af indsnævringen ved Helsingør – Helsingborg, der

dæmper effekten af de højvande der presser sig ind fra Kattégat. Højvande fra syd er de kraftigste, idet der er frit løb fra Østersøen op mod København, hvor vandet har svært ved at komme over tærsklen mellem København og Malmø. Københavns havn er meget smal og udgør en stor vandmodstand, hvorfor de resulterende højvande oftest skyldes vand der løber uden om København i Øresund, mere end det stammer fra vand der presses gennem havnen.

3.4 Vandløb

Med hensyn til oversvømmelse er København privilegeret i forhold til store kystbyer som London og New York hvor store floder passerer gennem byen. Det største vandløb langs kommunen er Harrestup Å, med et beskedent opland set i forhold til mange storbyer. Der ud over er der kun mindre vandløb, og disse er mere eller mindre kunstige og reguleret i forhold til tidligere tiders ønsker om vandforsyning til byen og voldgravene.

3.5 Regn

København er primært kloakeret efter fællessystemet, hvor regnvand op til en vis mængde bortledes via spildevandsledningerne. De nyeste områder som Ørestaden er forsynet med separate regnvandssystemer til bortledning af regnvand. Ved kraftig regn i de fælleskloakerede områder kan der ske aflastning fra kloakkerne til bassiner, vandløb og havnen, mens de fleste søer er friholdt for tilledning af overløbsvand. Under skybrud, hvor kloakkernes kapacitet er helt utilstrækkelig, vil regnvand løbe på overfladen og søge af de naturlige strømningsveje mod de laveste punkter og havnen. Skybrudsplanen indeholder forslag til at styre bortledningen af disse ekstreme regnskyl, så afstrømningen eller opmagasineringen foregår kontrolleret og på steder, hvor vandet gør mindst skade. Alle afløbssystemer leder mod havnen og Kalveboderne.

3.6 Grundvand

Grundvandstanden under København er kraftigt påvirket af vandindvindingen på Frederiksberg og ville stå væsentligt højere, hvis denne indvinding ophørte. Endvidere vil de forventede øgede nedbørsmængder og øget brug af nedsivning af regnvand medvirke til stigende grundvandsstand. På Amager og specielt på Vestamager er grundvandet kraftigt påvirket af havvandsstanden, og flere steder er områderne drænet og grundvandsstanden kunstigt sænket. Ved stigende havvandsstand må det forventes at grundvandet i de hav- og havnenære områder følger vandstandsstigningen og der vil sandsynligvis ske indtrængen af saltvand i de kystnære områder, hvilket kan påvirke vandindvindingsmulighederne og evt. give skader på fundamenter.

4 Strømningsforhold

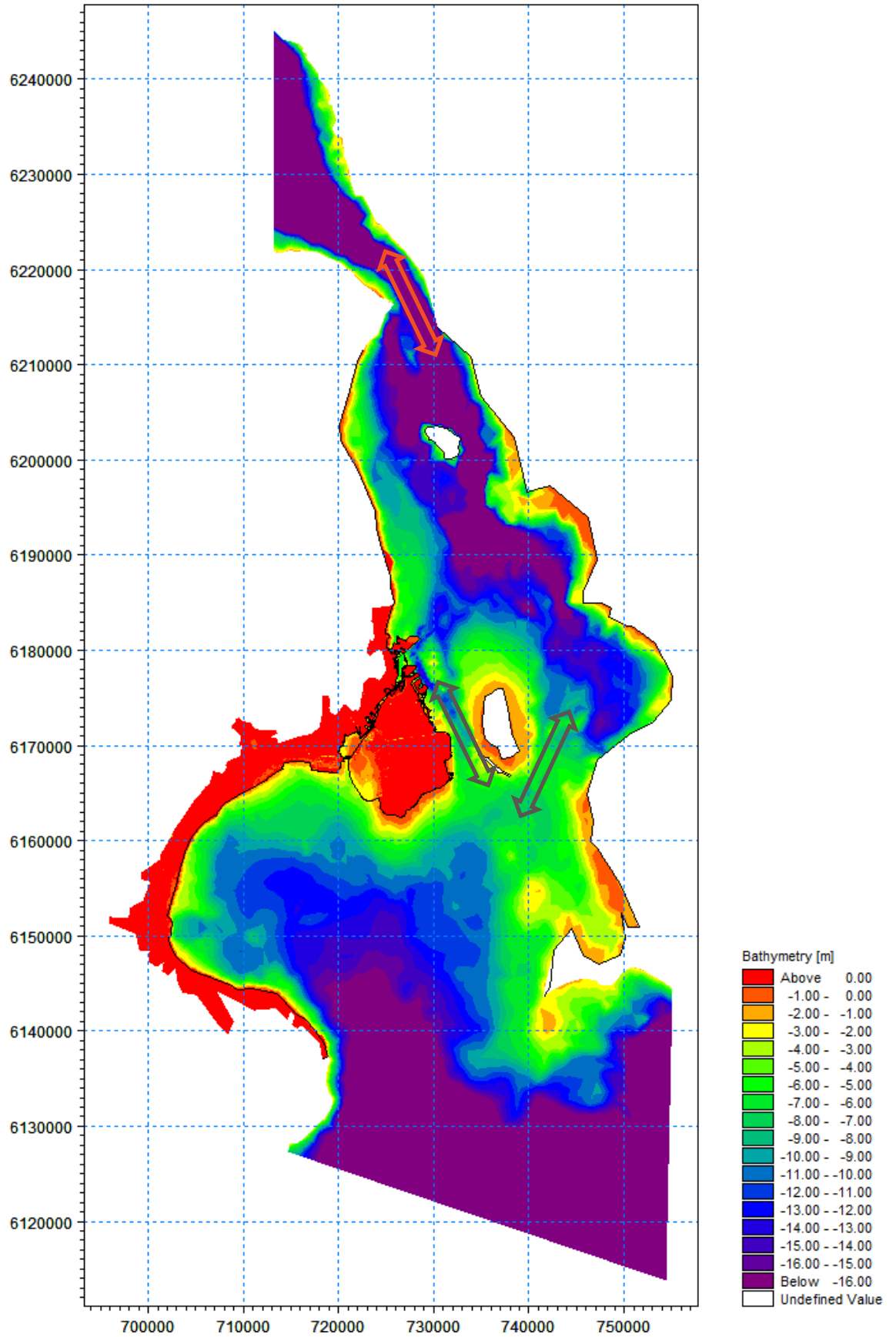
Dybdeforholdene hovedvandstømme i Øresund fremgår af Figur 4-1.

Det ses at der findes en lavvandet tærskel mellem København og Malmø som begrænser gennemstrømningen (Drogden-Limhamn tærsklen) ligesom indsnævringen mellem Helsingør og Helsingborg begrænser gennemstrømningen.

Normalt vender strømmen i Øresund med tidevandet, dog med en dominerende nordgående strømning i overfladen i ca. 60 % af tiden pga. af de store områder der afvander ferskvand til Østersøen, hvilket medfører en nettoudstrømning.

Strømningen i Øresund er endvidere påvirket af mødet mellem det tunge salte vand fra nord og det lettere ferske vand fra syd. Dette forhold beskriver Københavns Universitet meget kortfattet på følgende måde på deres hjemmeside:

"Saltholdigheden tiltager med dybden, og der er oftest et salt-springlag mellem 10 og 15 meters dybde. Det salte bundvand fra Kattegat bliver delvist stoppet af en tværgående "tærskel" mellem Amager og Malmø kaldet Drogden-Limhamn tærsklen. Tærskelen ligger som en undersøisk højderyg tværs over Øresund og udgør en barriere for tilførsel af saltvand fra Kattegat til Østersøen. En del af det salte vand der støder på denne tærskel bliver ført med nordover af det overfladenære ferske vand fra Østersøen. Tabet af bundvand til overfladestrømmen skaber så en sydgående bundstrøm til det nordlige og de dybere dele af det centrale Øresund. Ved yderligere opblanding øges saltholdigheden efterhånden i overfladestrømmen på dens vej mod nord."



Figur 4-1 Strømnings og dybdeforhold i Øresund

Vandgennemstrømningen gennem Københavns Havn er lille sammenlignet med vandgennemstrømningen gennem Øresund. Gennemstrømningen gennem havnen er endvidere begrænset af stemmeværket og slusen ved Sluseholmen. Stemmeværket bevirker endvidere at vandstandsvariationerne gennem havnen begrænses.

Ved højvande fra nord eller syd er der stor forskel på vandstanden i nord og syd, og den store modstand gennem havnen bevirker at et højvande hurtigere vil løbe uden om Amager over tærsklen i Øresund end passere gennem havnen.

5 Højvandsstatistik

Der henvises til det udredningsarbejde COWI- Systra Joint Venture for nylig har udført for Metroselskabet med hensyn til nuværende højvandsstatistik for de to højvandsstationer, der er repræsentative for højvande fra henholdsvis syd og fra nord (Køge og Ndr. Toldbod). Udredningsarbejdet er rapporteret af COWI-Systra JV 2016 (Jørgensen N., Holm A., 2016). I det følgende gives en oversigt over de data og beregninger der har ført til opstillingen af en ny højvandsstatistik for højvande fra syd, repræsenteret ved højvandsstationen i Køge.

5.1 Data indsamling

De specificerede data for havvandstanden i dette notatet er angivet i DVR 90 medmindre andet er anført. Dataene er indsamlet fra flere kilder, som er beskrevet herunder. I Bilag 1 er indsat en nærmere beskrivelse af fremskaffelsen af de gamle højvandsoplysninger samt direkte gengivelser af nogle af original-beskrivelserne fra de enkelte kilder. Bilag 1 er en direkte kopi af et uddrag fra rapporten til Metroselskabet: "CITYRINGEN BRANCH OFF TO SYDHAVNEN, Flooding analysis for Sydhavnen Metro" udarbejdet af COWI-Systra JV 2016 (Jørgensen N., Holm A., 2016).

5.1.1 DMI

COWI har modtaget data fra Dansk Meteorologiske Institut fra 16 stationer, hvoraf 9 stationer har haft interesse for dette studie. En oversigt over hvilke stationer og perioder dataene indeholder, er listet i Tabel 5-1.

Vandstanden for alle 9 stationer omregnes til DVR 90.

Tabel 5-1 Oversigt over data leveret af DMI til brug i dette studie.

Station	ID nr	data periode	Tids opløsning	Reference
Århus	22331	1890 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Fredericia	23293	1890 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Fynshav	26457	1970 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Slipshavn	28234	1890 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Korsør	29393	1890 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Hornbæk	30017	1891 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
		1891 – 2012	times log	(Hansen, L., 2013b)
København	30336	1889 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Rødbyhavn	31573	1955 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
Gedser	31616	1892 – 2012	Månedlig max	(Hansen, L., 2013a)
		Sep 1891 – 2012	times log	(Hansen, L., 2013b)

5.1.2 Kyst direktoratet (KD)

Data fra KD er afledt fra Sørensen, et al. (2012) og omfatter data fra Køge havn for perioden 1955 – 2012, dog med enkelte manglende data for perioden 2007-2011. Det er dog lykkedes for COWI at modtage daglige målinger for Køge havn. Den komplette sammensætning af data er vist under kapitel 5.1.4. KD har angivet data i henhold til reference system DNN og DVR90. Der er i KD's data anvendt en tærskels værdi på 111 cm (DVR90). COWI har for 1954 fundet max. vandstanden i Østsjælland Folkeblad, hvor store dele af Køge Bugt blev ramt af en storm.

5.1.3 Det svenske meteorologiske og hydrauliske institut (SMHI)

COWI har downloadet vandstands koter fra SMHIs hjemmeside med en tidsopløsning på en time (SMHI, 2015a; SMHI, 2015b)

Derudover, har COWI modtaget historiske data fra Axell Torny, hvilke er oplyst ved daglige maksimum (Torny, A. 2015). Alle data referer til det svenske system RH2000. En oversigt over hvilke data der benyttet i studiet er listet i Tabel 5-2. Data fra Sverige har dog ikke været anvendt i dette notat.

Tabel 5-2 Oversigt over rå data for de 8 svenske stationer i Øresund det sydlige Baltiske hav.

Station	ID nr	data periode	Tids opløsning	Reference
Stockholm	2069	Jan 1889 –	Pr. time	SMHI, 2015b
Landsort	2073	Jan 1886 – Sep 2006	Pr. time	SMHI, 2015b
Kungsholmsfort	2088	Jan 1886 – 2007	Pr. time	SMHI, 2015b
Ystad	2093	Jan 1887 – Dec 1986	Pr. time	Torny, A., 2015
Klagshamn	2095	Nov 1929 –	Pr. time	SMHI, 2015b
		Nov 1929 –	dagligt max	Torny, A., 2015
Barsebäck	2099	Apr 1982 –	Pr. time	SMHI, 2015b
		Feb 1937 – Jun 1969	dagligt max	Torny, A., 2015
		Apr 1982 –	dagligt max	Torny, A., 2015
Viken	2228	May 1976 –	Pr. time	SMHI, 2015b
		May 1976 –	dagligt max	Torny, A., 2015
Skånör	30488	Feb 1992 –	Pr. time	SMHI, 2015b
		Feb 1992 –	dagligt max	Torny, A., 2015

5.1.4 Køge havn

Data fra Køge havn er sammensat af data fra flere forskellige kilder. COWI har benyttet tre forskellige kontinuerte tidsserier, manuelle aflæsninger i havnen, årligt maksimum fra Kystdirektoratet og digitale tidsserier fra DMI. Desuden er dataene fra Køge havn blevet suppleret med enkelt stående hændelser.

Tabel 5-3 Oversigt over rå data fra Køge havn.

ID nr	data periode	Tids opløsning	Note	Reference
30478	Jan 1991 – Oct 1995	To gange dagligt	Manual aflæsning	Niels-Erik Sunesen, 2015
	Nov 1995 – Dec 2014	dagligt	-	
A478	Jan 1996 – Apr 2002	Ti minutter	Digital aflæsning	DMI, 2015
30478	Dec 2011 – Dec 2012	Ti minutter	Digital aflæsning	DMI, 2015
B478-1872	1872	Tegnet kurve af stormen 12.-14. November	National arkivet	A. Colding, 1881
C478-1904	1904	En aflæsning	Estimeret fra storm kolonne	Jørgensen N., 2015
D478-1954	1954	Årligt maksimum		Østsjællands Tiden- de, 1954
62	1957 – 1958, 1967, 1971, 1975-76, 78-79, 81, 83, 86, 88-89	Årligt maksimum	Tærskels værdi 111 cm, DNN	Sørensen, et al., 2012

5.1.5 Ekstrem vandstands målinger fra Tyskland

Vandstande er tilgængelige for det sydvestlige Baltiske Hav i Tyskland, stationerne er vist i Tabel 5-4. For fem stationer findes der årlige maksimums målinger. COWI

har i anvendt målinger fra Travemünde og øjenvideberetninger/målinger på historiske bygninger fra seks stationer.

Tabel 5-4 Oversigt over data fra målinger i Tyskland.

Station	data periode	Tids opløsning	Note	Reference
Flensburg	1694, 1835, 1872, 1904, 1960, 1978-79 and 1995	ukendt		
Kiel	1872, 1904, 1949, 1957, 1960, 1978-79, 1987-89 og 1995	ukendt		
Schleswig	1694, 1836, 1868 og 1872	ukendt		
Lübeck	1320, 1625, 1694, 1784, 1836 og 1867	ukendt		
Travemünde	1826 – 2006	1 til 4 gange dagligt	Jensen, J. og Müller-Navarra, S. H., 2008	
Wismar	1910 – 2014	1 til 4 gange dagligt	1926, 1941-42 mangler data	Holfort, J. 2015
Warmemünde	1910 – 2014	1 til 4 gange dagligt	1941 og 1944 mangler data	Holfort, J. 2015
Sassnitz	1914 – 2014	1 til 4 gange dagligt	1915 – 30, 1941 – 45 mangler	Holfort, J. 2015
Stralsund	1872, 1913 and 1995	Ukendt		
Swinoujscie	1947 – 1950 1950 – 1996 1996 - 2006	4 gange dagligt, per time minut data		Holfort, J. 2015
Greifswald	1872, 1904, 1913, 1949, 1954 og 1995	Ukendt		

5.1.6 Inddragelse af ældre observationer

Ved opstillingen af den nye statistik er der anvendt observationer fra år 1044 frem til 2014. I den første lange periode er det dog kun registreringer af ekstreme højvande fra Tyskland, der har været til rådighed og disse registreringer har været baseret på øjenvideberetninger, som af naturlige grunde ikke kan verificeres. Observationer fra Tyskland er omregnet til vandstande ved Køge ud fra kendskabet til sammenhængen i højvandsstand over Østersøen ved ekstreme storme/stormfloder fra øst. Denne sammenhæng har været etableret ud fra den veldokumenterede storm fra november 1872. I Tabel 5-5 er givet en oversigt over de udvalgte observerede og registrerede ekstreme højvande omregnet til vandstand i Køge efter det nuværende kote system (DVR90). Se en nærmere beskrivelse i Bilag 1.

Dato dd.mm.åååå	Estimeret/Målt vandstand ved Køge cm (DVR90)	Antal be- retninger af samme hændelse	Kommentar
xx.xx.1044	343	1	Tysk øjenvidne rapport
30.11.1320	286	1	Tysk øjenvidne rapport
xx.xx.1449	276	1	Tysk øjenvidne rapport
10.02.1625	290	4	Tysk øjenvidne rapport og fra Køge
xx.xx.1691	301	1	Tysk øjenvidne rapport
11.01.1694	258	4	Tysk øjenvidne rapport
13.10.1760	366	3	Øjenvidne rapport fra Køge (2 rapporter) samt måling i København (Dokken)
03.01.1825	230	5	Tyske målinger. Øjenvidne fra Køge. Rapport fra Amager, måling København
18.10.1828	235	3	Øjenvidne fra Rødby, måling København og Travemünde
19.12.1835	216	2	Målt i Flensburg og Travemünde.
12.11.1872	286	Målt	Målt i Køge og København
31.12.1904	220	Målt	Målt i Køge
30.12.1913	193	Målt	Målt i Køge

Tabel 5-5 Historiske stormfloder angivet med den målte eller beregnede vandstand i Køge. Denne kote svarer stort set til den forventede vandstand ved Kalveboderne ved ekstreme højvande fra syd. Hvis der skal sammenlignes med højvandskoter i dag skal der til ovenstående tillægges den generelle vandstandsstigning siden hændelsen fratrukket landhævningen. F.eks. svarer 286 cm ved højvandet i 1872 til et højvande på 292 cm i det nuværende målesystem med udgangspunkt i 1990 situationen (DVR90).

De i Tabel 5-5 angivne historiske observationer er primært fremskaffet via kilder fra I. G. Jensen, 1991, Hupfer, P., Harff, J., Sterr, H., Stigge, HJ Die Küste, 2003 og Focus magasin, 2016.

Der har været set på ca. 18 ældre observationer, men kun de i tabellen angivne 14 observationer har kunnet verificeres som valide for at indgå i statistikken. Kriterierne for validiteten har været øjenvidne beretninger, der ud fra beskrivelse muliggør en rimelig bestemmelse af havvandstands niveauet. Stormfloden november 1872 er den bedst dokumenterede stormflod med ekstrem Østenvind. Der henvises til A. Colding, 1881 for meget detaljerede beskrivelser af hændelsen. Denne storm genererede vandstande på 286 cm i Køge.

5.2 Behandling af data

5.2.1 Karakteristika af datamaterialet

Statistik for Køge er kompliceret af at den sydlige Østersø ved sjældne meteorologiske forhold påvirkes af storme af orkanstyrke fra øst. Disse storme har en gentagelsesperiode på ca. 150-200 år og forårsager ekstreme vandstande i den sydlige Østersø som fundamentalt afviger fra gængse højvandsituationer frembragt under

mere typiske, men ekstreme, meteorologiske forhold, forudsagt af ekstreme vinde fra vest.

Målinger af vandstande fra Køge Havn er iflg. Kystdirektoratets højvandsstatistik tilgængelig fra d. 1. april 1955, dvs. 60 år. Det er ikke muligt, ud fra den korte observations periode, at beregne sammenhængen mellem stormflodskoter og gentagelsesperioder gældende for Køge Bugt for høje gentagelsesperioder overstigende 50 år.

Det er nødvendigt at inkludere målinger fra andre stationer omkring den sydlige Østersø, som har haft en længere sammenhængende måle periode samt øjenvidneberetninger fra arkiver.

Inkluderes måle data fra Travemünde, hvor der er målt siden 1826, foreligger der kun én storm af orkanstyrke fra øst, som indtraf d. 12. november 1872. Anvendelse af vandstandsdata fra Travemünde er dog forbundet med usikkerheder, fordi måle data skal transformeres fra Travemünde til Køge.

Den længste måleperiode fra den sydlige Østersø er knap 200 år. Dette frembringer stadigvæk ikke tilstrækkeligt viden til at skabe en samlet troværdig statistik for Køge bugt for gentagelsesperioder over 100 år. Det er derfor nødvendigt at betragte øjenvidne beretninger.

Øjenvidne beretninger om stormfloder udgør ikke en kontinuert historie af målinger, men en notering af de mest ekstreme hændelser som har haft betydning for samfundet i form af store menneskelige eller monetære tab. Øjenvidne beretningernes præcision afhænger af den periode, hvor de er skrevet. Øjenvidne beretninger som ligger langt tilbage i historien vil relatere sig til steder og bygninger som med datidens øjne kan være svære at relatere sig til. Dermed bliver usikkerheden på fastlæggelsen af stormflodens vandstand og omfang derfor større i forhold til stormfloder, som ligger tættere på nutiden.

Kombination af målt statistik og øjenvidneberetninger er ikke direkte mulig. Den målte statistik er en objektiv, kontinuert serie af målinger, hvor selv mindre stormfloder registreres. Øjenvidneberetninger er af anden karakter, fordi beretningerne kun vil beskrive vandstande under meget ekstreme hændelser. For øjenvidneberetningerne er der derfor tale om en proces der i det følgende kaldes "historisk trunkering af data", idet vandstande som ikke gav anledning til større ulykker ikke blev husket/rapporteret. En udlægning af historisk trunkering er beskrevet under kapitel 5.3.2.

Den historiske trunkering vokser jo længere tid man går tilbage i historien. Det trykte medie blev introduceret i år 1440 og blev gradvist mere og mere almindeligt udbredt frem til år 1600 (Febvre, L. og Martin, H., 1997).

Med hensyn til øjenvidne beretningerne for stormfloder er det derfor vigtigt at opdele perioderne, fordi den historiske trunkering og nøjagtigheden af stormflodshøjderne har varieret over tid bl.a. styret af kommunikationsmulighederne som nævnt ovenfor. COWI har inddelt perioderne i tre. Perioderne er karakteriseret ved:

- 1 Målte vandstande fra år 1825-2014. Denne periode dækker den længste målte tidsserie fra den sydlige Østersø fra den Tyske by Travemünde (Jensen, J og Müller-Navarra, S. 2008). Den første officielle måling startede januar 1826, men den maksimale vandstand fra Travemünde for året 1825 er kendt. Målinger fra Gedser er til rådighed fra år 1891 (Hansen, L., 2013a;b), mens målinger fra Køge først officielt er til rådighed fra år 1955 (Østsjællands Tidende, 1954; Sørensen, et al., 2012 og DMI, 2015).
- 2 Øjenvidneberetninger fra Køge, sydlige Danske Østersø og Tyskland fra år 1500 til 1824. Disse øjenvidneberetninger er dokumenteret i Ib Gram Jensens publikation "Stormfloder" udgivet af DMI i år 1991 (I. Jensen, 1991). Perioden er karakteriseret ved at trykte medier var til rådighed, dog uden systematiske målinger af vandstanden i den sydlige Østersø. Det antages at den historiske trunkering for denne periode er 240 cm. Dvs. det antages at vandstande over 240 cm er antaget rapporteret kontinuerligt, fordi de var anledning til større skader.
- 3 Fra år 1044 til år 1499 foreligger der også øjenvidneberetninger (I. Jensen, 1991). Disse øjenvidneberetninger er nedskrevet i en tid hvor der ikke eksisterede trykte medier og samtlige rapporter er håndskrevne. Den historiske trunkering for denne periode er derfor højere end perioden, hvor trykte medier var til rådighed. Det antages at vandstande over 270 cm er blevet rapporteret kontinuerligt.

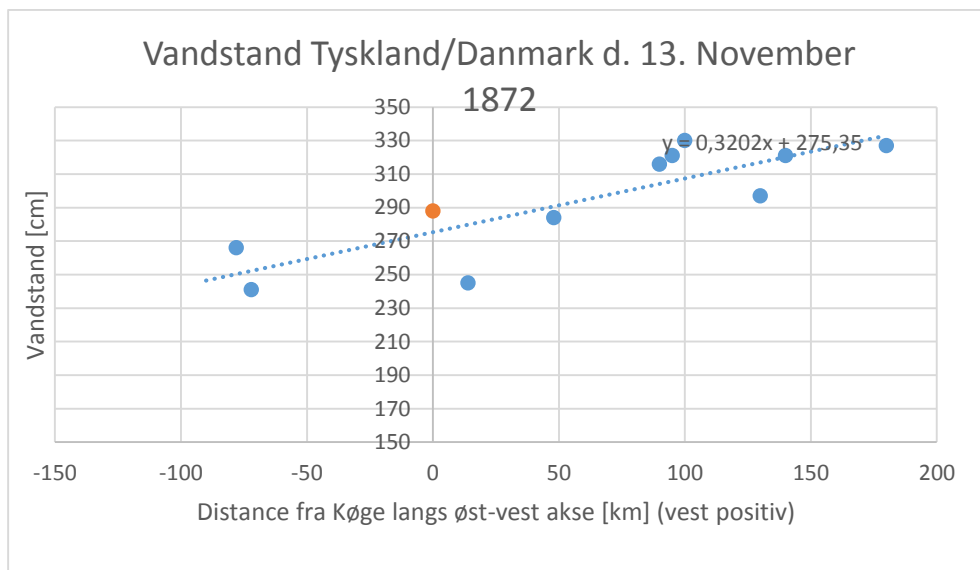
Storme som alle har været rapporteret fra Køge og som skabte vandstande over daglig vande på omkring 3 meter og derover (år 1625, 1760 og 1872) er alle frembragt af storme af orkanstyrke fra øst.

For at uddrage ekstrem statistik for storme fra øst er det derfor antaget, at alle storme, som overstiger en vandstand på 240 cm i Køge, er skabt af de sjældne meteorologiske tilstande, hvor storme af orkanstyrke blæser fra øst.

5.2.2 Transformation mellem lokaliteter

Da flere øjenvidneberetninger stammer fra forskellige steder langs Østersøen (tyske og danske byer) er det nødvendigt at omregne de konstaterede vandstande fra en lokalitet til Køge, således at data punkterne kan sammenlignes. Det antages at vandstandene under kraftige østenvinde er højest i den vestlige del af Østersøen og lavere i den østlige del af Østersøen forårsaget af det hældningsprofil af vandoverfladen som skabes under den kraftige vind (vindstuvning).

Antages Køge at udgøre et chainage nulpunkt langs en akse der går fra øst mod vest gennem Østersøen og betragtes vandstanden langs denne akse under den veldokumenterede storm 13. november 1872, kan det vind genererede hældningsprofil af havet som skabes under østen vinden optegnes (Colding, A. 1881). Antages vandstanden i Køge som ubekendt ville en ret linje som optegnet under Figur 5-1. En lineær antagelse er en approksimation, som dog er acceptabel for øjenvidneberetningerne, som allerede er angivet med en vis usikkerhed. Usikkerheden tages med i regning (se kapitel 5.2.5).



Figur 5-1 Ekstreme vandstande konstateret under stormen d. 13. November 1872 som en funktion af chainage langs en akse fra øst mod vest (Køge er chainage 0 km)(Colding, A., 1818).

Selv om det vindgenererede hældningsprofil typisk afviger fra en retlinjet profil giver denne simple model en afvigelse på 13 cm fra det aktuelt målte. Hældningen på kurven fra øst mod vest er ca. 32 cm pr. 100 km.

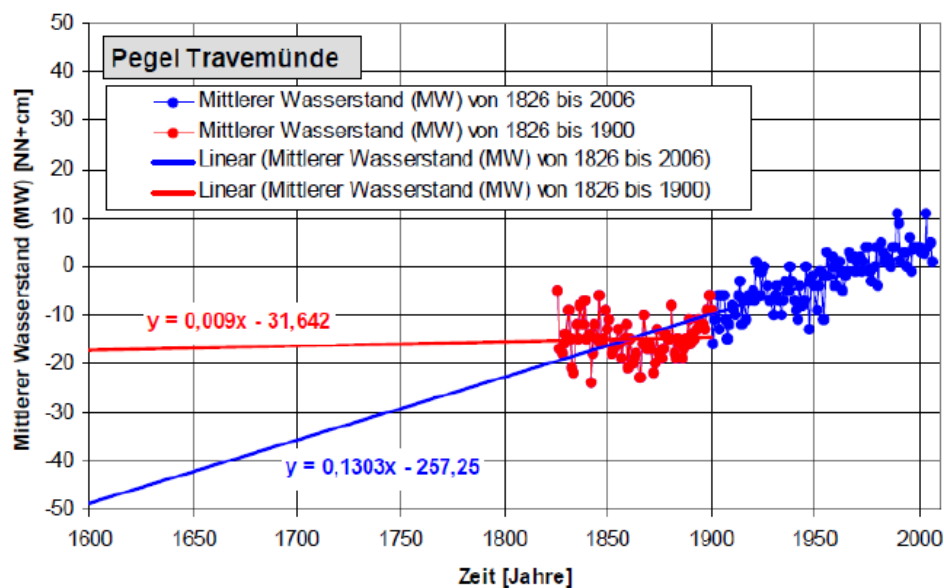
Både vindretning og styrke kan influere på vandoverfladens hældning og Figur 5-1 behøver ikke nødvendigvis at repræsentere alle storme. Dertil at data grundlaget for lille. Derfor er der i stedet indført en usikkerhed beskrevet vha. en normalfordeling med en given standardafvigelse.

5.2.3 Havvandstandsstigninger og iso-statiske ændringer

Havvandet stiger som følge af den globale opvarmning. For at beregne statistisk på ekstreme vandstande er det nødvendigt at justere for den langsigtede trend i data.

Historiske målinger er derfor blevet justeret for netto havvandstandsstigninger. Netto havvandstandsstigningerne er udtrykt ved havvandstandsstigningen fratrukket jordens isostatiske landhævning.

For tyske data har COWI valgt at følge de anbefalede værdier fra Mustok rapporten (Mudersbach, C. og Jensen, J., 2008). Her antages det at netto havvandstandsstigningerne før industrialiseringen har været lig med 0 og at havvandstandsstigningen har været 1,3 mm pr. år. for den industrialiserede periode fra 1850 frem til i dag (se Figur 5-2).



Figur 5-2 Middelvandstanden i Travemünde fra år 1826 til år 2006.

Derfor er de historiske vandstandsmålinger fra Tyskland blevet justeret med de anviste værdier.

For Køge er den målte trend 0.6 mm pr. år. Denne trend er målt over de sidste 55 år. For Gedser er trenden 1.2 mm pr. år for perioden 1889 til 2012 (Hansen, L., 2013) og derfor tæt på den trend der er blevet målt i Tyskland.

Forskellen mellem det Tyske nulpunkt (German Normal Nul) og det danske nulpunkt (DVR 90) er 2 cm. Vandstanden mellem DVR 90 og Tysk normal nul kan således udtrykkes ved:

Dansk DVR 90 kote = Tysk kote (Tysk normal nul) – 2 cm

5.2.4 Eksempel på beregning af vandstand

Nedenfor er vist et eksempel på en beregning af vandstanden for stormen som ramte Køge d. 10. februar 1625, se Tabel 5-6. I henhold til Ib Gram Jensen (1991) beskrives fra kilder at der rapporteret adskillige dødsopre, druknet kvæg og svære skader. Skovene ved Præstø og Køge skulle have været sejlbare. Vandstanden i Køge har dog ikke været kendt og er ikke noteret i nogen kilder. Til gengæld har man estimeret af vandstanden fra tyske kilder. Der er estimeret af vandstanden fra henholdsvis Rostock, Travemünde og Lübeck. Ud fra de givne vandstande og estimeret hældning af vandspejlet ved en østenvind antages vandstanden ved Køge at have været:

Tabel 5-6 Beregning af vandstand i Køge på baggrund af data fra øjenviden beretninger fra tre tyske byer under stormen i 1625.

By	Rostock	Travemünde	Lübeck
Chainage [km] (Køge 0)	16	90	100
Vandstand i cm (øjenvidne rapport)	293	306	284
Justering for hældning af vandspejl	-5	-29	-32
Estimeret vandstand Køge	288	277	252
Gennemsnit	272		
SLR Tyskland	20		
DVR90-Tysk NN	-2		
Resultat	290		

Ved korrektion for havvandstandsstigninger og ved at tage højde for placeringen af den enkelte øjenvidneberetninger kan de historiske vandstande for Køge bestemmes. Listen over de beregnede historiske vandstande er vist i Tabel 5-5.

5.2.5 Usikkerhed og øjenvidne beretninger

Øjenvidneberetningernes nøjagtighed afhænger af hvor langt tilbage i tiden beretningen er nedskreven. De tidligste øjenvidneberetninger vil have en større usikkerhed i forhold til målinger som er foretaget tættere på nutiden. Usikkerheden på øjenvidneberetningerne påvirker usikkerheden på estimatet og dermed konfidensintervallerne. Usikkerheden er dog i større grad påvirket af estimering af parametrene i fordelingen når der er færre observationer. COWI har udført forsøg med mere komplicerede usikkerhedsmodeller, men disse giver ikke bedre resultater. En grovere usikkerhedsmodel er derfor tilstrækkelig. Usikkerheden på estimaterne kan inddeles i følgende komponenter:

- › Usikkerheden for en korrekt nul-reference.
- › Usikkerheden på bestemmelsen af de historiske vandstandsstigninger.
- › Usikkerheden af selve observationen, bølger og øjenvidneberetningens troværdighed.
- › Om beretningen stammer fra den det tidspunkt hvor stormfloden var på sit højeste.

- › Usikkerhed i forbindelse med transformation af data, såfremt beretningen ikke stammer fra Køge.
- › Lokale vandstandseffekter

Tabel 5-7 viser de usikkerheder i form af standardafvigelse som er anvendt for de forskellige simulerede perioder.

Tabel 5-7 Sammenhæng mellem periode og standardafvigelse (cm).

Komponent	P1 1825- 2014 (189 år)	P2 1500- 1824 (324 år)	P3 1044- 1499 (455 år)
Usikkerhed i nul reference	0	5	15
Usikkerhed i historiske vands- tandsstigninger	1	5	15
Usikkerhed i øjenvidneberetninger	4	40	50
Den sande peak	5	10	15
Transformationsusikkerhed	12	15	20
Lokale effekter	5	5	5
Estimeret Std. afvigelse	15	45	60

Konklusionen er således at der i periode 1 (år 1825-2013) anvendes en standardafvigelse på 15 cm, for periode 2 (år 1500-1824) anvendes en standardafvigelse på 45 cm og for periode 3 (år 1044-1499) anvendes 60 cm.

Usikkerheden antages at være normalfordelt med en middelværdi som er lig med middel estimatet for den givne gentagelsesperiode T og med en standardafvigelse σ som angivet i Tabel 5-7.

5.3 Metode

Metoden er tilpasset af det forhold at statistikken for Køge reelt er delt i tre segmenter:

- › Et nedre segment for mindre stormfloder med lave gentagelsesperioder mellem 2 til 20 år. Disse stormfloder dannes under mere almindelige meteorologiske forhold. Statistikken for det nedre segment kan bestemmes ud fra de observerede data fra Køge i perioden fra 1954 til 2014, i alt 61 års data.
- › Et øvre segment af yderst sjældne stormfloder med høje gentagelsesperioder over 150-200 år. Stormfloderne i dette segment dannes af sjældne meteorologiske forhold, hvor en storm med vinde af orkanstyrke blæser fra øst. For dette segment regnes der på gentagelsesperioder på 500 år og derover. Statistikken for dette segment er primært baseret på øjenvidneberetninger.
- › Et sidste, tredje segment, er overgangen mellem det øvre og det nedre segment, hvor sammenhængen mellem vandstand og hyppighed skal bestemmes som en sum af sandsynligheden for de to statistisk uafhængige fænomener og hvor kraftige storme begynder at præge statistikken for stigende vandstande. Dette segment fases ind omkring 20 år og udfases igen omkring 500 års gentagelsesperiode. Denne statistik baseres på en kombination af øjenvidneberetninger og målinger.

Fælles for metoderne er at der regnes på trendfri data, dvs. at historiske vandstande er korrigeret for iso-statiske bevægelser og havvandstandsstigningerne, således at der regnes på "trendfri" vandstande. Alle beregninger foretages i henhold til DVR 90 nul reference. Nedenfor en kort beskrivelse af fremgangsmåden for de tre segmenter.

5.3.1 Nedre segment - lave gentagelsesperioder

Det første segment, for gentagelsesperioder mellem 2 og 20 år er forholdsvis simpelt at fastlægge. Her kan statistikken og fremgangsmåden fra Kyst Direktoratet benyttes.

I dette segment antages ekstrem vandstandsfordelingen at følge en Weibull fordeling. Antagelsen hypotese testes efterfølgende. Ankomstfordelingen antages at følge en Poisson fordeling.

Der anvendes et lavt skæringsniveau på 111 cm, som anbefalet af Kystdirektoratet. Som datagrundlag anvendes Kystdirektoratets seneste højvandsstatistik (se KD, 2012). Årene 2012-2014 tilføjes med digitale målinger fra DMI. Endvidere tilføjes maksimum vandstand i Køge år 1954, baseret på en beskrivelse i Østsjællands Folketidende fra d. 5. januar 1954 og tilføjelse af enkelte manglende år. Der er tale om målinger for årene 2007-2011, som er baseret på manuelle aflæsninger udført af havnefogeden for Køge Havn en gang dagligt kl. 8.00. Disse max. vandstande er derfor givet med grov tidsopløsning og derfor med usikkerhed for at den givne værdi ikke er den egentlige maximale vandstad. Det er kun året 2007, hvor vandstanden overstiger skæringsniveauet, idet vandstanden i dette år nåede 130 cm.

Statistikken for Køge dækker derfor en periode fra 1954 til år 2014.

Der er i alt 21 hændelser som overstiger skæringsniveauet på 111 cm. Dette giver en Poisson intensitet på $\lambda = 22/61 \text{ år} = 0,361 \text{ år}^{-1}$.

Weibull funktionen bestemmes vha. maximum likelihood metoden. De beregnede værdier :

$$\alpha = 1,51353$$

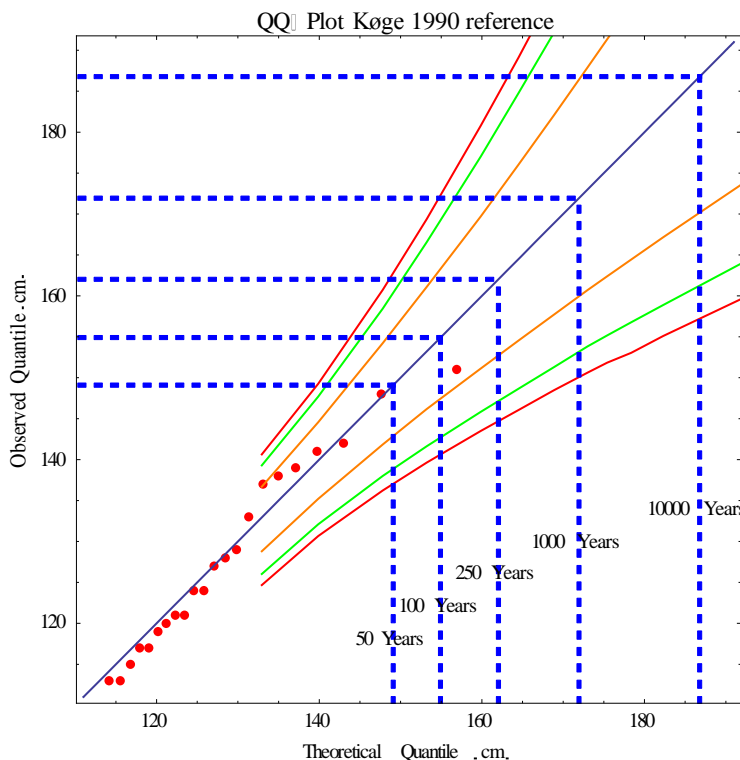
$$\beta = 18,88 + 111 = 129,88$$

De beregnede værdier giver følgende resultater:

Tabel 5-8 Weibull fordeling, T =gentagelsesperiode. Alle vandstande er angivet i cm (DVR90-trendfri).

Weibull Nedre hale i fordelingen					
T [år]	Median	Øvre 68%- kon- fidens- interval	Nedre 68%- konfidens- interval	Øvre 90%- kon- fidens- interval	Nedre 90%- konfidens- interval
1	105				
10	133	137	129	139	125
20	141	144	135	147	132
50	149	154	142	159	138
100	154	160	146	167	142

Det ses at denne statistik giver en større afvigelse i forhold til de velkendte stormfloder fra 1904, hvor vandstanden i Køge nåede op på 220 cm og stormfloden fra 1872, hvor vandstanden nåede op på 286 cm. Endvidere blev vandstanden i år 1913 målt til 193 cm ved Gedser. Statistikken er derfor ikke retvisende for højere gentagelsesperioder.



Figur 5-3 QQ-plot for nedre segment baseret på eksponential fordelingen mellem de observerede (Køge 1954-2014) og beregnede gentagelsesperioder og vandstande for Køge. (rød-95% konfidens, grøn 90% konfidens og orange 68% konfidens)

5.3.2 Øvre segment – høje gentagelsesperioder

Det øvre segment præges af stormfloder som fremkommer under sjældne meteorologiske forhold, hvor storm af orkanstyrke blæser fra øst i modsætning til de hyppige vesten storme og frembringer meget høje vandstande i Køge Bugt.

Ekstreme stormfloder fra 1625, 1760 og 1872 er alle rapporterede at være skabt af langvarige orkaner fra øst. Disse orkaner skaber vandstande på over 240 cm og i nogle tilfælde over 350 cm.

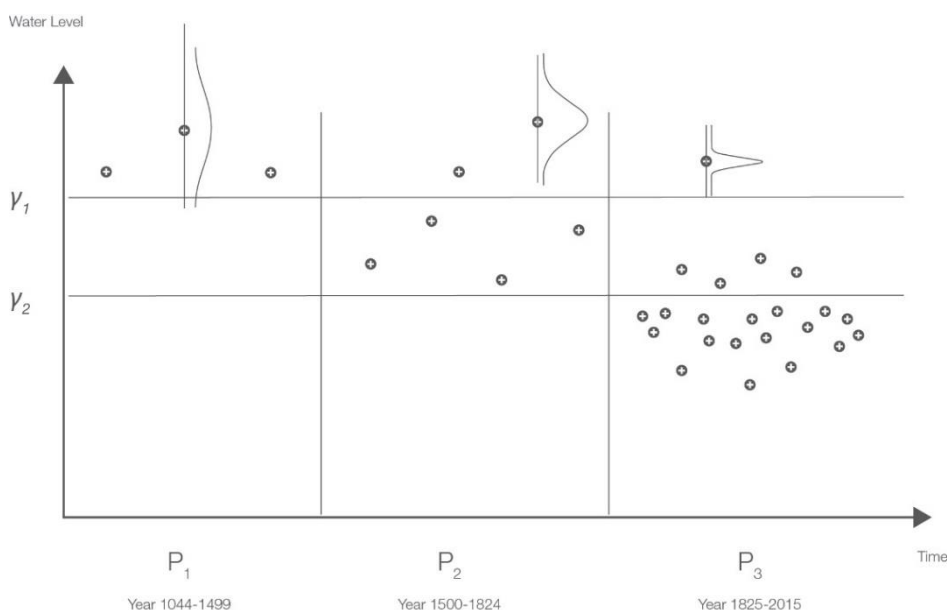
Ved at anvende databehandlingsprincipperne beskrevet under kapitel 5.2 uddrages en historisk data serie, som vist i Tabel 5-5. Der anvendes en Peak Over Threshold (POT) metode med et trunkeringsniveau på 240 cm.

I det øvre segment er det nødvendigt at opdele perioderne som beskrevet under kapitel 5.2.1 og tage højde for usikkerheden i data materialet som beskrevet under kapitel 5.2.5.

Pga. forskellen i perioderne antages en såkaldt historisk trunkering af data som kan afvige fra trunkeringen anvendt i POT analysen. Ved historisk trunkeringsniveau forstås: "Trunkering af måledata forårsaget af manglende kontinuert notering af vandstande. I disse perioder rapporteres kun ekstreme vandstande, hvis niveau forårsager materiel eller menneskelig skade. Dette niveau er i det efterfølgende beskrevet som det historiske trunkeringsniveau. Vandstande fra stormfloder som

ligger under det historiske trunkeringsniveau bliver enten rapporteret diskontinuerligt eller slet ikke og kan derfor ikke udgøre en del af beregningen"

Figur 5-4 illustrerer begrebet. Her kan det ses at der er i det viste tilfælde er to perioder med historisk trunkering, men forskellige trunkeringsniveauer hhv. γ_1 og γ_2 . Der kan være rapporterede vandstande under den historiske trunkering, men kan ikke anvendes direkte, fordi det metodemæssigt antages at de rapporterede vandstande over de historiske trunkeringsniveauer rapporteres kontinuerligt. Niveauer rapporteret under trunkeringsniveauerne skal derfor afvises. Der er dog en undtagelse. Da der er usikkerhed på målingerne vil rapporterede målinger der ligger under trunkeringsniveauerne stadig blive betragtet. Der genereres tilfældige tal fra en normalfordeling. Skulle estimatet i dette tilfælde overstige den historiske trunkering medtages værdien.



Figur 5-4 Princippet af historisk trunkering for de tre perioder. Forskellen i den estimerede spredning gengivet i tabel 5-7 er illustreret grafisk.

Ved at gennemgå data er de følgende historiske trunkeringsniveauer blevet fastlagt:

Periode (år)	Historisk trunkeringsniveau [cm]
P1: 1044-1499	$\gamma_1 = 270$
P2: 1500-1824	$\gamma_2 = 240$
P3: 1825-2015	Ingen trunkering, målte tidsserier fra Travemünde, Gedser og Køge

COWI har sammen med DTU udviklet en statistisk fremgangsmåde til at behandle trunkerede og usikre data. Værktøjet er blevet udviklet af COWI, i Mathematica. Værktøjet som kan regne på trunkerede tidsserier.

A priori antages fordelingen at være Weibull eller Eksponentielt fordelt. Der antages et højt skæringsniveau på hændelserne/øjenvidneberetningerne, således at kun vandstande over 240 cm medtages i beregningen. Storme som frembringer så høje vandstande antages primært at blive genereret af vinde fra øst og derfor fænomener, som er beskrivende for det øvre segment.

Da der er usikkerhed på de enkelte observationer genereres serier af tilfældige tal fra en normalfordeling, hvor spredningen afhænger af den periode hvor data stammer fra (se kapitel 5.2.5) og hvor middelværdien er bestemt ud fra det bedst tænkelige estimat som vist i Tabel 5-5 Historiske stormfloder angivet med den målte eller beregnede vandstand i Køge. Denne kote svarer stort set til den forventede vandstand ved Kalveboderne ved ekstreme højvande fra syd. Hvis der skal sammenlignes med højvandskoter i dag skal der til ovenstående tillægges den generelle vandstandsstigning siden hændelsen fratrukket landhævningen. F.eks. svarer 286 cm ved højvandet i 1872 til et højvande på 292 cm i det nuværende målesystem med udgangspunkt i 1990 situationen (DVR90).

Der genereres vandstande for de tre perioder. For den første periode fra 1044-1499 trunkeres der med en grænse på 270 cm og for de sidste to perioder fra 1500 til i dag trunkeres med et trunkeringsniveau på 240 cm.

Nu beregnes Maximum likelihood estimater for hhv. Weibull og eksponential fordelingen. For periode 1 tages højde for at den historiske trunkering på 270 cm ligger over den egentlige trunkering på 240 cm. Det er derfor nødvendigt at tage højde for dette forhold ved at beregne på betingede sandsynligheder for data der ligger i periode 1, mens data for periode 2 og 3 ikke skal trunkeres.

Ankomstfordelingen antages at være Poisson fordelt. Ankomstfordelingens intensitet beregnes på baggrund af periode 2 og 3, hvor der ingen trunkering forekommer. Fra ankomstfordelingen trækkes tilfældige tal som angiver antallet af observationer og for det genererede antal observationer uddrages nye tilfældige tal fra de fundne Weibull eller eksponentialfordelinger. Nye Weibull og eksponentialfordelinger beregnes vha. maximum likelihood estimater af de tilfældige tal og for disse funktioner beregnes vandstande for de forskellige gentagelsesperioder.

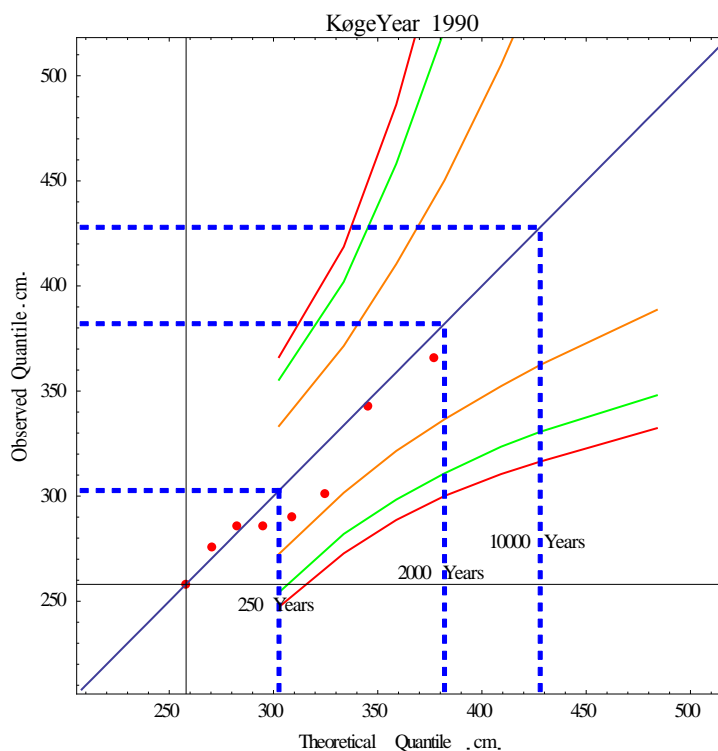
Proceduren gentages 10.000 gange, hvorved der skabes en sværm af estimater for sammenhængen mellem gentagelsesperiode og vandstand. Den høje gentagelse er nødvendig for at opnå tilstrækkelig mange ekstreme udfald. Ud fra udfaldet kan konfidens intervaller og medianværdier bestemmes for de enkelte gentagelsesperioder.

Til slut foretages en sammenligning af resultaterne mellem a priori fordelingerne Weibull fordelingen og eksponentiel fordelingen. Udvælgelsen af fordelingen foretages vha. en Maximum Likelihood Ratio test. På de anvendte data viser eksponentiel fordelingen som den foretrukne fordeling i langt de fleste simuleringer

Da der er tale om den øvre hale beregnes der kun på gentagelsesperioder som overstiger 500 år. De beregnede vandstande er vist i Tabel 5-9 og angiver vandstande op til 10000 års gentagelsesperiode:

Tabel 5-9 Resultater for eksponentialfordelingen (øvre hale).

Eksponentiel Øvre hale i fordelingen					
T [år]	Median	Øvre 68%- konfidens-interval	Nedre 68%- konfidens-interval	Øvre 90%- konfidens-interval	Nedre 90%- konfidens-interval
500	332	381	296	419	278
1000	376	441	324	495	299
2000	418	501	353	573	320
5000	473	582	390	675	346
10000	515	643	417	755	366



Figur 5-5 QQ-plot for øvre segment baseret på eksponential fordelingen mellem de observerede (øjenvidneberetninger) og beregnede gentagelsesperioder og vandstande for Køge. (rød-95% konfidens, grøn 90% konfidens og orange 68% konfidens)

5.3.3 Overgang mellem øvre og nedre segment

Det sidste segment beskriver overgangen mellem det øvre og det nedre segment. Problemet er at vandstandene for en given gentagelsesperiode både er påvirket af de almindeligt forekommende storme såvel som de sjældnere ekstreme storme fra øst.

Ingen af de traditionelle to- og tre-parametre fordelingsfunktioner kan tilpasse sig de øvre og nedre haler i fordelingen. Det er derfor nødvendigt at indføre en mere fleksibel fordelingsfunktion som kan separere det øvre segment fra det nedre segment. Dette separationsproblem har været beskrevet af John C. Houghton (se Houghton, 1977).

Separationsproblemet søges løst ved at anvende en Wakeby fordeling. Denne fordeling har fem parametre og kan derfor nemmere beskrive overgangen mellem de to meget forskellige nedre og øvre haler i fordelingerne af vandstande.

Til estimering af Wakeby fordelingsparametre anvendes både observerede data samt øjenvidneberetninger. En "Annual Maximum Series (AMS)" betragtes, således at den nedre hale er godt opløst. For at øge mængden af data omregnes observationer fra Travemünde og Gedser til forholdende i Køge. Dette foretages ved en simpel transformation. Gedser data transformeres ved at den ratio der er mellem middelværdien i AMS serien for de data som er indsamlet for Køge i perioden 1954 til 2014 og tilsvarende middelværdi for Gedser stationen i samme periode. Denne ratio multipliceres på værdierne for Gedser for de år hvor der ikke er data fra Køge og dermed fås estimerede værdier for Køge for perioden 1891 til 1953. Samme transformation foretages mellem Travemünde og Gedser som dermed transformeres yderligere, således at tidsserien kan forlænges med årene 1825 til 1890. Antagelsen er at Gedser, Travemünde og Køge følger samme stokastiske proces, kun adskilt af et indeks som her kan beskrives vha. middelværdien i det årlige maksima.

En Wakeby fordeling F_{W1} bestemmes vha. L-moment metoden, således at fordelingen tilpasses de målte data. Nu genereres tilfældige tal fra Wakebyfordelingen for perioden år 1500-1824, i alt 325 år, idet det antages at data i dette tidsrum har fulgt samme stokastiske proces som for perioden 1825-2014.

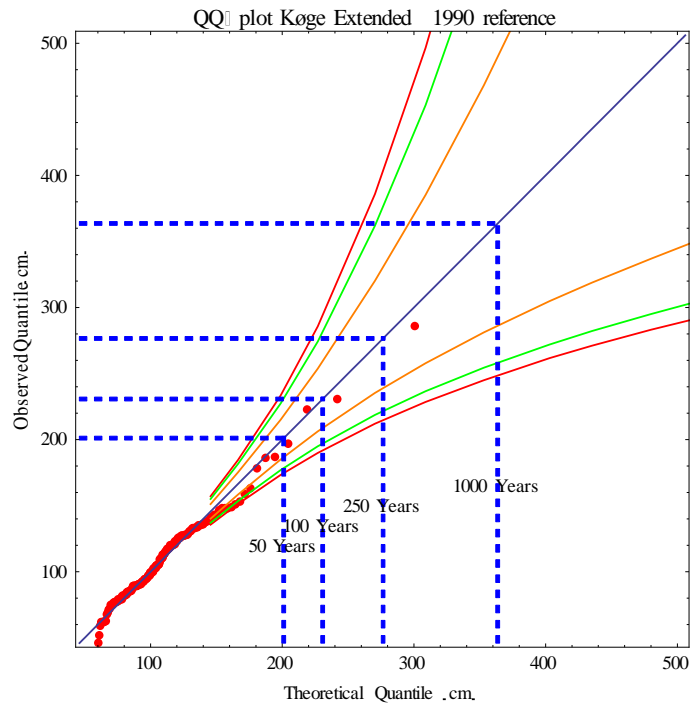
Denne "kunstigt" frembragte serie trunkeres ved 240 cm og de øvre trunkerede værdier erstattes med observerede øjenvidneberetninger for perioden. En ny Wakeby fordeling F_{W2} tilpasses hhv. observationer fra perioden 1825-2014, øjenvidneberetninger for periode 1500-1824 og de af Wakebyfordelingen udtrukne tilfældige tal for perioden 1500-1824. Denne proces er illustreret grafisk under *Figur 5-7*.

Samme teknik anvendes nu for perioden 1044-2014, idet der genereres tilfældige tal fra F_{W2} for perioden 1044-1824. For perioden 1044 til 1499 trunkeres værdier over 270 cm og disse data erstattes af øjenvidneberetningerne for denne periode. For perioden 1500-1824 trunkeres ved 240 cm og data erstattes af øjenvidneberetninger for denne periode. For perioden 1825-2014 anvendes målte data (se *Figur 5-7*).

En ny og sidste Wakeby fordeling F_{W3} bestemmes. Med den valgte fordeling foretages der Monte-Carlo simuleringer så median og konfidensintervaller kan blive fastlagt. Princippet er vist grafisk på *Figur 5-7*. Med de angivne data er Wakeby konstanterne beregnet til:

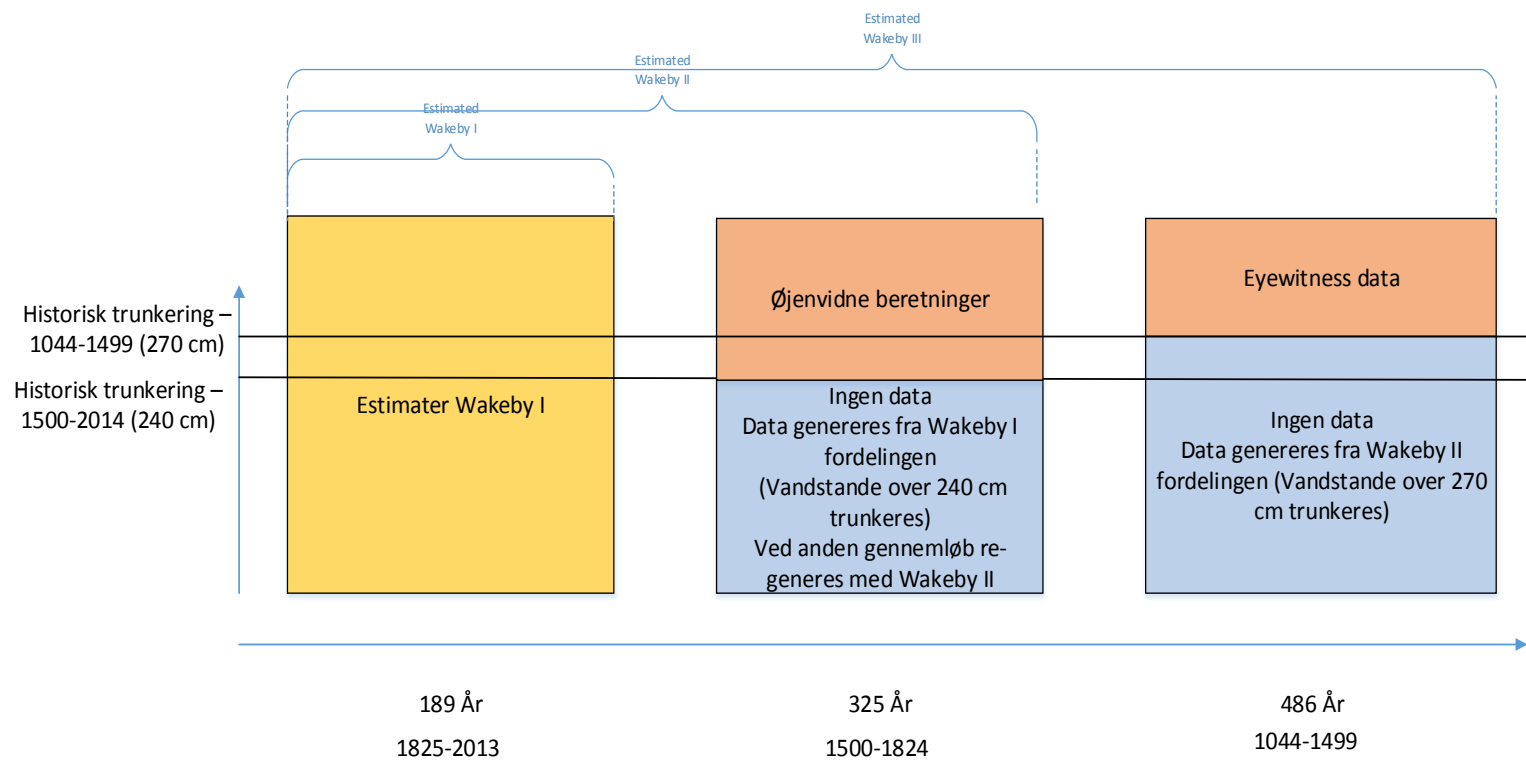
$$\mu = 0.542, \alpha = 1.25, \beta = 4.12, \delta = 0.195, \gamma = 0.195$$

QQ-plot mellem den observerede vandstande for givne gentagelsesperioder og de beregnede værdier ud fra den estimerede kvantil funktion er vist på *Figur 5-6*.



Figur 5-6 QQ-plot for overgangen mellem øvre og nedre segment. Sammenligning mellem de observerede (Travemünde/Gedser/Køge) data og beregnede vandstande ud fra Wakeby fordelingen for Køge. (rød-95% konfidens, grøn 90% konfidens og orange 68% konfidens).

Figur 5-7 Overblik over processen for estimering af Wakebyfordelingen.



Ved at anvende ovenstående metode kan værdierne for det midterste segment i fordelingen beregnes. Resultaterne er vist nedenfor:

Tabel 5-10 Resultater for Wakebyfordelingen (midterste segment).

Wakeby Midterste segment					
T [år]	Median	Øvre 68%- kon- fidens- interval	Nedre 68%- konfidens- interval	Øvre 90%- kon- fidens- interval	Nedre 90%- konfidens- interval
20	166	175	158	182	154
50	198	215	185	227	177
100	227	254	206	275	194
250	270	320	234	361	219
500	309	385	257	453	236
1000	353	467	280	578	254

5.3.4 Sammensætning af segmenter

Der forekommer mindre afvigelser i overgangene mellem de forskellige segmenter. Derfor foretages en lineær overgang mellem segmenterne, således at fordelingerne bindes sammen omkring skæringen med et andet segment.

Sammenbindingen mellem fordelingerne for de enkelte segmenter er beregnet ved at gange koefficienter på de enkelte estimater. Koefficienterne anvendt er vist i Tabel 5-11. De resulterende værdier af denne proces er vist i Tabel 5-12 og resultaterne er vist grafisk i Figur 5-9.

Tabel 5-11 Koefficient anvendt for de individuelle fordelinger.

Gentagelsesperiode [år]	Weibull (nedre segment)	Wakeby (mid- terste segment)	Eksponential (øvre segment)
1	1.00	0.00	0.00
10	1.00	0.00	0.00
20	0.75	0.25	0.00
50	0.50	0.50	0.00
100	0.25	0.75	0.00
250	0.00	1.00	0.00
500	0.00	0.50	0.50
1000	0.00	0.00	1.00
2000	0.00	0.00	1.00
5000	0.00	0.00	1.00
10000	0.00	0.00	1.00

Tabel 5-12 Samlet statistik for Køge.

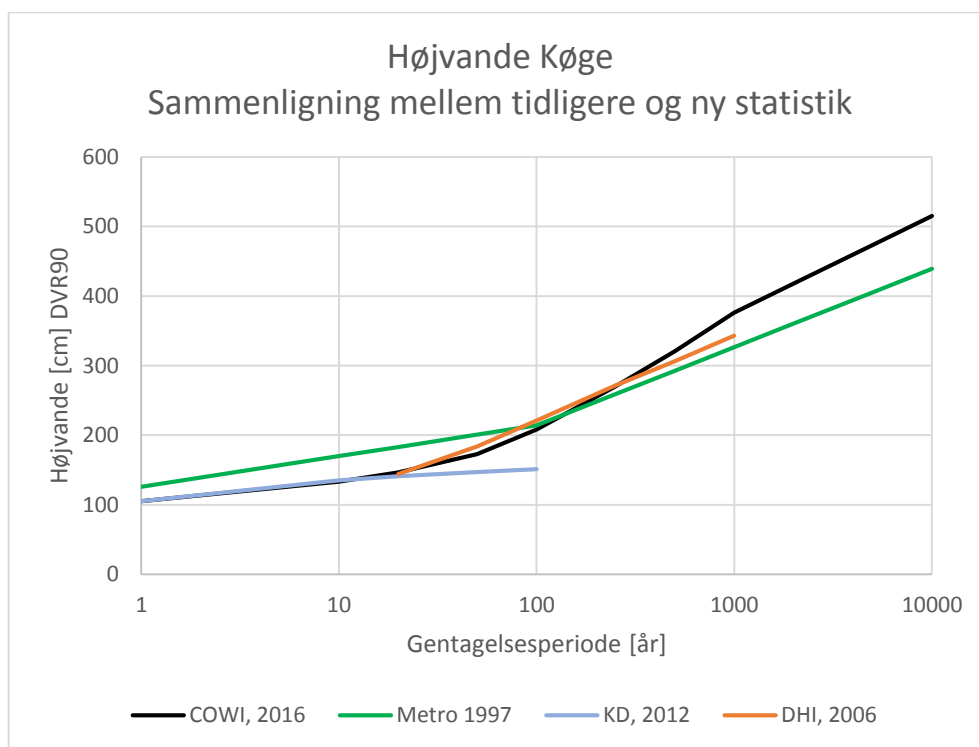
Køge Kombineret statistik					
T [år]	Median	Øvre 68%- konfidens- interval	Nedre 68%- konfidens- interval	Øvre 90%- konfidens- interval	Nedre 90%- konfidens- interval
1	105				
10	133	137	129	139	125
20	147	152	141	156	138
50	174	185	164	193	158
100	209	231	191	248	181
250	270	320	234	361	219
500	321	383	277	436	257
1000	376	441	324	495	299
2000	418	501	353	573	320
5000	473	582	390	675	346
10000	515	643	417	755	366

Den kombinerede statistik er sammenlignet for medianværdier med tidligere statistikker for Køge Bugt. Dette er vist i Tabel 5-13.

Tabel 5-13 Sammenligning mellem tidligere statistik for Køge Bugt.

T	COWI, 2016	Metro 1997	KD, 2012	DHI, 2006
1	105	126	105	
10	133	170	135	
20	147	183	141	144
50	174	201	147	184
100	209	214	151	221
250	270	259		271
500	321	293		306
1000	376	327		343
2000	418	360		
5000	473	405		
10000	515	439		

En grafisk sammenligning mellem de forskellige estimater for Køge Bugt er vist i Figur 5-8.



Figur 5-8 Højvande [cm] som funktion af gentagelsesperioden [år], for fire forskellige beregninger: COWI, 2016 (gældende for dette studie), Metroselskabets rapport 1997 (COWI, 1997), Kystdirektoratets rapport fra 2012 (Sørensen et al., 2012) og DHI rapport i 2006 (Madsen, H., 2008).

Som det kan ses rammer DHI's statistik (orange linje) fra år 2006 tættest på COWI's seneste statistik (sorte linje). Denne statistik undervurderer dog de højere gentagelsesperioder som overstiger 500 år. Dette fordi der bl.a. ikke tages hensyn til

den historiske trunkering. Den tidligere Metro rapport fra COWI undervurdere også de høje gentagelsesperioder. Dette skyldes primært at man har løst problemet grafisk og anvendt nedre sandsynlighedsværdier.

Endvidere fremgår det tydeligt at KD's statistik (blå linje) kun bør anvendes for meget lave gentagelsesperioder på 50 år eller derunder. Ellers bliver afvigelsen for Køge Bugt for stor.

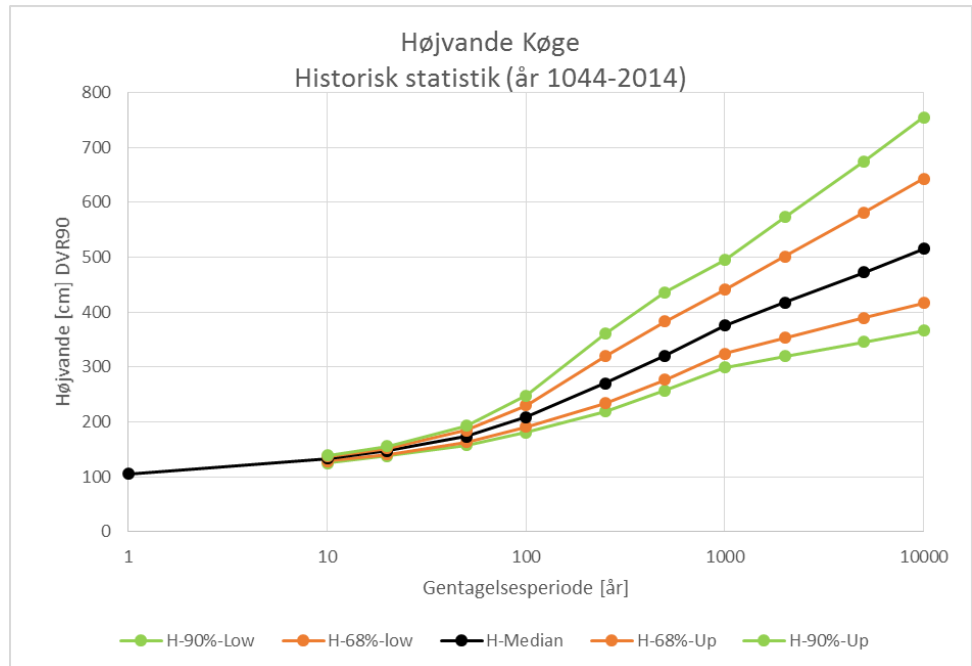
5.3.5 Opstilling af ny højvandsstatistik

Den statistiske bearbejdning af alt datamaterialet, med inddragelse af de observerede og registrerede ældre historiske ekstremer, har vist at der fra syd reelt er en større sandsynlighed for stormfloder end hidtil antaget. Dette skyldes bl.a., at der i den hidtidige højvandsstatistik og den officielle statistik fra Kystdirektoratet ikke har været medtaget så lang en tidsserie indeholdende ekstreme situationer stammende fra ældre øjenvidne beretninger, men alene en kort periode med de seneste registrerede og verificerede højvande.

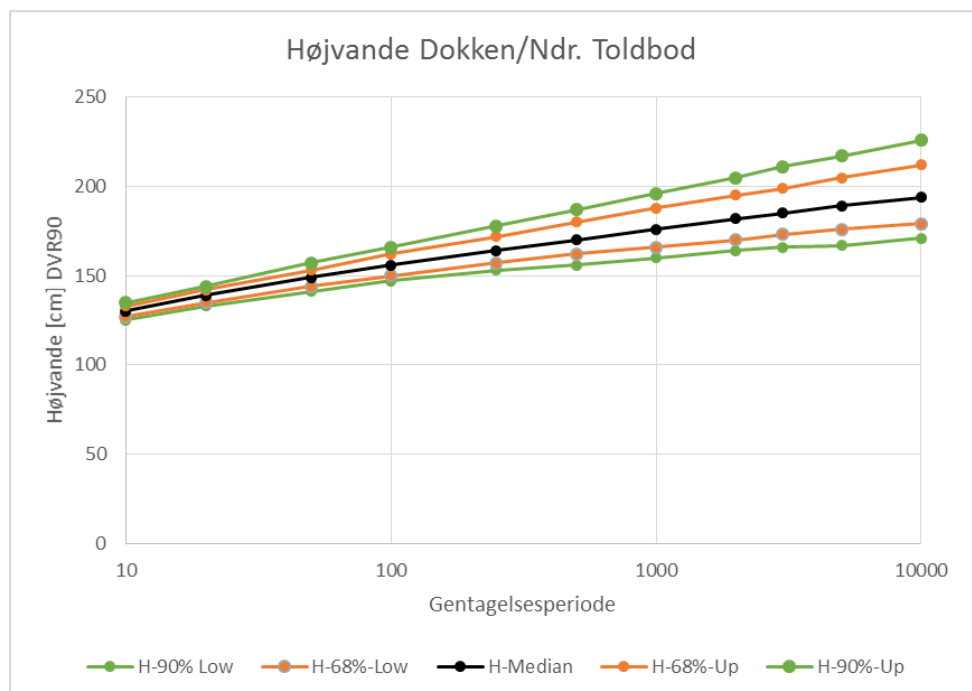
De nye udarbejdede højvandsstatistikker for stationerne ved Ndr. Toldbod og Køge er vist på Figur 5-9 og Figur 5-10. Der er altid knyttet usikkerheder til bearbejdninger af observationer af vind og vejr. Der kan ikke drages en konklusion om hvordan statistikken for højvande præcist vil se ud, da der kun haves et begrænset statistisk grundlag. Der haves som regel kun målinger og observationer for en begrænset periode, hvorfor der er stor usikkerhed på vurderingerne af sandsynligheden for specielt de meget sjældne hændelser. Jo længere serie der haves, jo større sikkerhed bliver der i opstillingen af højvandsstatistikken, dog indtræffer en sekundær effekt at usikkerheden på målingerne vokser. Dog er netto effekten af en flere observationer over en længere periode en reduktion af den samlede usikkerhed.

Også her, hvor vi har inddraget så mange historiske data som muligt, er der usikkerhed knyttet til statistikken. Der er derfor angivet den mest sandsynlige højvandsstatistik (median), hvor halvdelen af de modellerede hændelser (Monte-Carlo simuleringer) ligger under den angivne vandstand. Medianen er suppleret med konfidens-intervaller for henholdsvis 68% og 90%.

I det videre arbejde med vurdering af konsekvenser regnes med median kurven.



Figur 5-9 Ekstremværdistatistik for Køge uden klima forandringer, baseret på historiske hændelser (Median=sort, 68% konfidens interval=orange, 90% konfidens interval=grøn).



Figur 5-10 Ekstremværdistatistik for Ndr Toldbod uden klima forandringer, baseret på historiske hændelser (Median=sort, 68% konfidens interval=orange, 90% konfidens interval=grøn).

Det ses at kurverne for nord og syd har forskelligt udseende. Det skyldes at observationerne af højvande fra nord passer fint med en antagelse om en Weibullfordeling, som er den mest almindeligt anvendte for højvandsstatikker. Observatio-

nerne fra syd viser et andet billede, hvor de "almindelige" mindre højvande og stormfloder følger den almindelige fordeling, mens de observerede meget sjældne stormfloder er genereret af ekstreme storme fra øst. Stormfloder genereret af østenvind passer ikke ind i samme fordelingsfunktion. Den stokastiske proces for disse storme følger en eksponentialfordeling. Højvande situationen mellem de to typer af stormfloder er estimeret med en Wakeby fordeling.

5.4 Udvikling i højvandsstatistik

Der henvises til IPCC og DMI mht. den forventede ændring i statistikken som følge af ændrede vindpåvirkninger.

Tidligere blev der i forbindelse med klimatilpasningsplanen for København regnet med at de ændrede vindforhold i år 2100 ville give øget højvande på 10-15 cm i de indre danske farvande ved meget ekstreme og sjældne storme. I den nyeste udredning fra DMI (CRES, Centre for Regional Earth Science) vurderes det, at disse storme ikke vil påvirke størrelsen af højvandene ved de sjældne hændelser.

Citat fra "Analyse af IPCC delrapport 2 – Effekter, klimatilpasning og sårbarhed, Naturstyrelsen, 2014:

"Øget risiko for oversvømmelser fra havet

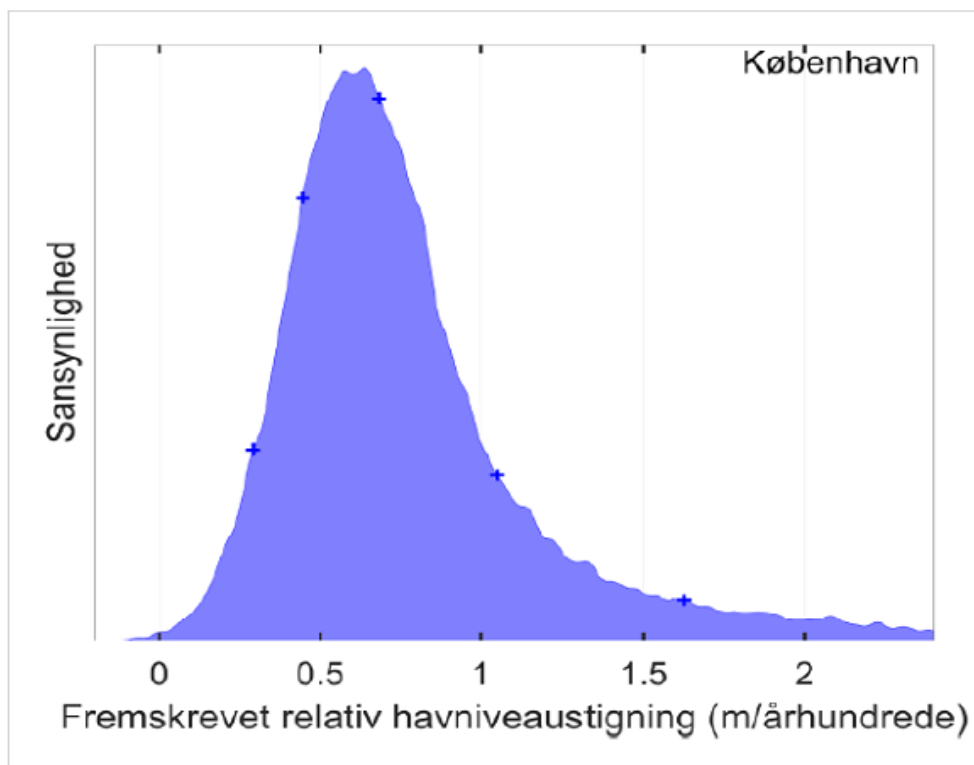
I dag er risikoen for oversvømmelser fra havet forholdsvis lille. Men den vil stige i fremtiden i takt med stigende havniveau. Desuden vil ændringer i stormintensitet og -mønstre have en effekt på frekvensen og intensiteten af stormfloder i de danske farvande. Klimamodelresultater viser en uændret eller endog en lidt mindre ekstrem stormflodsvandstand (dvs. uden stigning i havniveauet) i de indre danske farvande."

På basis af denne konklusion regnes der ikke med en ændring i højvandsstatistikken som følge af ændrede vindforhold. Ved dimensionering af diger, dæmninger mv. skal der dog tages hensyn til at bølgerne bliver kraftigere med de øgede stormstyrker.

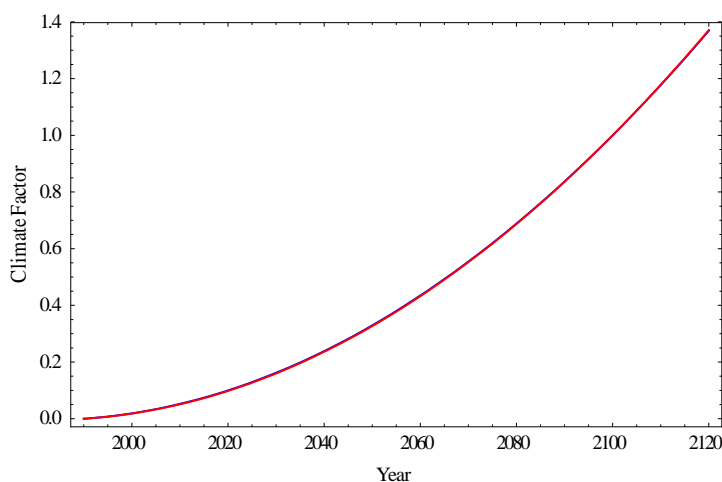
5.5 Udvikling i havvandsstand

Her henvises til udredninger fra IPCC (AR5) og DMI (CRES, Centre for Regional Earth Science). IPCC har på globalt plan udarbejdet konsekvensvurderinger for fire forskellige antagelser om ændringer i energiniveauet (4 RCP's, Representative Concentration Pathways) mens CRES har fokuseret på nedskalering af resultaterne til lokale konsekvensvurderinger for Danmark og nærmeste omgivelser.

Af nedenstående Figur 5-11 fra rapporten fra CRES ses den forventede relative havvandsstigning over 100 år med udgangspunkt i år 2000. Den mest sandsynlige stigning ligger omkring 65 cm. Det ses også at stigningen kan blive mere end 2 meter, selvom sandsynligheden for det er meget lille. I de følgende vurderinger anvendes en forventet stigning i havvandsstanden på 1,0 meter i perioden fra år 1990 til år 2100. Dette blev anbefalet af DMI i forbindelse med udarbejdelsen af Klimatilpasningsplanen for København.



Figur 5-11 *Fordelingen af den relative forventede havniveaustigning for København over de næste hundrede år ifølge CRES.*



Figur 5-12 *Parabolsk fremskrivning af udviklingen i højvandsstand (år 2100 klimafaktor 1.0, svarende til grafen vist i Figur 5-11).*

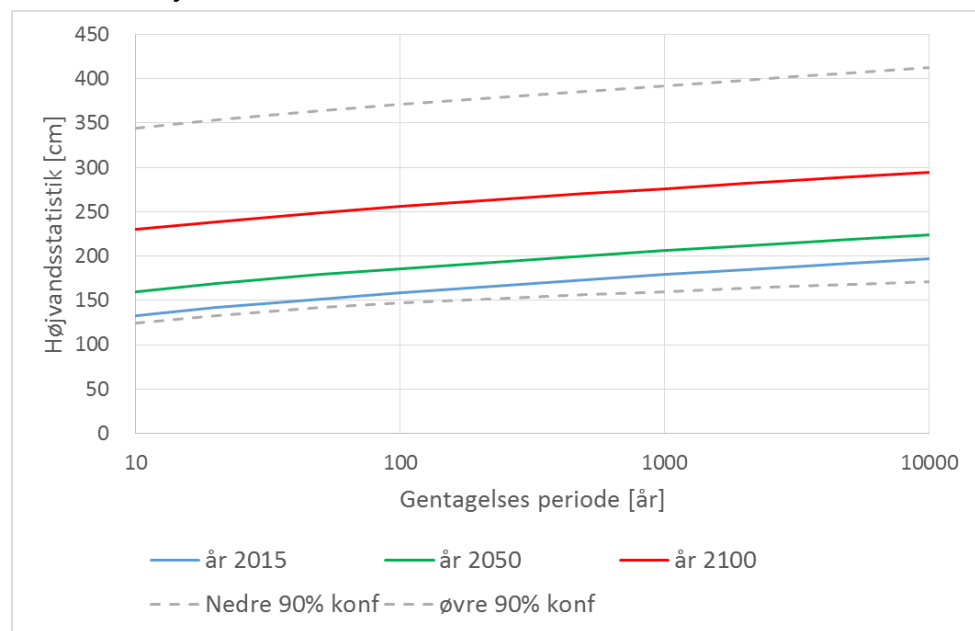
Ved vurderingerne af konsekvenserne af stigningen i havvandsstand, som angives i forhold til en fast kote (DVR90), skal man huske at kompensere for at landet ikke ligger fast men hæver eller sænker sig afhængigt af lokalitet. For København er det angivet at der sker en generel hævnning af landet med 1,26 mm pr år) hvorfor der skal kompenseres for dette ved vurderingen af vandstandsstigningen.

5.6 Samlet udvikling i højvandsstatistik

Baseret på udredningerne for Metroselskabet om den historiske statistik og antagelserne om klimaets indflydelse på ændringer i statistikken og havvandsstand er der i det følgende opstillet højvandsstatistikker for Køge og Ndr. Toldbod for forskellige årstal frem til år 2100. Højvandsstatistikken er angivet som den mest sandsynlige og udgør det reelt bedste bud på, hvor det hele vil ende (lige stor sandsynlighed for at det bliver mere eller mindre).

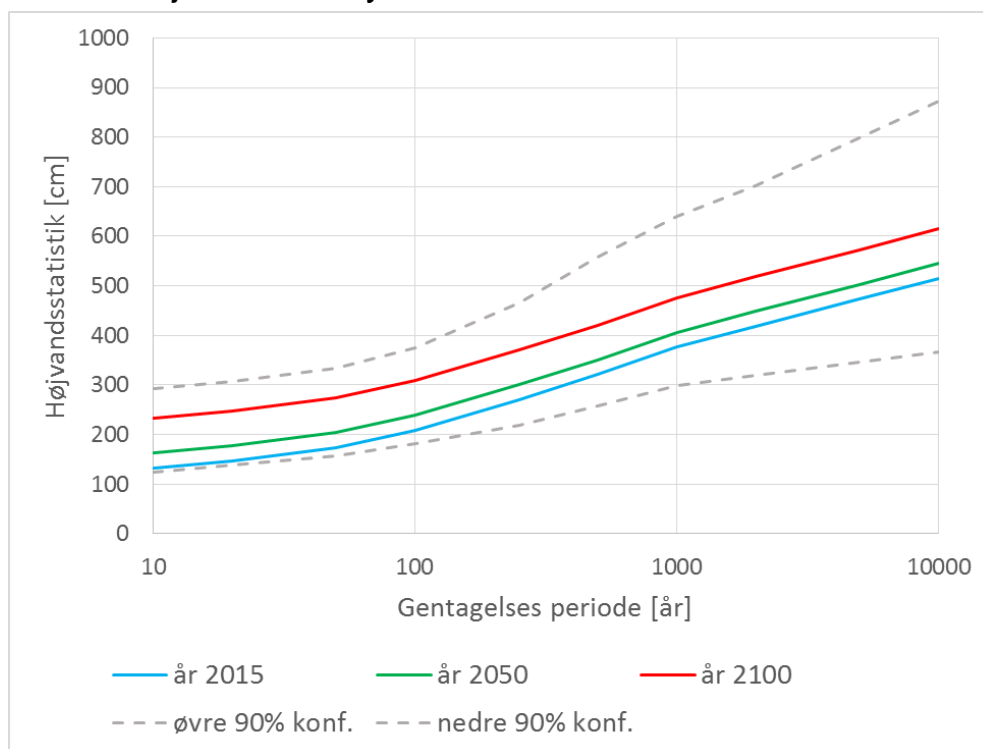
For at illustrere den usikkerhed der knytter sig til statistikken og usikkerheden på vurderingen af påvirkningerne fra klimaudviklingen, er der for år 2100 vist 90% konfidens-intervallet som stiplede linjer (der er 90% sandsynlighed for at det endelige resultat vil ligge et eller andet sted mellem de to stiplede linjer). Den tilsvarende mest sandsynlige højvandsstatistik for 2100 er vist med en rød linje (lige stor sandsynlighed for at det endelige resultat ligger over eller under linjen).

5.6.1 Højvande fra nord



Figur 5-13 Median højvandsstatistik for Nordre Tolbod for årene 2015, 2050 og 2100 er vist med fuldt optrukket linje. For år 2100 er endvidere med stiplede linjer vist 90% konfidens intervallet (90% sandsynlighed for at det endelige resultat ligger et sted mellem de to stiplede linjer).

5.6.2 Højvande fra syd



Figur 5-14 Median højvandsstatistik for Køge Havn for årene 2015, 2050 og 2100 er vist med fuldt optrukket linje. For år 2100 er endvidere med stiptet linje vist 90% konfidens intervallet (90% sandsynlighed for at det edelige resultat ligger et sted mellem de to stiplede linjer).

6 Øvrige forhold

6.1 Vandløb og regn

6.1.1 Nuværende situation

Som beskrevet i afsnit 3.4 findes der ikke store vandløb i oplandet til Københavns Havn og Kalveboderne. Største vandløb er Harrestrup Å, der har et opland på ca. 4.500 ha. Øvrige små vandløb og grøfter har kun tilsluttet mindre områder og er kunstigt reguleret.

Regnvand ledes normalt via kloaksystemerne til renseanlæggene, men under kraftig regn sker der aflastninger direkte til havnen og til vandløb, der fører til havnen. Ørestaden og enkelte nye områder har dog separate regnvandssystemer. De lavest liggende områder på Amager kan ikke afvande naturligt til havet/havnen, men vandet må pumpes ud.

6.1.2 Udvikling i afstrømning

Der forventes ikke nogen større omlægninger i kloaksystemet, men det er planlagt at bygge lokale anlæg til separat lokal håndtering af regnvand samt at bygge skybrudsanlæg der under kraftig regn kan magasinere eller transportere de regnmængder der ikke kan rummes i kloakken.

Regnmængderne på årsplan forventes at stige med lidt over 1 mm om året og fordelingen vil med stor sikkerhed gå mod mere våde vintre og sandsynligvis også mod mere tørre somre. Intensiteten af de kraftige sommer regnskyl forventes at stige markant. Dette vil påvirke afstrømningen i vandløbene tilsvarende, idet disse ligger i et meget urbaniseret opland. Tilsvarende vil den højere vinternedbør og mere udbredt anvendelse af nedsivning medføre øget grundvandsafstrømning til dræn og vandløb.

Selvom det tilstræbes at gøre byens overflader mere åbne så mere regnvand kan nedsives, vil der blive inddraget nye områder til bebyggelse, hvilket kan resultere i en forøgelse af de befæstede arealer der skal afvandes.

6.2 Sammenfald af ekstreme – højvande/regn

Der er en generel tendens til at ekstreme højvande optræder om vinteren mens ekstreme nedbørshændelser optræder om sommeren. DTU har i flere omgange lavet undersøgelser af de trends, der kan ses i udviklingen af tidspunkt og hyppighed for ekstreme hændelser og vurderet sandsynligheden for at disse ekstreme fra regn og højvande vil ske samtidig.

Konklusionen er umiddelbart at der i dag er ingen til meget lille sandsynlighed for at ekstreme optræder samtidig. Den nuværende trend og forventede klimaudvikling indikerer at de ekstreme regnskyl meget langsomt rykker mod efteråret og ekstreme vindgenererede højvande breder sig over en længere periode og dermed også mod det sene efterår. Dette bevirker at sandsynligheden for sammenfald af ekstreme for regn/vandføring og højvande forventes at stige lidt med tiden, men sandsynligheden for sammenfald vurderes dog fortsat at være meget lille og reelt ikke eksisterende. Højvande vil fortsat forekomme i oktober til marts mens skybrud vil forekomme i juni til august.

6.3 Grundvand

I Københavns Klimatilpasningsplan er det beskrevet hvordan grundvandet forventes påvirket af klimaændringerne frem til år 2110. Det fremgår af planen at grundvandet i København og Frederiksberg generelt vil stå 0,25 - 0,5 meter lavere i det sekundære magasin i år 2060 end i dag. Tilsvarende beskrives at grundvandsstanden langs kysten i høj grad er styret af havniveauet, hvorfor grundvandet i et bælte langs kysten og havnen vil stige svarende til stigningen i havniveau.

7 Illustrationer af udbredelse af udvalgte højvande

Der er ud fra den opstillede højvandsstatistik og de forventelige konsekvenser ved højvande, udvalgt 5 højvande fra syd og fra nord. Disse højvande repræsenterer forskellige gentagelsesperioder afhængigt af det årstal man fokuserer på. Den udvalgte højvandskote på 1,68 m fra nord (Bodil) repræsenterer således et højvande der kun vil forekomme hvert 280 år i år 2015, men som vil forekomme hvert år i år 2100. Se Tabel 7-1.

I nedenstående Tabel 7-1 ses den forventelige gentagelsesperiode for de udvalgte højvande afhængigt af hvilket årstal man betragter. Alle vandstande er givet i koter svarende til DVR90.

Hyppighed i år	2015	2050	2100
1,68 m fra Nord (Bodil)	280	18	<1
1,85 m fra Nord	2.000	90	<1
2,05 m fra Nord	30.000	900	2
2,30 m fra Nord	1.000.000	20.000	10
2,90 m fra Nord (havn)	+1.000.000	+1.000.000	6.000
Hyppighed i år	2015	2050	2100
1,73 m fra Syd	50	16	<1
2,08 m fra Syd	100	55	1,2
2,92 m fra Syd (1872)	350	220	70
3,76 m fra Syd	1.000	700	280
5,15 m fra Syd	10.000	6000	1.800

Tabel 7-1 *Hyppighed af de udvalgte højvande angivet for forskellige årstal, baseret på antagelser om klimændringernes indflydelse på højvandsstatistikken. Højvande er angivet i faste koter iht. DVR 90.*

7.1 Beregningsmodel

Der er opbygget en hydraulisk model som dækker hele Øresund og Køge Bugt. Med denne model kan dynamikken omkring stormflod ved København beskrives på bedst mulig vis.

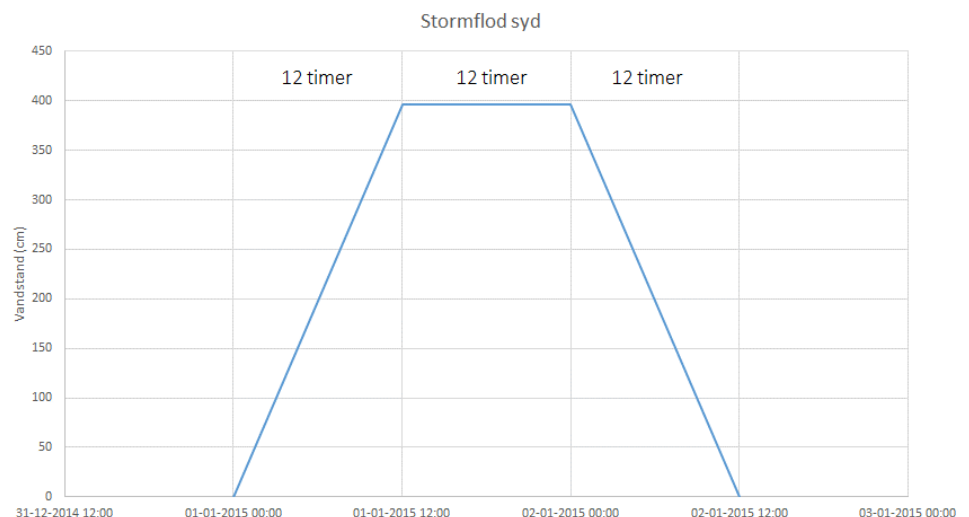
Havbundkoter i Øresund, Køge Bugt og Kalveboderne stammer fra informationer fra digitale søkort, mens bundkoter i Københavns Havn stammer fra søkort fra By&Havn. Terrænkoter på land er baseret på den digitale terrænmodel fra 2014.

Diger langs kysten er registreret og indlagt i model med kote for kronekant.

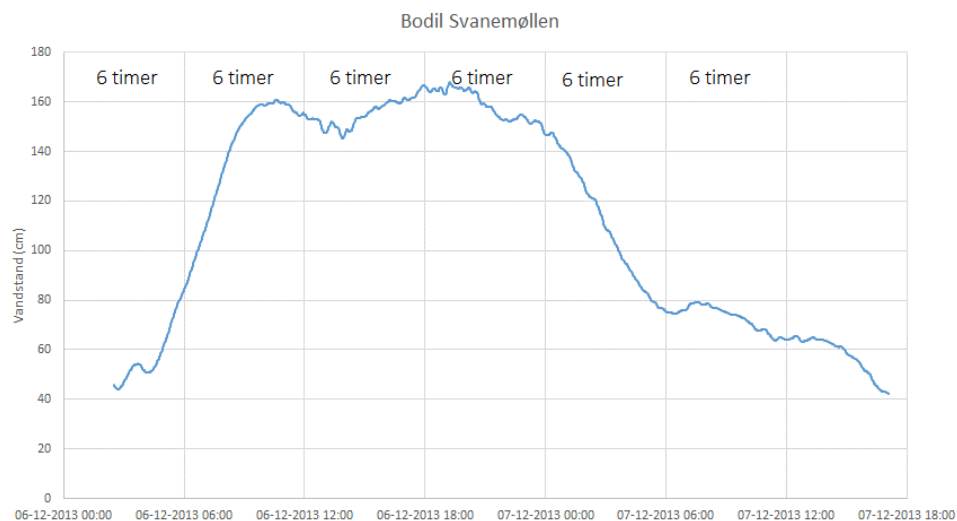
Modelafgrænsning er vist på Figur 7-3. Ved beregning af stormflod påføres højvande i nordlig eller sydlig rand af modellen, hvorefter højvande fordeler sig i modelområdet. Ved nordlig stormflod sættes vandstand ved syd til normal daglig vandspejl og omvendt ved sydlig stormflod.

Der er for højvande fra syd antaget en samlet varighed af højvandet på 36 timer, hvor højvandet bygger op over 12 timer, holder sig på toppen i 12 timer og falder til normalt niveau efter yderligere 12 timer. Dette svarer til en situation der er lidt værre end det der normalt ses, da maksimum sjældent holdes i mere end 12 timer.

For højvande fra nord anvendes tidsudviklingen for den aktuelle højvandskurve fra højvandet "Bodil" d. 6-7 december 2013, proportioneret op eller ned til de højvande der analyseres. "Bodil" var speciel ved at vandstanden stod omkring maksimum i forholdsvis lang tid på grund af nogle helt specielle vindforhold.

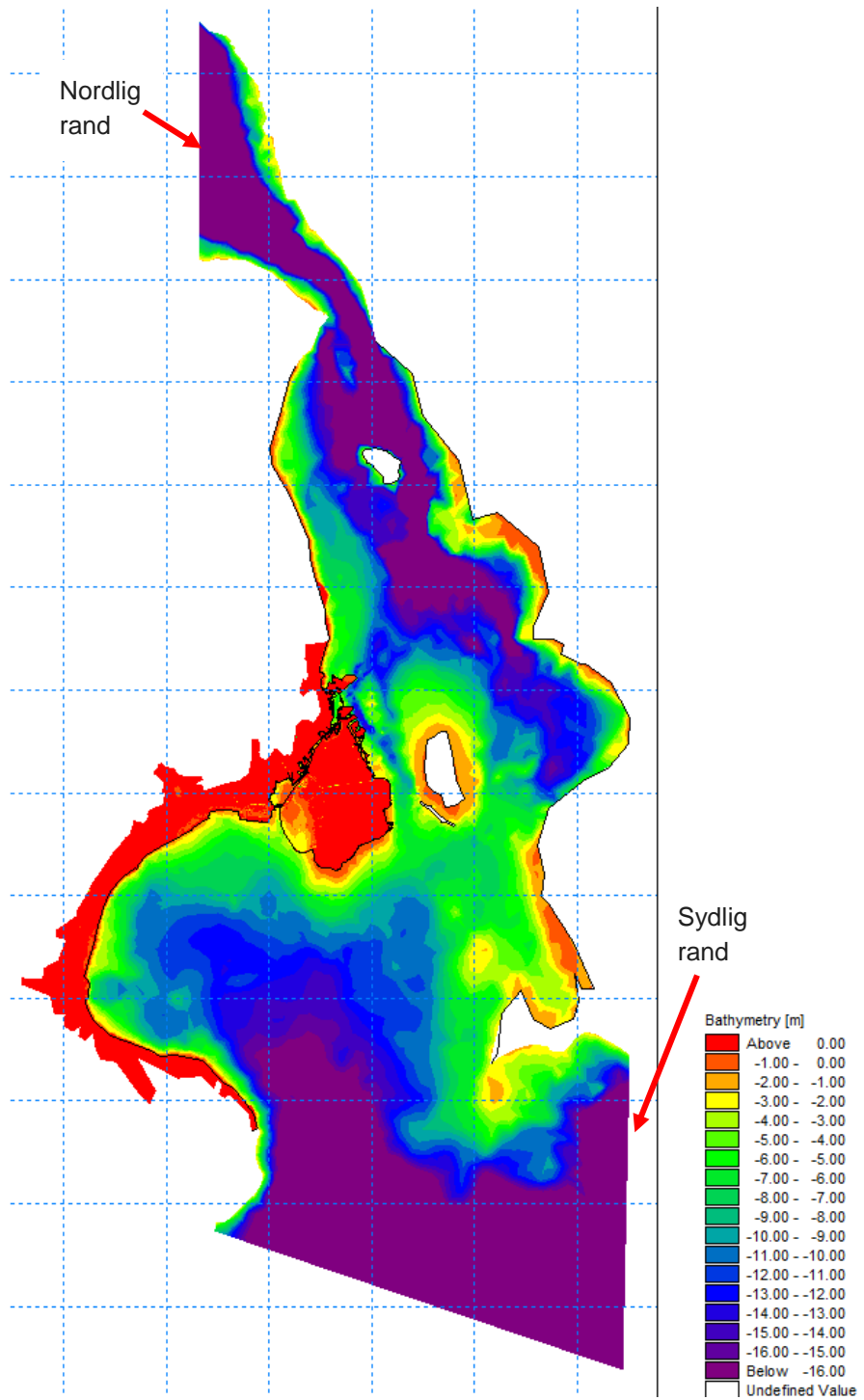


Figur 7-1 Tidsfordeling af undersøgte højvande fra syd (eksempel på et 400 cm højvande).

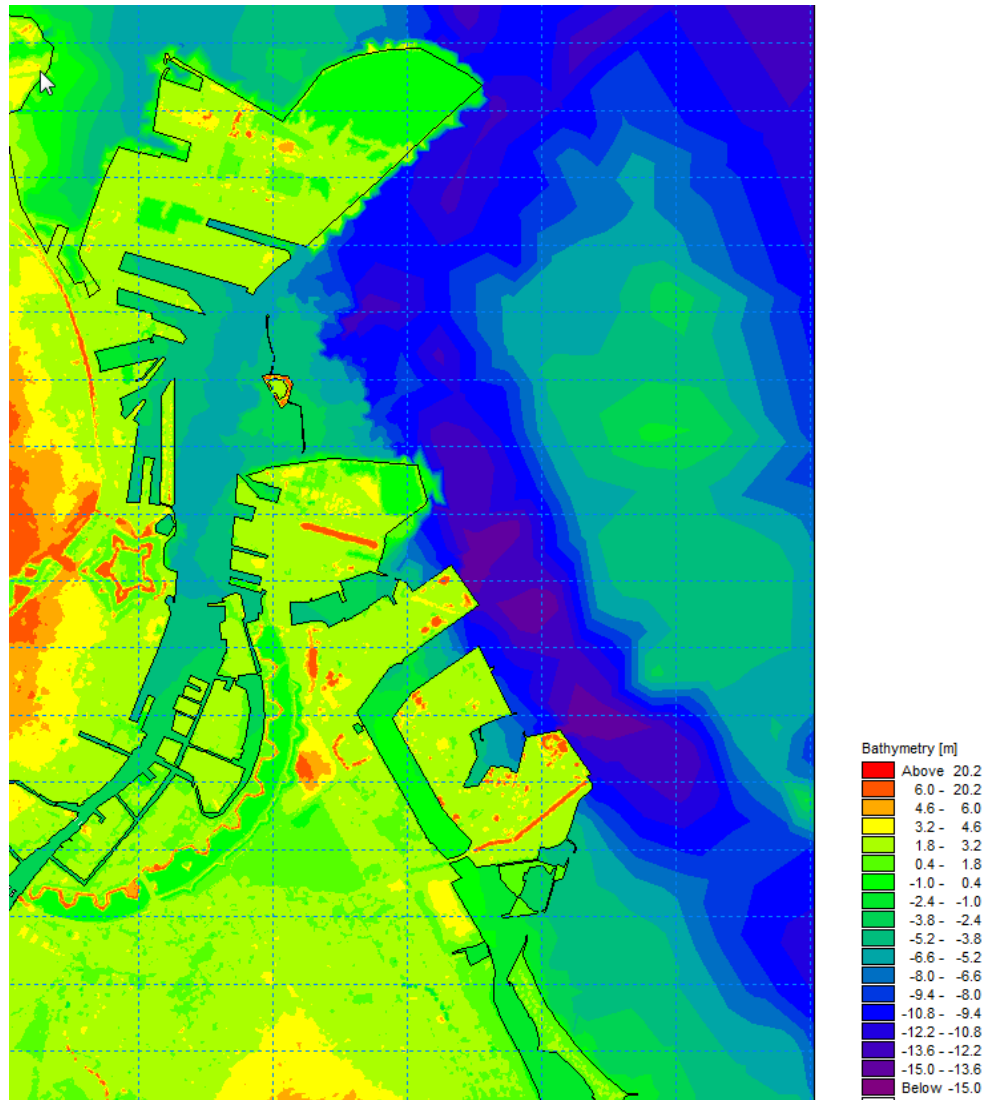


Figur 7-2 Tidsfordeling af undersøgte højvande fra nord. Den aktuelle fordeling af højvandet fra stormen "Bodil" er anvendt med op eller ned skalering til den undersøgte maksimale højvandskote.

Det er ikke undersøgt hvilke konsekvenser det vil få for oversvømmelsernes udbredelse over land hvis højvandet holder sit maksimalniveau i f. eks. 6 timer længere. Umiddelbart vil det betyde at højvandet kan nå at strømme lidt længere ind over land og ramme et lidt større område. Der er dog så stor modstand fra terræn og bygninger – og evt. stigende terræn – at forøgelsen af udbredelsen vurderes at være begrænset.



Figur 7-3 Afgrænsning for beregningsmodel

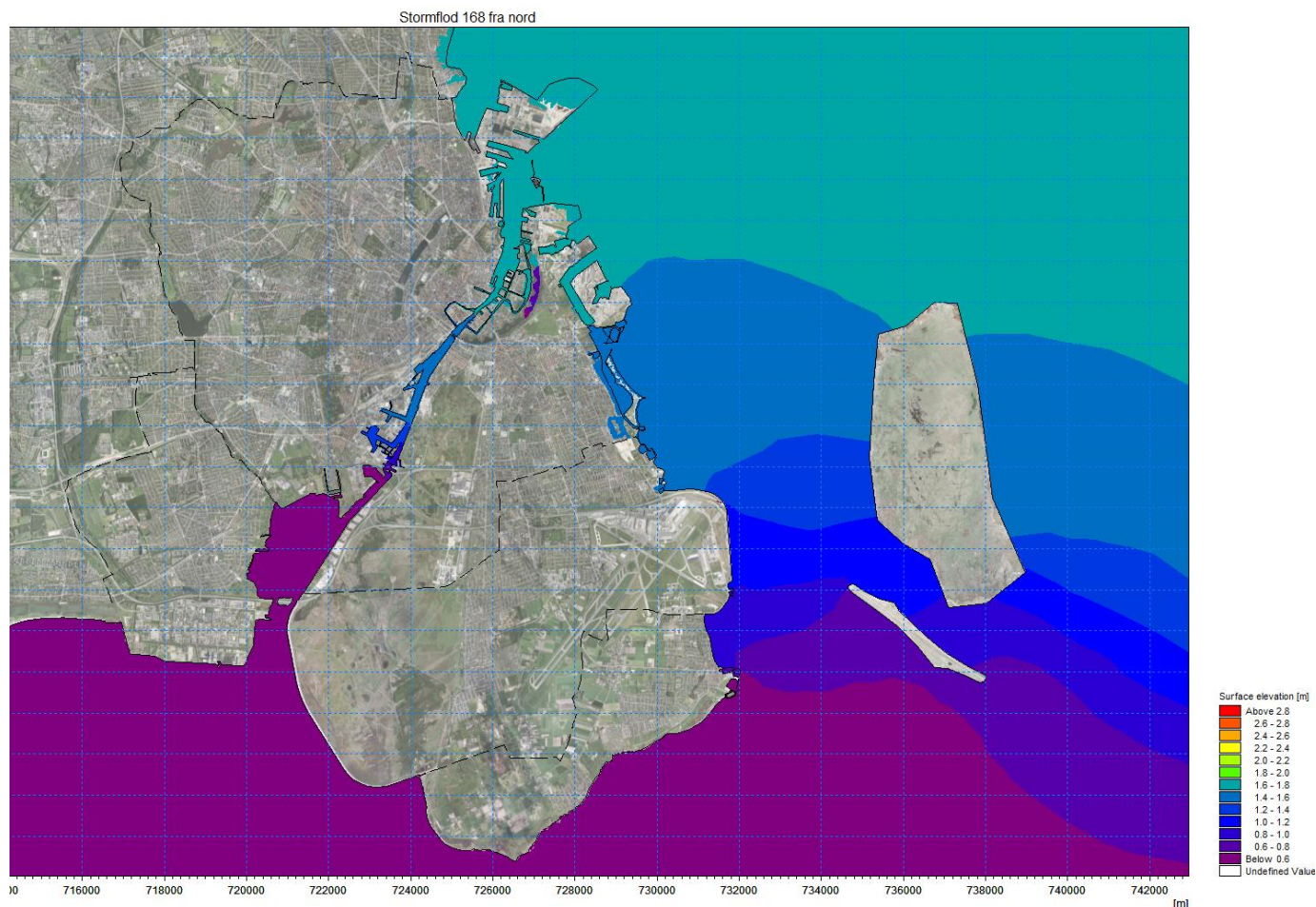


Figur 7-4 Udsnit af model omkring Københavns Havn

7.2 Stormflod fra nord

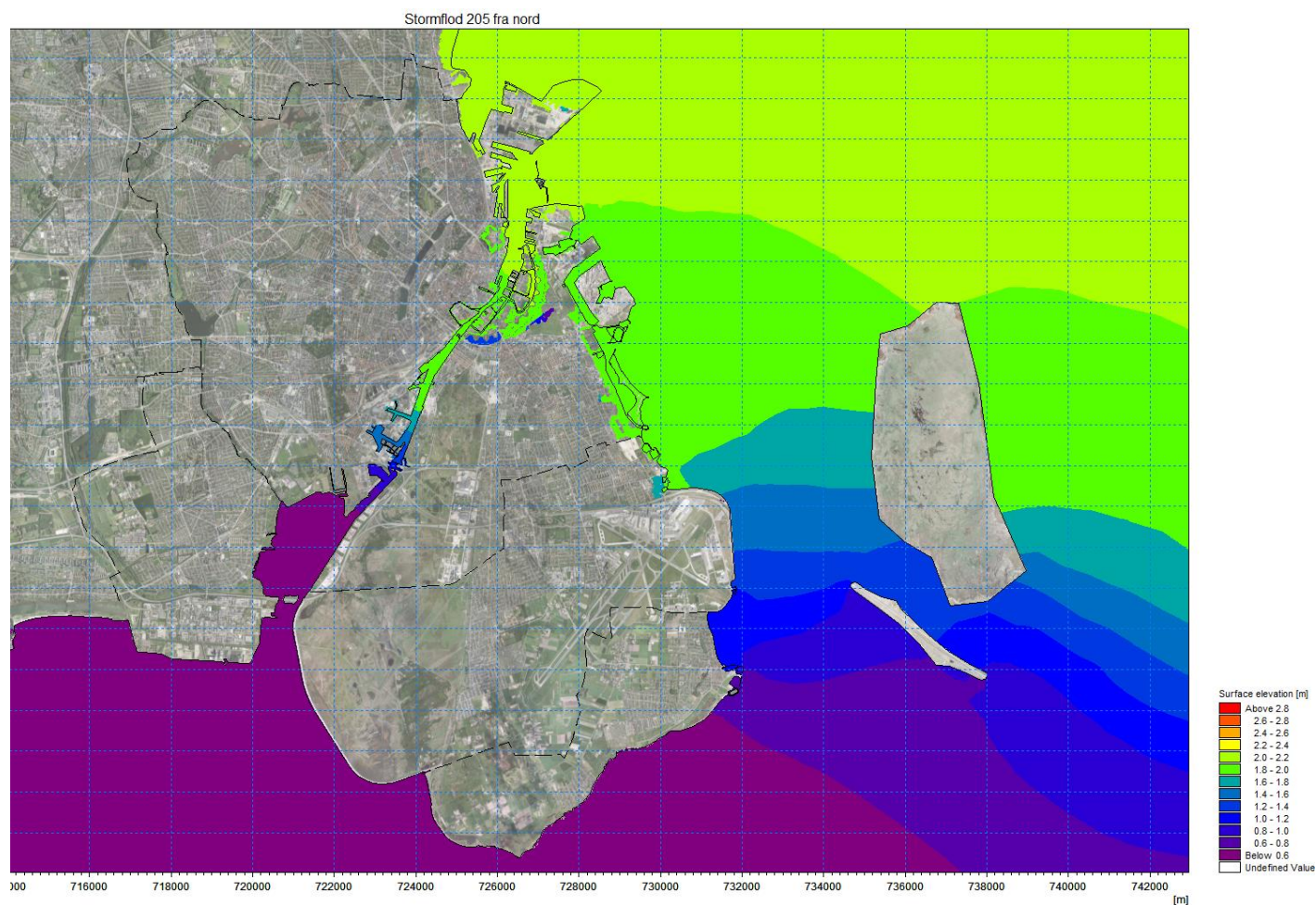
De beregnede udbredelser af oversvømmelser for stormflod fra nord er vist på Figur 7-5 til Figur 7-8.

For stormflod fra nord på 168 cm ved Ndr Toldbod er der få oversvømmelser ved Christianshavn.



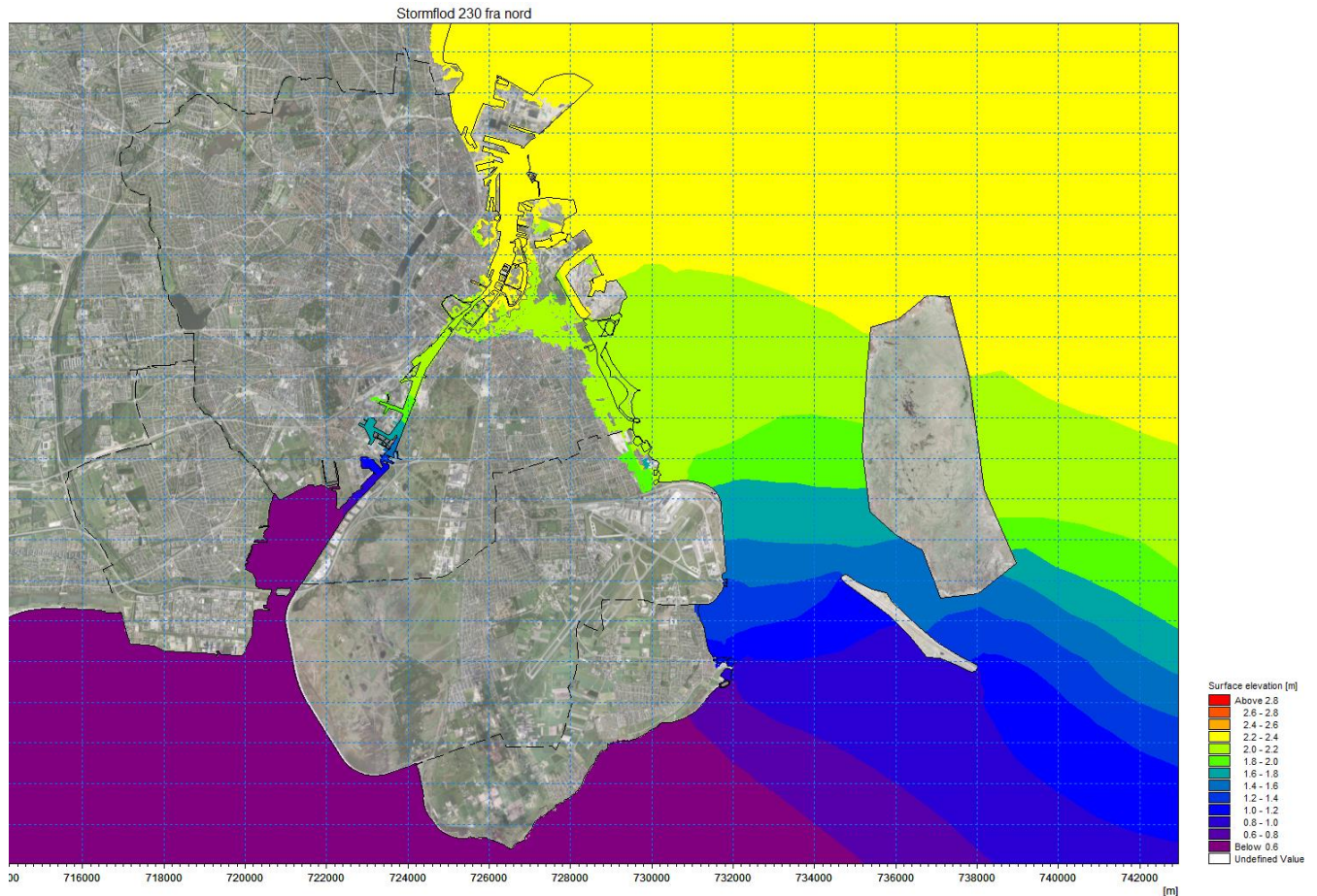
Figur 7-5 Højvande fra nord på 168 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

For hændelsen på 2,05 meter fra nord begynder oversvømmelserne at brede sig over et større område på Christianshavn og begynder at oversvømme bygninger på Østamager.



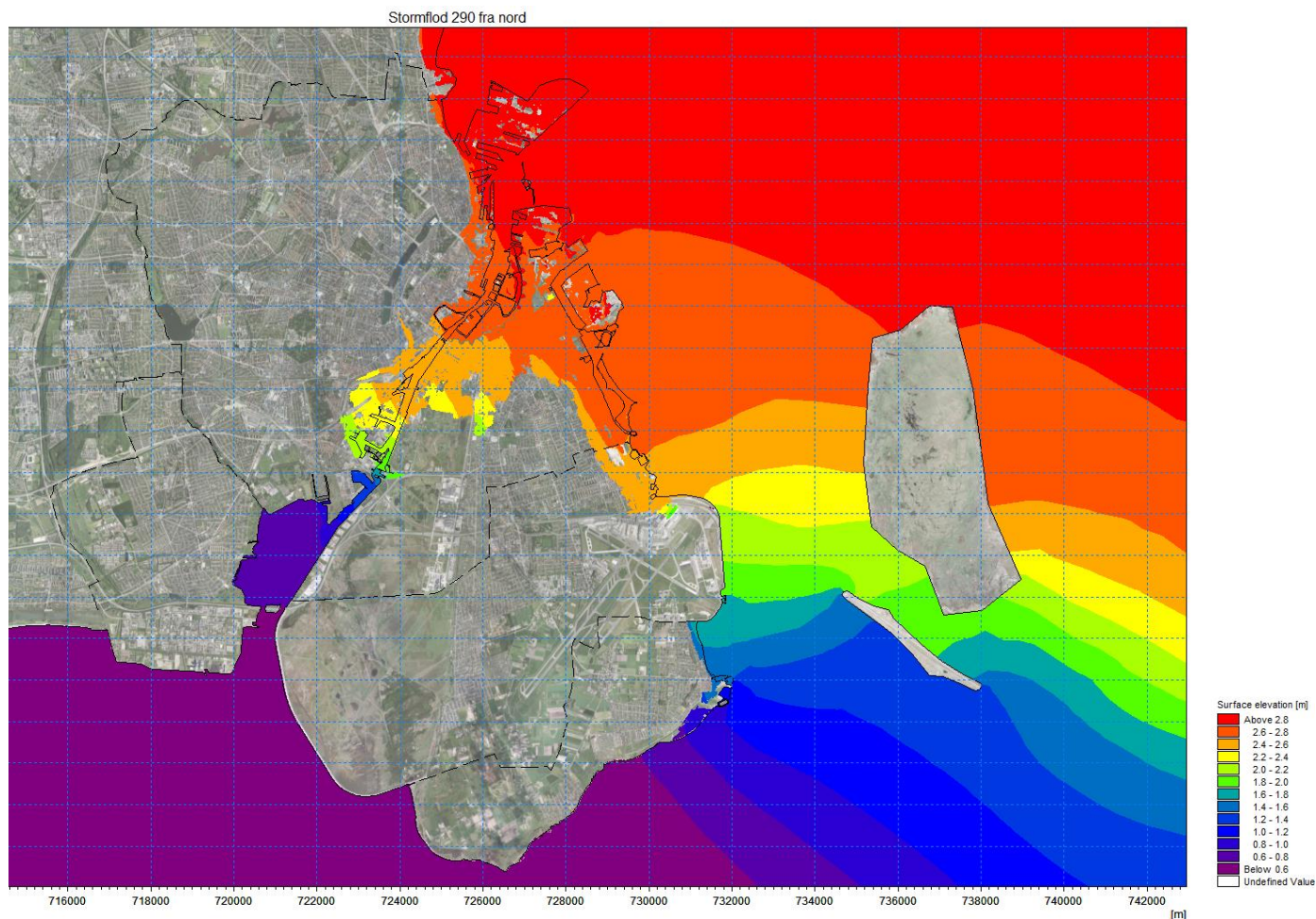
Figur 7-6 Højvande fra nord på 205 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

For en stormflod fra nord på 2,30 meter begynder kajkanterne langs Københavns havn, at blive oversvømmet. Der kommer derfor oversvømmelser af havnenære bygninger ned til omkring Langebro. Derfra mod syd er stormflodsniveauet under kajkant niveau, og vil kun give problemer for ejendomme ved Teglholmen og evt. ved enkelte ejendomme ved Sluseholmen. Ved dette højvande kommer der store oversvømmelser på Christianshavn og det nordlige Amager. Metro-nedgange ved Havnegade, Christianshavn og Stadsgraven bliver ikke oversvømmet ved denne stormflod selvom sikringsniveauet er i 2,20 meter.



Figur 7-7 Højvande fra nord på 230 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

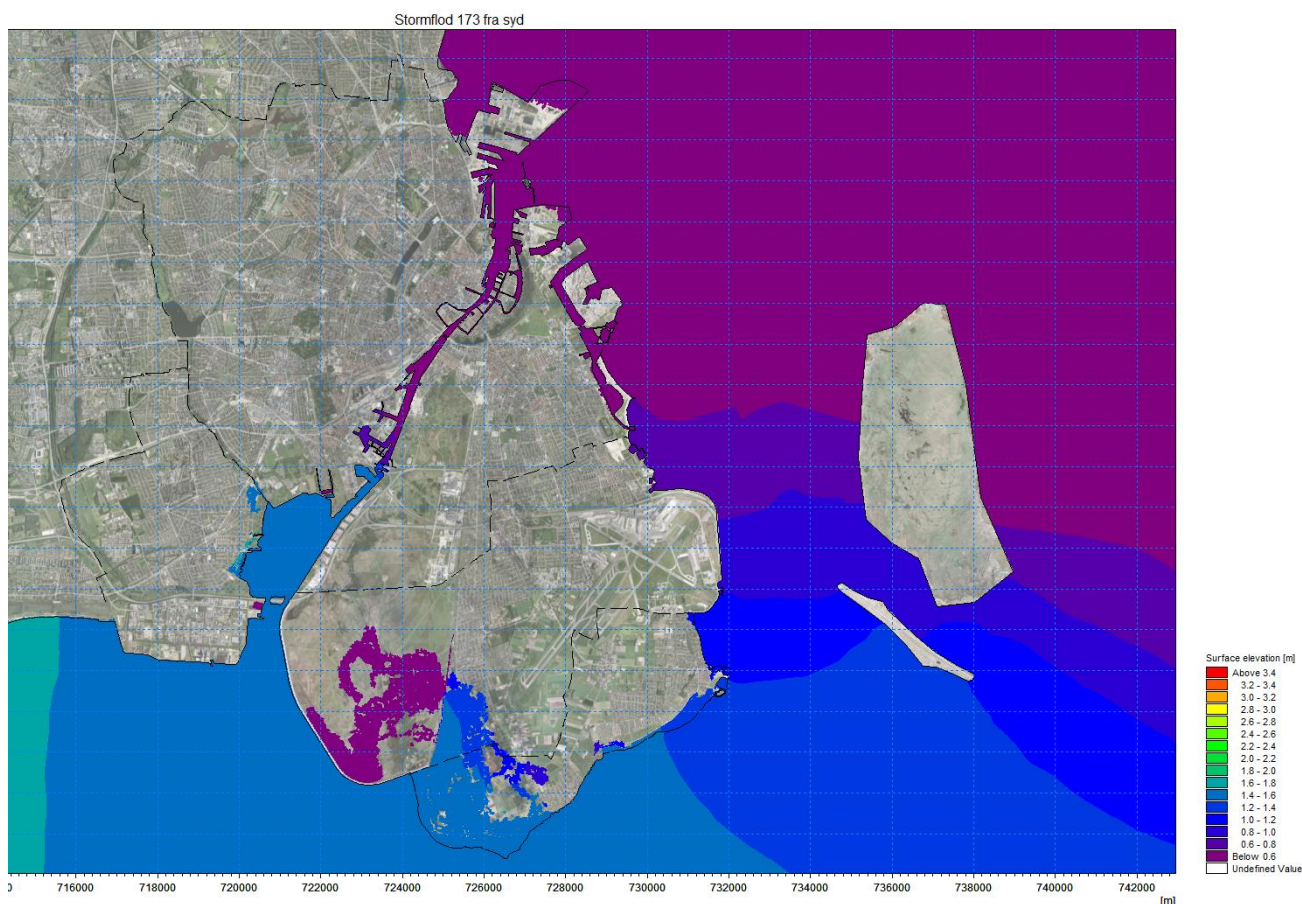
Ved en stormflod fra nord på 2,90 meter breder oversvømmelserne sig helt ned til Sluseholmen og vil medføre store skader langs havnen og hele det nordlige Amager. Ved denne hændelse vil banegraven ved Hovedbanegården, banetunnelen ved Sydhavnen og Metroen blive oversvømmet. Endvidere vil Nordhavnen med de nævrende terrænforhold blive oversvømmet.



Figur 7-8 Højvande fra nord på 290 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

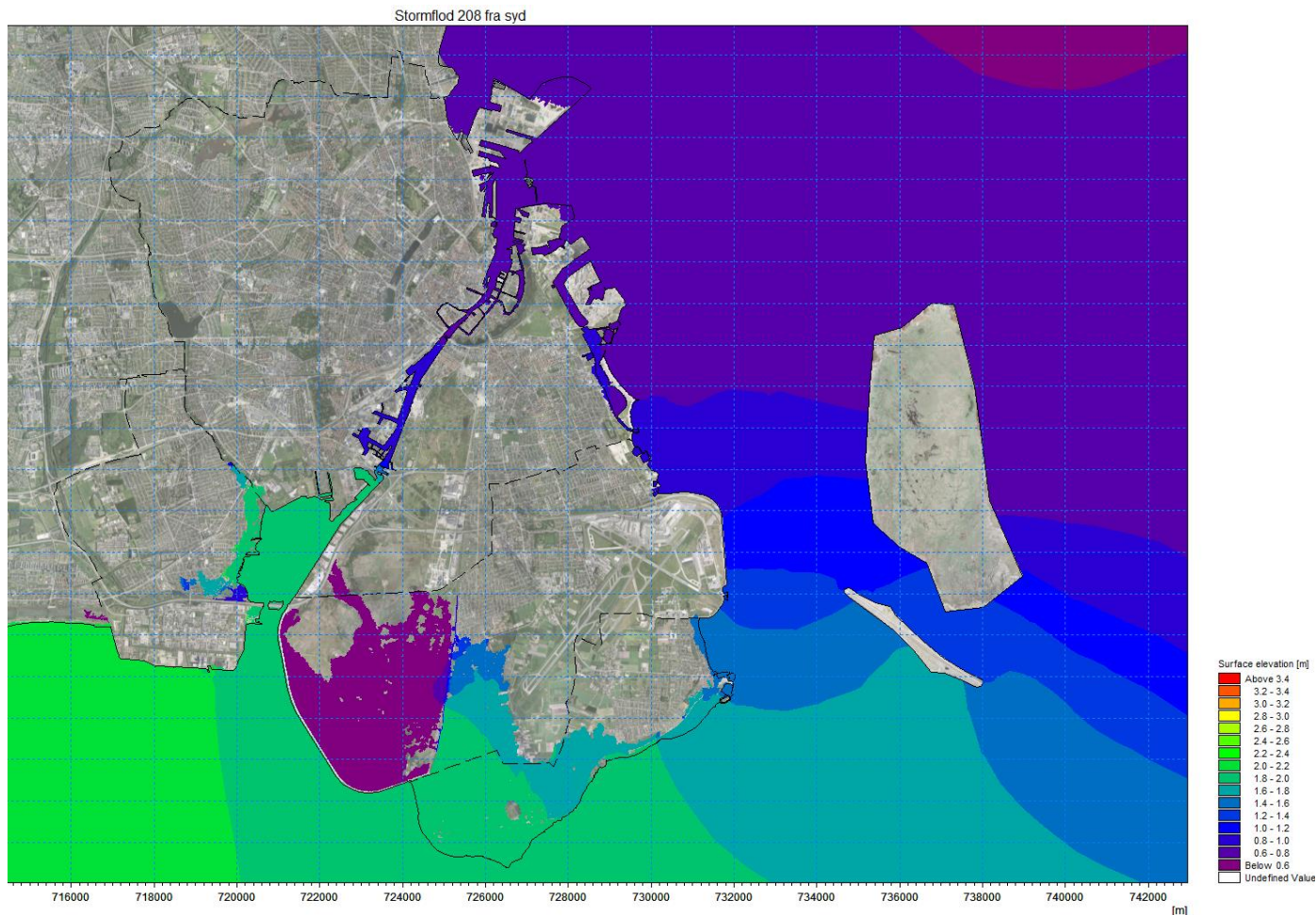
7.3 Stormflod fra syd

Ved en stormflod fra syd på 1,73 meter vil der forekomme oversvømmelser på det sydlige Amager, men disse oversvømmelser vil ikke brede sig til Københavns Kommune.



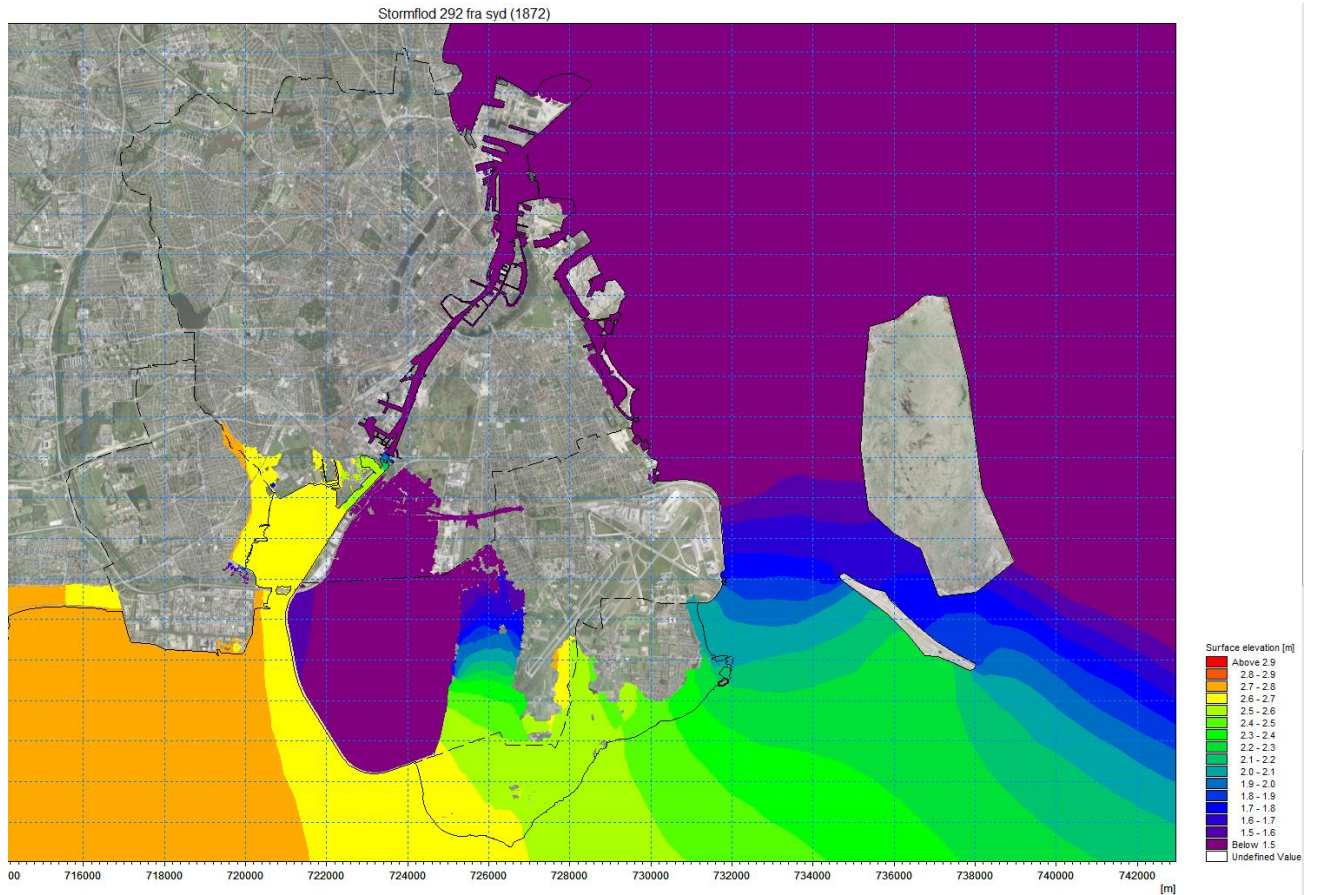
Figur 7-9 Højvande fra syd på 173 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

Ved stormflod fra syd på 2,08 meter vil oversvømmelserne på det sydlige Amager fortsætte over land og ramme Kalvebod Fælled og oversvømme områder i Københavns Kommune. I Kalveboderne vil højvandet også forårsage oversvømmelser ved Harrestrup Å.



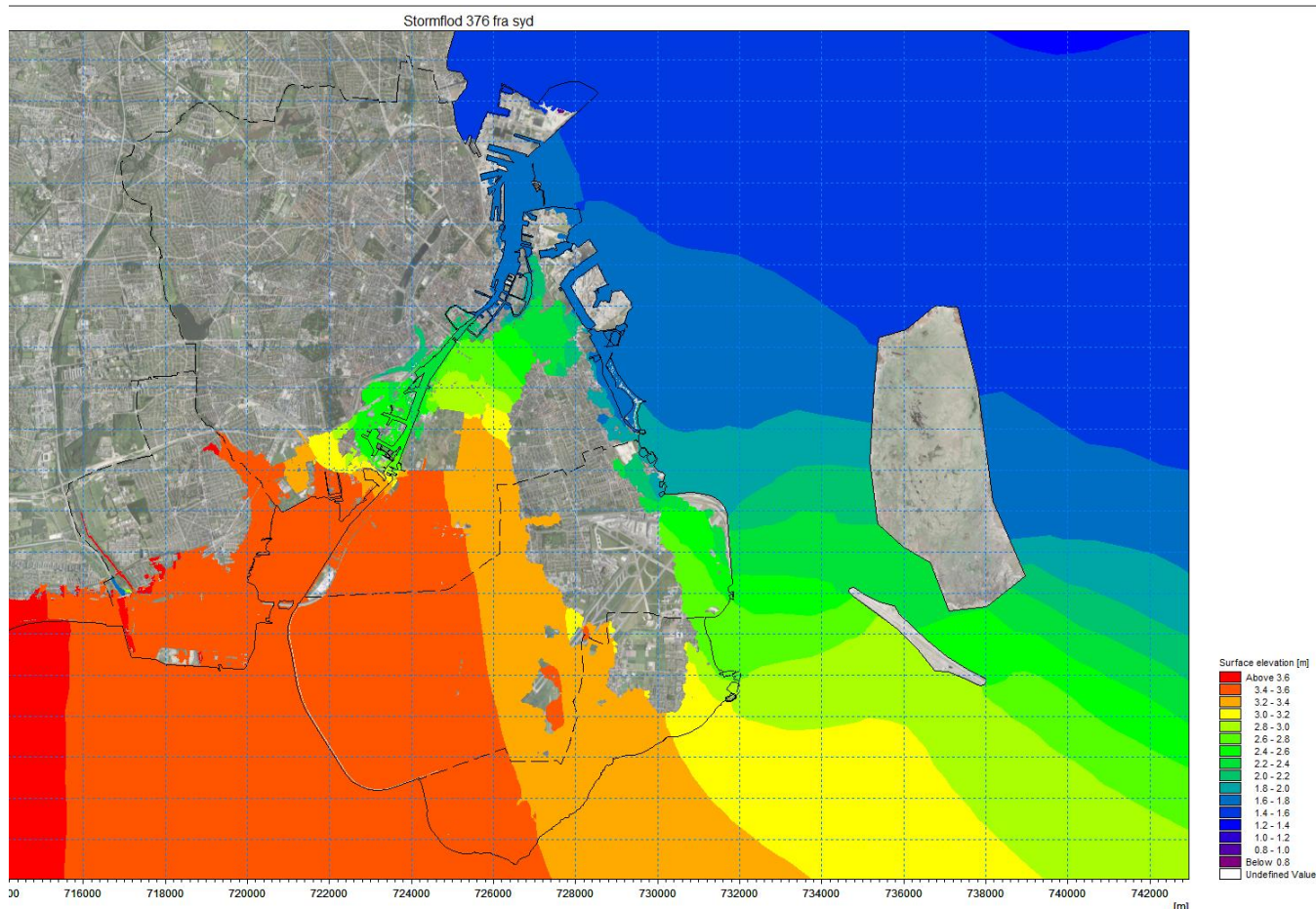
Figur 7-10 Højvande fra syd på 208 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

Ved stormflod fra syd på 2,92 meter, hvilket svarer til den historiske 1872 stormflod, vil der komme oversvømmelser af Ørestad Syd og Øresundsmotorvejen. Ved Harrestrup Å kommer der store oversvømmelser og Valbyparken samt havneområdet ved Fiskerihavnen bliver også ramt.



Figur 7-11 Højvande fra syd på 292 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

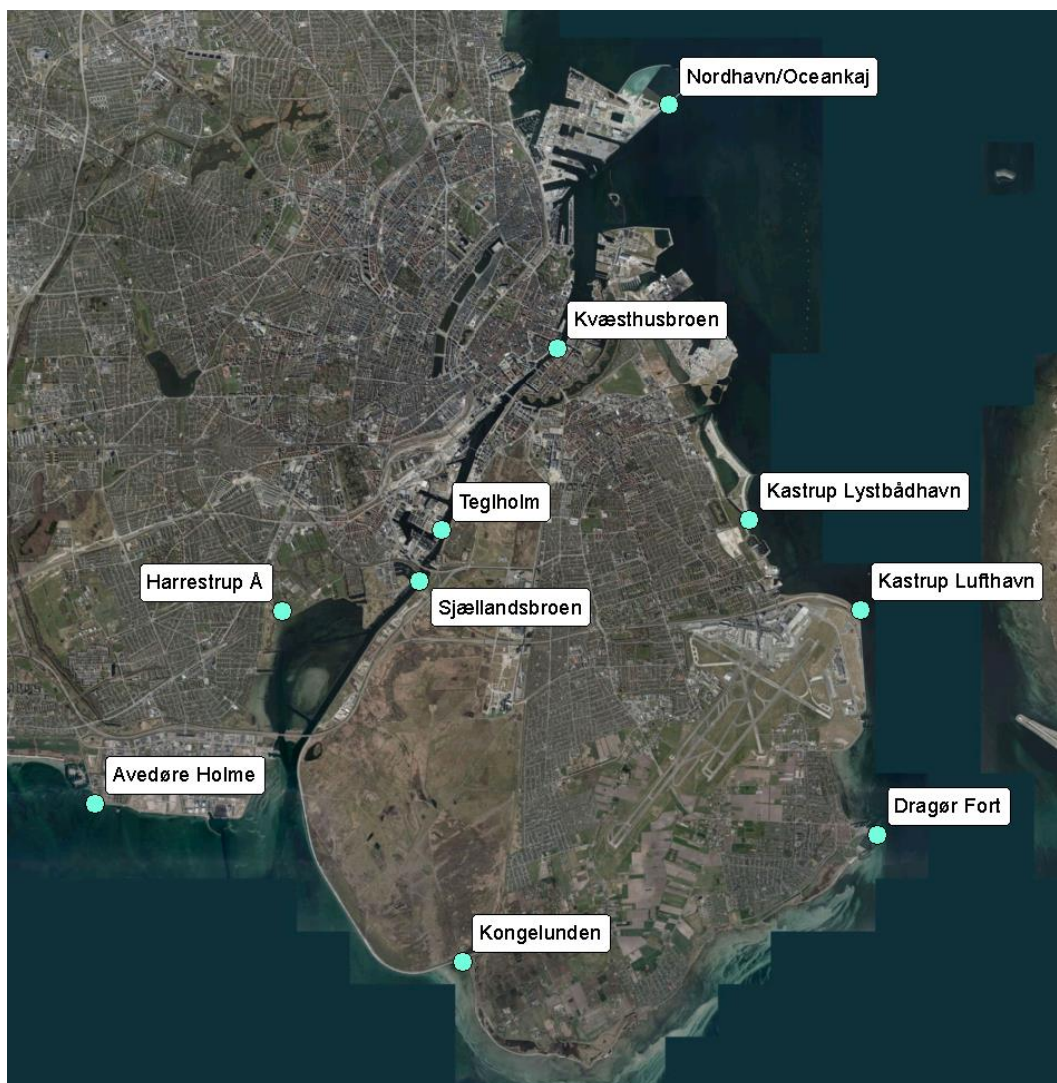
Ved stormflod fra syd på 3,76 meter bliver store dele af Amager oversvømmet. Digerne langs Avedøre Holme bliver også oversvømmet, hvilket medfører, at der bliver presset store vandmængder ind i Kalveboderne og videre ind over København. Oversvømmelserne breder sig helt op til Slotsholmen. Banegraven ved Hovedbanegården, banetunnelen ved Sydhavnen og Metroen blive oversvømmet. Oversvømmelserne af Vestamager, Ørestaden og nordlige del af Amager, skyldes vand der trænger ind fra syd via Dragør og Tårnby Kommune.



Figur 7-12 Højvande fra syd på 376 cm, maksimal stormflodsudbredelse og maksimal vandstand under højvandet

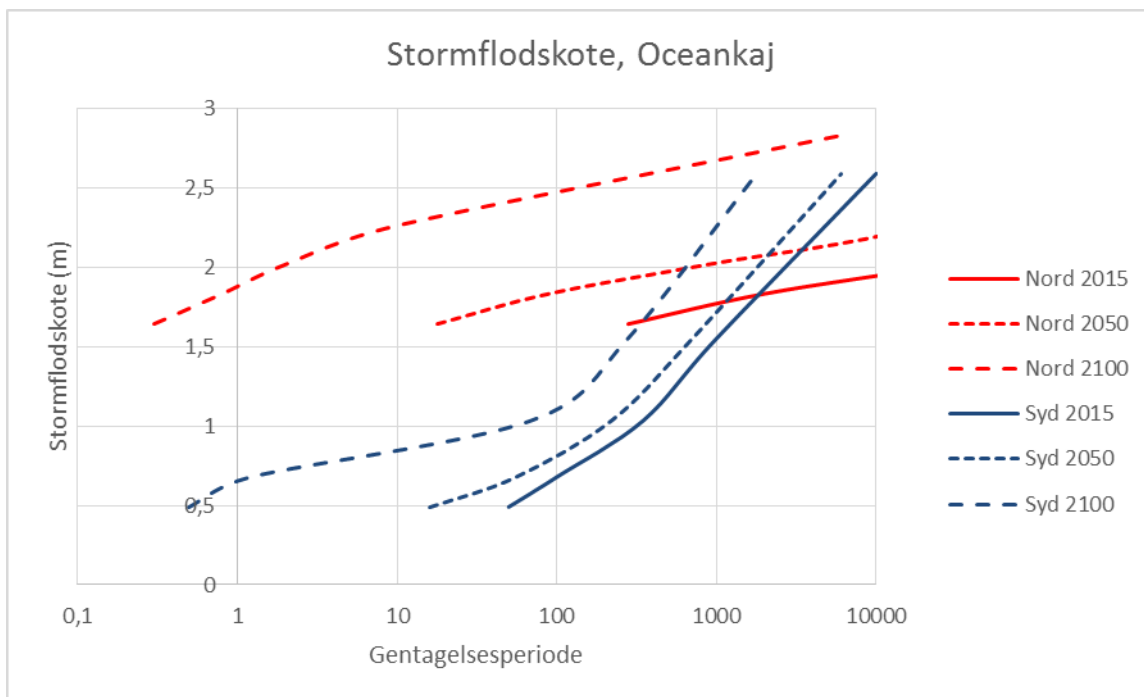
7.4 Stormflodskoter for udvalgte lokaliteter

For de gennemførte stormflodsberegninger er maksimale vandstande for udvalgte lokaliteter trukket ud. De udvalgte lokaliteter er vist på Figur 7-13.

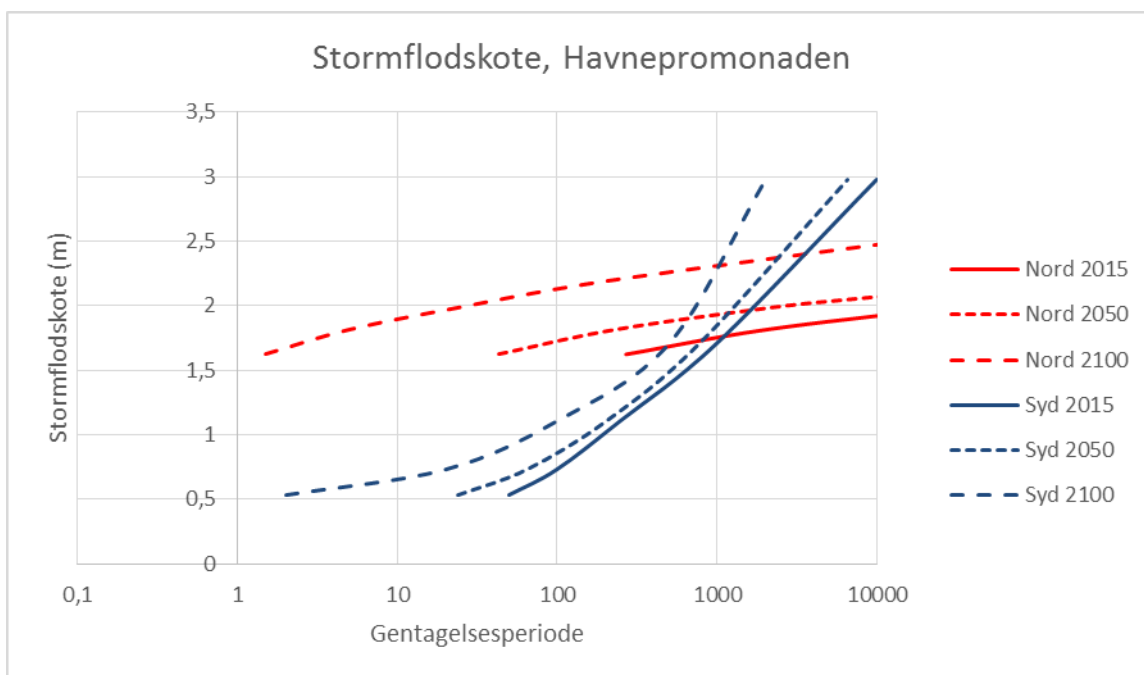


Figur 7-13 Lokalteter hvor der er beregnet stormflodskoter

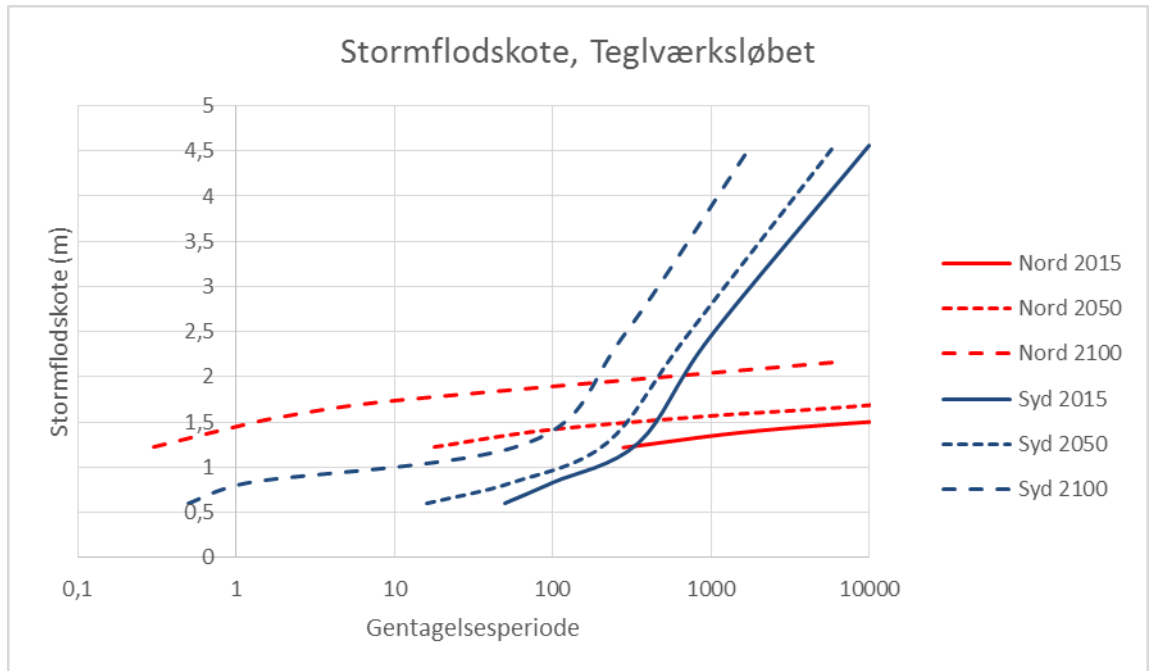
Resultaterne er illustreret i en figur for hver lokalitet, hvor både stormflod fra syd og nord er angivet. Med figurerne kan det ses om det er stormflod fra nord eller syd som har størst betydning for den pågældende lokalitet. Eksempelvis er det for Kvæsthusbroen stormflod fra nord som er farligst op til en gentagelsesperiode på 1000 år, mens stormfloder fra syd vil give de højeste vandstande for højvande der er sjældnere end hvert 1000 år. Se Figur 7-15.



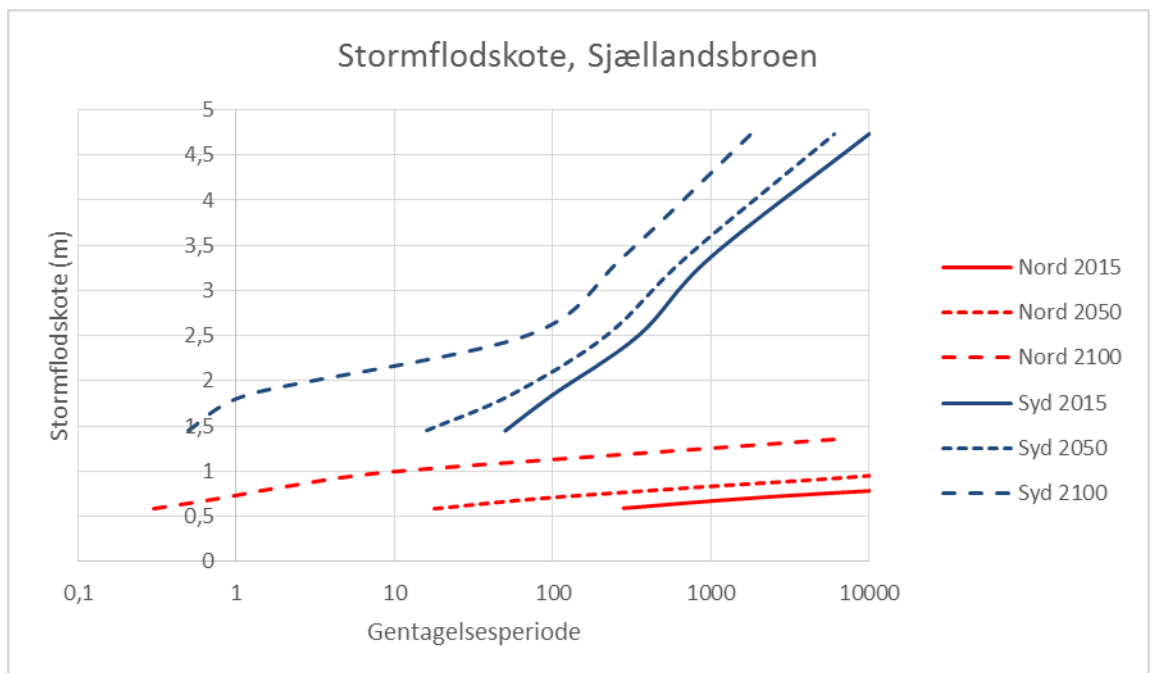
Figur 7-14 Stormflodskote for Nordhavn/Oceankaj



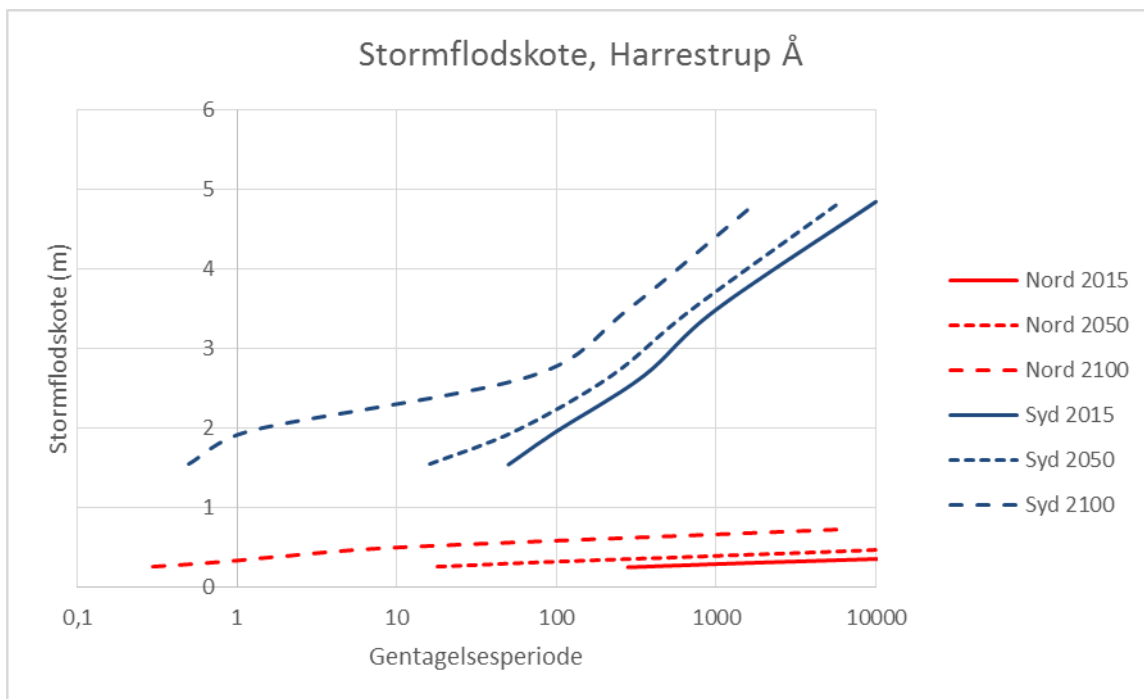
Figur 7-15 Stormflodskote for Havnepromenaden (Kvæsthusbroen)



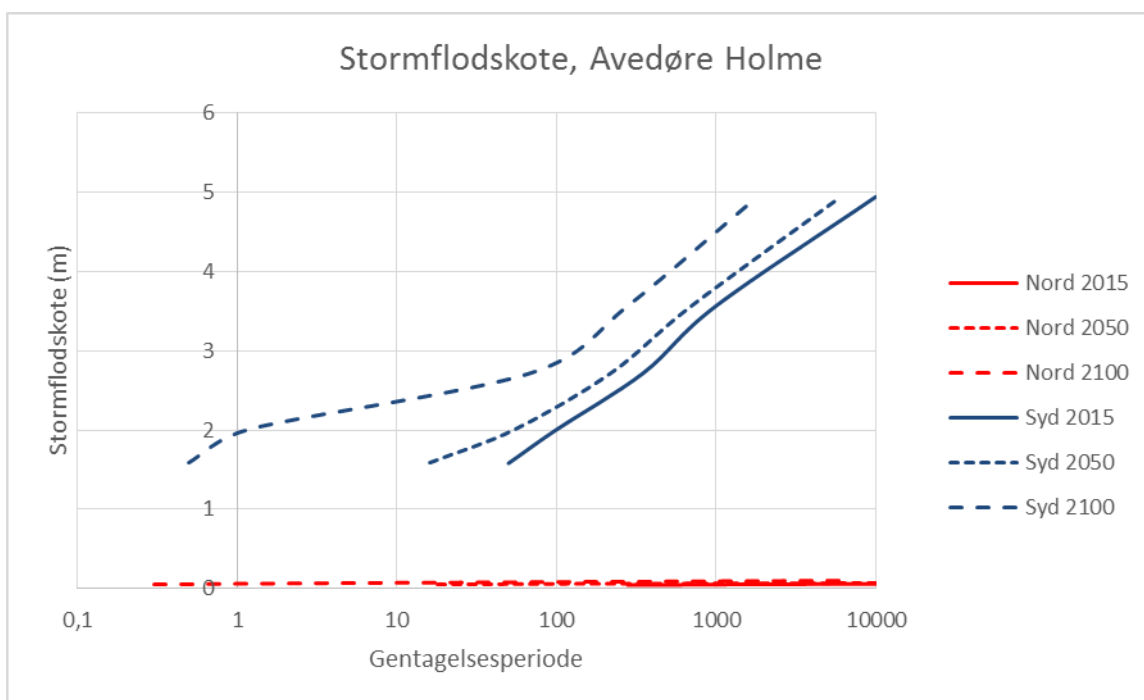
Figur 7-16 Stormflodskote for Teglværksløbet/Teglholt



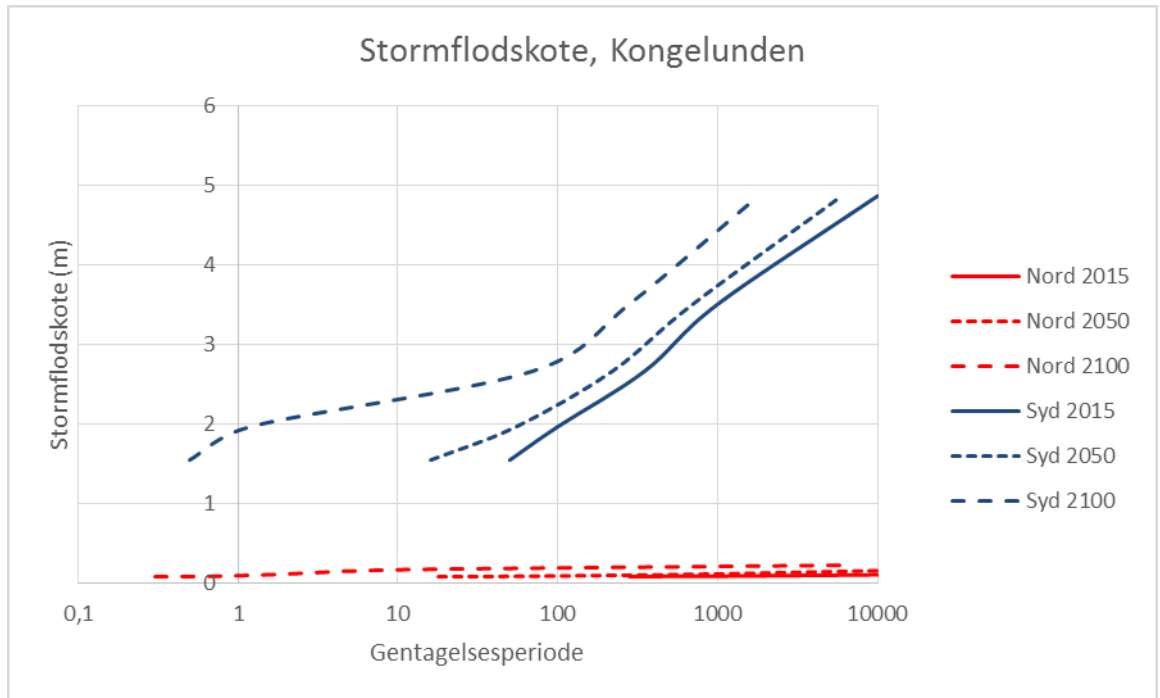
Figur 7-17 Stormflodskote for Sjællandsbroen



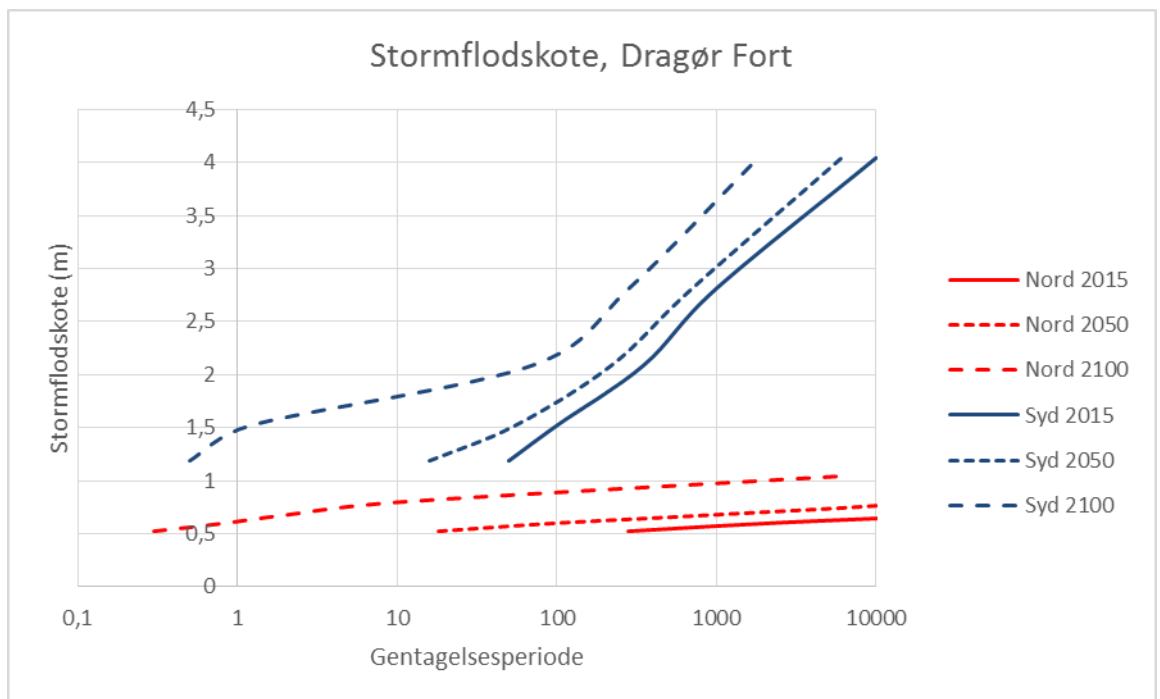
Figur 7-18 Stormflodskote for Harrestrup Å



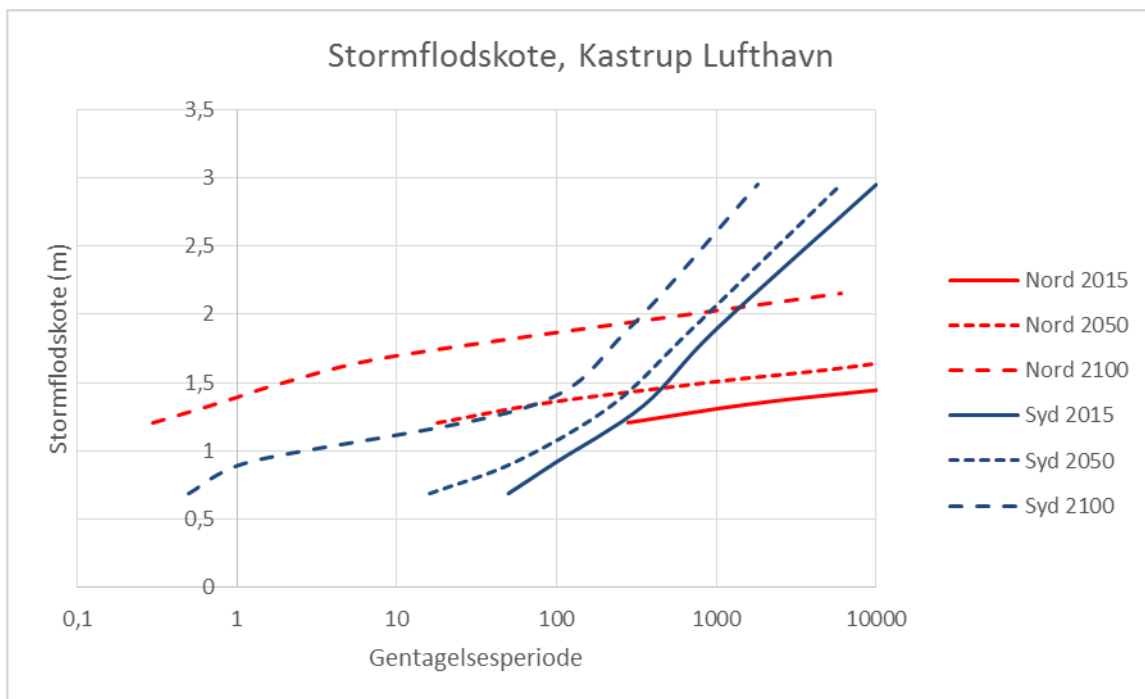
Figur 7-19 Stormflodskote for Avedøre Holme



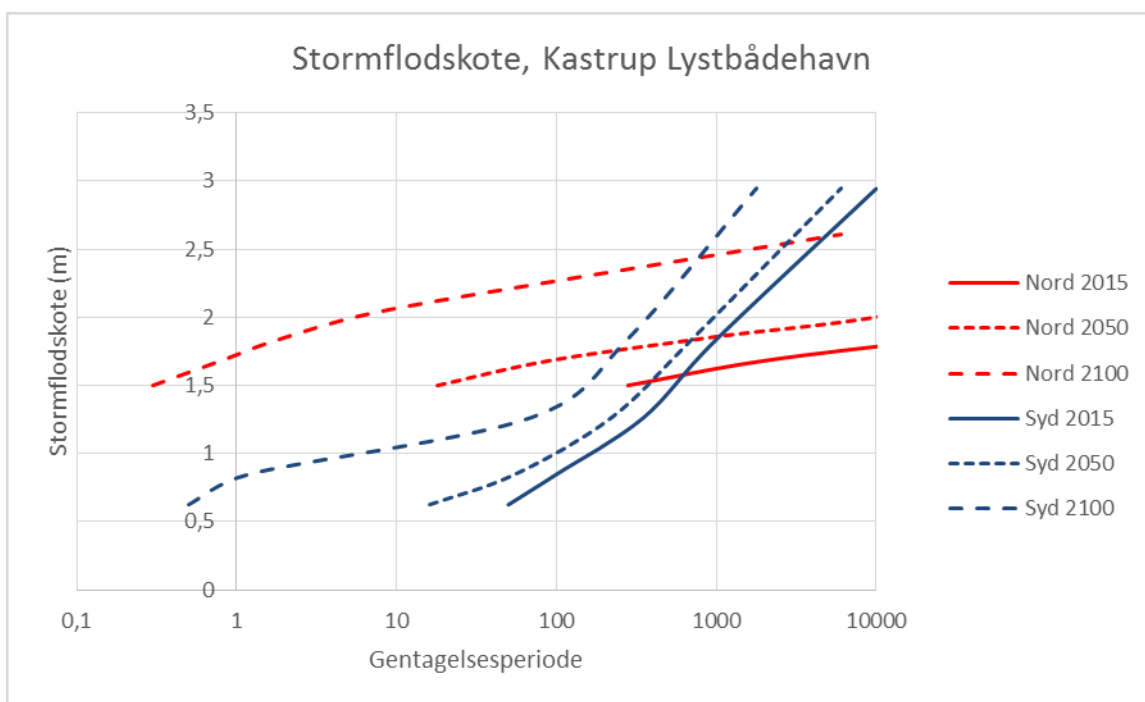
Figur 7-20 Stormflodskote for Kongelunden



Figur 7-21 Stormflodskote for Dragør Fort



Figur 7-22 Stormflodskote for Kastrup Lufthavn



Figur 7-23 Stormflodskote for Kastrup Lystbådehavn

8 Økonomiske konsekvenser ved de udvalgte højvande

For de gennemførte beregninger er den maksimale udbredelse af oversvømmelser registreret. Antallet af bygninger, infrastruktur og tekniske installationer som bliver ramt af oversvømmelser beregnes og omsættes til skadesomkostninger.

De enhedspriser for skadesomkostninger som er angivet i Naturstyrelsens samfundsøkonomiske beregningsværktøj (PLASK) er anvendt ved beregning af skader.

For skader på bygninger er der indhentet data fra Stormrådet. Udbetalinger i region Hovedstaden for Bodil stormen i december 2013 er anvendt. Det antages, at kælderskader er ens for skybrud og stormflod og at der er kælderskader på 70% af bygningerne. Den gennemsnitlige udbetaling er anvendt for erhvervsskader. De anvendte enhedsomkostninger for forskellige typer skader er angivet i Tabel 8-1.

Skadestype	Enhed	Skade (kr./enhed)
Trafikforstyrrelser alle hovedveje	Antal	272
Vejbrud	m	2.951
Stueetage - privat	m ²	2.825
Kælder - privat	m ²	528
Transformerstationer	Antal	1.100.000
El-svigt private (>5 t)	Antal	2.063
El-svigt erhverv (>5 t)	Antal	6.189
Erhverv - skader, produktionstab og løvsøre	Antal	448.000
Skader på kloakker	Antal	1.100.000

Tabel 8-1 Enhedspriser for samfundsøkonomiske skader

Der er endvidere risiko for oversvømmelse af en række centrale trafik anlæg med efterfølgende nedlukning og genopbygning. Prissætning af disse skader, driftstab og omkostninger i forbindelse med passagerenes forsinkelser er angivet i Tabel 8-2.

Efter færdiggørelsen af Metro Cityring forventes passagertallet for metroen at stige til det tredobbelte i 2025, hvorfor omkostningerne ved en evt. oversvømmelse af hele metroen også forventes at stige til det tredobbelte. De økonomiske beregninger er baseret på den nuværende passagemængde og udgør derfor et for lavt niveau for omkostningerne for metroen efter 2025. Der er generelt i konsekvensberegningerne anvendt den nuværende situation mht. arealanvendelse, infrastruktur, passager mv.

	Passagertal 2014 (mio/år)	Periode (år)	Omkostning til Anlæg (mio kr)	Driftstab (mio kr)	Forsinkelser (mio kr)
Metro	56 ¹	2 ²	1.000 ²	1.000 ²	4.400
Jernbane (S-tog og fjerntog)	91 ³ (2007)	1	1.000	2.000	3.600
Kastrup Lufthavn	25,6 ⁴	1	1.000	4.000 ⁴	4.000
Øresundsbroen	21	1,5 ²	2.000 ²	2.000 ²	2.500

- 1 <http://www.m.dk/#!/om+metroen/metrobyggeriet/om+cityringen/passagertal>
_____ Forventes at stige til 154 mio. passagerer i 2025
- 2 Forstærkning af Kalveboddiget, Rambøll 2008
- 3 DSB Østtælling 2007
- 4 http://www.cph.dk/globalassets/om-cph/investor/publikationer/cph_dk_aar_report_2014.pdf
- 5 <https://www.oresundsbron.com/da/traffic-stats> og
<http://sundogbaelt.dk/togpassagerer-over-oeresundsbron/>

Tabel 8-2 Samfundsøkonomiske skader ved trafikknudepunkter 2014

De samlede samfundsøkonomiske skader er beregnet for hver af de modellerede højvandssituationer på basis af de angivne enhedsomkostninger/skader og en opgørelse af de områder og infrastrukturer der rammes af disse oversvømmelser. Resultaterne er vist i Tabel 8-3 og Tabel 8-4

Stormflodskote, Nord (cm)		168	185	205	230	290
Trafikforstyrrelser alle hovedveje	mio. kr	0,0	27,2	130,6	184,5	390,9
Vejbrud	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Stueetage - privat	mio. kr	5,7	135,1	421,5	555,0	1.881,6
kælder - privat	mio. kr	0,5	97,3	313,4	450,5	1.525,9
Transformerstationer	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elsvigt private (>5 t)	mio. kr	0,0	0,3	1,7	3,0	6,8
Elsvigt erhverv (>5 t)	mio. kr	0,0	0,7	2,7	5,6	21,6
Erhverv - skader, produktionstab og løsøre	mio. kr	3,6	46,6	180,5	368,7	1.525,4
Skader på kloakker	mio. kr	0,0	2,2	3,3	5,5	11,0
Anlæg+driftstab, Kastrup Lufthavn	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anlæg+driftstab, Øresundsbro (tunnel)	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anlæg+driftstab, jernbane	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	3.000,0
Anlæg+driftstab, Metro	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	2.000,0
Forsinkelser, Kastrup Lufthavn	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Forsinkelser, Øresundsbro	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Forsinkelser, jernbane	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	3.637,3
Forsinkelser, Metro	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	4.416,2
Total	mio. kr	9,8	309,4	1.053,8	1.572,9	18.416,7

Tabel 8-3 Samfundsøkonomiske skader for stormflodshændelser fra nord. Koter for Nordre Tolbod.

Stormflodskote, Syd (cm)		173	208	292	376	515
Trafikforstyrrelser alle hovedveje	mio. kr	0,0	13,6	135,9	407,8	1.087,5
Vejbrud	mio. kr	0,0	0,0	0,1	0,1	0,7
Stueetage - privat	mio. kr	5,7	65,9	269,8	2.914,0	4.237,5
Kælder - privat	mio. kr	0,5	50,5	202,6	1.627,5	2.640,0
Transformerstationer	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elsvigt private (>5 t)	mio. kr	0,0	0,1	0,5	14,0	20,6
Elsvigt erhverv (>5 t)	mio. kr	0,0	0,3	1,7	15,2	30,9
Erhverv - skader, produktionstab og løsøre	mio. kr	2,7	17,6	117,8	1.069,4	2.240,0
Skader på kloakker	mio. kr	0,0	0,0	16,5	27,5	55,0
Anlæg+driftstab, Kastrup Lufthavn	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	5.000,0
Anlæg+driftstab, Øresundsbro (tunnel)	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	4.000,0
Anlæg+driftstab, jernbane	mio. kr	0,0	0,0	0,0	3.000,0	3.000,0
Anlæg+driftstab, Metro	mio. kr	0,0	0,0	125,0	2.000,0	2.000,0
Forsinkelser, Kastrup Lufthavn	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	4.015,6
Forsinkelser, Øresundsbro	mio. kr	0,0	0,0	0,0	0,0	2.545,5
Forsinkelser, jernbane	mio. kr	0,0	0,0	0,0	3.637,3	3.637,3
Forsinkelser, Metro	mio. kr	0,0	0,0	550,0	4.416,2	4.416,2
Total	mio. kr	8,9	147,9	1.420,0	19.129,0	38.926,9

Tabel 8-4 Samfundsøkonomiske skader for stormflodshændelser fra syd. Koter for Køge.

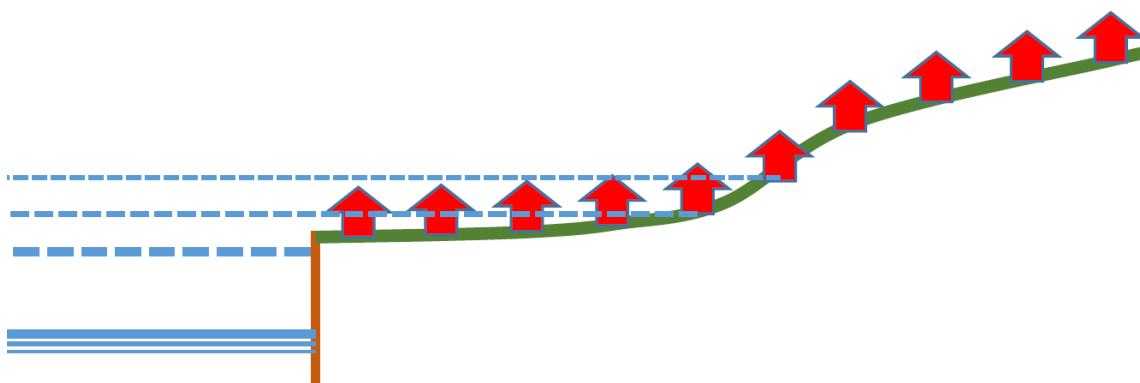
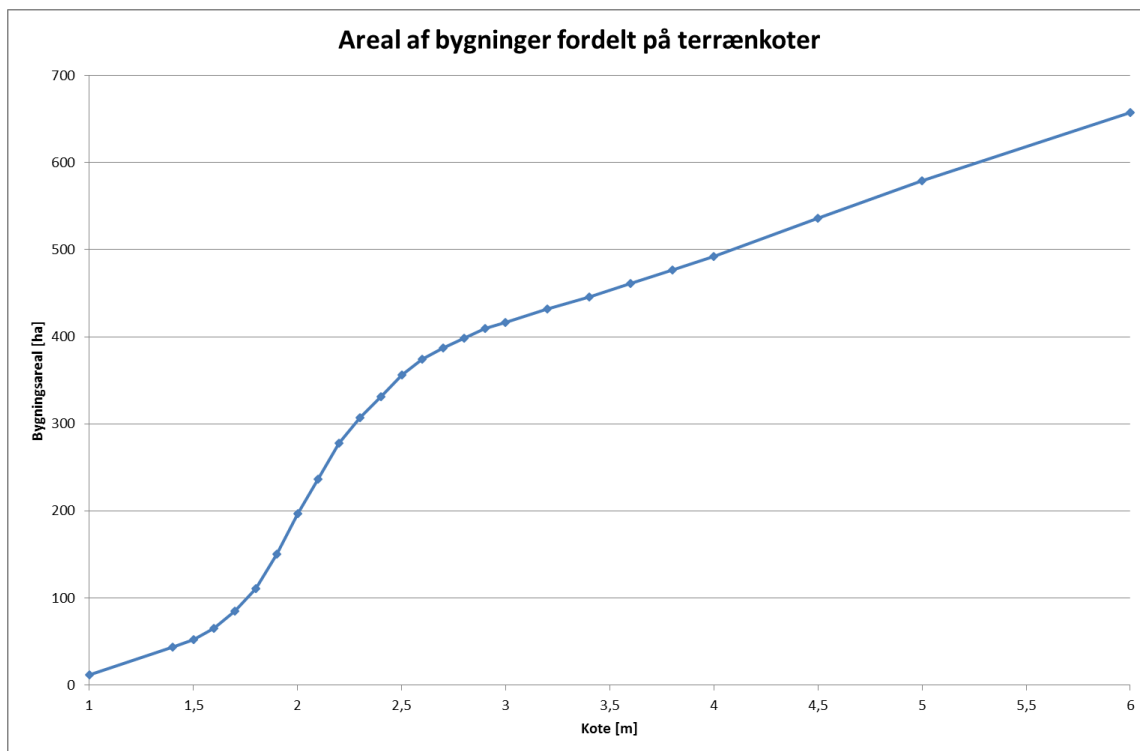
9 Diskussion af problemstilling og anbefaling

Hovedresultaterne af de gennemførte beregninger af forventelige fremtidige højvandsstatistikker og deraf følgende konsekvenser for omfanget af oversvømmelser og skader ved disse oversvømmelser er summeret i det følgende. De mest centrale problemstillinger ridses op som støtte for de videre vurderinger af forslag til ønsket sikring mod højvande og hvordan denne sikring skal etableres over tid og til hvilken højde.

Mange bygninger mellem kote 1,5 og 2,7

Bygninger og dermed infrastrukturen i Københavns Kommune er ikke jævnt fordelt i forhold til højden af terræn. Topografien betyder, at der ikke ligger ret mange bygninger under kote 1,5 m, mens der på "strandengene" mellem kote 1,5 og kote 2,7 m ligger en meget stor andel bygninger. Ved højere terræn sker tilvæksten i omfanget af bygninger væsentligt langsommere, hvilket fremgår af Figur 9-1.

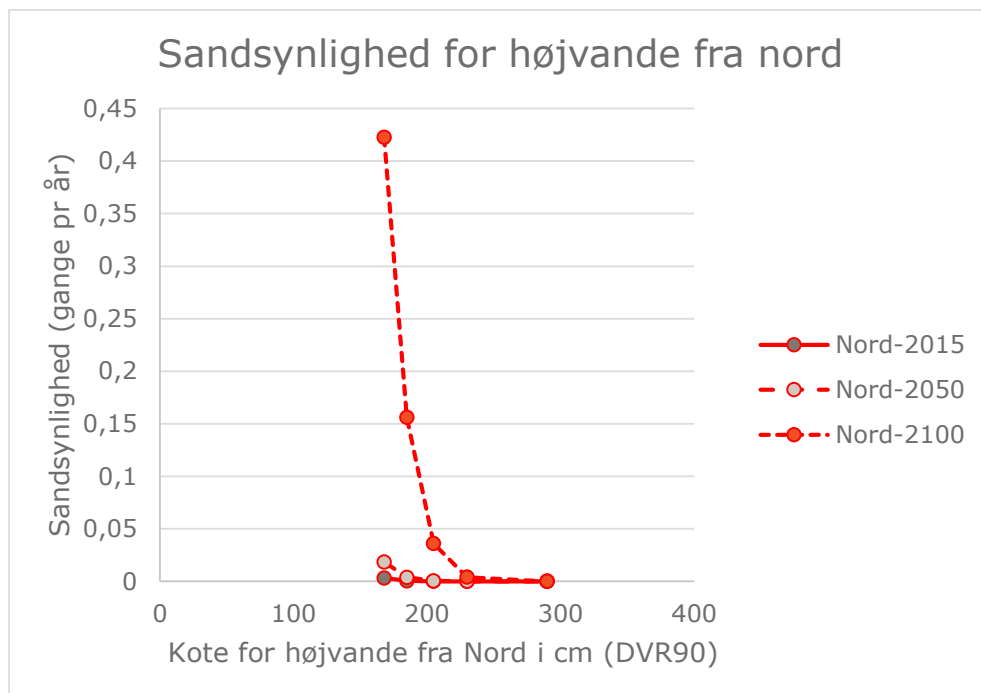
Omskrevet til oversvømmelseskonsekvenser betyder det, at højvande mindre end 1,5 meter reelt ikke giver nogen skader, men ved højvande mellem kote 1,5 og 2,7 m går det rigtig stærkt med tilvækst i skader, fordi vandet står over kajkanten og breder sig hurtigt over de lave områder. Ved højere højvande, skal vandet mere op ad bakke og udbredelsen af oversvømmelse og dermed omfang af skader sker kun langsomt i forhold til vandstandsstigningen.



Figur 9-1 Bygningsarealer i Københavns Kommune i forhold til terrænkote og illustration af højvandes betydning for omfang af oversvømmede bygninger.

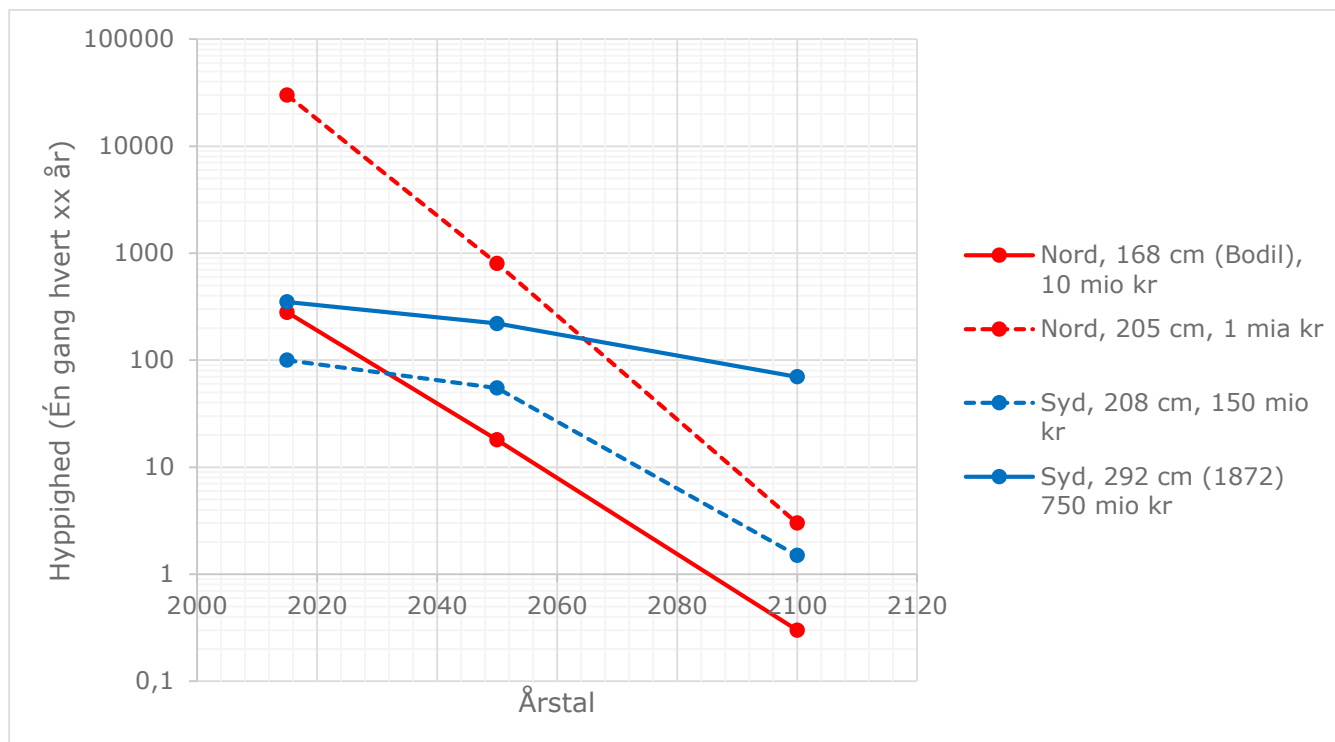
Efter 2050 bliver kritiske højvande hyppige

Ses på højvandsstatistikker for højvande fra nord og syd samt udviklingen over tid, ses at højvande fra syd når op i højere koter end højvande fra nord. Se Figur 5-9 og Figur 5-10 samt Figur 5-13 og Figur 5-14. Endvidere ses at meget kritiske højvande, statistisk set ikke vil ske så hyppigt de næste 20-40 år, mens der i de følgende 30-40 år vil ske en meget kraftig stigning i hyppigheden af kritiske og skadesvoldende oversvømmelser. Se Figur 9-2 for højvande fra nord. Man skal dog være opmærksom på at der er tale om statistik og sandsynligheder. Et 10.000-års højvande vil således ikke ske om 10.000 år, men kan ske om en uge eller om 20 år – det er helt tilfældigt, hvornår betingelserne er til stede for et højvande, der statistisk set forventes at optræder én gang hvert 10.000 år.



Figur 9-2 Sandsynlighed for højvande fra nord i 2015, 2050 og 2100 angivet som gange pr. år for forskellige højvande (cm i DVR90)

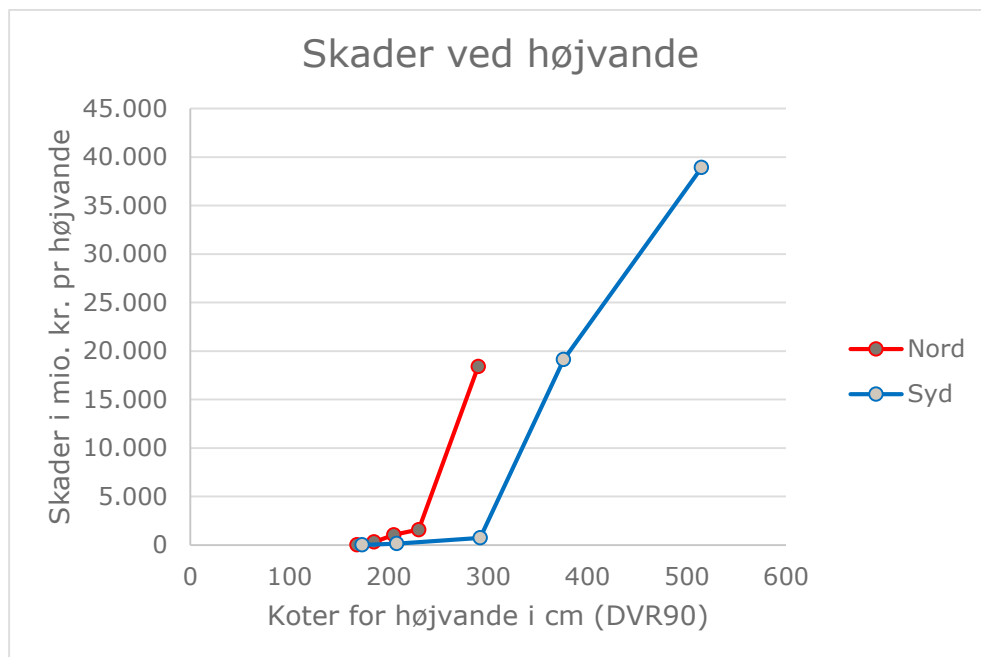
For at illustrere udviklingen i hyppigheden af stormflod, er der i Figur 9-3 vist hvordan hyppigheden af to kendte stormfloder og to repræsentative stormfloder forventes at stige med tiden. F. eks ses at stormfloden Bodil, der i dag har en statistisk gentagelsesperiode på én gang hvert 280 år, forventes at ske én gang hvert 18 år inden år 2050 og forventes at optræde hyppigere end to gange om året i år 2100.



Figur 9-3 Ændring i hyppighed over tid for fire udvalgte stormfloder. Hyppigheden er angivet som det antal år der forventes at gå mellem der optræder et højvande der er større end den angivne vandstand.

Store skader fra 2 m i nord og fra 3 m i syd

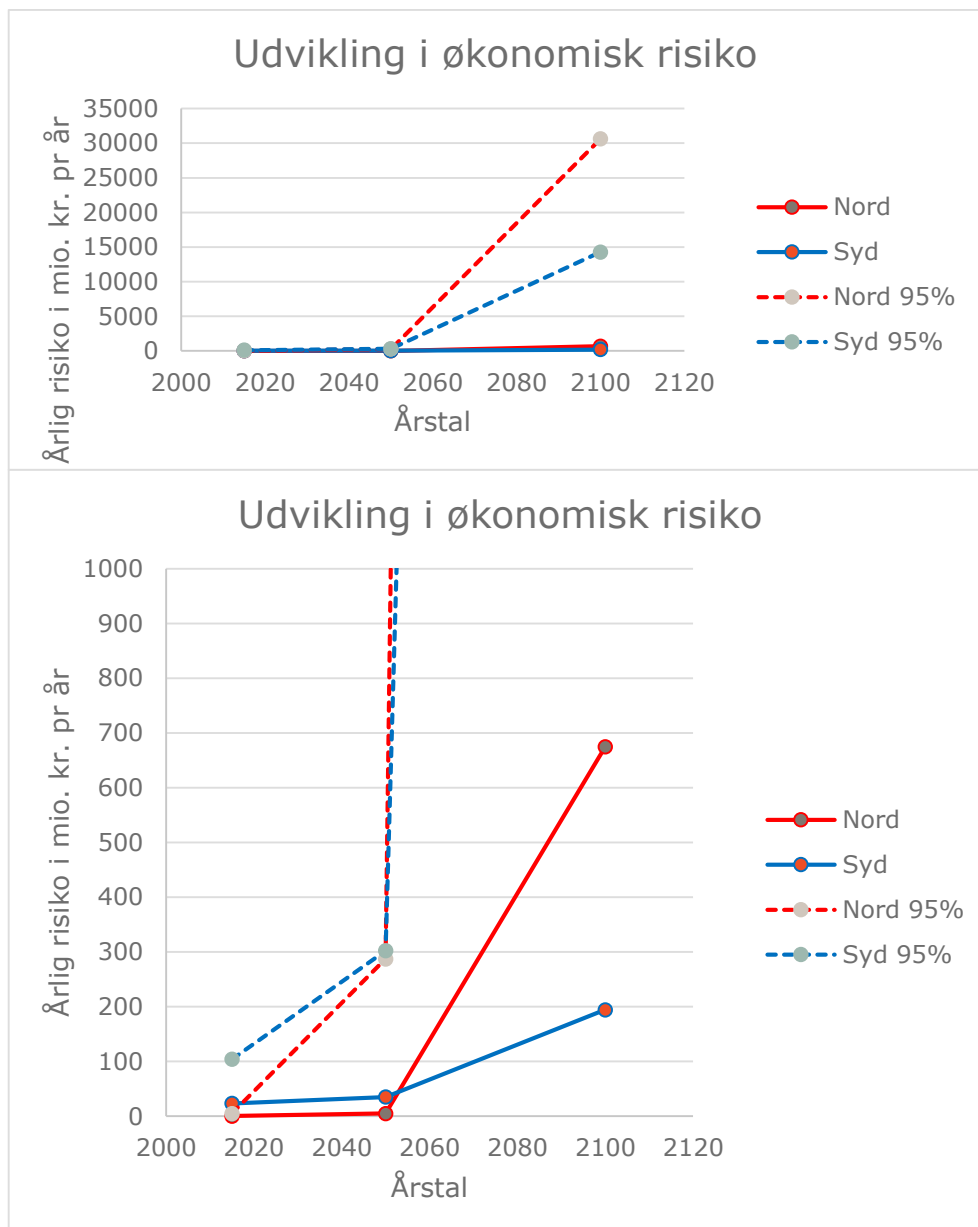
Ses på skadeskonsekvenserne ved forskellige højvande fra nord og syd som illustreret i Figur 9-4, ses at der for højvande fra nord sker store skader ved højvande allerede fra højvande under 2 meter og at skadesomfanget stiger meget hurtigt med højvande op mod 3 meter. Fra syd begynder de reelle skader først at vise sig ved højvande over 3 meter og viser herefter samme billede som fra nord med hensyn til tilvæksten i skader med stigende højvande. Der er kun medtaget gener og skader i Københavns Kommune, samt for de større transportanlæg – metroen, jernbanen, motorvejene, lufthavnen og Øresundstunnelen.



Figur 9-4 Omkostninger ved gener og skader som følge af forskellige størrelser af højvande fra nord og syd. Skader er opgjort i mio. kr. Skader i Københavns Kommune og større transportanlæg i nærområdet.

Økonomisk risiko

For at få et overblik over den økonomiske trussel fra højvande er det nødvendigt at beregne den økonomiske risiko ved at gange konsekvensen af et højvande med sandsynligheden for at dette højvande vil forekomme. Der er derfor udført en beregning, hvor baggrundstallene for ovenstående grafer er ganget sammen, så det er muligt at se hvordan denne økonomiske risiko eller trussel fra højvande vil udvikle sig over tid. Figur 9-5.



Figur 9-5 Årlig økonomisk risiko relateret til forekomsten af højvande fra nord og syd i forskellige årstal. Risikoen er angivet i mio. kr. pr år. De fuldt optrukne grafer viser den statistisk set mest sandsynlige graf, mens de stiplede linjer viser de værdier vi med 95% sandsynlighed holder os under – eller vi med 5% sandsynlighed overskrider.

Af Figur 9-5 ses at højvande fra syd udgør den største økonomiske risiko i dag og at der vil ske en meget markant stigning i truslen fra højvande i perioden efter 2050. Der er statistisk set en mindre økonomisk risiko relateret til de her undersøgte højvande fra nord i perioden frem mod 2050. Den generelle havvandsstigning vil imidlertid betyde at niveauet i den følgende periode kommer over et kritisk niveau, så den økonomiske risiko fra højvande fra nord stiger meget voldsomt. Se også Figur 9-1.

For at illustrere risikoen er der endvidere beregnet de samlede omkostninger fra gener og skader ved de historiske højvande, hvis de kom i dag med den nuværende udformning og anvendelse af arealerne i Københavnsområdet. Se Tabel 9-1.

Omkostningerne dækker kun Københavns Kommune, samt for de større transportanlæg – metroen, jernbanen, motorvejene, lufthavnen og Øresundstunnelen.

Dato for Stormflod	cm (DVR90)	Kilde	Fra nord mio.kr.	Fra syd mio.kr.
xx.xx.1044	343	Tysk øjenvidne rapport	26.000	5.500
30.11.1320	286	Tysk øjenvidne rapport	16.000	660
xx.xx.1449	276	Tysk øjenvidne rapport	10.000	550
10.02.1625	290	Tysk øjenvidne rapport og fra Køge	18.000	730
xx.xx.1691	301	Tysk øjenvidne rapport	20.000	1.050
11.01.1694	258	Tysk øjenvidne rapport	5.000	390
13.10.1760	366	Øjenvidne rapport fra Køge	29.000	13.000
03.01.1825	230	Tysk måling. Øjenvidne fra Køge	1.600	220
18.10.1828	235	Øjenvidne fra Rødby	1.950	150
19.12.1835	216	Målt i Flensburg	1.200	175
12.11.1872	286	Målt i Køge	15.000	650
31.12.1904	220	Målt i Køge	1.300	180
30.12.1913	193	Målt i Køge	500	45
07.12.2013	166	Målt i Køge	9	0

Tabel 9-1 Økonomiske konsekvenser af historiske højvande, hvis de forekom i dag med den nuværende arealanvendelse i Københavnsområdet. Der er angivet skader både ved højvande fra nord og syd, selvom de fleste stormfloder er kommet fra syd. Skaderne er kun opgjort for Københavns Kommune og for store transportanlæg.

Størst trussel fra syd – senere fra nord

Samlet set er der i dag en større økonomisk trussel fra højvande fra syd end højvande fra nord. Dette vil dog ændre sig i løbet af 40-50 år, idet der vil ske en markant stigning i de økonomiske- og oversvømmelsesmæssige trusler fra højvande fra nord. Dette skyldes at de meget hyppige højvande på grund af den generelle stigning i havvandsstanden vil komme op i niveau med de lave områder omkring havnen.

Sikring mod et 1.000 års højvande i 2050 og 2100

Umiddelbart foreslås det, at der nu, ud fra et økonomisk synspunkt, laves en sikring op til et højvande svarende til et højvande der forekommer ca. hvert 1.000 år i 2050 og at alle aktiviteter i området tager højde for en fremtidig sikring, svarende til et 1.000 års højvande som det forventes at forekomme i år 2100.

En sådan sikring reducerer den nuværende årlige økonomiske risiko fra højvande fra syd fra ca. 23 mio. kr./år til kun ca. 4 mio. kr./år. Risikoen fra syd vil dog stige til ca. 6 mio. kr./år frem til 2050, men ville være steget til ca. 35 mio. kr./år, hvis der ikke var foretaget en sikring mod højvande. Hvis der omkring år 2050 yderligere sikres op til niveauet for et 1.000 års højvande, som det forventes i år 2100, vil risikoen frem til 2100 holdes under 10 mio. kr./år, mens risikoen vil udgøre ca. 200 mio. kr./år, hvis der ikke bliver gennemført nogen form for sikring mod højvande fra

syd. Ses på højvande fra nord vil sikringen mod et 1.000 års højvande i 2100, kunne reducere risikoen til under 10 mio. kr./år frem til 2100, mens risikoen ville udgøre ca. 675 mio. kr./år i år 2100, hvis der ikke bliver gennemført nogen form for sikring mod højvande fra nord.

Endvidere bør der disponeres med fleksible løsninger i forbindelse med alle planer og anlægsarbejder i området, så der tages højde for at sikringen skal øges yderligere i højden i fremtiden. Sikringen bør i første omgang koncentrere sig om højvande fra syd, mens udførelsen af sikringen i den nordlige del kan forberedes og udføres løbende i den kommende tid, så man får imødegået den meget eksplosive stigning der vil ske i trusselsbilledet fra højvande fra nord om nogle få år.

Niveauerne for sikringen kan tage udgangspunkt i de højvandstabeller der er udarbejdet for de enkelte kyststækninger og den hyppighed af oversvømmelse man vælger at sikre sig imod og på hvilket tidspunkt. Ved fastsættelse af koter for digekroner mv. skal der endvidere tages hensyn til en lang række andre faktorer, som sætninger, erosion, bølgepåvirkning mv. De udarbejdede højvandsstatistikker er middelværdier hvor der er lige stor sandsynlighed for at koten er sat for lavt som for højt. Ønsker man en højere sandsynlighed end 50% for at sikringskoten er høj nok, kan der anvendes højvandsstatistikker, hvor sandsynligheden for at kurven ikke overskrides er f.eks. 80%.

Sikring til
kote 270 cm i nord
og 450 cm i syd.

Med de her angivne middelfkurver svarer den anbefalede sikring mod et 1.000 års højvande til følgende højvandskoter for kyststrækningerne ved Nordhavn/Oceankaj og Avedøre Holme. Niveauerne for højden af højvandsbeskyttelse for kyststrækningen mellem de to stationer skal afpasses i henhold til de udarbejdede højvandsstatistikker for udvalgte punkter på kysten. Koter for alle punkter på kysten kan beregnes.

Kote til 1.000 års højvande	År 2015 cm (DVR90)	År 2050 cm (DVR90)	År 2100 cm (DVR90)
Nordhavn/Oceankaj	180	205	270
Avedøre Holme	355	380	450

Tabel 9-2 Koten til et 1.000 års højvande som det i middel forventes i perioden frem til 2100 for to udvalgte kystpunkter i nord og syd

For Metroen har der været anvendt en sikring op til et 10.000 års højvande som det forventes i år 2100. I nedenstående tabel er derfor angivet de omtrentlige koter svarende til de beregnede for et 1.000 års højvande i Tabel 9-2.

Kote til 10.000 års højvande	År 2015 cm (DVR90)	År 2050 cm (DVR90)	År 2100 cm (DVR90)
Nordhavn/Oceankaj	260	290	355
Avedøre Holme	490	525	610

Tabel 9-3 Koten til et 10.000 års højvande som det i middel forventes i perioden frem til 2100 for to udvalgte kystpunkter i nord og syd

10 Referencer

Colding, A. 1881, Colding, A., 1881, Nogle Undersøgelser over Stormen over Nord- og Mellem-Europa af 12^{te} – 14^{de} Nov. 1872 og over den derved fremkaldte Vandflod i Østersøen. Med 23 Planer og Kort. Resumé en français.

COWI, 1997, Ørestadsselskabet I/S, Minimetro Phase 1, Civil Works of te Minimetro II.

CRES, Miljøstyrelsen, 2014 Analyse af IPCC delrapport 2, Effekter, klimatilpasning, og sårbarhed, med særlig fokus på Danmark. Miljøministeriet, naturstyrelsen, 2014

DMI, 2015, Digitale vandstands målinger fra Køge havn (30478), Københavns havn (30336). Vindhastigheder fra Tessebølle (06174) og København (06180).

Febvre, Lucien og Martin, Henri-Jean, 1997, The Coming of the Book: The Impact of Printing 1450–1800, London: Verso

Focus Magasin, 2016, Internet: http://www.focus.de/wissen/natur/tid-9152/sturmflut_aid_264116.html [besøgt 27-05-2016]

Hansen, L., 2013, Technical Report 13-15 Sea Level data 1889 – 2021 from 14 stations in Denmark, DMI, [online], http://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/TR/2013/tr13-15.pdf [besøgt 04-03-2016]

Holfort, J., 2015, Max A1910 2014 WismWarnSassKarn, Data from: Das Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH). [e-mail]. korrespondance fra 12.06.2015 – 15.06.2015.

Hupfer, P., Harff, J., Sterr, H., Stigge, HJ., 2003: "Die Küste", Sonderheft, Die Wasserstände and der Ostseeküste, Entwicklung - Sturmfluten - Klimawandel. Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast. Ku-

ratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Heft 66 Jahr 2003.
Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co. Heide i. Holstein

Jensen, I. G., 1991, Scientific Report, Danish Meteorological Institute, 91-1.

Jensen, J. og Müller-Navarra, S. H., 2008, Storm Surges on the German Coast. *Die Küste*, 74, pp.92-124

John C. Houghton, 1977, Birth of a Parent: The Wakeby Distribution for modeling of flood flows.

Jørgensen N., A. Holm, 2016, COWI Systra Joint Venture, CITYRINGEN BRANCH OFF TO SYDHAVNEN, Flooding analysis for Sydhavnen Metro

Jørgensen N., 2015. Aflæsning på stormflods søjle ved Køge toldbod, COWI A/S

Madsen, H., 2008. Vandstandsstatistik i Køge Bugt under klimaændringer, DHI – teknisk notat.

Mudersbach, C. og Jensen, J., 2008, Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste, MUSTOK.

Sunesen, N.E., 2015, Daglig vandstands målinger fra Køge Havn 1991 – 2015.

Swedish Meteorological og Hydrological Institute (SMHI), 2015, About SMHO, [online], <http://www.smhi.se/en/about-smhi> [besøgt 04-03-2016]

Swedish Meteorological og Hydrological Institute (SMHI), 2015, Oceanografisk observationer, [online], <http://opendata-download-metobs.smhi.se/explore/>, [besøgt 04-03-2016]

Sørensen, C., Madsen, H.T. and Knudsen, S.B., 2012, Højvandsstatistikker, Kystdirektoratet

Torny, A., 2015, Water levels SMHI. [e-mail]. korrespondance fra 16.04.2015 – 21.05.2015.

Østsjællands Tidende, 1954, Digebrud paa Fyn og Lolland har sat store arealer under vand. 5. Jan. 1954

11 Bilag 1. Kilde beskrivelser

Dette bilag er en direkte kopi af et uddrag fra rapporten til Metroselskabet: "CITYRINGEN BRANCH OFF TO SYDHAVNEN, Flooding analysis for Sydhavnen Metro" udarbejdet af COWI-Systra JV 2016 (Jørgensen N., Holm A., 2016).

Uddraget omhandler beskrivelsen af de kilder der er fundet i Rigsarkivet vedrørende ældre målinger og optegnelser samt de øjenvidneberetninger der kan findes i ældre noter, aviser mv.

11.1 National Archive

The doctoral dissertation from O. Simonsen (Simonsen, O., 1949) was the entrance to the following sources in the Danish national archive (Sø-Etaten 1798-1800, 510 and 515) and (Sø-Etaten, 1730-1859, 420A and 420B). The same doctoral dissertation clearly describe the location of gauges and possible minor adjustment of the water level gauges to ensure the gauges were located with zero at mean sea level.

Most of the available historical measurements originates from "Dokken", the Danish word for a dock for ships. The dock was located at Christianshavn in Copenhagen. In year 1681 the first attempt was made to establish a dry dock to service the ships from the Danish marine. The attempts failed due to ground water filling the dock with water.

In 1734 the count Frederik Danneskiold-Samsøe had the responsibility to establish a new dry dock. He hired the German marine engineer Johan Heinrich Dumreicher to establish the dry dock. The dry-dock was established in 1738, but the dry-dock was still having issues with infiltration of water, so water had to be pumped out at regular intervals.

Johan Heinrich Dumreicher established measurements to be taken at the stream nearby the dry-dock at a manhole and the water level in the sea. The first measurements of water levels were taken in 1747 and during the years the measurements became more systematic. The Danish Marine maintained the dry dock until year 1919 where it was decommissioned. Figure 11-1 shows a historic picture of the dry dock. A good description of historic water level gauges can be found in (O. Simonsen, 1949).

Figure 11-2 depicts the location of "Dokken" in Copenhagen. Today the land where the dock was located serve as a small park to the Danish Architecture Center at Strandgade 27B, Copenhagen. A picture of the log-book from the dry-dock is shown in Figure 11-3. This provides an overview of historical stations established in the period from 1747 to 1888. The number in brackets are the total record length. The location of the stations Refshale Øen and Kalvebod Strand/Brygge are unknown and estimated due to the name, see .

Additional stations has been available. There exist descriptions of a water level gauge established at Langebro, but no data from those stations have been found.



Figure 11-1 *Dry dock "Dokken" servicing the ships from the Danish Marine from 1738 to 1919, the location of local water level measurements in Copenhagen.*

Additional water levels were taken at Nyholm, Gammelholm, Kalvebod brygge, Kalvebod Strand, Refshaleøen and Langebro. From those locations Nyholm and Gammelholm were considered the main stations where the water level was noted down on a regular basis. It is described that most of the records from Nyholm and Gammelholm no longer exists (O. Simonsen, 1949) except for measurements taken from 1798 to 1800. Those measurements are available in the national archive (Sø-Etaten, 1798-1800, 515).

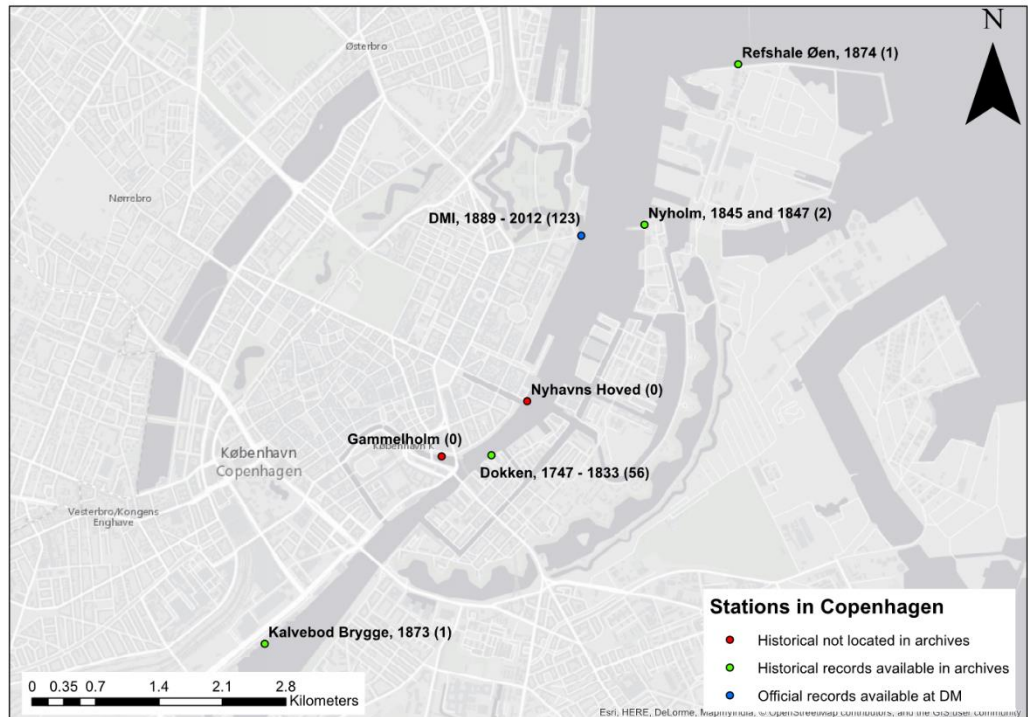


Figure 11-2 Overview of historic gauges located in Copenhagen from 1748 to 1888 and Nordre Toldbod, existing official gauge from DMI, the number in brackets indicate the available data for the reference point.

By searches in the Danish national archive COWI located additional packages containing historical water level data, please refer to the packages (Sø-Etaten 1844-1848, 1166-1169) and (Københavns Havn Havneforvaltning, 1873-1874, 1256) adding additional 5 years to the record. Johan Heinrich Dumreichers signature can be seen in the log-book.

Historical water level data may still exist in the Danish National Archive, but COWI has been limited in time to search for additional information.

COWI contacted the Danish Harbour Authorities (By og Havn I/S) to investigate if they possessed any historical records. The Danish Authorities (By og Havn I/S) never returned and COWI has not followed up further on this possible reference.

COWI took contact to DMI, as to investigate if DMI in its archives have data dating further back in history. DMI could not find any records available. A summary of the data collected from the Danish National Archive is listed in Table 11-1.

Additional stations are available. Descriptions of a water level gauge established at Langebro exist. It has not been possible to collect data from those locations. Collection of data from those locations could provide more insight into the hydraulic conditions of the historic Copenhagen.

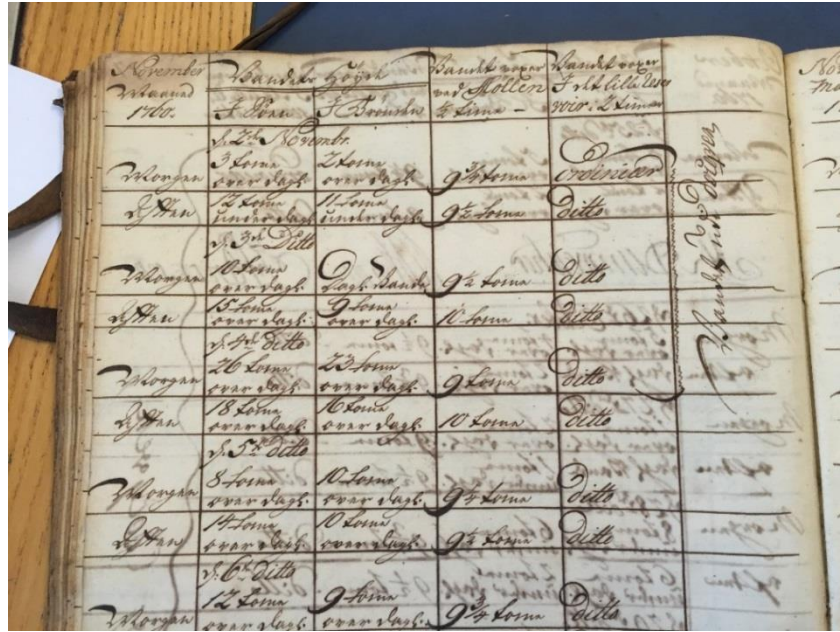


Figure 11-3 Example of handwritten log from the Danish National archive. 04.11.1760 – Level noted on the day is 26 Danish inches (Source: (Sø-Etaten, 1730-1859, 420A), Bind 1 - 1747-1765)

Table 11-1. Overview of the available raw data from the National Archive.

Station	Record period	Time resolution	Note	Reference
Dokken	1747-48, 1758-65	Twice a day	Few months 1759-64 has full years of data	(Sø-Etaten, 1730-1859, 420A) Dokken 1747-1832\Bind 1 - 1747-1765
	1774-83	Twice a day	1775-82 has full years of data	515 420A Dokken 1747-1832\Bind 2 - 1774-1783
	1784-86, 1788-92, 1794-97, 1799	One time per day	All years are complete	(Sø-Etaten, 1730-1859, 420B) Dokken 1784-1799
	1793, 1798, 1803, 1808-15	four times per day	1793, 1798, 1813-14 are complete	(Sø-Etaten ,420A) Dokken 1747-1832\Water Level Curves Dokken 1798-1832
	1800-02, 1804-07, 1816	1800-02 and 1804 one time per day, 1805-07 and 1816 high/low	year 1800 is incomplete	(Sø-Etaten, 420A) Dokken 1747-1832\Sheets-1747-1816
1817-33	1817-21 four times per day, 1822-33	year 1833 is incomplete	515 Dokken 420A	
Nyholm Kalvebod Strand	1845 and 1847	Eight times daily	Both years complete	Sø-Etaten, 510, 1844-1848, Nr. 1166-1169
Refshale-øen/Peak values from Kalvebod Strand	1873 1874	Three times daily, 8 AM, noon and 4 PM	1. April 1873 to 24. Dec. 1874	

11.2 Eyewitness reports

COWI has collected a range of eyewitness reports from respectively Copenhagen, Køge (located 25 km from the coast of South Copenhagen) and the German Baltic Sea cities.

Below is a short description of the reports.

11.2.1 Eyewitness reports from Copenhagen

For Copenhagen, the focus has been the storm 3. January 1825 (in some sources reported as 10th January 1825, but from further research the storm from the 3. January influenced Copenhagen most). COWI provides the details of the sources in the COWI report (COWI, N. Jørgensen, 2015). In short the sources are:

Lollands Stiftstidende 4th February 1825

Danske Sjællandske øgruppens landmilitære domicil 1982

Colonel von Prangens archives, Danish National Archive, 1831 to 1832

Additional eyewitness reports were found (since COWI's report of the 1825 storm was released). The additional eye witness reports are:

The magazine "Nyeste Skilderie", 1830, pp. 883-885

The magazine "Dagen", Nr. 7, 8. januar 1825,

Both sources describes that the storm surge occurred the 3rd January 1825 and not the 10th January 1825 as wrongly stated in Lollands Stiftstidende, even though a storm of lower magnitude occurred on the 10th January 1825.

First in Danish ("Nyeste Skilderie"):

Kjøbenhavn, 1830

"Mod Havet ligger Staden vel paa en flad og lav Grund, men dog ikke saa lavt, som i St. Petersburg og flere Stæder, kunne befrygtes. Ved usædvanlige høje Vande kan Vandet vel paa enkelte Steder bag Børsen strømme ind i Kjeldere; og ved Langebro har Vandet ogsaa været gaaet op paa Broen selv. Vandhøjden bliver fire Gange daglig undersøgt, og ved Sø-Etaten protokolleret. Den 3die Jan. 1825 var Højden 46 Tommer over den sædvanlige Vandstand. Efter ældre Tidens Optegnelser har Vandhøjden en Gang været 48 Tommer over det Sædvanlige; altså to Tommer højere. (See Dagen 1825 Nr. 7.8.25)"

Translated into English and changed into modernized wording:

The capital (Copenhagen) is located next to the sea with a flat topography at lower grounds, however, not as low as St. Petersburg and other locations as could be feared. At high water levels in the sea, water can enter locations

behind the bourse (Børsen, Copenhagen) and into cellars and at Langebro (bridge been replaced since), the water has been above the bridge itself. The water level is measured four times daily by the Marine (Sø-Etaten). On the 3rd January the water level was 46 inches above the usual water level. After old times previous notations the water level has once reached 48 inches above the usual water level, so two inches higher.

The story is reliable as it clearly match the description from the log collected from the National Archives.

The report from Dagen states (In Danish):

Kjøbenhavn, den 8de Januar.

I Mandags den 3die Januar havde man her overordentlige Højvande, som oversvømmede en Deel af Amager, og den vestre Bred af Kalleboestrand. I Amagerports Accisecontoir stod Vand 1 Alen højt. Efter gamle Folks Udsagn vides ikke Højvande i 60 Aar at have været saa store her som den 20de Dec. sidst og den 3die d. M. [= 3. januar 1825]. Har man i Kjøbenhavn Optegnelser, om de forskellige Højvande; Mærker og antegnede Maal? Vist nok ved Lodsvæsenet? Trykte Opgivelser mindes ikke at man har.

Translated into English and changed into modernized wording:

Copenhagen, 8. January 1825

Monday the 3rd January an extreme high water level was noticed, the water flooded parts of Amager and the western part of Kalvebod beach (no longer exist, but located at Kalvebod Brygge). The water level at Amager ports Accisse office stood 62 cm inside the building. It is unknown to man in the street if there ever has been such a flood the last 60 years that has exceeded the floods 20th December 1824 and now the 3rd January 1825. Do we have records of the water levels or any high water marks with given measurements? Maybe at "lodvæsenet"? No issued printed documentation seems to exist.

The two newly detected reports are important. An updated version of the 1825 report (COWI, N. Jørgensen, 2015) is expected estimating the peak level based on the very precise description. The Accisse office stood next to Accisse boden and this building still exist on Torvegade 75 in Copenhagen.

The measurements in 1825 was taken at every 6 hours and may have missed the true peak. The measured level of 46 inch corresponds to 136 cm DVR 90. If the eyewitness reports, that seems to be similar, is true, then water level at locations before Langebro would be approximately 205 cm. The hydraulic headloss would be approximately 70 cm from a position just before Langebro to Dokken, a distance of 980 m.

In Lolland-Falsters Stiftstidende from the 4th, 7th and 14th January, Literis Mando, page 531:

In Danish:

Stærke NW-Storme 3. 1., N-vind 4.1. Stueetagen oversvømmet i flere huse i Nakskov, vandet stod højt op i gaderne ved fjorden, Slotø og Vejlø led betydelig skade ved oversvømmelse; landed under vand i en afstand af omtrent ¼ mil fra Nakskov fjord. Store kyststrækninger ved Bogense oversvømmet af havet. 5.1. om aftenen gik vandet op i Østergade i Rødby. Kraftige regnskyl satte store arealer under vand ved Maribo og Rødby.

Translated into modern English:

Strong storms from North West on the 3rd January 1825. The ground floor in many houses in Nakskov flooded, the water level was high in the street close to the fjord, Slotø and Vejlø was significantly damaged by the flooding, the land under water for a quarter mile from Nakskov fjord. Large coastal areas at Bogense is flooded and on the 5th January in the evening the water was up in Østergade in Rødby. Large amount of rain impacted and large areas was under water at Maribo and Rødby.

Such large differences seems possible when considering the storm surge from 1872. The water level at Vestre Gasværk was 157 cm (LN, 1872) while it was only 46 cm (LN, 1872) at Toldboden. So the large hydraulic resistance from Langebro and Knippelsbro bridges and the reduction in cross-sectional area may have caused significant flooding caused by storm surges from the south.

Today Amager has changed (see COWI, N. Jørgensen, 2015). Modelling can establish the hydraulic profile for different scenarios and different entrance configurations to Copenhagen.

However, from the historic storms it appear realistic that the storms from south can enter the southern part of Copenhagen. Significant head losses occur in the canal system, but the head losses will depend on the water level. Simulations with Mike Flood indicate a high water level induce less friction and hence propagate further into the Copenhagen canal system. Conclusively, the design level at specific locations along the Copenhagen canal may depend on statistics for storm surges for north, south or a mixture of the two depending on the return period.

11.2.2 Eyewitness reports from Køge

COWI visited the local archive in Køge. The local archive has collected reports from three storm surges. The storm surge 31st December 1904, 12-14 November 1872 and 13th October 1760.

Storm surge October 1760:

The Storm surge October 1760 reported Christensen Brasch in a letter to the Countess Meyerfeld:

"Siden den 13. hujus (denne maaned) har vi havt saa stærkt en storm at ingen kand erindre lige dertil at have hørt. Som har med en Østen vind voxet saa stærkt, at den i 24 timer stod 12 Fod højere end sædvanlig og derved foraarsaget Oversvømmelser over alle næst ved stranden liggende marker, i Kjøge har vandet nedbrudt et af Kiøbmændenes Pakhuus, herved Gaarden (Gammel Kjøgegaard), som var omflyt med vand, har det staaet 2 alen høyt op på den store Sahls længe og nedrevet demningen ned til aalen.«."

Translated into English in modern language

"We have had a storm since the 13th October so strong that no one can ever remember to have ever experienced before. The water level increased intensively in the easterly wind so it in 24 hours stood 12 feet above the usual level (3.77 m above MSL). The trades men's house was destroyed and Gammel Køge Gård (a castle with farming activity) had water up to 2 alen (125 cm = 351 cm MSL DVR90) in the main building (level 210 cm) and the dike around the stream has been fully destroyed"

This water level is extremely high. The measurement is not precise and cannot be verified from other eyewitness reports. The location of Gammel Køge Gård still exists and is located at Køge Åsen. The main building is from year 1603. The building is 1.5 km from Køge harbour. The ground level is 210 cm DVR 90. Adding 125 cm reaches a level of 335 cm. Taking into account sea level rise since 1760 and the water level DVR90 reported from Gammel Køgegaard would be 351 cm.

Storm Surge November 1872:

Additional eye witness reports has been collected from Køge Local Archive regarding the storm surge from 12th to the 14th November 1872. However, the most precise measurements description of the storm surge is reported in (Coldings, A. 1881). Here it is possible to see a graph of the water level in Køge. There are two levels indicated, one at 10 feet and another at 8 feet. Accordingly, the water level is between 280 cm and 310 cm above MSL.

Storm Surge November 1904:

This storm surge occurred on the 31st December 1904. The storm surge was not as critical as the two previous storm surges. The water level stood approximately 20 cm above the level of the quay wall. This water level during the storm was approximately 220 cm. The water level is provided by Danish Coastal Authority (KD, 2011)

COWI found an article from the newspaper Østsjællandske Folkeblad 1. Jan. 1905 at Køge library. The paper (stored on micro-film) contained an article about the storm, but the copy taken was not possible to read, so another visit to the library is

required to get a better copy. Table 3-7 provides a summary of the water levels. Check of corresponding high water levels at Copenhagen records from Dokken and Nordre Toldbod for the years 1760, 1872 and 1904 was conducted.

11.2.3 Indication of water levels

The Køge custom building (Køge Toldbod) was constructed in 1840. The building existed during the storm surge in 1872.

The blue column next the door indicates is a measure indicating the storm surge level for the two most recent extreme storm surges in respectively 1872 and 1904. Figure 3-5 is a picture of the building.

There are two marks indicated, the storm surge level 31/12/1904 and the storm surge levels from the storm surge 12/11/1872 to 14/11/1872.

The water affected most parts of the city for a distance of approximately 1.5 km.



Figure 11-4 Toldboden in Køge, constructed in 1840, with the column in blue indicating the storm surge levels experienced in respectively 13. Nov. 1872 and 31. Dec. 1904.

11.2.4 Summary of eyewitness Danish reports

For the storm in Copenhagen 1825 the storm surge level was approximately 205 cm in the south of Copenhagen and approximately 136 cm (peak maybe higher) at Dokken.

Table 11-2 summarized the water levels and storm surges investigated during the study.

Table 11-2 High water levels reported in Køge and corresponding water levels in Copenhagen and Gedser according to eyewitness and recorded measurements.

Storm	Max. level in Køge [cm]	Max. level in Gedser [cm]	Recorded level in Copenhagen [cm]
10. Feb. 1625 (Jensen,1991)	Unknown, but eyewitness reports from Køge stating, "possible to sail in Køge city"	Unknown, human casualties and 400 cows dead. Water level in Lübeck 284 cm, Travemünde 280 cm and Rostock 306 cm	Unknown
Storm started 13. Oct. 1760 and lasted for several days (Christensen Brasch,1760)	351 cm DVR90 trendfree (eyewitness report from Kjøgegaard) 377 cm (12 feet) (381 cm DVR90)	Unknown	Dokken 13. October 1760 -9 inch (43 cm) 18. October 1760 - 36 inch (113 cm DVR90)
3. January 1825 (COWI, 2015)	Unknown	Unknown, but high	205 cm around Langebro according to several eyewitness reports 135 cm measured at Dokken
12-14. November 1872 (Colding, 1881)	8-10 feet, 280 msl (recording) according to Colding ,1881, DMI identify the level to 286 DVR 90, trendfree	9.5 feet (Rødby), approximately 297 cm LN-1872 Gedser Fyr 254 cm DVR90	46 cm (1.5 feet, Toldboden) KNN-1872, 56 cm DVR90 157 cm (5 feet, Vestre Gasværk)-KNN-1872 – 167 cm DVR90
31. Dec 1904 (Køge, Toldboden)	220 cm, trendfree DVR90 Travemünde, Germany 222 cm German Normal Nul	146 (DNN)	Unknown, but below 103 cm (Max. recorded in 1904)

11.2.5 German Baltic eyewitness reports

Eyewitness reports from Germany are available in (Ib Gram Jensen, 1991), (Focus, 2008) and (Peter Hupfer et al, 2003),

The earliest significant storm surge reported from Køge was the storm surge on the 10th February 1625. During the storms ships went on grounds in the woods around Køge. Earlier eyewitness reports from the years 1044, 1320 and 1449 originates from Germany, but are assumed to have caused significant flooding in Køge as well. Table 11-3 provides overview of the German eyewitness reports:

Table 11-3 Overview of German Baltic eyewitness reports

Storm	Source	Location	Recorded level (German Normal Höhe)
Year 1044	Die Küste	Greifswald and Rügen	300 cm
	Ib Gram Jensen	Schleswig	Above 300 cm
30.11.1320	Lübecker Chronik	Lübeck	320 cm
1449	Focus	Stralsund Greifswald	
	Ib Gram Jensen	Schleswig	Estimate 310 cm

There are also reports from the years 906 (Wolin). 1134 (Vineta, historical city), 1307 (Allerheiligen-Flut, Rügen) and 1545 (Greifswald). However, there are no clear indication of the levels reported from those events.