

# Regional Havstigning Prosjektrapport



Bergen, 2009-3-26



Grieg Foundation



Vision Vest



G. C. Rieber Fondene

## **Innhold**

<b>1.</b>	<b>Forord .....</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>Sammendrag .....</b>	<b>9</b>
2.1	Effekt av klimapåvirkninger.....	9
2.2	Ytre fjordsystemer .....	9
2.3	Indre havneområder .....	9
2.4	Forebyggende tiltak .....	10
2.5	Videre arbeider.....	10
<b>3.</b>	<b>Global Havstigning – regionale konsekvenser.....</b>	<b>11</b>
3.1	Bakgrunn.....	11
3.2	Observert globalt havnivå .....	12
3.3	Havnivåprosjeksjoner for det 21.århundre .....	15
3.4	Øvre skranke for global havstigning i det 21.århundre .....	19
3.5	Nedre skranke for global havstigning i det 21.århundre .....	19
3.6	Estimert havstigning i Bergensområdet i år 2100 .....	20
<b>4.</b>	<b>Mulige regionale skadefvirkninger .....</b>	<b>23</b>
4.1	Det ytre fjordsystem .....	23
4.2	Det indre havneområde .....	33
4.2.1.	<i>Bergen – en by ved havet.....</i>	33
4.2.2.	<i>Bergen havn .....</i>	34
4.2.3.	<i>Oversvømte områder .....</i>	35
4.2.4.	<i>Berørt infrastruktur.....</i>	47
<b>5.</b>	<b>Forebyggende tiltak.....</b>	<b>48</b>
5.1	Grunnlagsdata .....	48
5.1.1.	<i>Innledning .....</i>	48
5.1.2.	<i>Dimensjoningskriterier - generelt.....</i>	48
5.1.3.	<i>Input fra Klimagruppen .....</i>	51
5.1.4.	<i>Bergen og omegn – returperioder og akseptkriterier .....</i>	53
5.2	Erfaringer med flomforbygninger i Europa .....	56
5.2.1.	<i>Innledning .....</i>	56
5.2.2.	<i>Nederland .....</i>	56
5.2.3.	<i>London .....</i>	58
5.2.4.	<i>Venezia .....</i>	59
5.2.5.	<i>St. Petersburg .....</i>	60
5.2.6.	<i>Elveforbygninger .....</i>	62
5.2.7.	<i>Større konstruksjoner – fyllingsdammer .....</i>	68
5.3	En ytre fjordbarriere .....	70
5.3.1.	<i>Ytre barriere - definisjon.....</i>	70
5.3.2.	<i>Tverrsambandet .....</i>	71
5.3.3.	<i>Raunefjorden nord (Bergen – Little Sotra).....</i>	72
5.3.4.	<i>Hjeltefjorden sør (Little Sotra – Askøy).....</i>	74
5.3.5.	<i>Herdlefjorden nord (Askøy – Holsnøy) .....</i>	76
5.3.6.	<i>Kvernafjorden (Holsnøy – Knarvik) .....</i>	78

5.3.7.	<i>Radfjorden nord (Halsnøy – Radøy ved Bongno)</i> .....	80
5.3.8.	<i>Ytre barrierer – konstruksjoner</i> .....	83
5.3.9.	<i>Miljøkonsekvenser for fjordsystemet</i> .....	86
5.3.10.	<i>Trafikk/logistikk</i> .....	87
5.4	<i>Indre havnebarrierer</i> .....	89
5.4.1.	<i>Innledning</i> .....	89
5.4.2.	<i>Forurensede masser</i> .....	91
5.4.3.	<i>Kulturminner</i> .....	91
5.4.4.	<i>Indre barrierer – plassering</i> .....	92
5.4.5.	<i>Indre barrierer – konstruksjoner</i> .....	95
5.4.6.	<i>Miljøkonsekvenser for havnebassenget</i> .....	104
5.4.7.	<i>Trafikk /logistikk</i> .....	105
5.5	<i>Skjerming av enkeltområder og bygg</i> .....	106
5.6	<i>Kostnadsvurderinger</i> .....	106
<b>6.</b>	<b>Anbefalt videre arbeid med prioriteringer og tidsplan</b> .....	<b>108</b>
<b>7.</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>110</b>

## **Figurer**

Figur 1 Observert globalt havnivå fra 1870	12
Figur 2 Observert havnivå mellom 1993 og sommeren 2008	13
Figur 3 Observert global havstigning fra satellitt oktober 1992 til januar 2008	14
Figur 4 Observert årsgjennomsnitt havnivå i Bergen relativt et fast referansenivå fram til og med 2006.	15
Figur 5 Global temperaturutvikling på jorden	15
Figur 6 Observert og simulert global havstigning relativt 1990	17
Figur 7 Estimert fremtidig global havstigning (i cm relativt til år 2000) basert på Rahmstorf	18
Figur 8 Geografisk fordeling av havstigning i år 2100	18
Figur 9 Fjorder innenfor ytre barrierer (Kartgrunnlag: Gule Sider)	23
Figur 10 Kystnære virksomheter på Askøy og Kjøkkelvik i Bergen	24
Figur 11 Bjørsvik - eksempel på mindre steder som vil bli berørt av havstigningen	25
Figur 12 Nordhordlandsbroen med Salhus i bakgrunnen	26
Figur 13 Berørte områder og konstruksjoner Del 1	27
Figur 14 Berørte områder og konstruksjoner Del 2	28
Figur 15 Berørte områder og konstruksjoner Del 3	29
Figur 16 Berørte områder og konstruksjoner Del 4	30
Figur 17 Berørte områder og konstruksjoner Del 5	31
Figur 18 Berørte områder og konstruksjoner Del 6	32
Figur 19 Bergen ca 1880 (BergGIS)	33
Figur 20 Bergen indre havn (Bergen og Omland havnevesen)	34
Figur 21 Festningskaien	34
Figur 22 Utsnitt 1 – Sandviken ved stormflo	35
Figur 23 Utsnitt 2 – Vågen ved stormflo	36
Figur 24 Utsnitt Vågen ved springflo	37
Figur 25 Utsnitt 3 – Nordnes ved stormflo	38
Figur 26 Utsnitt 4 – Dokken ved stormflo	39
Figur 27 Utsnitt 5 – Puddefjorden ved stormflo	40
Figur 28 Utsnitt 6 – Solheimsviken ved stormflo	41
Figur 29 Utsnitt 7 – Nygårdstangen ved stormflo	42
Figur 30 Utsnitt Nygårdstangen ved springflo	43
Figur 31 Bryggen ved stormflo	44
Figur 32 Torget ved stormflo	44
Figur 33 Bryggen ved springflo	45
Figur 34 Torget ved springflo	45
Figur 35 Gammel sjølinje (Bergen Kommune)	46
Figur 36 Programskisse Nygårdstangen (Bergen Kommune)	46
Figur 37 Sårbarhetsvurdering (Byantikvaren)	47
Figur 38 Sannsynlighet og returperioder	50
Figur 39 Eksempel på akseptkriterier for flom, København, Danmark (Rambøll, Danmark)	50
Figur 40 Sannsynlighetsfordeling for havnivåstigning i år 2100	51
Figur 41 Havnivåstigning ved konstant årlig økning	52
Figur 42 Stormflo Bergen havn, februar 1990	53

Figur 43 Vannstandsnivåer Bergen havn	54
Figur 44 Returperioder for stormfloannstand, Bergen havn	55
Figur 45 Flomkatastrofen februar 1953	56
Figur 46 Deltaprojektet - eksempler på storflobarrierer ( <a href="http://www.deltawerken.com">www.deltawerken.com</a> )	57
Figur 47 Nederland - flomområder og dimensjoneringskriterier	58
Figur 48 Thames -barrieren	59
Figur 49 Barrièresystem ved Venezia (SMIT Marine Projects, <a href="http://www.smit.com">www.smit.com</a> )	60
Figur 50 Satellittfoto St.Petersburg	61
Figur 51 Prinsippskisse for provisorisk barriere med tetting av løsmasser til berg, SWECO Praha	62
Figur 52 Bruk av sandsekker under flommen i Dresden, Tyskland, april 2006	63
Figur 53 Elveforbygning, sandfylte polyestermembraner, Novi Sad, Serbia	64
Figur 54 Mobil dike - vannfylte polyestermembraner	64
Figur 55 Midlertidig barriere - vegg av stål og aluminium. Shrewsbury og Bewdly, England, februar 2006	65
Figur 56 Midlertidig barriere - vegg av aluminium, Florida, USA	65
Figur 57 Bruk av spuntvegg for tetting av løsmasser over berg	66
Figur 58 Permanente veggger	66
Figur 59 Prinsippskisse demning med overløp, Bayern, Tyskland	67
Figur 60 Prinsippskisse for dike med tettningsskjerne	68
Figur 61 Prinsippskisse - tverrsnitt Sysendammen	69
Figur 62 Storglomvassdammen	69
Figur 63 Det ytre fjordsystem	70
Figur 64 Tverrsambandet (Bergens Tidende)	71
Figur 65 Raunefjorden nord (kartgrunnlag Gule Sider)	72
Figur 66 Raunefjorden nord - tverrsnitt	73
Figur 67 Hjeltefjorden sør (kartgrunnlag Gule Sider)	74
Figur 68 Hjeltefjorden sør - tverrsnitt	75
Figur 69 Herlefjorden nord (kartgrunnlag Gule Sider)	76
Figur 70 Herlefjorden nord - tverrsnitt	77
Figur 71 Kvernafjorden (kartgrunnlag Gule Sider)	78
Figur 72 Kvernafjorden - tverrsnitt	79
Figur 73 Alternativ plassering ved Bongno (kartgrunnlag Gule Sider)	80
Figur 74 Alternativ plassering ved Bongno – tverrsnitt	81
Figur 75 Alternativ plassering i Radsundet (kartgrunnlag Gule Sider)	82
Figur 76 Alternativ plassering i Radsundet - tverrsnitt	82
Figur 77 Etablering av kontinuerlig isvegg	85
Figur 78 Bergen indre havn	88
Figur 79 Bergen indre havn. Plassering av konstruktive barrierer (kartgrunnlag Google)	89
Figur 80 Sjøfronten i Bergen - prinsippskisse	90
Figur 81 Vågen med mulig plassering av stormflo barriere (kartgrunnlag Google)	92
Figur 82 Barriere Damsgårdssundet (kartgrunnlag Google)	93
Figur 83 Strømmen	94
Figur 84 Barriere ved Gamle Nygårdsbro (kartgrunnlag Google)	95
Figur 85 Sjøfronten i Bergen - prinsippskisse spunt	97
Figur 86 Flombeskyttelse ved hjelp av cellespunkt, Williamson, West Virginia, USA	98

Figur 87 Barriere Vågen - tverrsnitt	100
Figur 88 Barriere Damsgårdssundet - tverrsnitt	101
Figur 89 Oversvømmelse på Bryggen (foto Bergens Tidende)	102
Figur 90 Båttrafikk på Vågen	105

## **Tabeller**

Tabell 1 Estimert bidrag til globalt havnivå for periodene 1993-2003 og 2003-2008 .....	13
Tabell 2 Estimert fremtidig havstigning fra IPCC (2007a) .....	16
Tabell 3 Estimert endring av havnivået globalt (hvite felt) og for Bergen (grå farge) i løpet av det 21. Århundre .....	21
Tabell 4 Sikkerhetsklasser for plassering av byggverk .....	49
Tabell 5 Estimert tidspunkt for korrigende tiltak.....	52
Tabell 6 Type tiltak mot flom og stormflo .....	83
Tabell 7 Estimert mengde fyllmasse ved fylling opp til kote 0 .....	84
Tabell 8 Alternativer for stengning av terskelområder.....	86
Tabell 9 Konsekvenser av innsnevring og stengning av terskelområder.....	87
Tabell 10 Skipsanløp Bergen og omland havn 2007 .....	87
Tabell 11: Konsekvenser og kostnadsoverslag .....	106

## **1. Forord**

De private fondene Grieg Foundation, Visjon Vest og GC Rieber Fondene har tatt et felles initiativ for finansiering og organisering av foreliggende prosjekt.

Utgangspunktet for initiativet er at det i dag er sterkt vitenskapelig støtte for at vi står ovenfor betydelige globale klimaendringer. Uavhengig av de underliggende årsaker til disse endringer vil en mulig sentral konsekvens være endringer i havnivået. FNs Klimapanel har gjennom analyser og modellarbeid konkretisert alternative scenarioer for denne utvikling på global basis.

De utfordringer som her skisseres vil gi konkrete konsekvenser lokalt og regionalt, også for Vest-Norge. De muligheter som eksisterer, eller som vil eksistere i fremtid, for å motvirke slike konsekvenser må også utvikles lokalt.

En stigning av havnivået på Vestlandet, som generell heving på permanent basis, og i kombinasjon med ekstreme periodiske variasjoner, vil forsterke de negative skadefinnkninger vi allerede opplever som følge av tidvis ekstremt høye tidevannsforhold.

I Bergensområdet vil slik fremtidig endring av havnivået ha konsekvenser i hele strandsonen. Det indre havnebasseng inneholder en del av våre mest verdifulle historiske minnesmerker. Det indre og ytre havnebasseng inneholder i tillegg betydelige økonomiske aktiviteter og boligområder og det planlegges videre utbygging.

Initiativtakerne er av den oppfatning at de globale utfordringer som er skissert nå krever at det settes søkelys på mulige lokale konsekvenser samt behov og muligheter for tiltak.

Det prosjekt som nå er gjennomført har adressert følgende utfordringer:

1. FNs Klimapanel har skissert forskjellige globale scenarioer for endring i havnivå som følge av klimaendringer. Hvilke mulig utvikling av havnivået på Vestlandet, periodisk eller permanent, kan skisseres dersom disse globale scenarioer legges til grunn.? Så langt som mulig skal denne del av prosjektet skissere kvantifiserbare utviklingsalternativer med mulig tidsangivelse, og angi innbyrdes sannsynligheter.
2. Hvilke tekniske muligheter finnes for å motvirke skadefinnkningene av en generell eller tidvis økning av havnivået i Bergensområdet?

Den pilotfase av utredningsarbeidet som nå er gjennomført er å betrakte som et ide-/skisseprosjekt. Rapporten fra arbeidet inneholder derfor anbefalinger om, og på hvilken måte, arbeidet bør videreføres.

Det må spesielt understrekkes at det arbeid som nå legges frem ikke inneholder en konkret analyse av de samfunnsøkonomiske verdier som vil bli negativt berørt av de fremtidige endringer i havnivået. Denne type analyser er nødvendig for å kunne gjennomføre mer detaljerte nytte-kostnadsvurderinger av mulige forebyggende tiltak.

Slike analyser bør være viktige elementer i et videre arbeid.

Initiativtakerne er av den oppfatning at videre uredning, og spesielt gjennomføring, av fysiske tiltak av den type dette prosjekt omhandler, i det alt vesentlige er offentlige oppgaver. Dette gjelder også eventuell ytterligere forfining og utdyping av de regionale modeller for miljøkonsekvensene.

Når private interesser i Bergen nå tar initiativ til og finansierer første fase av dette arbeid er det imidlertid i erkjennelse av at det her også ligger betydelig privat ansvar. Initiativet er således tatt for å få satt søkelys på, og kommet i gang med praktisk arbeid med de store utfordringer vi som regionalt fellesskap her står ovenfor.

For å få et bredest mulig faglig fundament for prosjektet har arbeidet vært organisert i tre, samarbeidende faggrupper:

- *Klimagruppen* med ansvar for regionalisering av de globale klimamodeller og derved de grunnleggende prognosene for fremtidig regional havstigning har vært ledet av Bjerknessenteret ved Professor Helge Drange
- *Sjøgruppen* med ansvar for konsekvensvurderinger i fjordsystemet av eventuelle fysiske tiltak, ledet av Havforskningsinstituttet ved forskningsdirektør Einar Svendsen og seniorforsker Jan Aure
- *Ingeniørgruppen* med ansvar for arbeidet med mulige fysiske tiltak og økonomiske konsekvenser av slike, ledet av de bergenske avdelinger av ingeniørgruppene SWECO AS ved divisjonsleder Ole Petter Thunes og senioringeniør Arne Instanes, og Rambøll Norge AS ved regiondirektør Tom Arne Olsen og seniorrådgiver Hans-Kristian Jacobsen.

Prosjektleder har vært administrerende direktør Gert A. Gundersen.

Initiativtakerne takker alle medvirkende i prosjektet.

Avslutningsvis håper vi arbeidet vil bli oppfattet som nyttig og at offentlige myndigheter vil finne det hensiktsmessig å videreføre prosjektet i samsvar med de anbefalinger som er fremmet. I tillegg håper vi at arbeidet så langt vil være et nyttig innspill i offentlige myndigheters arbeid med planlegging og byggeforskrifter i strandsonene, og i det generelle beredskapsarbeidet. Det bør også være mulig å bruke erfaringene fra arbeidet på tilsvarende problemområder langs norskekysten.

Grieg Foundation  
Per Grieg snr.

Visjon Vest  
Siren Sundland

GC Rieber Fondene  
Christian Rieber

## **2. Sammendrag**

### **2.1 Effekt av klimapåvirkninger**

Internasjonale forskningsprosjekter, herunder FN sitt Klimapanel, påpeker at det er forventet et sterkt økende havnivå i inneværende århundre. Havstigningen påvirkes av flere faktorer, men primært er det den globale oppvarming, med tilhørende avsmelting av iskapper på land og økende havtemperatur som gir økningen.

For Vestlandet konkluderes det med at det er 90 % sannsynlighet for at havnivået stiger 50 cm, og 50 % sannsynlighet for 75 cm innen år 2100. Den årlige stigningen vil akselerere fra andre halvdel av dette århundret.

En generell havstigning på 75 cm vil i perioder med ekstremvær, som også vil opptre med økende hyppighet, kunne gi stormflo 2,37 meter over normalt havnivå i vår region. Dette vil ha dramatiske konsekvenser for bygninger, infrastruktur, fremkommelighet og sikkerhet for befolkningen.

### **2.2 Ytre fjordsystemer**

Bergen omkranses av flere fjordsystemer som danner innløp mot Bergen indre havn. Rapporten angir plassering og løsninger for å kontrollere disse innløpene med tanke på havstigning. Aktuelle løsninger er steinfyllinger i kombinasjon med "dokk-porter" som kan stenges i aktuelle perioder.

Slike løsninger er meget krevende, teknisk, økonomisk og miljømessig. Teknisk vil det være utfordrende å plassere så store fyllinger på en sikker måte på store dyp. Økonomisk er dette milliardinvesteringer med store driftskostnader. Miljømessig vil vannsirkulasjonen i det indre avstengte fjordsystemet endres med hensyn på surstoffinnhold og strømforhold og kunne gi et "dødt fjordsystem".

Rapporten peker på at stigningen de første 50 årene sannsynligvis ikke gir så store problemer i det ytre fjordsystem at denne type tiltak kan forsveres i dette tidsperspektiv. Det anbefales derfor å prioritere indre og lokale løsninger før en så omfattende løsning.

### **2.3 Indre havneområder**

I de indre havneområder (Vågen, Damsgårdssundet og Store Lunegårdsvann) vil havstigningen skape større problemer på et tidligere tidspunkt.

Bryggen, vår verdensarv, tar allerede i dag skade av stormflo og oversvømmelser. I kombinasjon med synkende grunnvannsstand medfører dette uopprettelig skade på bygningsmassen.

Bebyggelsen, kaiene og kaiområdene rundt Vågen vil oversvømmes og ta sterkt skade ved et havnivå på kote + 2,37 meter. Man må regne med strømbrudd, tilbakeslag i

avløpssystemer, betydelige trafikkproblemer og sterk verdiforringelse.

Damsgårdssundet er et byfornyingsområde. Utbyggerne i området tar langt på vei høyde for fremtidig avstigning, men rapporten viser at kaiområder og deler av Nygårdsparken vil settes under vann.

Store Lungegårdsvann er også et aktuelt utbyggingsområde. Her vil havstigningen påvirke utfyllingsnivå og infrastruktur. Det mest alvorlige er imidlertid at Nygårdshøydetunellen vil fylles av vann samtidig som veinettet rundt Bystasjonen og den nye Brannstasjonen blir ufremkommelig. Jernbanestasjonen og godsterminalen vil også legges under vann. Kanalen til Lille Lungegårdsvann (som planlegges åpnet) vil medføre store oversvømmelser rundt Festplass-området.

## 2.4 Forebyggende tiltak

Som angitt anbefales det ikke å sette i verk tiltak i det ytre fjordsystem nå. Rapporten viser løsninger som kan ivareta sikkerheten og kontrollere effekten av havstigning i de indre områdene. To alternativer peker seg ut: barrierer som kan kontrollere havnebasseng og spunktkonstruksjoner som kan sikre landsiden.

Begge alternativer er aktuelle innefor det tidsperspektivet rapporten omtaler. Spunktkonstruksjonene er fleksible og kan allerede nå settes inn for å sikre Bryggen mot videre skader. En barriere i Strømmen (mot Store Lungegårdsvann) vil effektivt hindre oversvømmelser av sentrale kommunikasjonsområder og gi et forutsigbart og kontrollert utfyllingsnivå for ny bebyggelse.

## 2.5 Videre arbeider

Rapporten anbefaler at det arbeides videre med to konkrete delprosjektet:

Sikring av Bryggen ved spunktkonstruksjon

Sikring av Store Lungegårdsvann ved barrierer i Strømmen.

Begge delprosjekter har begrensete investeringskostnader (i forhold til verdisikringen) og oppfattes som meget effektive.

Det anbefales også videre arbeid med følgende forhold:

- Videre utvikling av sikringstiltak
- Beredskapsplanlegging i hele det berørte fjordsystem
- Konkretisering av plan- og byggeforskrifter i den berørte strandsonen

## 3. Global Havstigning – regionale konsekvenser

### 3.1 Bakgrunn

I løpet av de siste 100 årene har jordens middeltemperatur steget med rundt 0.7 grader, med en akselererende oppvarming de siste 50 år. En del av den målte temperaturøkningen kan tilskrives naturlige variasjoner i klimaet. Men det er umulig å forklare temperaturøkningen de siste 50 årene uten å inkludere menneskeskapte utslipper av klimagasser og -partikler. Siste rapport fra FNs klimapanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) konkluderer derfor med at

*Det er meget sannsynlig<sup>1</sup> at mesteparten av økningen i globale gjennomsnittstemperaturen siden midten av det 20. århundret skyldes den observerte økningen i menneskeskapte klimagasskonsentrasjoner (IPCC 2007a).*

Videre sier klimapanelet at

*Oppvarming av klimasystemet er utvetydig, noe som nå er tydelig fra observasjoner av økte globale gjennomsnittstemperaturer i atmosfære og hav, omfattende smelting av snø og is, og økende globalt gjennomsnittlig havnivå.*

Globalt havnivå kan endre seg grunnet flere faktorer, de viktigste er:

- *Variasjoner i mengden av is på land* – i hovedsak i form av breer og iskapper – påvirker det globale havnivået direkte. Derfor var havnivået under siste istids maksimum for ca. 18.000 år siden rundt 120 meter lavere enn i dag. På tilsvarende måte vil smelting av landis føre til at det globale havnivået stiger.

På Grønland er det i dag lagret vann i form av is tilsvarende om lag 7 meter global havstigning. Tilsvarende tall for Antarktis er rundt 60 meter havstigning.

Havstigning på mer enn 0.5 meter per 100 år kan bare skje ved smelting av (deler av) Grønlandsisen og/eller isen i Antarktis.

- *Havets temperatur* påvirker havnivået da havvannet utvider seg med økende temperatur (termisk ekspansjon). Siden verdenshavene midlere dyp er på 3500 meter, snakker vi om store vannmasser som kan endre sitt volum. Men siden den vertikale blandingen i havet er en særdeles langsom prosess, vil økningen av havnivået grunnet termisk ekspansjon komme nokså langsomt, typisk 20-30 cm per 100 år.

Også endringer i havets saltholdighet påvirker havnivået, men denne effekten er generelt liten sammenlignet med termisk ekspansjon.

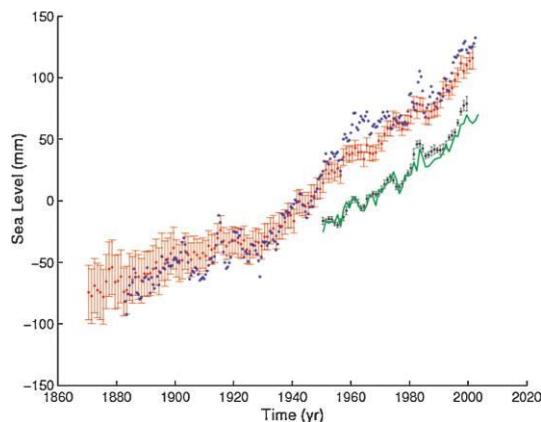
---

<sup>1</sup> I IPCC-terminologien er *meget sannsynlig* ment å bety mer enn 90% sannsynlighet.

- *Vann lagret på land*, som følge av naturlige klimavariasjoner og forbruk av vann, vil også påvirke havnivået. Denne effekten er liten, typisk noen cm per 100 år.
- *Landheving og -senkning* vil påvirke havnivået observert fra land. Denne faktoren er spesielt viktig for nordområdene siden landet løfter seg her som følge av at den 2-3 km tykke Fennoskandinaviske iskappen trykket landmassene ned under siste istid. For Bergensregionen er dagens landheving estimert til rundt 17 cm per 100 år (Vestøl 2006).
- Havnivået er ikke jevnt fordelt på jorden. Hovedgrunnene til dette er lokale variasjoner i havstrømmene, fordelingen av varme (og salt) i havet og atmosfærrens vinder og lufttrykk. På tvers av et havbasseng som Stillehavet eller Atlanterhavet kan denne forskjellen være 0.5 til 1 m. Lokale variasjoner kan utgjøre opp til noen titalls cm. Havnivået er derfor ikke statisk.

### 3.2 Observert globalt havnivå

Det globale havnivået har blitt observert basert på tidevannsmålinger langs deler av verdens kyster fra seint på det 19. århundre, se figur 1. Som det framgår av denne figuren viser ulike studier en noe ulik havnivåøkning, men alle studiene viser at havnivået stiger. Det er også indikasjon på at stigningen av havnivået akselererer. Siden år 1900 har det globale havnivået steget med rundt 17 cm.



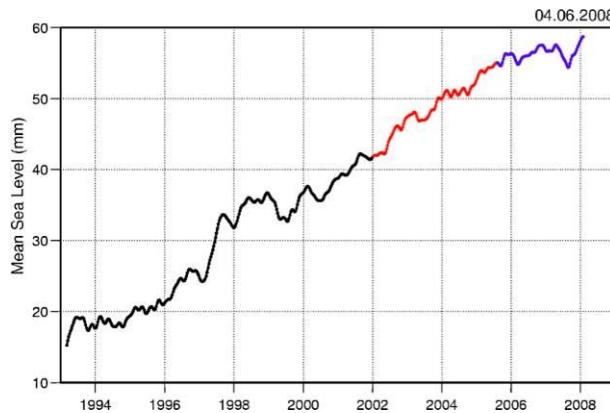
*Figur 1 Observert globalt havnivå fra 1870*

Røde symboler i Figur 1 fra Church et al. (2004), blåe fra Jevrejeva et al. (2006), grønne fra Holgate (2007) og svarte fra Bergenguyen et al (2008). Figur fra Cazenave et al. (2008).

Fra 1993 har i tillegg målinger fra satellitt målt havets nivå. Figur 2 viser oppdatert havnivå målt fra satellitt fram til sommeren 2008. Fra 1993 har stigningen i globalt havnivå basert på satellittobservasjoner ligget på like over 3 mm per år.

Som det framgår av Figur 2 er det mellomårlige variasjoner i det globale havnivået. Disse variasjonene er i stor grad knyttet til naturlig forekommende temperaturvariasjoner langs

ekvator i Stillehavet, kjent som El Niño (høy havtemperatur) og La Niña (lav havtemperatur). Merk at havstigningen har avtatt noe de siste årene grunnet en kald La Niña situasjon i Stillehavet.



Figur 2 Observert havnivå mellom 1993 og sommeren 2008

De ulike fargene i Figur 2 angir havnivå målt fra ulike satellittsensorer. Figur fra Cazenave et al. (2008).

Inntil nylig har det ikke vært fullt ut samsvar mellom observert globalt havnivå fra satellitt og estimatorer av de ulike bidragene til havnivåstigningen. Selv om det fremdeles er usikkerheter, er denne inkonsistensen i ferd med å forsvinne.

Estimerte bidrag til globalt havstigning, basert på Cazenave et al. (2008), er vist i tabell 1. Som det framgår av tabellen er det godt samsvar mellom observert havstigning sett fra satellitt og de ulike bidragene. På tross av det gode samsvaret er det fremdeles for tidlig å konkludere med at observert endring av det globale havnivået er fullt ut forstått.

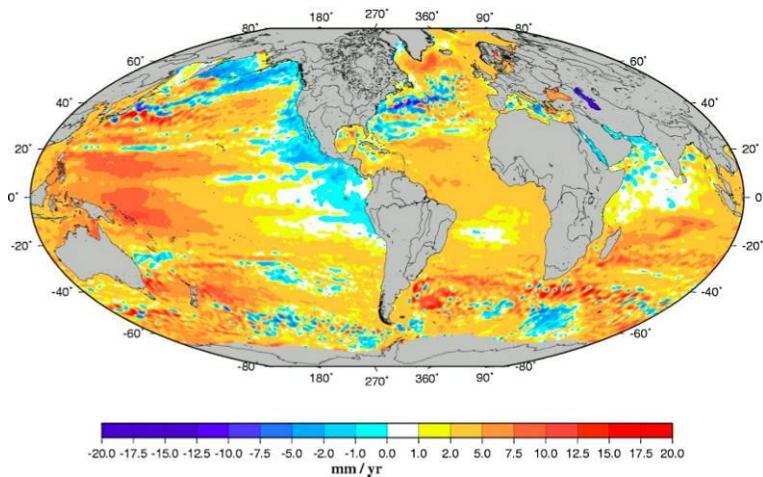
Estimerte bidrag til globalt havnivå for periodene 1993-2003 og 2003-2008.

Tabell 1 Estimert bidrag til globalt havnivå for periodene 1993-2003 og 2003-2008

Bidrag til havstigning	1993-2003 (i mm per år)	2003-2008 (i mm per år)
1. Termisk ekspansjon	$1.6 \pm 0.3$	$0.37 \pm 0.1$
2. Breer	$0.8 \pm 0.1$	$1.1 \pm 0.25$
3. Iskapper	$0.4 \pm 0.2$	$0.95 \pm 0.1$
Fra Grønland	$0.2 \pm 0.04$	$0.4 \pm 0.05$
Fra Antarktis	$0.2 \pm 0.17$	$0.55 \pm 0.06$
4. Vann på land		$0.2 \pm 0.1$
<b>Sum av 1-4</b>	<b><math>3.0 \pm 0.5</math></b>	<b><math>2.6 \pm 0.3</math></b>
<b>Fra satellitt</b>	<b><math>3.1 \pm 0.4</math></b>	<b><math>2.5 \pm 0.4</math></b>

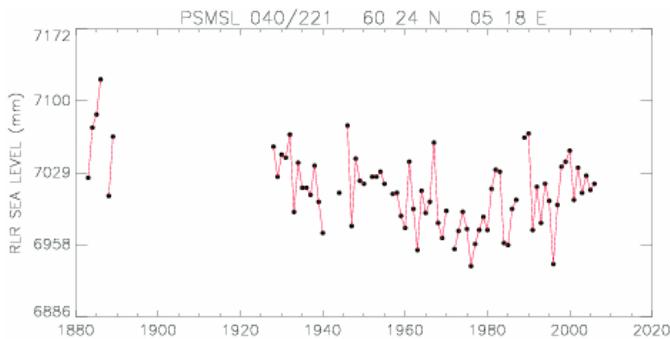
Tall i Tabell 1 fra Cazenave et al. (2008). Det framgår av tabell 2 at havstigningen har avtatt i perioden 2003-2008 sammenlignet med perioden 1993-2003. Dette skyldes utelukkende reduksjon i den termiske ekspansjonen, sannsynligvis i hovedsak knyttet til den pågående La Niña-situasjonen. Skulle smeltingen av landis fortsette som fram til i dag, betyr dette at havnivået vil kunne stige med rundt (og enda til mer enn) 4 mm per år når den pågående kalde La Niña situasjonen slipper taket. Det siste kan skje i løpet av 2009. Bare fortsatt monitorering av havnivået vil gi svar på når og i hvilken grad framtidig havnivå vil akselerere.

Økningen i global havstigning er ikke jevnt fordelt på jorden. Basert på satellittobservasjoner over de siste 15 år, se figur 3, følger det at havstigningen i våre områder har vært på mer enn 2 mm per år, mens det har vært liten eller ingen havstigning i deler av Det indiske hav og fallende havnivå i østre deler av Stillehavet. De lokale variasjonene skyldes naturlige fluktusjoner i temperaturfordelingen i havet og endringer i havsirkulasjonen. En kan derfor ikke konkludere om det globale havnivået stiger eller ikke basert på korte tidsserier for et avgrenset område på jorden.



*Figur 3 Observert global havstigning fra satellitt oktober 1992 til januar 2008*

Figur 3 fra Cazenave et al. (2008). Basert på Vestøl (2006), har det vært en midlere havstigning langs norskekysten på rundt 14 cm for perioden 1891 og 1990. Siden Bergensdistriktet har en landheving på  $17 \pm 5$  cm per 100 år (Vestøl 2006), er det sannsynlig at havet i middel har sunket i forhold til land, ikke steget, for perioden 1891-1990. Dette er i tråd med årsmidlet tidevannsmålinger fra Bergen, se figur 4. Men siden havstigningen akselererer, har havnivået i Bergen steget raskere enn landhevningen fra og med tidlig på 1980-tallet (økende stormaktivitet vinterstid fra 1960-tallet til og med 1995 kan også ha bidratt til deler av stigningen i havnivået etter 1980). Økningen siden tidlig på 1980-tallet er på anslagsvis 6 cm (tilsvarende vel 2 mm per år). Med akselererende havstigning vil havnivået øke stadig raskere enn den lokale landhevningen, med den følge at havet vil stå høyere på land i framtiden.

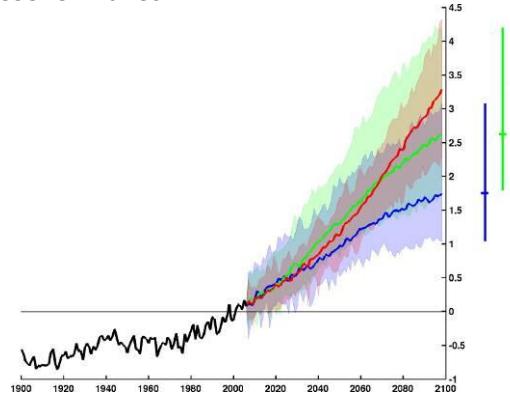


*Figur 4 Observert årlig gjennomsnitt havnivå i Bergen relativt et fast referansennivå fram til og med 2006.*

Det er 7.2 cm forskjell i havnivå mellom hvert merke på den vertikale skalaen i Figur 4. Figuren er fra Proudman Oceanographic Laboratory, <http://www.pol.ac.uk/psmsl>.

### 3.3 Havnivåprosjeksjoner for det 21. århundre

Grunnet økningen i atmosfærens innhold av drivhusgasser og -partikler, både fram til i dag og framover i dette århundre, kan den globale lufttemperaturen forventes å stige med mellom 2 og 3 grader innen år 2100 relativt år 2000 (IPCC 2007a, se også Figur 5). Større temperaturøkning kan ikke avskrives. En slik temperaturstigning vil klart overgå observert temperaturstigning i det 20. århundre, og vil føre til betydelig smelting av breene på land, gradvis smelting av Grønlandsisen og iskappen i Antarktis, og til termisk ekspansjon av vannmassene i havet.



*Figur 5 Global temperaturutvikling på jorden*

I Figur 5 er vist global temperaturutvikling på jorden (i grader C relativt år 2000) basert på observert temperatur (svart linje) og tre utslipsscenarioer (farget kurver) fra

modellene som inngår i siste IPCC-rapport (IPCC 2007a). Skraveringen rundt temperaturscenarioene angir høyeste og laveste verdi for de respektive scenarioene. Figur fra Drange et al. (2007).

*Tabell 2 Estimert fremtidig havstigning fra IPCC (2007a)*

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) <sup>a</sup>		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	Best estimate	Likely range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
<b>Constant Year 2000 concentrations<sup>b</sup></b>	0.6	0.3 – 0.9	NA
<b>B1 scenario</b>	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
<b>A1T scenario</b>	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
<b>B2 scenario</b>	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
<b>A1B scenario</b>	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
<b>A2 scenario</b>	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
<b>A1FI scenario</b>	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Siste rapport for FNs klimapanel har estimert noen av de forventede bidragene til framtidig global havstigning. Disse er gjengitt i Tabell 2. Som det framgår av tabellen varierer havstigningen fra 18 til 59 cm for perioden 2090-2099 relativt 1980-1999.

Som det framkommer av IPCC-rapporten, inkluderer Tabell 2 ikke alle bidragene til framtidig havstigning. Syntesedelen av IPCC-rapporten sier derfor følgende (IPCC 2007b, vår oversettelse):

*Fordi forståelsen av noen viktige effekter som påvirker framtidig havstigning er begrenset, tar denne rapporten verken for seg sannsynligheten eller gir et beste estimat eller en øvre skranke for framtidig havstigning.*

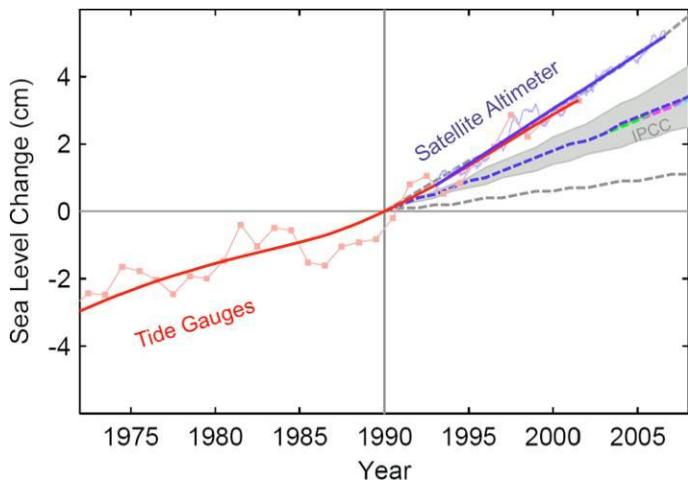
Mer spesifikt, gjelder følgende:

- Havnivået gitt i tabell 2 inkluderer bare delvis effekten av isstrømmene fra de store iskappene på Grønland og i Antarktis. Klimarapporten sier derfor at dette bidraget kan øke havnivået, og følgelig verdiene i Tabell 2, med 10-20 cm eller mer, i løpet av dette århundre.
- Havnivåendringen gitt i Tabell 2 inkluderer ikke den fulle temperaturøkningen gitt av klimamodellene. Tar en med hele temperaturintervallet, kan en legge til omlag 10 cm til verdiene i tabellen.

---

<sup>2</sup> **Scenario B1 (blå farge):** Globale løsninger på økonomisk og sosial bærekraftighet. Raske endringer i økonomiske strukturer og introduksjon av rene teknologier. 7 milliarder mennesker i 2100. Atmosfærens CO<sub>2</sub>-innhold er på 540 ppm i 2100, mot 390 ppm i dag (ppm er "parts per million"). **Scenario A1B (grøn farge):** Rask økonomisk vekst. Rik verden, men ujevt fordelt. 7 milliarder mennesker i 2100. Teknologiske endringer fører til balanse mellom fossil og ikke-fossil energiteknologi. Atmosfærens CO<sub>2</sub>-innhold er på 703 ppm i 2100. **Scenario A2 (rød farge):** Delt verden med høy befolkningsvekst og mindre bekymring for rask økonomisk utvikling. 15 milliarder mennesker i 2100. Atmosfærens CO<sub>2</sub>-innhold er på 836 ppm i 2100.

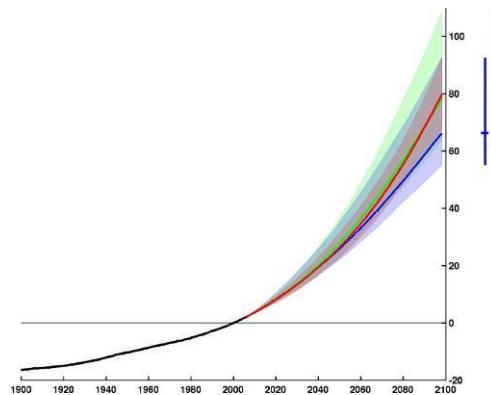
- Tabell 2 angir ikke sannsynlighetsfordelingen av framtidig havstigning. Som for framtidig temperaturøkning er det større sannsynlighet for høyere enn lavere havstigning relativt den mest sannsynlige havstigningen.
- Nedre grense i Tabell 2 på rundt 2 mm pr år gir en havstigning som er ca. halvparten av den havstigningen vi i dag observerer (rundt 3 mm per år). Med stadig sterkere oppvarming er det særdeles vanskelig å se at den nedre grensen i tabellen er representativ for framtidig havstigning.
- Fra 1960-2003 gir klimamodellene bare halvparten av observert havstigning. Grunnen til at klimamodellene underestimerer observert havstigning er fremdeles dårlig kjent, men kandidater er for langsomt varmeopptak i havet, for langsom smelting av breer på land og at smelting og dynamikken til Grønlandsisen og iskappen i Antarktis ikke er inkludert i klimamodellene. Havøkningen i Tabell 2 er følgelig basert på en mye mer langsom havstigning enn den vi har observert siden 1960. Det siste er vist i Figur 6.



*Figur 6 Observert og simulert global havstigning relativt 1990*

Den røde kurven i Figur 6 er basert på observert havnivå fra tidevannsmålinger, mens den blå kurven er basert på satellittmålinger. Gjennomsnittet av IPCC-modellene er vist med blå stiplet linje. Fra Rahmstorf et al. (2007a).

Siden dagens generasjon av klimamodeller kraftig underestimerer observert havstigning, har forenklede beskrivelser blitt benyttet for å estimere mulig havstigning i dette århundre. Resultatet fra en slik modell, presentert av Rahmstorf (2007b), er vist i figur 7. Basert på denne modellen kan en forvente at globalt havnivå kan stige med mellom 0.5 og 1 meter i løpet av dette århundre, med største sannsynlighet for en havstigning på 66-80 cm (de heltrukne kurvene).

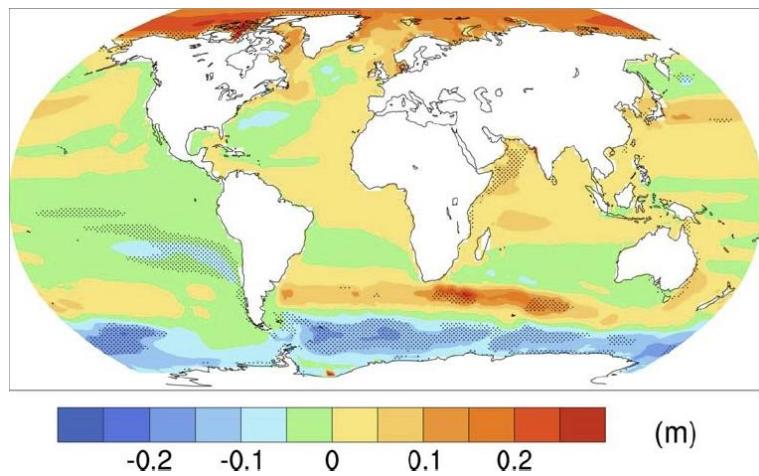


*Figur 7 Estimert fremtidig global havstigning (i cm relativt til år 2000) basert på Rahmstorf*

Figur 7 viser estimert framtidig global havstigning (i cm relativt år 2000) basert på Rahmstorf (2007b) for de tre temperaturscenarioene vist i Figur 5. Middelverdi og spredning i år 2100 er vist til høyre for den vertikale aksen (80 cm for A2, 78 cm for A1B og 66 cm for B1). Figur fra Drange et al. (2007).

Rahmstorfs modell som vist i figur 7 er basert på meget enkle antagelser, og modellen har blitt kritisert grunnet dette.

I en nederlandsk studie, har Katsman et al. (2008) estimert framtidig havstigning i Atlanterhavet basert på en kombinasjon av observasjoner, teori og modellkjøringer. Katsman et al. (2008) konkluderer med en havstigning på mellom 30 og 80 cm i løpet av dette århundre.



*Figur 8 Geografisk fordeling av havstigning i år 2100*

Figur 8 viser geografisk fordeling av havstigningen i år 2100 (i m) relativt global middelstigning basert på 16 av modellene som tok del i 2007-rapporten fra IPCC og for

mellomscenarioet A1B. Figur fra IPCC (2007a).

Den nederlandske deltakommisjonen (<http://www.deltacommissie.com/en/advies>) kom 3. september 2008 med sin anbefaling til de nederlandske myndighetene når det gjelder framtidig havstigning. Deltakommisjonen konkluderer med at øvre skranke for global havstigning i dette århundre er på mellom 55-110 cm. Fram til år 2200 argumenterer deltakommisjonen for at havnivået kan stige med mellom 2-4 meter.

Geografiske fordeling av framtidig havstigning basert på modellene som tok del i klimapanelets siste rapport (IPCC 2007a) er vist i Figur 8. Som det framgår av denne figuren kan vi forvente en noe høyere havstigning i våre nærområder enn den globale havstigningen mot slutte av dette århundre, kanskje på rundt 10 cm. Hovedårsaken til den geografiske fordelingen av framtidig havnivå er ulik absorpsjon av varme i havet (og følgelig ulik termisk ekspansjon), effekt av en noe endret havsirkulasjon, og netto tilførsel av ferskvann i nord.

### **3.4 Øvre skranke for global havstigning i det 21.århundre**

Som det framkommer over er det betydelige usikkerheter knyttet til å estimere global havstigning i løpet av dette århundre. En annen tilnærming er derfor å estimere øvre skranke for hvor raskt havet kan stige. Dette kan gjøres basert på analyse av havnivåendringer tilbake i tid, eller ved å se på raskest mulig smelting av Grønlandsisen og iskappen i Antarktis.

En slik studie, Pfeffer et al. (2008), konkluderer med at havstigningen ikke kan overstige 2 meter fram til år 2100, og at en mer plausibel grense er 80 cm for samme tidsperiode.

### **3.5 Nedre skranke for global havstigning i det 21.århundre**

En annen tilnærming til problemet er å tallfeste en nedre skranke for framtidig havstigning. Skulle den globale temperaturen stabilisere seg på 2006-nivå, estimerer Bahr et al. (2009) at jordens breer og iskapper alene vil bidra med minst  $18 \pm 3$  cm havstigning i dette århundre. Fortsetter temperaturøkningen som i dag, er nedre skranke for havstigningen fra breer og iskapper estimert til  $37 \pm 2$  cm. I tillegg til disse verdiene kommer, i særlig grad, bidrag fra termisk ekspansjon grunnet et stadig varmere hav.

Antar vi at en nedre skranke for termisk ekspansjon er 16 cm i løpet av dette århundre (se Tabell 1), får vi at havstigningen sannsynligvis vil overstige 50 cm ( $37+16$  cm) i dette århundre.

### **3.6 Estimert havstigning i Bergensområdet i år 2100**

Framtidig havstigning for Bergensområdet vil i hovedsak være avhengig av den globale havstigningen, men også lokale forhold vil spille inn. De viktigste av de lokale forholdene er effekten av at landet hever seg og at havstigningen kan forventes å være større hos oss enn på global skala. I tillegg vil værets virking på havnivået, gjennom stormflo, kunne gi et ekstra bidrag grunnet framtidig endring i retning, intensitet eller antall stormer.

Tar vi utgangspunkt i rapporten fra den nederlandske deltakommisjonen (<http://www.deltacommissie.com/en>), får vi som vist i tabell 3. Havnivået i Bergensområdet kan derfor forventes å stige med mellom 40 og 110 cm i løpet av dette århundre. Tar en med forventet effekt av noe sterkere stormer (Woth et al. 2006), kan en stormflo i år 2100 forventes å stige med 40 til 130 cm. Merk at den nedre skranken på 40 cm i tabell 3 ligger under nedre skranke på 50 cm basert på Bahr et al. (2009) og en antatt minste termisk ekspansjon på 16 cm i løpet av 100 år som beskrevet over.

Det er ikke mulig å entydig bestemme en mest sannsynlig havstigning i dette århundre. Basert på tabell 3, det vil se i all hovedsak den nederlandske deltakommisjonen, men også i tråd med Rahmstorf (2007b), Pfeffer et al. (2008), Katsman et al. (2008) og Bahr et al. (2009), konkluderer vi med at en midlere havstigning for Bergen kan forventes å ligge rundt 75 cm i løpet av dette århundre.

Usikkerhetene er som angitt store, så både lavere og høyere havstigning kan påregnes. Det er vanskelig å se for seg en havstigning på under 50 cm i løpet av dette århundre. På tilsvarende måte skal det en raskt akselererende smelting av Grønlandsisen og/eller isen i Antarktis til for å overstige 1 m i dette århundre. Vi konkluderer derfor med at det er 10% mulighet for at havstigningen er så lav som 50 eller så høy som 100 cm i løpet av dette århundre. I mangel av annet antar vi at sannsynligheten for høyere eller lavere havstigning er symmetrisk fordelt om 75 cm.

For stormflo vil havstigningen ligge anslagsvis 10 cm høyere enn verdiene over (Woth et al. 2006), det vil se at det beste estimatet for økningen av en stormflo mot slutten av dette århundre i Bergensregionen er på 85 cm (med 10% sannsynlighet for 60 og 110 cm økning). Det kan ikke utelukkes at antall og intensitet til lavtrykkene kan gi et bidrag på havnivået som overstiger 10 cm, men dette kan ikke tallfestes da den romlige oppløsningen til dagens klimamodeller er for lav til å beskrive lavtrykksbanene og - intensiteten på en god (realistisk) måte.

*Tabell 3 Estimert endring av havnivået globalt (hvite felt) og for Bergen (grå farge) i løpet av det 21. Århundre*

	IPCC AR4 – A1FI (Including extra flow from ice caps (1))		Upper limit scenario of the commission		Delta	Justification of the difference in results
<b>Total (2)</b>	<b>+0.25 to +0.76 m</b>		<b>+0.55 to +1.10 m</b>			
Increase of sea water volume	+0.17 to +0.41 m	Results from climate models	+0.12 to +0.49 m	"Simple" connection between expansion (of sea water) and atmospheric temperature, simulated by climate models (Katsman et al, 2008; Rahmstorf 2007b)	Larger temperature rise is considered compared to the results from climate models (3)	
Glaciers	+0.08 to +0.17 m	Simple connection between decrease in ice volume and atmospheric temperature, based upon observations (4)	+0.07 to +0.18 m	cf. IPCC (2007a)	The small differences are the result of the small difference in temperature scenarios	
Antarctica	-0.14 to -0.03 m	(i) increased snowfall based on climate models (ii) estimated outflow of ice	-0.01 to +0.41 m	(i) cf. IPCC (2007a)  (ii) Continuation or even increase in the recently observed ice flow in the Amundsen Sea, in the East Antarctic, and on the Antarctic peninsula	(i) –  (ii) The ice cap is vulnerable due to the geographic conditions in the area (5).  Recent observations show that the ice sheet in the area is moving. It is still impossible to say whether this movement will decrease, continue or accelerate	
Greenland	+0.02 to +0.12 m	(i) Change in volume based on icecap models (ii) Ice flow as observed between 1993 and 2003  (iii) increase of summer melting	+0.13 to +0.22 m	(i) cf. IPCC (2007a)  (ii) increase in movement of the glaciers that flow into the sea  (iii) cf. IPCC (2007a)	(i) –  (ii) Recent measurements show that these glaciers can respond fast to warming climate  (iii) –	
Increased flow from ice sheets	-0.0 to +0.17 m	Extrapolation of the ice flow based the recently observed connection between ice flow and temperature rise	–	–	(6)	
<b>Total (2)</b>	<b>+0.25 to +0.76 m</b>		<b>+0.55 to +1.10 m</b>			
<b>For Bergen</b>						
Land uplift, Bergen			-0.22 to -0.12 m	Updated values	Based on Vestøl (2006): $17 \pm 5$ cm per 100 yr	
Non-uniform sea level rise, Bergen			+0.05 to +0.15 m		Based on Fig. 10.32 in IPCC (2007a), reproduced as Figure 8 above	
<b>Total</b>			<b>+0.38 to 1.13 m</b>			
Storm surge, Bergen			+0.05 to +0.15 m		Estimated based on Worth et al. (2006)	
<b>Total</b>			<b>+0.43 to 1.28 m</b>			

(1) In IPCC (2007a) these extra ice flow are referred to as scaled-up ice discharge.

(2) The totals are rounded off to 5 cm and are calculated as follows. First the central estimates  $x$  are determined (mostly an average of the given spread). The central estimate for the total  $X$  is the sum of the central values of the components ( $X = \sum x$ ). The total spread  $dX$  follows from the quadratic sum of the given spreads of the components:  $dX^2 = \sum (x-X)^2$ . The given spread of the total is  $(X-dX, X+dX)$ . This procedure is the correct one when it is assumed that the uncertainties in the individual components are independent of each other, and is followed in both IPCC (2007a) and in the Delta Committee report.

(3) The upper limit scenario of the Delta commission considers world average temperature rises of 2-6 degrees. For the A1FI emission scenario, climate models show a world average temperature rise of max 5.2 but are not taking into account possible feedback between the climate and the carbon cycle.

(4) The analysis takes into account the decrease of sensitivity of the glaciers to temperature change (the most vulnerable parts disappear faster) and the decrease of the total ice volume (high elevated parts of the glacier disappear more slowly than the lower lying parts).

(5) The rock which the named glaciers are lying on is positioned below sea level and is tilted downwards along the edge of the ice sheet. Such marine glaciers could in theory completely disappear, over a period of a century or more.

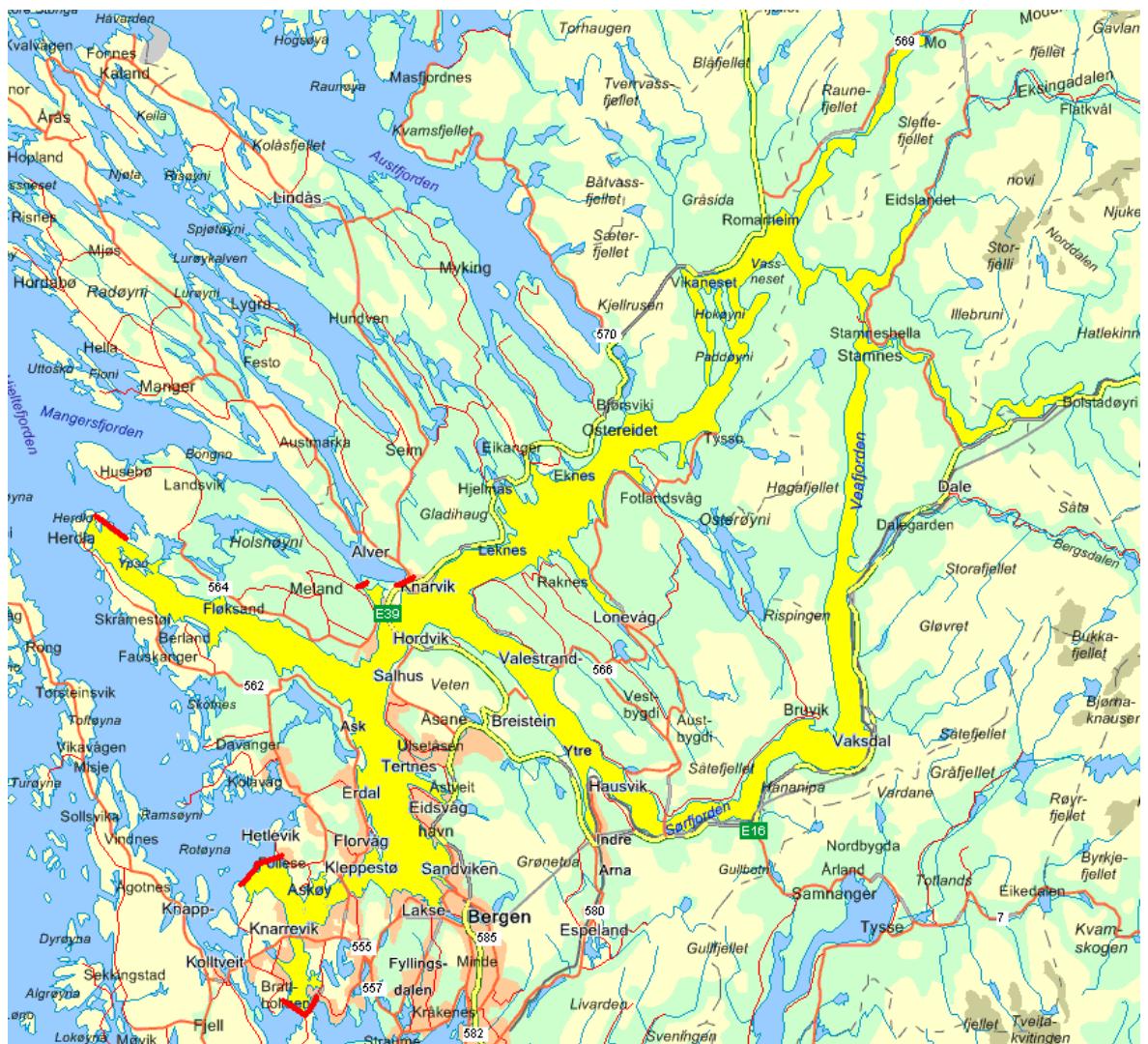
(6) The contribution of fast ice dynamics is included in the individual contributions from Greenland and Antarctica. In the scenario of the Delta commission, the contribution of the fast ice dynamics in the Antarctic ice sheet are estimated higher than in IPCC (2007a).

Estimert endring av havnivået globalt (hvite felt) og for Bergen (grå farge) i løpet av det 21. århundre. De globale verdiene er basert på den nederlandske deltakommisjonens rapport av 3. september 2008, se <http://www.deltacommissie.com/en>.

## 4. Mulige regionale skadevirkninger

### 4.1 Det ytre fjordsystem

Med utgangspunkt i barrierer plassert i fjordsystemet utenfor Bergen er det foretatt en vurdering av hvilken sjønær infrastruktur som er lokalisert innenfor. Området som er innenfor berører ni kommuner: Bergen, Fjell, Askøy, Meland, Lindås, Modalen, Vaksdal, Voss og Osterøy. Befolkningskonsentrasjonen i de berørte områdene er svært ulik – fra tett by til uberørt land. En stor del av områdene har en uberørt kystlinje.



Figur 9 Fjorder innenfor ytre barrierer (Kartgrunnlag: Gule Sider)

Dette kapittelet omfatter ikke områdene i Bergen sentrum ved Vågen, Puddefjorden og Store Lungegårdsvann som vil bli behandlet i neste kapittel om de indre barrierer.

Et utvalg av de største stedende som er lokalisert langs kyststripen innenfor de viste barriereplasseringene omfatter:

Bergen Kommune:	Laksevåg, Kjøkkelvik, Godvik, Trengereid, Arna, Steinestø, Salhus, Eidsvåg, Sandviken.
Askøy Kommune:	Strusshamn, Kleppestø, Florvåg
Meland Kommune:	Frekhaug
Lindås Kommune:	Knarvik
Modalen Kommune:	Mo
Vaksdal Kommune:	Eidslandet, Stanghelle, Vaksdal
Voss:	Bolstadøyri
Osterøy:	Haus, Valestrandsfossen, Lonevåg, Fotlandsvåg, Bruvik



Figur 10 Kystnære virksomheter på Askøy og Kjøkkelvik i Bergen

Klimagruppen antar at i år 2100 vil havet ved stormflo kunne stige 2,37 meter i forhold til null-nivået på land (havet stiger til 2,37 meter over havet (m.o.h.) eller kote +2,37). Denne vannstanden vil ha en retourperiode på ca 100 år, det vil si at sannsynligheten for at vannstanden skal inntrefte i løpet av ett år er ca 1 % (se avsnitt 5.1.3 og Figur 44 for flere detaljer).

Alle landområder som ligger lavere enn 2,37 meter vil derfor bli stående under vann de timene en stormflo av denne størrelse varer. En typisk kai er bygget med overkant dekke på kote +1,5 til 2 meter. Det betyr at de fleste kaiene vil bli oversvømmet og ubrukbar ved et havnivå tilsvarende forventet stormflo i år 2100. Bygningskonstruksjoner på kaiene, som typisk kan være lagerbygg eller industrilokaler, vil også bli berørt.

Et utvalg av hva som kan finne seg lavere enn 2,37 meter over havet:

Bygg:	Industri, næring, bolig, fritidsbebyggelse, naust, historiske bygninger
Anlegg:	Offentlige og private kaier, båtanlegg, fiskeoppdrett, flytebro
Infrastruktur:	Veier, plasser, ledningsanlegg
Natur:	Friluftsområder, våtmark, historiske områder

Figur 13 - Figur 18 viser et utvalg av sjønære konstruksjoner innenfor ytre barrierer som i ulik grad vil kunne bli påvirket av havstigningen.

Når en skal vurdere verdien av beskyttet infrastruktur må en samtidig vurdere gjenstående levetid. Et typisk bygg og kaikonstruksjon er dimensjonert for å vare i 50-100 år. Med det som utgangspunkt vil en derfor kunne vurdere å se bort fra beskyttelseseffekten av bestående byggverk og kaier som har en levetid langt kortere enn når havnivået er forventet å stige høyt nok til å kunne skade konstruksjonene. Med henvisning til Tabell 5 vil det gå ca 60 år før havnivået har steget med 25 cm.

Mange bygg og konstruksjoner vil ha en levetid som overstiger den dimensjonerende levetiden. Historiske og vernedde bygg kommer i denne kategorien. Denne type bygg vil en ønske å ta vare på i sin bestående form og historiske omgivelser. I den grad disse byggene kan bli skadet av havstigningen vil en bli tvunget til å iverksette beskyttelsestiltak – enten med ytre barrierer eller lokale tiltak. Et typisk eksempel innenfor ytre barriere vil være Norsk Trikotasjemuseum i Salhus og sjøboder i Sandviken.



Figur 11 Bjørsvik - eksempel på mindre steder som vil bli berørt av havstigningen

Kaikonstruksjoner er typisk oppført i betong og har en begrenset levetid. Ser en bort i fra kaikonstruksjoner som har historisk verdi, kan en se for seg at en nivåtilpasning av kaiene kan bli gjennomført samtidig med nødvendig vedlikeholdsoppgradering. I de fleste

tilfeller vil en kai ikke ta skade av å bli oversvømmet av sjøvann i perioder. Og så lenge kaien ved normal vannstand oppfyller krav til nivå for lasting, lossing og fortøyning for båter vil den vil fortsatt kunne fungere som kai. Men i perioder som kaien er oversvømmet vil den ikke kunne brukes og derfor kunne medføre driftstap for berørte virksomheter.

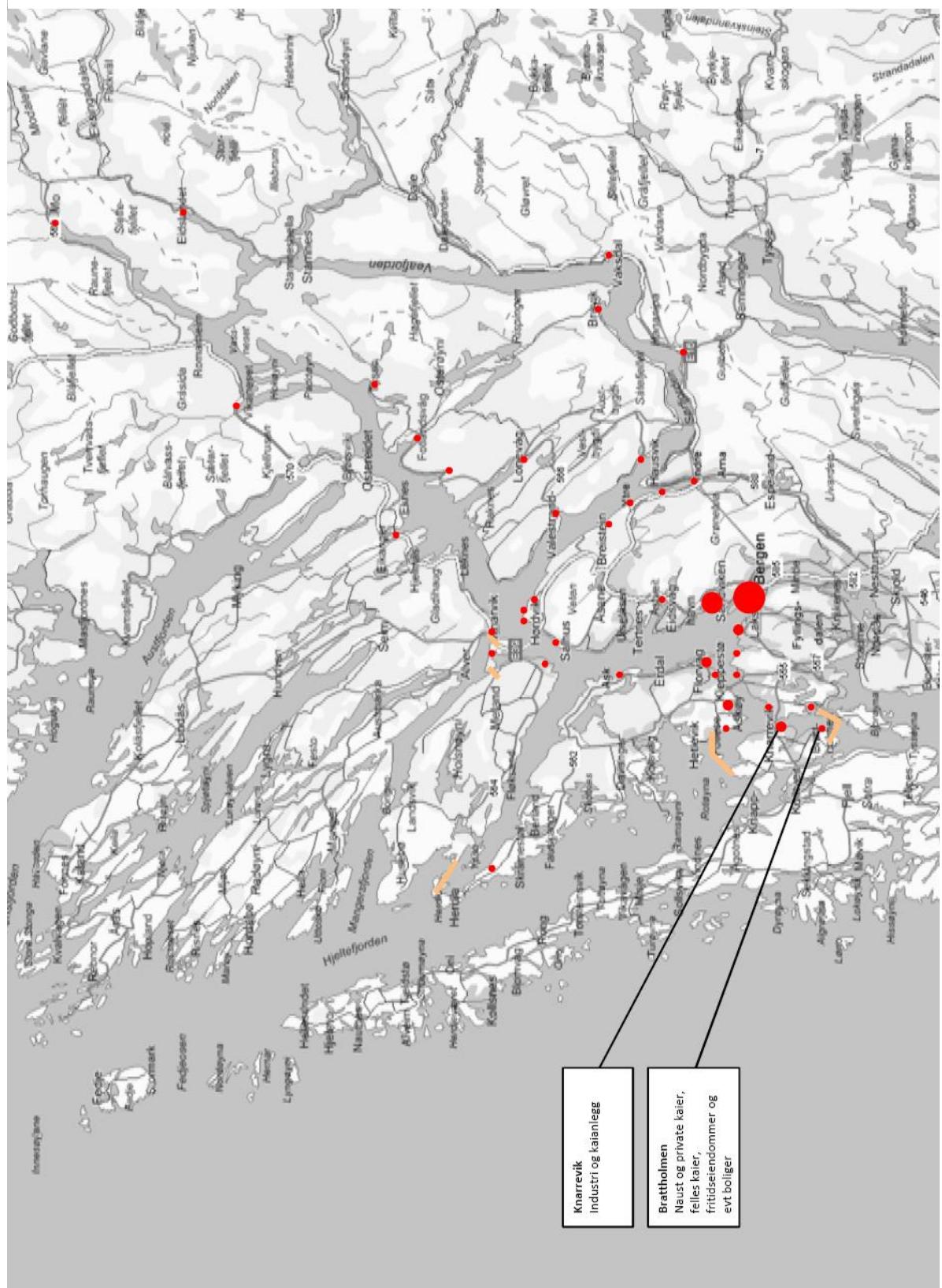
Spesielt viktige konstruksjoner vil være dimensjonert for en levetid på mer enn 50 år. Innenfor den ytre barriere er det tilfelle for Nordhordlandsbroen. Nordhordlandsbroen er prosjektert for en levetid på 100 år. Broen er dimensjonert for å kunne takle havnivåer på  $\pm 2$  m. Det betyr at uten en ytre barriere konstruksjon, så vil broen måtte gjennomgå en ombygging og tilpasning for havnivåer på over kote +2,0.



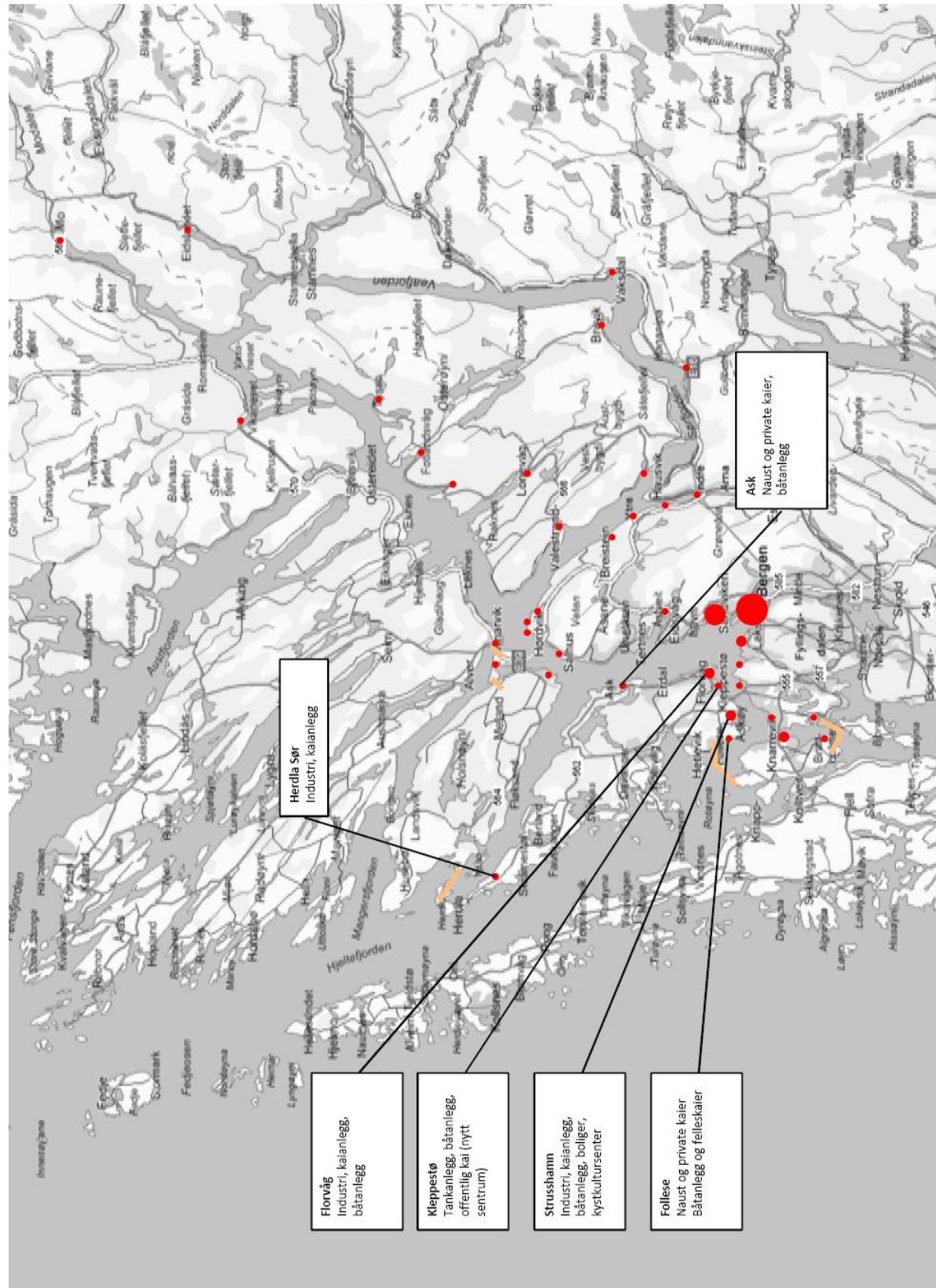
Figur 12 Nordhordlandsbroen med Salhus i bakgrunnen

For ny bebyggelse som er under oppføring eller planlegging er informasjon om forventet stigning av havnivået kjent og skal derfor være en del av dimensjoneringsgrunnlaget. Nybygg langs f. eks. Damsgårdssundet bygges i dag med en første etasje på et høyere nivå enn tidligere for å tilpasse seg forventede økninger i havnivå.

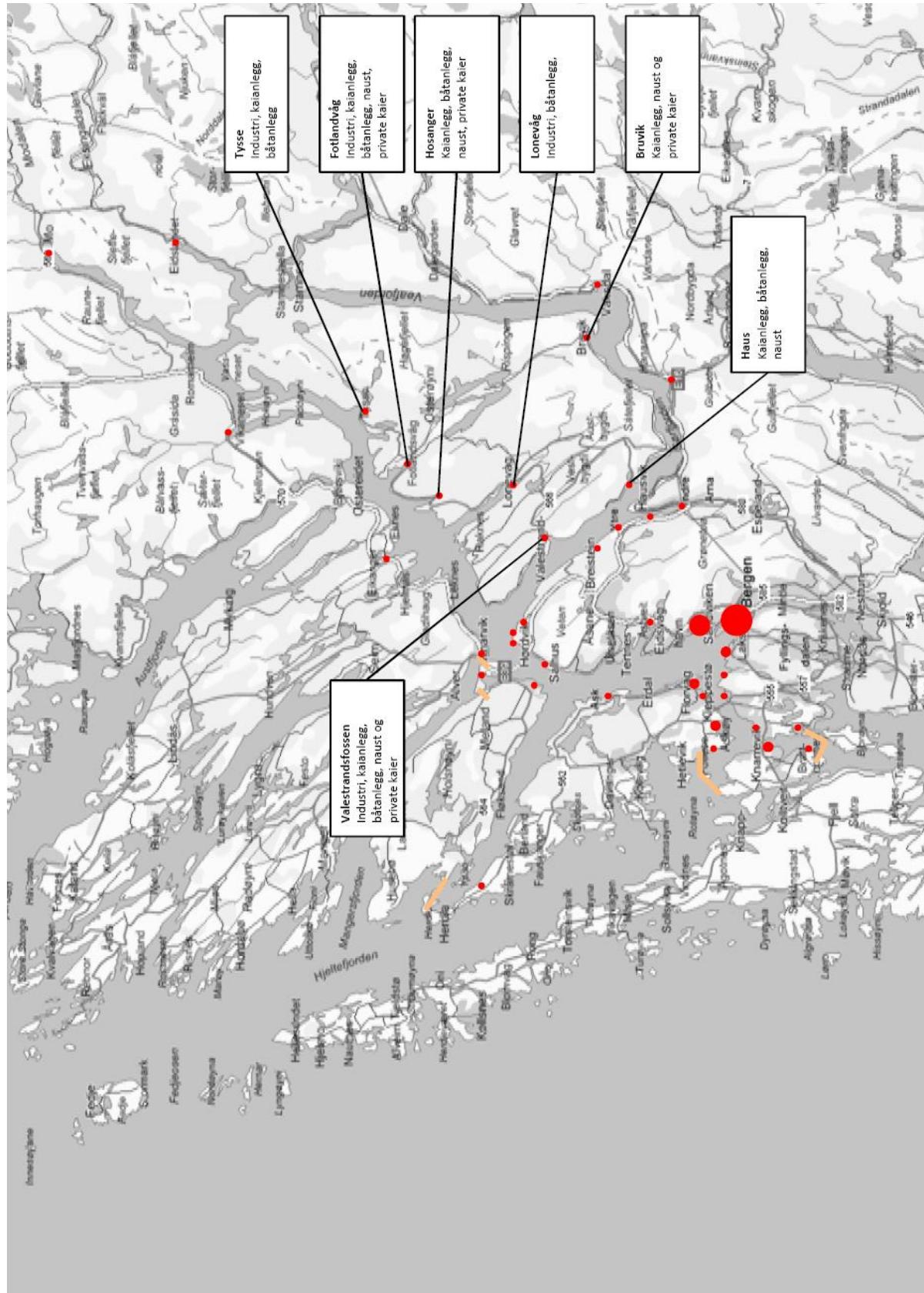
Figur 13 Berørte områder og konstruksjoner Del 1



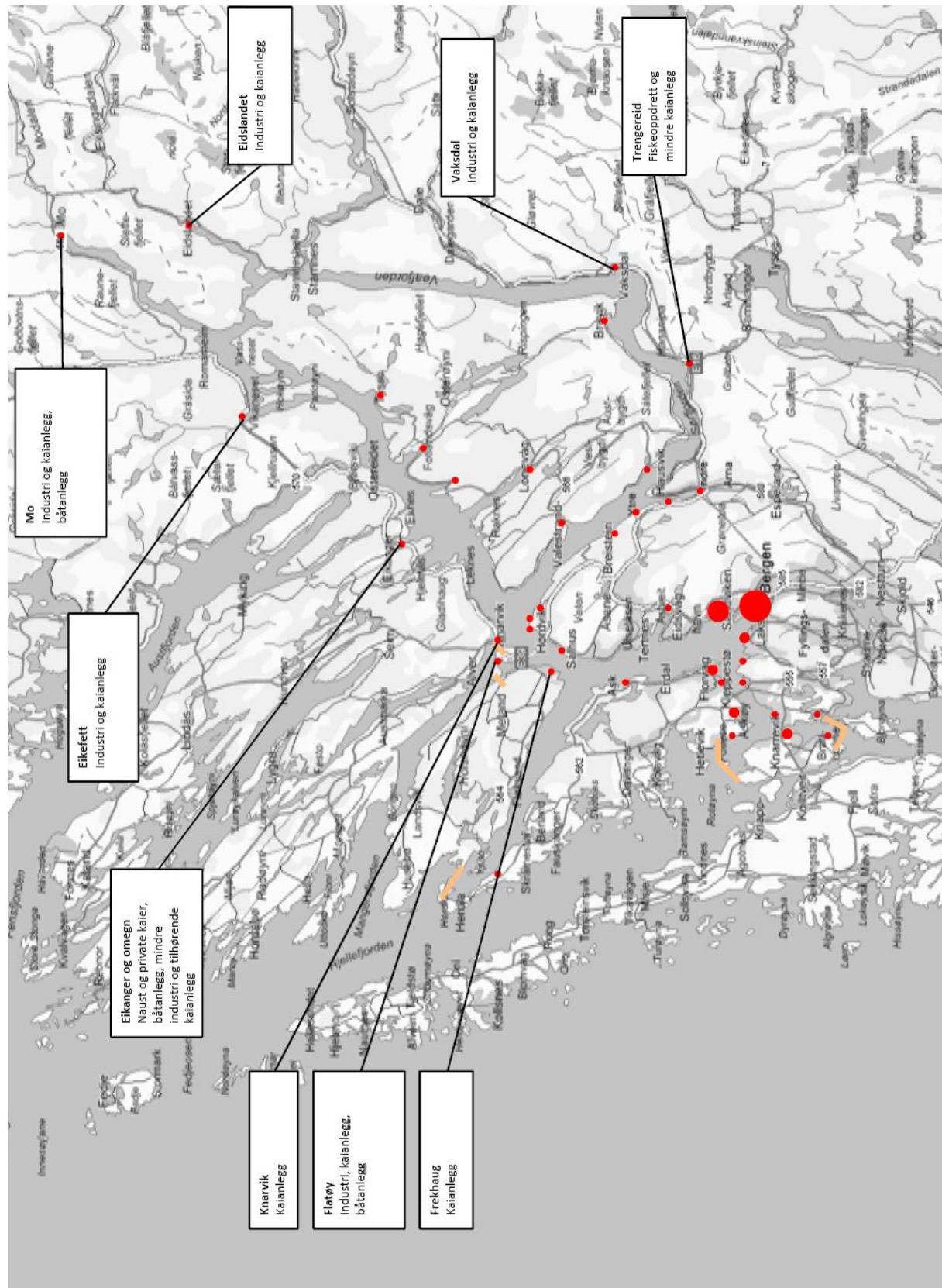
Figur 14 Berørte områder og konstruksjoner Del 2



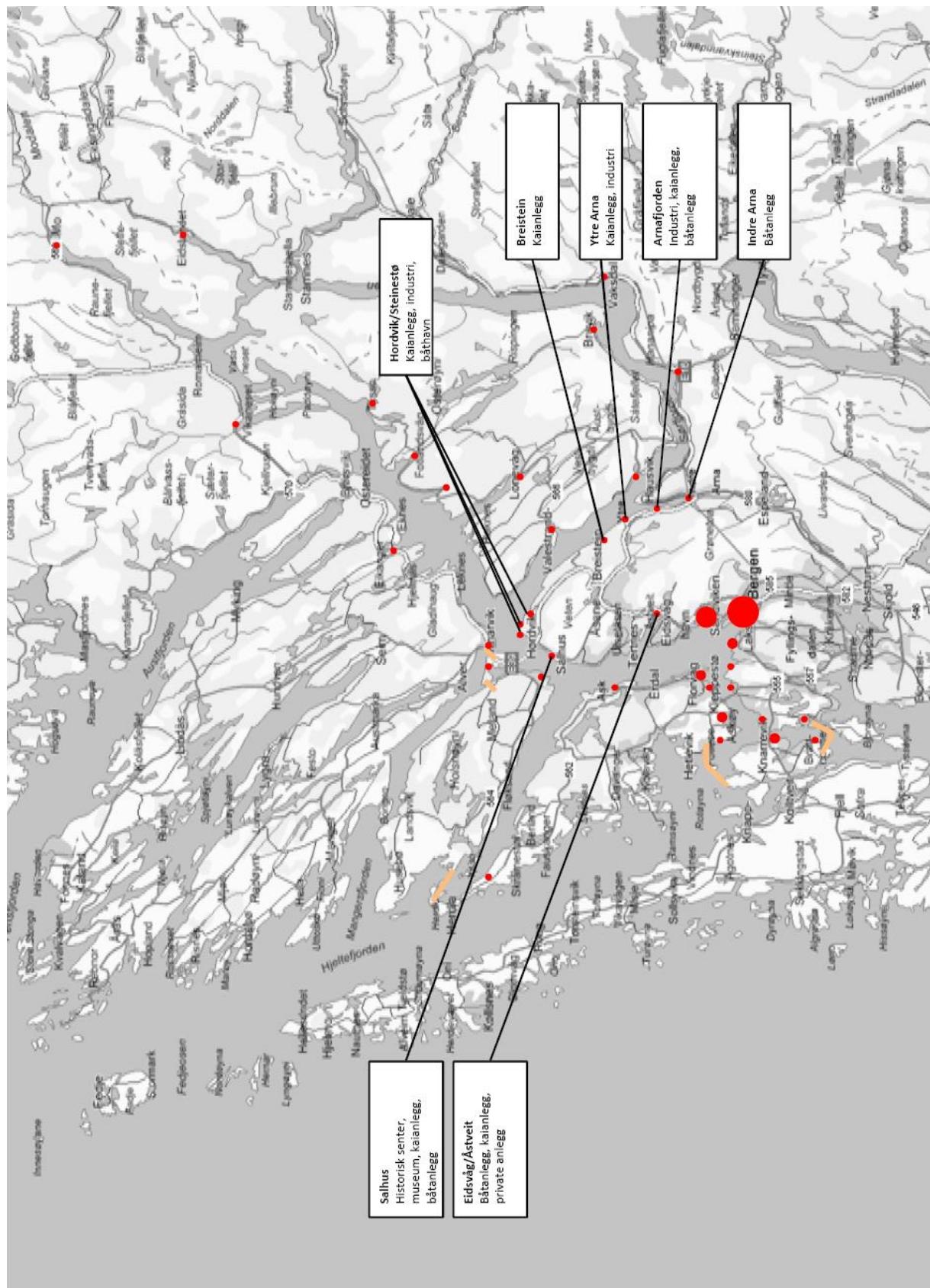
Figur 15 Berørte områder og konstruksjoner Del 3



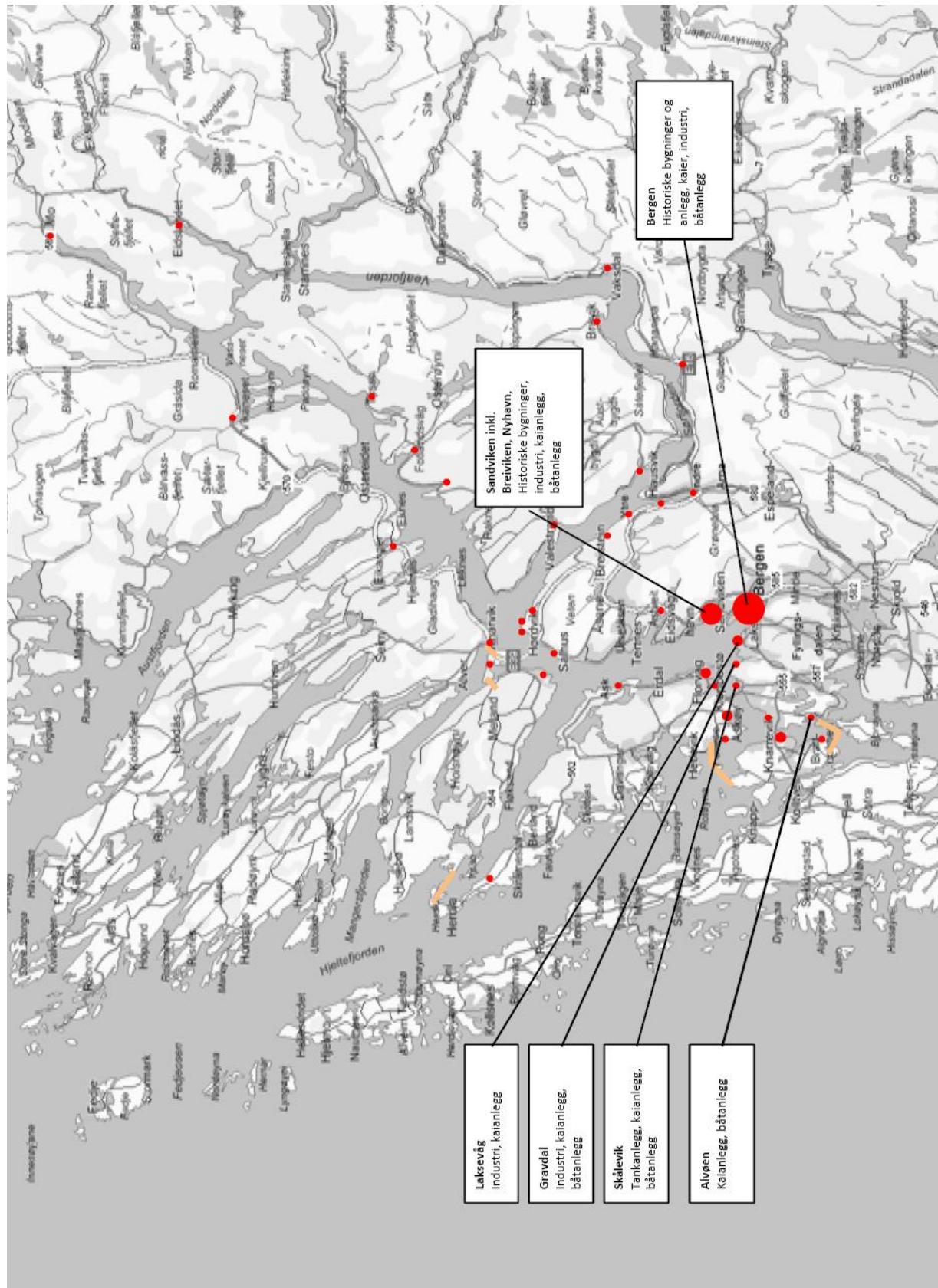
Figur 16 Berørte områder og konstruksjoner Del 4



Figur 17 Berørte områder og konstruksjoner Del 5



Figur 18 Berørte områder og konstruksjoner Del 6



## 4.2 Det indre havneområde

### 4.2.1. Bergen – en by ved havet

Bergen by har en lang og unik historie. Med Bergen Byleksikon som kilde kan deler av historien oppsummeres slik:

*Under den siste istiden var Bergenshalvøya dekket av is i 100.000 år. Før denne glasiale perioden hadde det i 10-15.000 år vært mellomistid. Havoverflaten den gang lå 56 m høyere enn nå; det var sjøforbindelse mellom Puddefjorden og Nordåsvannet. For 10.000 år siden var den siste istiden over.*

*Bergen ble grunnlagt av Olav Kyrre i 1070. Den eldste bosettingen i Bergen var mellom Mariakirken i nord og Korskirken i sør.*

*Vågen var forutsetningen for Bergens fremvekst til en viktig europeisk handelsby. Den lå sentralt på norskekysten, var sjeldent islagt og velegnet for håndtering av gods. Kjernen i bydannelsen var østbredden mellom Holmen og Korskirken, der Bryggen med sine vel 30 sjøgårder ble anlagt.*



Figur 19 Bergen ca 1880 (BerGIS)

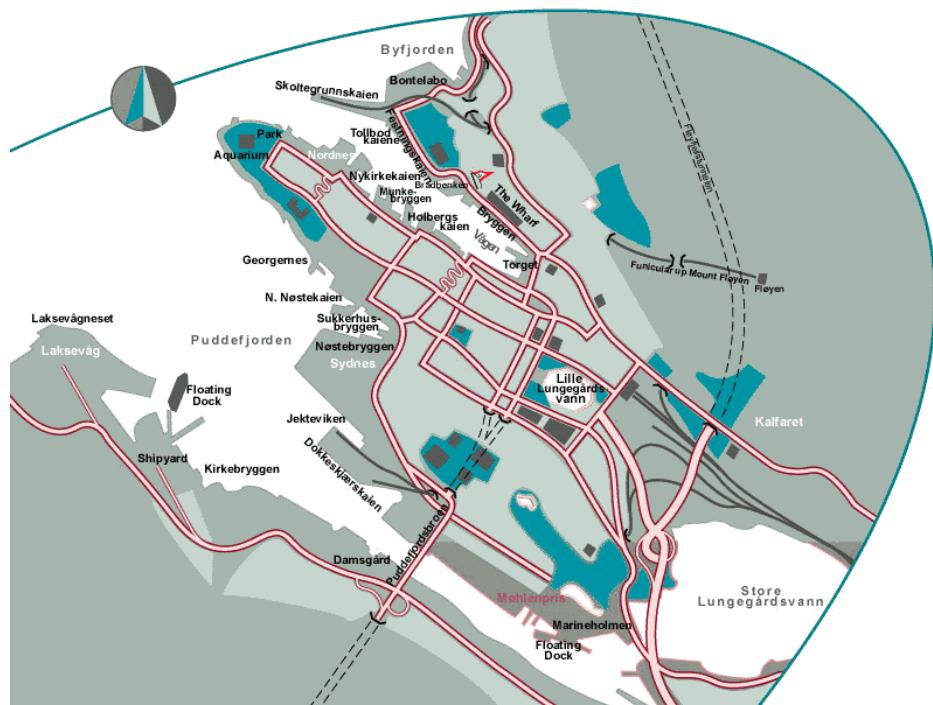
*kaifronten. Denne fjordarmen var opprinnelig mye bredere enn i dag, innpå det dobbelte av de 130 m det nå er mellom Bryggen og Stranden.*

*Utfyllingene av begge Lungegårdsvannene har gitt nye landområder. Sjøen gikk opprinnelig så langt som til den blå steinen på Ole Bulls plass. Eidet mellom Lille Lungegårdsvann og Vågen var bare 180 m bredt. Sundet mellom Lungegårdsvannene ble gjenfylt 1926.*

*Skoltegrunnskaien ble ferdigstilt i 1923 og først da ble forholdene tilfredsstilt for mottak av turistskip.*

#### **4.2.2. Bergen havn**

Antall skipsanløp for Bergen sentrale havn var for 2007 totalt 18.747 med en samlet bruttotonnasje på ca 40 mill tonn. Antall cruiseskipanløp i 2007 var 231 med ca 200.000 passasjerer.



*Figur 20 Bergen indre havn (Bergen og Omland havnevesen)*

Bergen indre havn har ca 6.000 m med offentlige kaier. Nivå av kaiene er basert på dagens havnnivå og på hvilke typer båter som skal kunne legge til. I år 2100 er det forventet at det generelle havnnivået vil stige med 75 cm. Denne økningen vil gjøre dagens kaier uegnet for fortøyning for mange typer fartøyer.



*Figur 21 Festningskaien*

#### **4.2.3. Oversvømte områder**

En digital terregnmodell for Bergen (Figur 22 - Figur 34) viser hvilke arealer som vil stå under vann hvis havet stiger til stormflonivå, kote +2,37 eller springflonivå, kote +1,47.



*Figur 22 Utsnitt 1 – Sandviken ved stormflo*

Figur 22 viser strandsonen fra Kristiansholm til Bontelabo. Veier og plasser på Kristiansholm vil være oversvømmet og industribyggene vil bli isolert. Sjøen vil dekke hele Sandvikstorget og samtidig blokkere Sjøgaten, hovedveien gjennom Sandviken, RV 585. Sjøen vil også strekke seg mot bebyggelsen øst for Sandvikstorget.

Kaianlegget og deler av plassen på Slaktehustomten vil bli dekket og flere bygninger vil bli berørt. Det er planlagt ny bebyggelse på nordre del av Slaktehustomten. Det forutsettes at ny bebyggelse anlegges på et nivå med tilstrekkelig klaring til forventet stormflo.

I Skuteviken vil kaiene, torget, hovedveien og området helt opp til bebyggelsen øst for torget bli oversvømmet. I tillegg vil hele rekken med Skuteviksboder få vann inn i byggene høyere enn nivå på gulv 1. etasje.

I området ved Bontelabo vil hele kaiområdet bli oversvømmet helt inn til bebyggelsen. Parkeringsplass, hovedvei og område for jernbanetrase vil også stå under vann.



*Figur 23 Utsnitt 2 – Vågen ved stormflo*

Figur 23 viser at hele Skoltegrunnskaien vil stå under vann og byggene der vil bli oversvømmet. I Vågen vil alle dagens kaier bli oversvømmet. Havet vil også hindre trafikk langs Bryggen, over Torget og i C. Sundts gate. Lagerbygninger plassert på kaiene ved Bradbenken og Slottsgaten vil bli oversvømmet. Det økte havnivået vil strekke seg til bebyggelsen langs nordsiden av Slottsgaten. Ved SAS Hotellet vil plassen ved hovedinngangen og bebyggelsen mot Vågen, samt garasjen bli oversvømmet.

C. Sundts Gate vil bli oversvømmet ved stormflo fra Østre Murallmenning og til forbi Nykirkekaien. Hus nord for C. Sundts Gate inkludert Holbergskaien, Munkebryggen, Nykirkekaien og Tollbodkaiene vil få vann på alle sider.



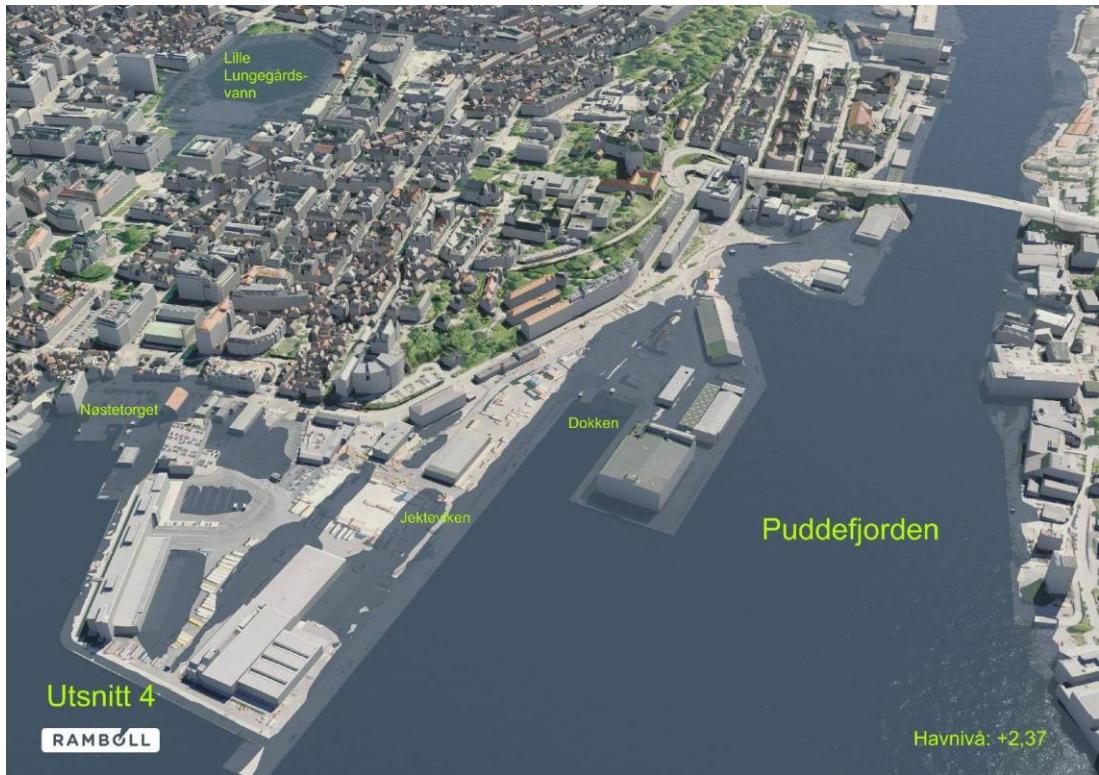
Figur 24 Utsnitt Vågen ved springflo

Figur 24 viser havnivå ved springflo og tilnærmet ingen oversvømmelser langs Vågen.



Figur 25 Utsnitt 3 – Nordnes ved stormflo

På sørspissen av Nordnes vil kaien ved boligene på Georgenes Verft bli oversvømmet. Ved USF vil deler av plassen ved hovedinngangen og hele kaiområdet bli oversvømmet. Nøstegaten vil bli oversvømmet fra Vestre Holbergsallmenningen og til og med Nøstetorget og hindre en av hovedtilkomstene til sentrum (RV 555) og til Klostergarasjen.



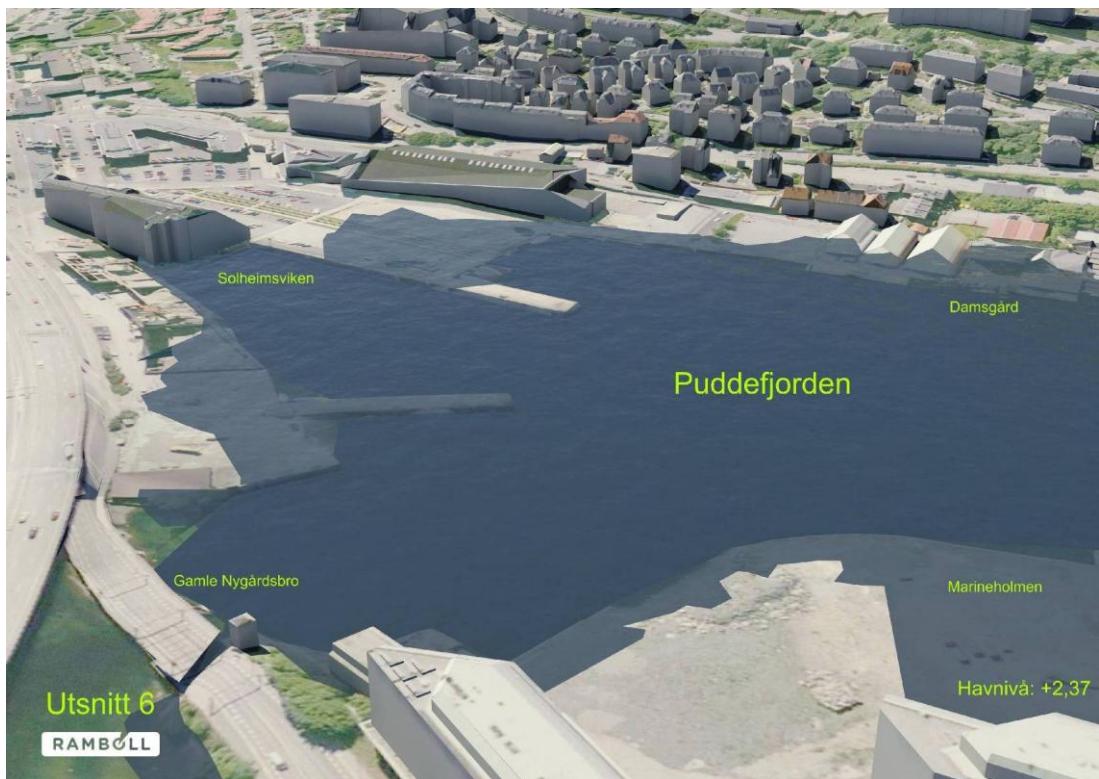
Figur 26 Utsnitt 4 – Dokken ved stormflo

Store deler av de utfylte arealene i Jekteviken og Dokken vil bli oversvømmet. Tilsvarende som for Vågen vil også kaiene langs Puddefjorden bli oversvømmet.



Figur 27 Utsnitt 5 – Puddefjorden ved stormflo

I området på Marineholmen pågår bygging av flere nybygg og flere er under planlegging. G. C. Rieber Eiendom har tatt konsekvensen av forventet havstigning og hevet byggene med 0,5 m. Tilsvarende har BOB hevet byggene på Damsgård til 1 m over kaiene.



Figur 28 Utsnitt 6 – Solheimsviken ved stormflo

Området i Solheimsviken er under utvikling og det er planlagt ny bebyggelse på flere av de oversvømte områdene. Nivå av den nye bebyggelsen vil bli tilpasset det økte havnivået.



*Figur 29 Utsnitt 7 – Nygårdstangen ved stormflo*

Kartutsnittet over området fra Store til Lille Lungegårdsvann (Figur 29) viser store landområder som ligger lavere enn kote +2,37. Nygårdstangen er et viktig trafikknutepunkt for Bergen. Uten skjerming vil Fjøsangerveien ved Bystasjonen, RV 555 Sotraveien som går i tunnel under Nygårdshøyden og andre deler av veinettet bli stående under vann ved stormflo i år 2100. Områder ved brannstasjonen, sør for Bystasjonen og godsterminalen for jernbanen vil stå under vann. Bebyggelsen mellom Vestre Strømkaien og Fjøsangerveien ligger lavt og vil også bli berørt av havstigningen.

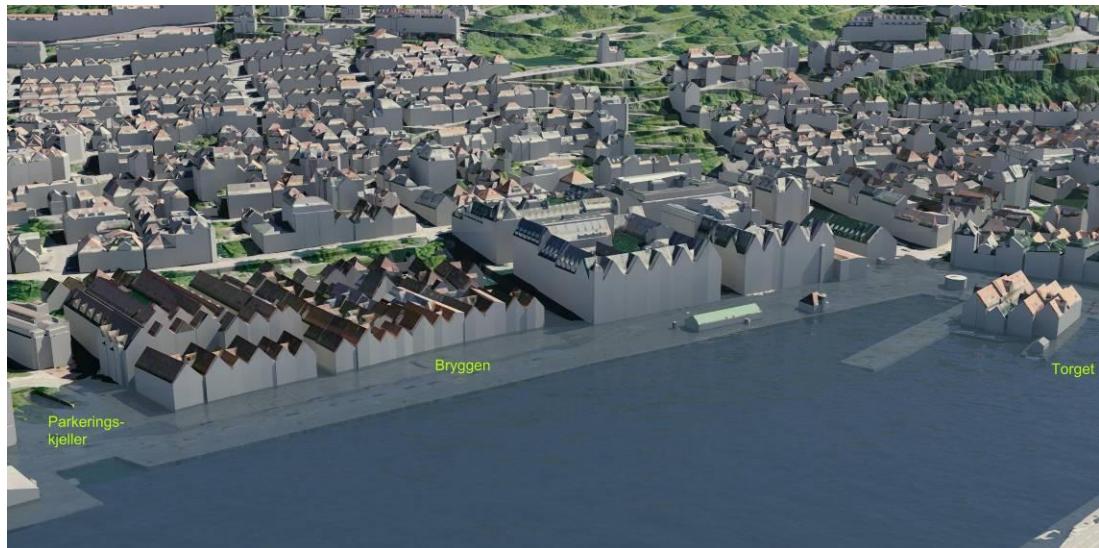
Lille Lungegårdsvann ligger i dag på kote +0,40 m. Hvis havet tillates å stige inn til Lille Lungegårdsvann vil hele Festplassen, nedre del av Ole Bulls plass og område frem til bebyggelsen nord og sør for Lille Lungegårdsvann bli oversvømmet. I tillegg viser kartutsnittet et område øst for Grieghallen mellom Nygårdsgaten og Fjøsangerveien som også vil bli oversvømmet.



Figur 30 Utsnitt Nygårdstangen ved springflo

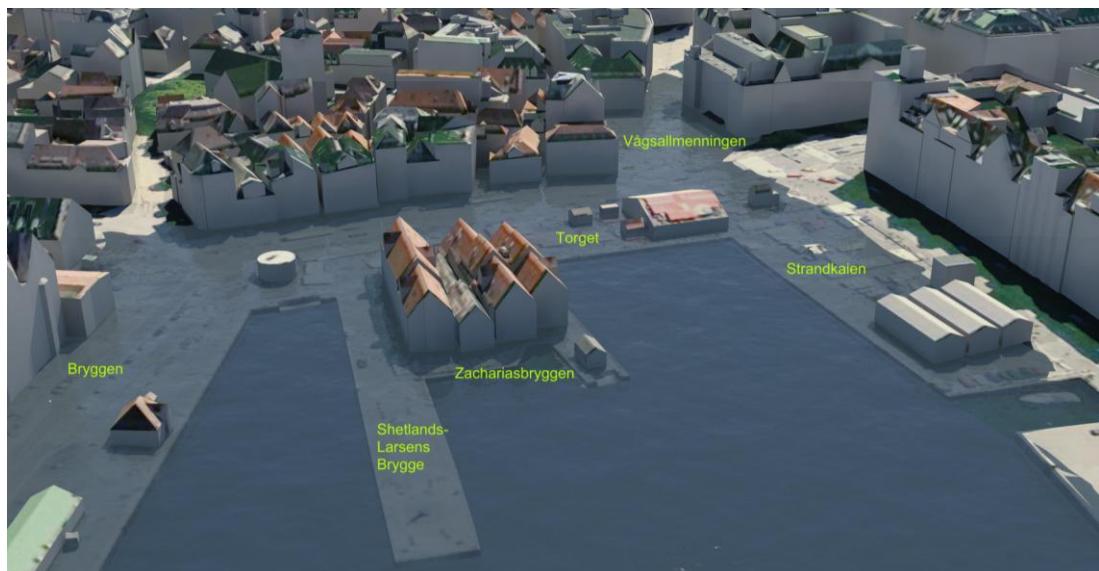
Utsnitt av området ved Nygårdstangen ved springflo viser et begrenset område som blir berørt av et havnivå på kote +1,47.

Bryggen er byens viktigste byggverk. Som vist på kartutsnittet vil Bryggen og hele plassen mellom Bryggen og Vågen bli oversvømmet ved stormflo.



Figur 31 Bryggen ved stormflo

På Torget vil sjøen strekke seg til nedre del av Vetrlidsalmenningen, dekke hele Torget og oversvømme husrekken mot øst. I område ved Vågsalmenningen vil vannet gå helt opp til Olav Kyrres gate og Nedre Korskirkealmenningen. Veien langs Strandkaien går fri, men blomstertorget og lagerbyggene der blir oversvømmet.



Figur 32 Torget ved stormflo

Denne siden viser tilsvarende illustrasjoner som foregående side, men med havnivå satt til kote 1,47 som tilsvarer springflonivå i år 2100.

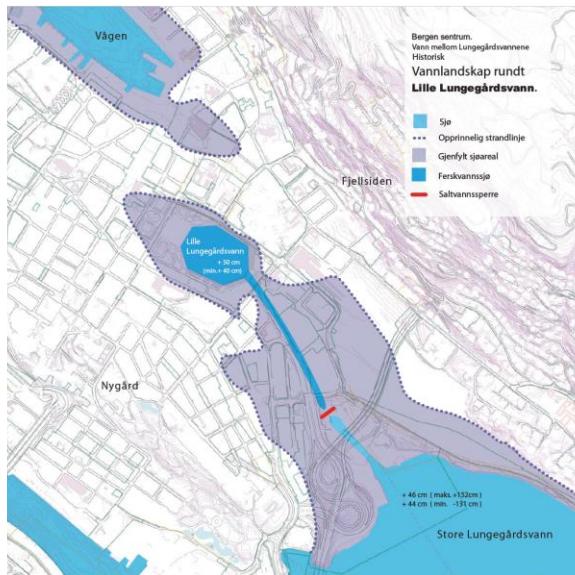


Figur 33 Bryggen ved springflo

De aller fleste kaiene er høyere enn springflonivå og i området ved Torget er det kun deler av Strandkaien og Zachariasbryggen som vil bli oversvømmet.



Figur 34 Torget ved springflo



Figur 35 Gammel sjølinje (Bergen Kommune)

havstigning vil være større enn hva kartillustrasjonen viser, da konstruksjoner under bakkeplan vil kunne bli utsatt for vanninntrengning også ved lavere vannstand enn ved stormflo.



Figur 36 Programsksisse Nygårdstangen (Bergen Kommune)

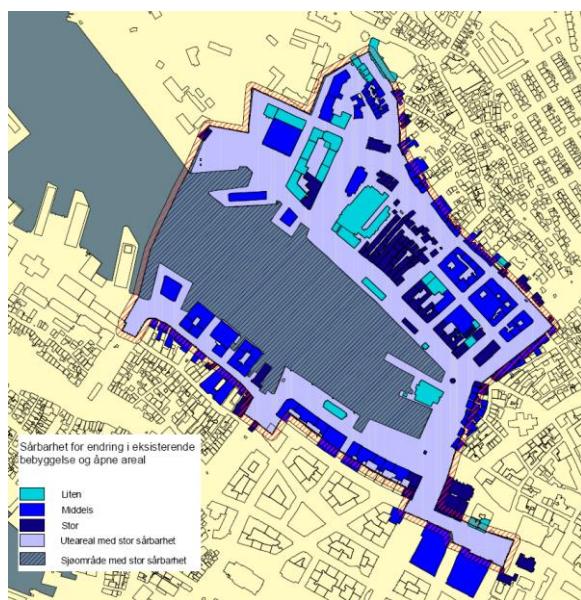
Figur 35 viser hvor store landområder som er blitt utfylt i forhold til plassering av den opprinnelige strandlinjen. Dette området er sterkt sammenfallende med arealet som vil kunne bli oversvømmet ved en stormflo i år 2100. En må kunne anta at mye av de utfylte massene vil være relativt åpne for vanninntrengning. Det betyr at havvann vil trenge inn i massene og at vannivået i massene for deler av området vil følge tidevannsvariasjonene. For å beskytte infrastruktur i det utfylte området vil det derfor ikke nødvendigvis være tilstrekkelig å etablere en demning fra dagens nivå og opp til kote +2,37, men også hindre vann i å trenge inn gjennom fyllmassene. Det medfører også at konsekvensene for en

Opprinnelig var Lille Lungegårdsvann en fjordarm av Store Lungegårdsvann. Det er planer om å åpne opp igjen vannforbindelsen mellom vannene ved å etablere en delvis åpen kanal. En kanalforbindelse kombinert med åpne fyllmasser vil vanskeliggjøre en lokal skjerming mot havnivåøkningen. For å sikre området vist på Figur 36 vil derfor en barriereløsning ved innløpet til Store Lungegårdsvann eller i Puddefjorden være mest hensiktsmessig.

#### **4.2.4. Berørt infrastruktur**

Ovennevnte beskrivelse og kart viser et betydelig omfang av bygninger og utearealer som vil bli berørt ved ekstremvannstand i år 2100.

Bergen er rik på sjønære kulturminner som det vil være viktig å sikre for fremtiden.



Figur 37 viser utsnitt av Vågen hvor sårbarheten til de ulike byggene og plassene er klassifisert.

Figur 37 Sårbarhetsvurdering (Byantikvaren)

Berørt infrastruktur vil også omfatte tekniske konstruksjoner i grunnen. Det må forventes at deler av avløpssystemet vil bli påvirket ved økende havnivå. Ved etablering av ulike former for skjermvegger vil det bli nødvendig å sikre en forsvarlig håndtering av oversvann. Skjermkonstruksjonene vil stenge overvannet inne og forårsake oversvømmelser innenfor skjermveggene ved store nedbørsmengder. I videre vurderinger vil det være nødvendig å se nærmere på andre anlegg som kan bli berørt – f. eks. bossug, fjernvarme etc. Kostnader med omlegging og tilpasning av slike anlegg i grunnen må medregnes når barrierene skal etableres.

Deler av Bergen sentrum har kulturminnebestemmelser som legger begrensninger for hva som tillates etablert i grunnen. Nye konstruksjoner i for eksempel Vågen vil utløse krav om arkeologiske undersøkelser. Utforming av skjermkonstruksjoner vil også måtte bli avklart i samråd med antikvariske myndigheter. Dette vil medføre betydelige tilleggskostnader utover selve konstruksjonsarbeidene.

I mange områder i Bergen – f. eks. Puddefjorden og Vågen, er det påvist forurensning i grunn. Felles eller lokale barrierer vil kreve arbeider i grunn og vil derfor også utløse krav om sikker håndtering av forurensede masser som også vil være kostnadsdrivende for byggearbeidene.

## **5. Forebyggende tiltak**

### **5.1 Grunnlagsdata**

#### **5.1.1. Innledning**

Ingeniørvitenskapen omhandler risiko som produktet av sannsynlighet for en hendelse og konsekvens av hendelsen. Avhengig av konstruksjonstype og konsekvens av uønskete hendelser, dimensjoneres bygg og anlegg typisk for naturlaster med sannsynlighet for å inntreffe i løpet av ett år på  $10^{-2}$  ("100 års-hendelse, typisk for vind, bølger, strøm) til  $10^{-3}$  til  $10^{-4}$  ("1.000 til 10.000 års-hendelse" typisk for skred, jordskjelv), se Figur 38.

For havnivåstigning er situasjonen spesiell. I Bergensområdet foregår det fortsatt landheving etter siste istid. Det er estimert at dette utgjør 1,7 mm per år. IPCC (2007) viser at havnivåøkningen i perioden 1961 til 2003 var gjennomsnittlig 1,8 mm per år, økende til ca. 3,1 mm per år i perioden 1993-2003. Det er uklart om denne økningen skyldes tilfeldige variasjoner eller er en mer langsiktig trend. Vi kan altså anta at havnivåøkning i 2008 ligger et sted mellom 1,7 og 3,1 mm per år. Nettohavstigning for Bergensområdet blir altså 0,1 til 1,4 mm per år.

For øyeblikket skjer altså havnivåstigningen meget langsomt. Iverksetting og prioritering av tiltak må forholde seg til dette.

#### **5.1.2. Dimensjoneringskriterier - generelt**

Plan- og bygningslovens paragraf 68 har relevans for vurderinger knyttet til stormflo. Denne paragrafen sier at "*grunn kan bare deles eller bebygges dersom det er tilstrekkelig sikkerhet mot fare eller vesentlig ulempe som følge av natur- eller miljøforhold. Kommunen kan for grunn eller område som nevnt i første ledd, om nødvendig nedlegge forbud mot bebyggelse eller stille særlige krav til byggegrunn, bebyggelse og uteareal*".

For naturlaster er det vanlig å kvantifisere det subjektive begrepet *tilstrekkelig sikkerhet* ved å angi et tallmessig krav til hvilken sikkerhet ulike typer bygninger skal ha mot naturpåkjenninger som skred, flom, bølger, strøm, vind, jordskjelv med mer. § 7-32 i teknisk forskrift til plan- og bygningsloven (1997) omhandler sikkerhet mot naturpåkjenninger (skred, flom, sjø og vind):

##### **1. Generelle krav**

*Byggverk skal plasseres og utformes slik at de har tilfredsstillende sikkerhet mot å bli skadet av naturpåkjenninger (skred, flom, sjø og vind).*

*Planløsning og plassering av byggverk som kan innebære en fare på grunn av forutsatt bruk av byggverket, skal vurderes spesielt.*

2. *Sikkerhet mot skred*

*Sikkerheten mot skred antas å være tilfredsstillende når byggverk i sikkerhetsklasse 1, 2 og 3 og medhørende utvendige bruksarealer dimensjoneres eller sikres mot skred slik at normtabellene i tabellen nedenfor oppnås. Byggverk i sikkerhetsklasse 4 skal ikke plasseres i skredfarlig område.*

*Tabell 4 Sikkerhetsklasser for plassering av byggverk*

<b>Sikkerhets-klasse</b>	<b>Skade-konsekvens</b>	<b>Største nominelle årlige sannsynlighet</b>	<b>Eksempler på bygninger</b>
1	Liten	$10^{-2}$	Mindre garasjer Båtnaust Lagerskur med lite personopphold Brygger for sport og fritid
2	Middels	$10^{-3}$	Små hus og tilsvarende bygg for næringsdrift Hytter Driftsbygninger i landbruker Mindre kaier og havneanlegg
3	Stor	$< 10^{-3}$	Andre bygg
4	Katastrofal	0	Bygninger skal ikke plasseres i området

Dimensjonering med tanke på stormflo bør i prinsippet følge samme tankegangen som for skred, men det er viktig å være klar over at konsekvensen av et skred er mye mer alvorlig enn en oversvømmelse. Det bør derfor kunne tillates høyere årlig sannsynlighet for en stormflo-hendelse enn et skred.

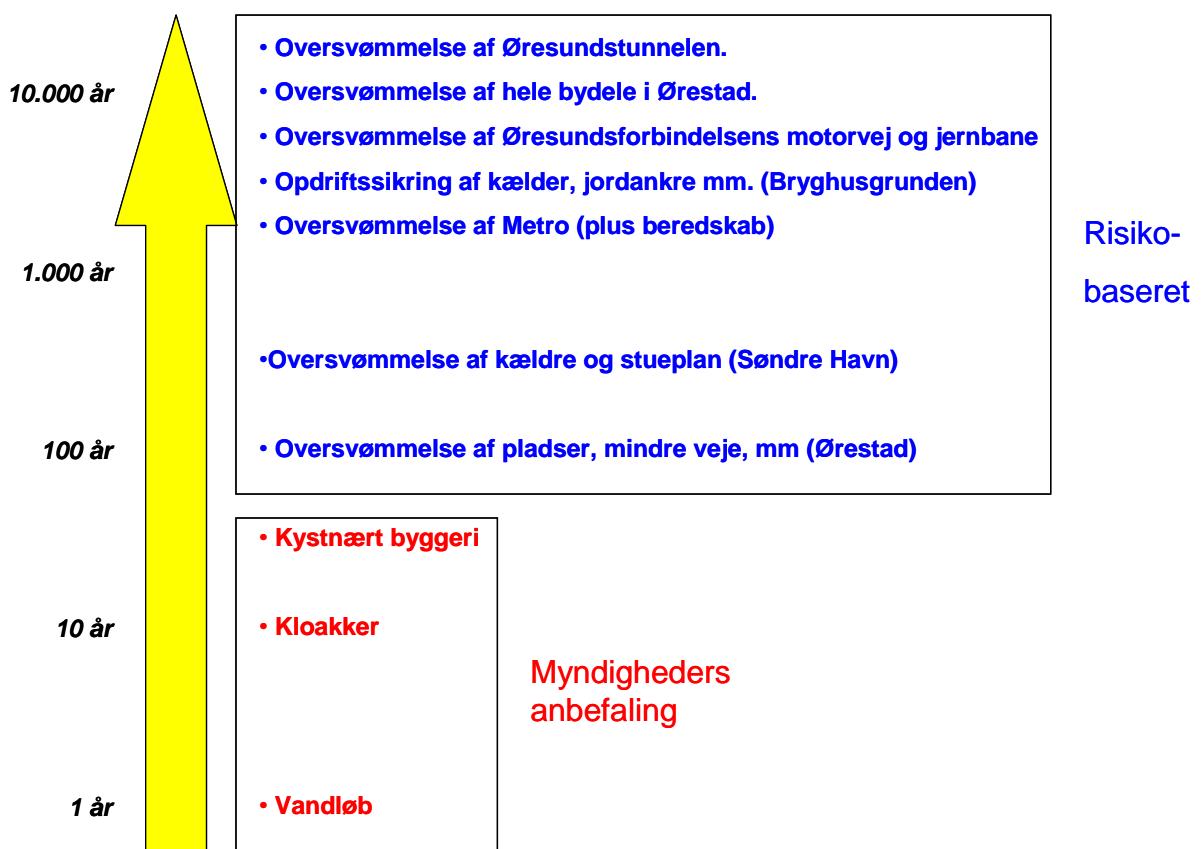
Rambøll Danmark har presentert hvordan dette gir seg utslag for bydelen Ørestad ved Kastrup i København, se

Figur 39. Denne figuren illustrerer godt hvordan dimensjonering av infrastruktur med tanke på flom bør være basert på en vurdering av risiko.

Risiko defineres ofte som produktet av sannsynlighet for at en hendelse skal inntreffe og skadekonsekvensen av hendelsen.

ÅRLIG SANNSYNLIGHET		RETURPERIODE	TYPE HENDELSE
$10^{-1}$	10 %	10 år	10-års hendelse
$10^{-2}$	1 %	100 år	100-års hendelse
$10^{-3}$	1 ‰	1.000 år	1.000-års hendelse
$10^{-4}$	0,1 ‰	10.000 år	10.000-års hendelse

Figur 38 Sannsynlighet og returperioder

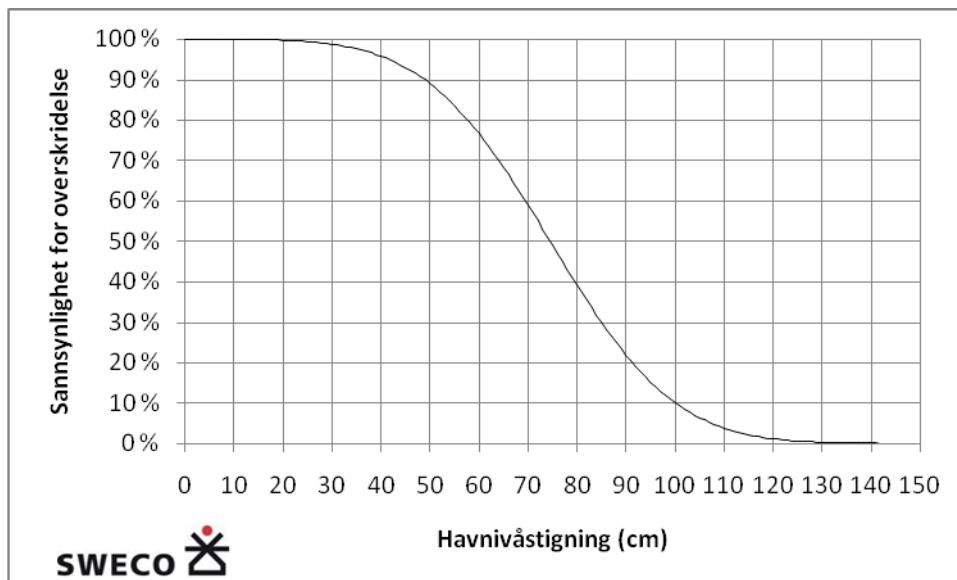


Figur 39 Eksempel på akseptkriterier for flom, København, Danmark (Rambøll, Danmark)

### **5.1.3. Input fra Klimagruppen**

Fra Klimagruppen har vi følgende utgangspunkt for våre vurderinger:

- Middelvannstand økning i år 2100 sammenlignet med dagens nivå: 75 cm og sannsynlighetsfordeling som vist i Figur 40.
- Stormflovannstand økning i år 2100: 85 cm med sannsynlighetsfordeling tilsvarende det som er vist i Figur 40.



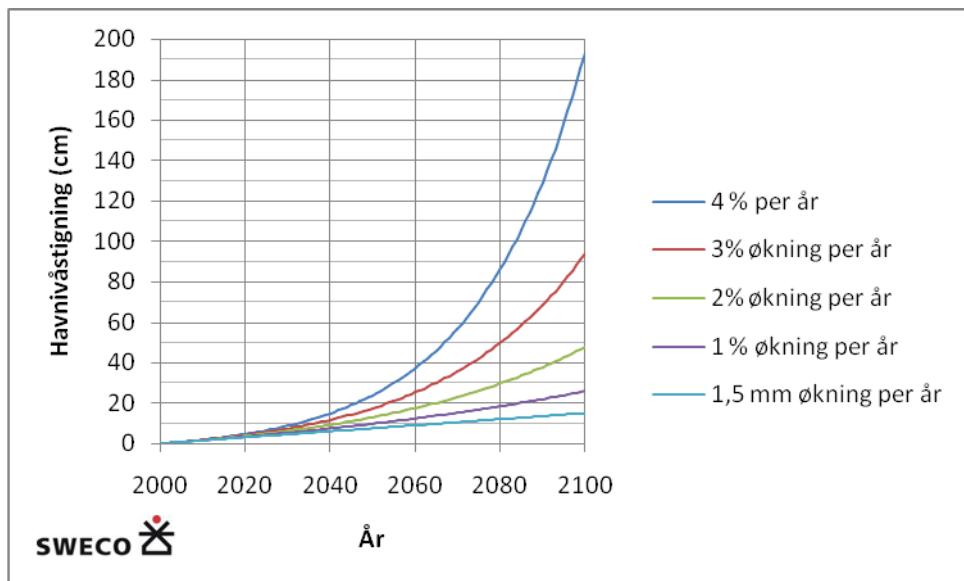
*Figur 40 Sannsynlighetsfordeling for havnivåstigning i år 2100*

Klimagruppen har videre uttalt at maksimal havstigning per 100 år ikke kan overstige 2 meter.

Fra Figur 40 kan det observeres at dagens havnivåstigning (justert for landheving) på maksimalt 1,4 mm per år, eller 14 cm havnivåstigning per århundre, med tilnærmet 100 % -sannsynlighet vil bli overskredet.

Den årlige havnivåstigningen må derfor akselerere betydelig for at vi skal få en havnivåstigning på 75 cm innen år 2100. Ingeniørgruppens beregninger viser at havnivået må øke med ca 2,7 % årlig for å oppnå dette, se Figur 41. Fra figuren kan det også observeres at en årlig havnivåøkning på litt over 4 % gir maksimalverdien på 2 meter innen år 2100.

Observasjoner av havnivå er derfor svært viktig for å vurdere hvor mye tid som er tilgjengelig for å gjøre korrigerende tiltak sett i sammenheng med levetiden til konstruksjoner.



Figur 41 Havnivåstigning ved konstant årlig økning

Havnivåøkning per i dag går meget sakte og det er ikke nødvendig å starte bygging av barrierer i dag.

Basert på overstående antagelser viser Figur 41 at havnivåøkningen vil akselerere i andre halvdel av dette århundre, noe som er i samsvar med IPCCs estimater.

Skadekonsekvensene ved en havnivåøkning på 25 cm er vurdert til å være små. En havnivåøkning i denne størrelsesorden kan håndteres ved bedre varslingsrutiner og enkle provisoriske tiltak. Med andre ord vurderes dette som en akseptabel havnivåstigning for eksisterende infrastruktur og konstruksjoner i Bergensområdet.

Tabell 5 viser hvor lang tid som er tilgjengelig før korrigende tiltak er nødvendig, basert på antagelsene ovenfor.

Med en havnivåstigning på 75 cm, er det ikke nødvendig å sette i verk tiltak før i år 2065, altså om 55 år. Ved det mest ekstreme estimat for havnivåstigning (2 meter per århundre) er det ikke nødvendig å sette i verk tiltak før om over 40 år.

Tabell 5 Estimert tidspunkt for korrigende tiltak

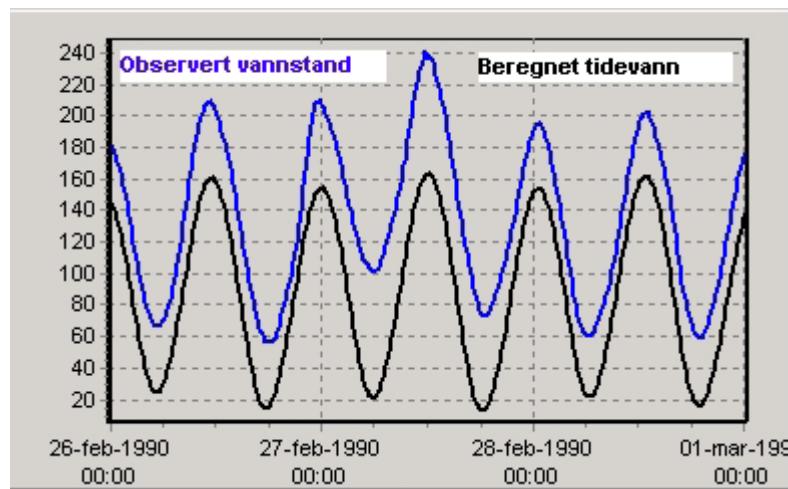
Årlig havnivåøkning	Årstall for i verksetting av korrigende tiltak	Havnivåstigning i år 2100
Som i dag	Korrigende tiltak ikke nødvendig	15 cm
1%-økning per år	2100	26 cm
2%-økning per år	2075	48 cm
<b>2,7%-økning per år</b>	<b>2065</b>	<b>75 cm</b>
3%-økning per år	2060	94 cm
4%-økning per år	2050	193 cm

Unntaket er Gamle Bryggen i Bergen som allerede i dag har store utfordringer knyttet til setninger i grunnen og oversvømmelse av sjøfronten ved stormflo. Tiltak bør iverksettes så snart som mulig for dette området. Dette blir nærmere omtalt i kapittel 5.4.5.3.

#### **5.1.4. Bergen og omegn – returperioder og akseptkriterier**

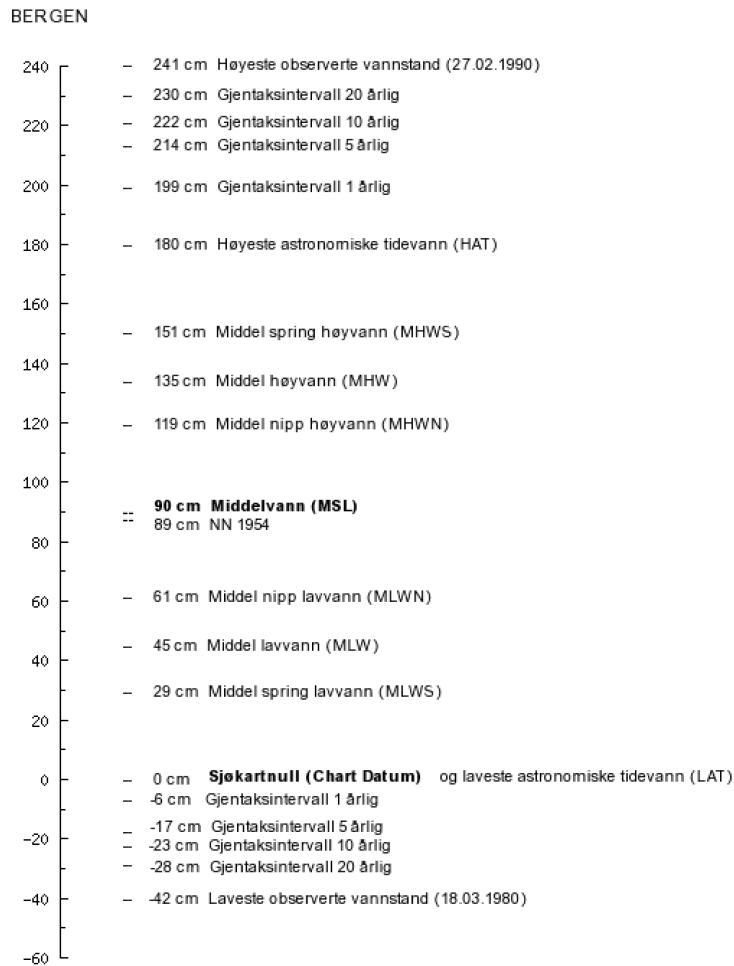
For Bergen havn foreligger tidevannsobservasjoner fra 1915. Høyeste observerte vannstand i Bergen havn er 241 cm over sjøkart-null i februar 1990 (eller 152 cm over NN1954) og oppsto på grunn av en kombinasjon av springflo og lavtrykkspassasjer i Atlanterhavet og Nordsjøen som presset vann inn mot Vestlandet. Værrets virkning på vannstanden ble estimert til 80 cm.

Figur 42 viser observert og beregnet vannstand for perioden 26.februar til 1.mars 1990. Fra figuren kan det observeres at vannstanden ligger over det astronomiske høyvann i ca 6 til 7 timer. Det høyeste 20 cm oppstår kun i 2 til 3 timer.



*Figur 42 Stormflo Bergen havn, februar 1990*

Observeerde og statistiske vannstandsnivåer for Bergen havn basert på måleserien fra 1915 er vist i Figur 43.



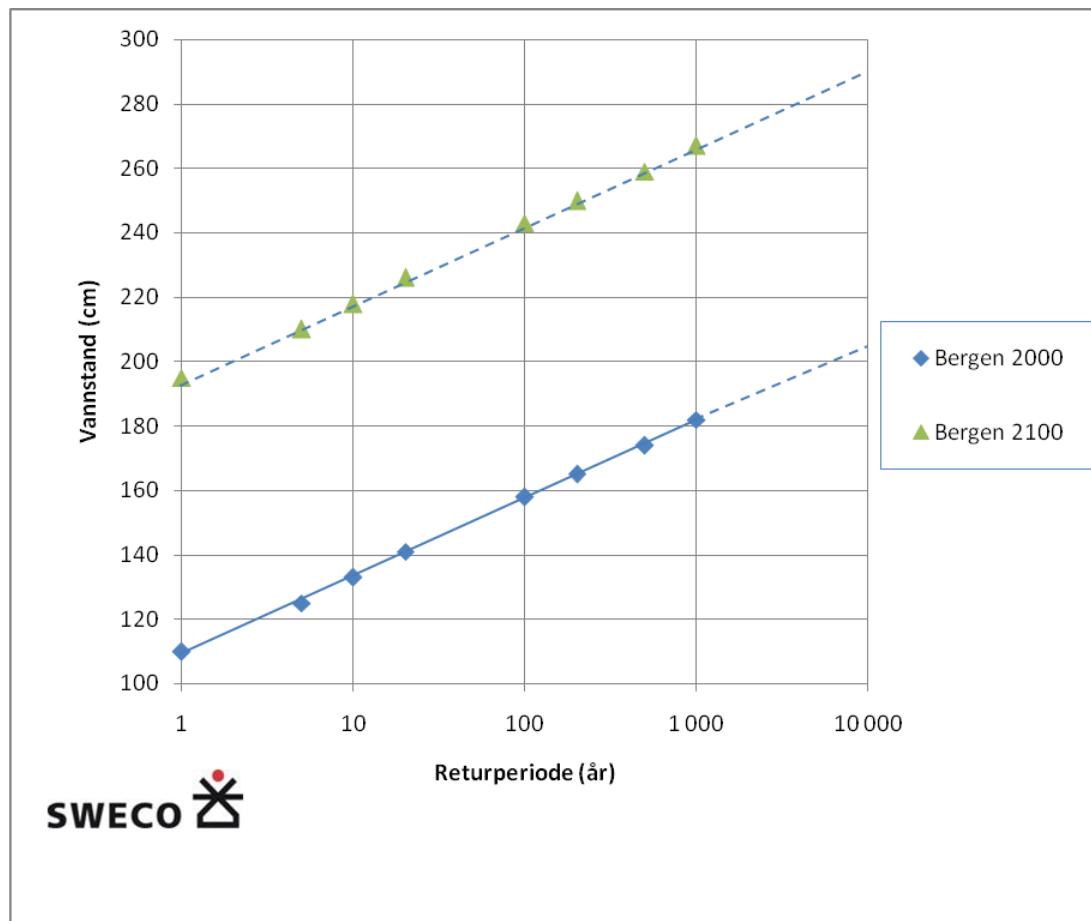
Figur 43 Vannstandsnivåer Bergen havn

Figur 44 viser returperioder for vannstandsnivåer i Bergen havn basert på Gumbels statistiske fordeling.

Med en antatt økning i springflo på 85 cm i år 2100 (se avsnitt 5.1.3) vil middel spring høyvann i år 2100 være høyere enn høyeste observerte vannstand 27.februar 1990. Middel spring høyvann oppstår to ganger per måned, og er middelverdiene av påfølgende høyvann i tiden rundt fullmåne og nymåne, da tidevannskreftene fra sol og måne virker i samme retning. Dette betyr at den ekstreme vannstanden ved stormfloen 27.februar 1990 kan oppstå flere ganger årlig i år 2100.

I Bergen og omegn er det tvilsomt om det kan identifiseres konstruksjoner som er så essensielle for samfunnsøkonomien og liv og helse i Bergen og Vestlandet at det kreves dimensjonering for returperioder lengre enn 100 år, se Figur 38 og Figur 39.

Det må også tas i betraktning at levetiden til den eksisterende bygningsmasse, havnekonstruksjoner og infrastruktur generelt er mindre enn 100 år. Unntakene er kanskje bygninger av spesiell historisk og antikvarisk verdi som gamle Bryggen og lignende.



Figur 44 Returperioder for stormflovannstand, Bergen havn

## **5.2 Erfaringer med flomforbygninger i Europa**

### **5.2.1. Innledning**

Mange europeiske land har store utfordringer knyttet til kysterosjon, lavliggende landområder som kan bli oversvømmet ved stormflo og oversvømmelse på grunn av flom i elver og vassdrag.

Flere land i Europa har derfor satt i gang risiko- og sårbarhetsanalyser og store utbygningsprosjekter for å være bedre rustet mot fremtidig havnivåstigning.

### **5.2.2. Nederland**

Nederland har et areal på 41.526 km<sup>2</sup> hvor nesten halvparten ligger på havnivå eller under havnivå. 11 millioner av dagens befolkning på 16,7 millioner lever i dag i disse områdene. 70 % av landets nasjonalprodukt produseres her, og 65 % av landets verdier ligger i områder som ikke møter kravene til flombeskyttelse (Dagens Næringsliv, 5. September 2008). Nederland er derfor svært utsatt for springflo og stormflo.

Natten til 1. Februar 1953 ble landet rammet av en stormflo som oversvømmet ca 2.000 km<sup>2</sup> dyrket areal i den sørvestre delen av landet, se Figur 45. Dette var Nederlands største flomkatastrofe på 300 år. 1835 mennesker omkom, 3.000 hus og 300 gårder ble lagt øde.



*Figur 45 Flomkatastrofen februar 1953*

Umiddelbart etter katastrofen i 1953 ble Delta-kommisjonen etablert, som et rådgivende organ til myndighetene, for å beskytte den sørvestlige delen av landet mot stormflo.

Siden den gang er det bygget 16.500 km med diker (ca 15 % såkalte primærdiker) og ca 300 større konstruksjoner, se Figur 46. Arbeidene ble i første omgang avsluttet i 1997.

Figur 47 viser områder i Nederland som ville være oversvømt av havet hvis det ikke var bygget diker og andre konstruksjoner for å holde vannet ute.

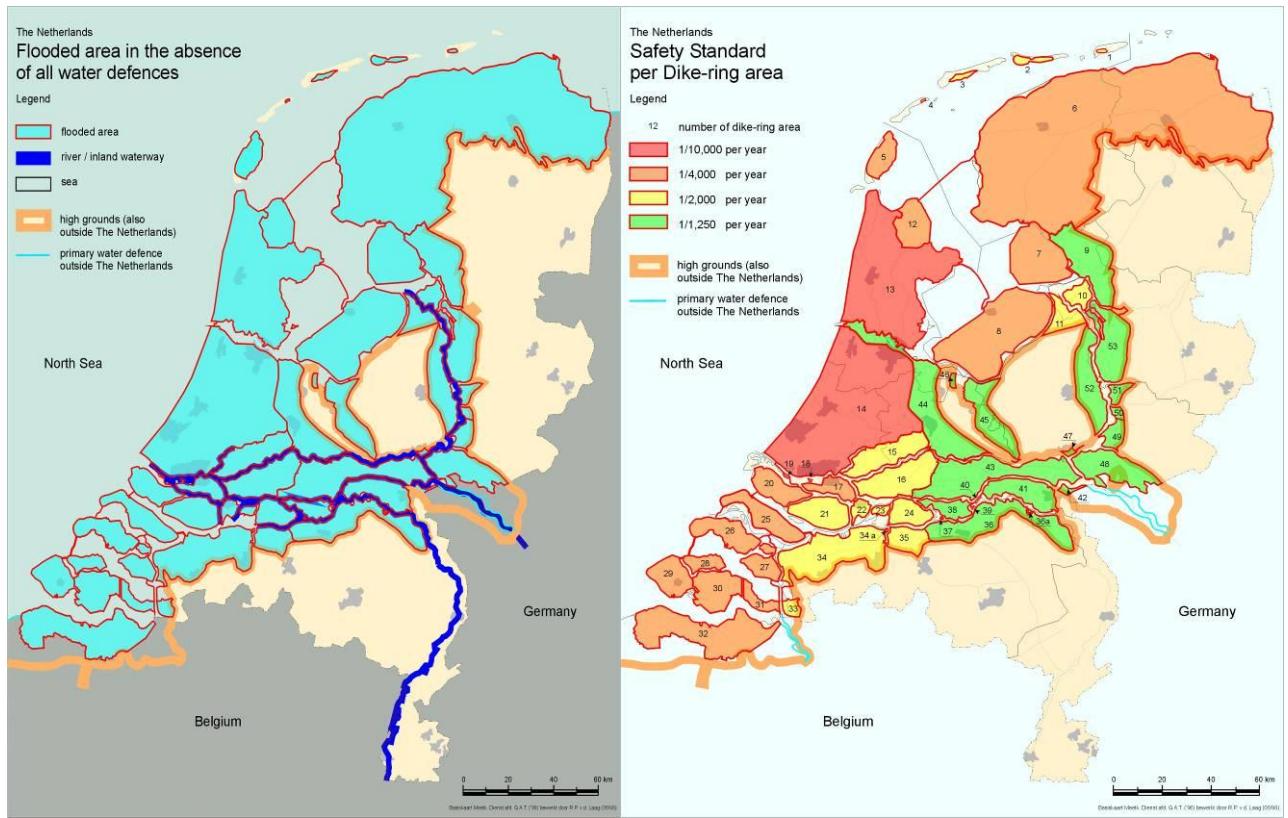
Figur 47 viser også dimensjoneringskriteriene for barrièresystemene i de forskjellige områder av landet. På grunn av de meget alvorlige konsekvensene ved en eventuell oversvømmelse er store deler av landet sikret mot en såkalt 10.000-års hendelse, se kapittel 5.1.2.



Figur 46 Deltaprosjektet - eksempler på storflobarrierer ([www.deltawerken.com](http://www.deltawerken.com))

I Nederland gjennomføres hvert femte år en sikkerhetsvurdering av flomforbygningene. Arbeidet med å forsterke og erstatte eksisterende diker og konstruksjoner pågår kontinuerlig. Det er satt av 8 milliarder kroner årlig frem til år 2020 med dette arbeidet.

Nederland synker i forhold til havnivå med ca 0,3 m per hundre år på grunn av tektoniske bevegelser (bevegelse i platene som jordskorpen er bygd opp av), senking av grunnvannsstand i store områder og setninger i bebygget grunn. I tillegg er det knyttet bekymring til sikkerhetsnivået, på bakgrunn av IPCCs estimer for havnivåstigning. Deltakommisjonen gjør derfor for øyeblikket nye vurderinger knyttet til tiltak for å sikre landet mot stormflo frem mot år 2100.



*Figur 47 Nederland - flomområder og dimensjoneringskriterier*

### 5.2.3. London

England ble også hardt rammet av den samme stormfloen som rammet Nederland i 1953. Eksisterende stormflobarrierer ble ødelagt og 307 mennesker omkom. På Canvey Island i munningen av Themsen omkom 58 personer og 10 000 mennesker ble evakuert. Docklands ble oversvømmet, men de sentrale delene av London ble spart. I 1954 konkluderte man med at det måtte bygges en stormflobarriere over Themsen. Barrieren ble ferdigstilt i 1984.

Thames-barrieren (Figur 48) er dimensjonert for en såkalt 1000-års hendelse basert på statistisk analyse av historiske stormflo data fra 1819, og en levetid frem til år 2030.

Den sørlige delen av England synker i forhold til havnivå med opptil 0,6 meter per hundre år på grunn av tektoniske bevegelser, senking av grunnvannsstand i store områder og setninger i bebygget grunn.

Barriermen er under redimensjonering på grunn av strengere dimensjoneringskriterier (10 000-års hendelse) forventet havnivåøkning, og dessuten at tidevannsbølgen opp Themsen har økt på grunn av utretting og heving av elvebreddene.

Storbritannias Miljøverndepartement (Environment Agency) evaluerer for øyeblikket

hvordan stormflosikringen av Themsen skal utvikles de neste 100 år. Kostnadene ved en oversvømmelse av sentrale deler av London er estimert til 300 milliarder kroner. Byen vil kunne bli lammet i flere måneder på grunn av skader på tunnelbanesystemet (London Underground), vann, avløp telefon- og datasystemer og bygninger.



Figur 48              *Thames -barrieren*

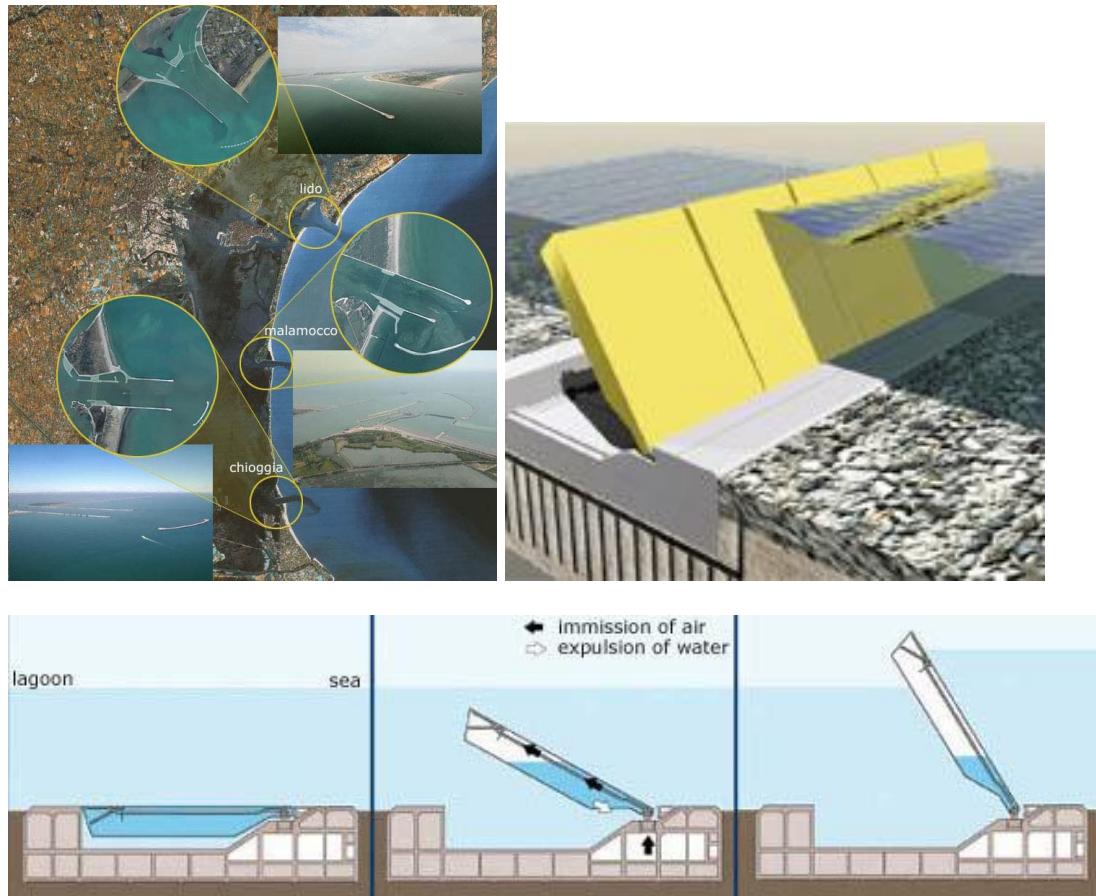
#### **5.2.4. Venezia**

Venezia er svært utsatt for stormflo da byen synker i forhold til havnivå på grunn av utpumping av grunnvann og setninger. Det siste hundre år har byen sunket 23 cm, og havnivået har steget 8 centimeter (per dags dato er havnivåstigningen på 1,27 mm/år). I tillegg bryter sjøvann ned og eroderer fundamentene på de historiske bygningene.

I 2003 vedtok Italia å sette i gang byggingen av et barrièresystem (Figur 49) for å beskytte Venezia mot stormflo. Anleggsarbeidene for MOSE-prosjektet (*MOSE = Modulo Sperimentale Elettromeccanico*) er estimert til ca 25 milliarder kroner og ta 8 år.

Barrièresystemet består av 79 damporter og tar høyde for en havnivåstigning på 60 cm, basert på IPCC (2007) høyeste estimat.

Barrierene er dimensjonert for en stormflo på 2 meter over middelvannstand. I 1966 var stormflonivået på 1,8 meter og i 2000 1,3 meter. Dimensjoneringskriteriet kan synes noe lavt i forhold til forventet havnivåstigning.



*Figur 49 Barrièresystem ved Venezia (SMIT Marine Projects, [www.smit.com](http://www.smit.com))*

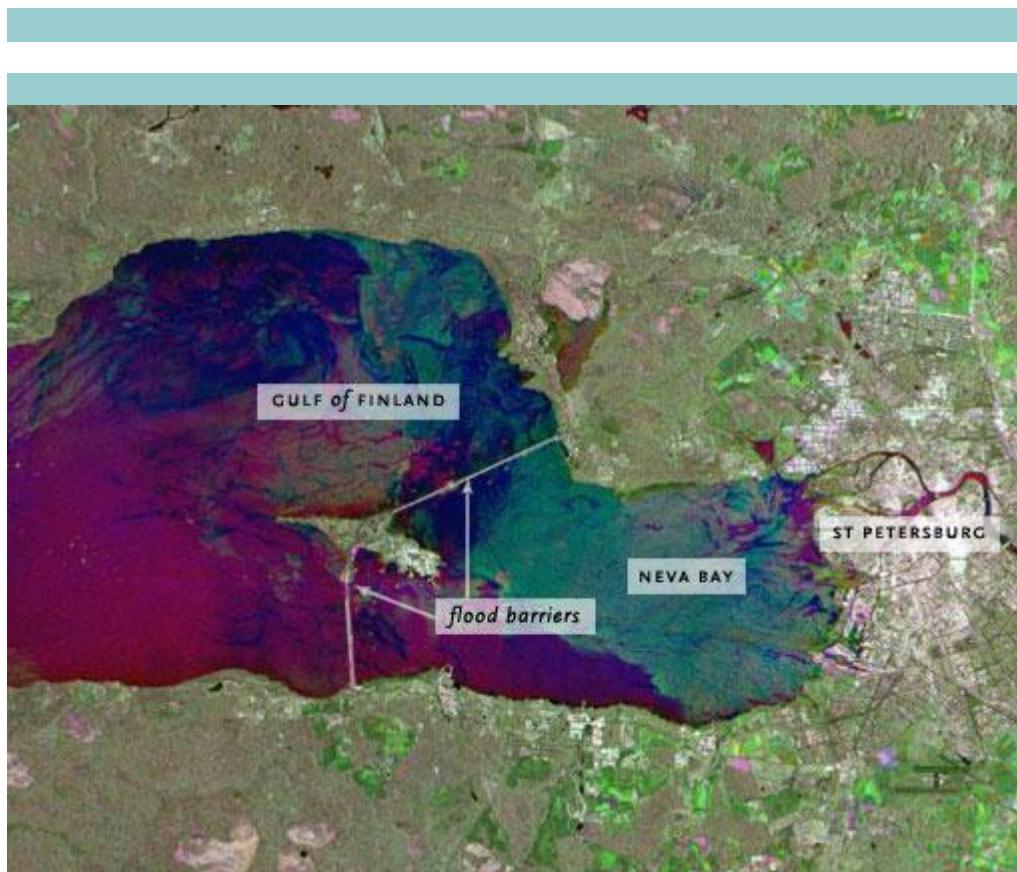
Hver dampot er ca 20 meter bred, 20 til 30 meter høy og 4 til 5 meter dyp. I "hvilestilling" vil damportene være fylt med vann og ligge på sjøbunnen. Hvis havnivået stiger en meter eller mer (noe som skjer ca 50 ganger i året) pumpes luft inn i portene og de vil flyte opp og sperre havet ute.

#### **5.2.5. St. Petersburg**

St. Petersburg ligger i et deltaområde ved utløpet av elven Neva, og mesteparten av byen ligger bare 1 til 2 meter over havnivå. Gjennom århundrene er byen stadig blitt oversvømmet av elven Neva og stormflo i Finskebukta. I gjennomsnitt er det flom i byen en gang i året (definert som vannstand høyere enn 1,6 meter, da kjellere og lavliggende

områder blir oversvømmet). I det siste århundret er høyeste observerte vannstand 3,69 meter i 1924, 2,82 meter i 1955 og 2,6 meter i 1986.

I 1980 begynte Sovjetunionen arbeidene med å bygge en stormflobarriere på begge sider av øyen *Ostrov Kotlin* for å beskytte St.Petersburg, se Figur 50. Planene ble stoppet på grunn av miljøkonsekvensene og problemer med finansiering. I 2003 startet prosjektet opp på nytt og et hovedelement i prosjektet er å utvikle et bedre varslingssystem for stormflo.



Figur 50 Satellittfoto St.Petersburg

### **5.2.6. Elveforbygninger**

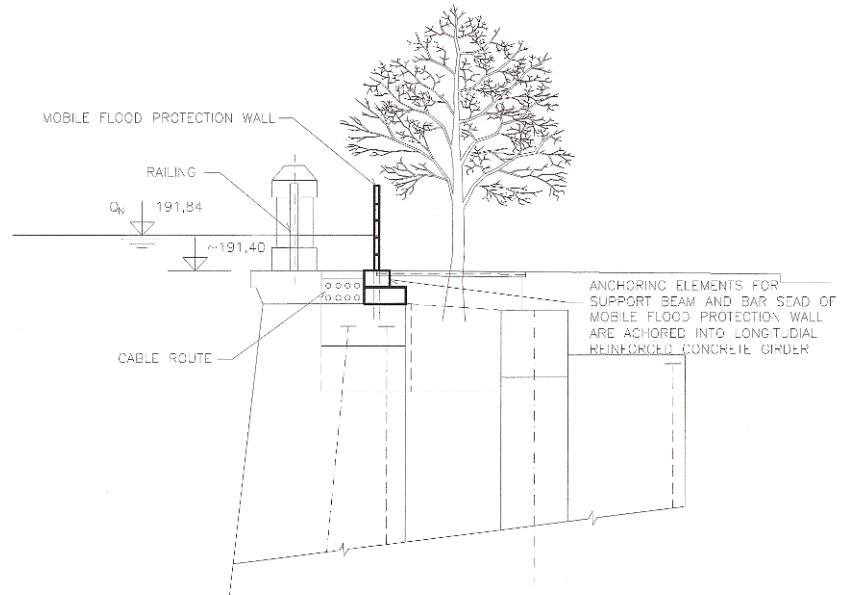
Sentrale- og østlige deler av Europa opplever jevnlig flom i elver og vassdrag. Dette er heller ikke et ukjent fenomen her til lands.

I 2002 forårsaket en såkalt 100-års flom tap av menneskeliv og skader for mange titalls milliarder kroner. Spesielt Tsjekkia, Østerrike, Tyskland, Slovakia, Polen, Ungarn, Romania og Kroatia ble hardt rammet. Flommen startet med store nedbørsmengder i de østlige Alpene som forårsaket flom og oversvømmelser i Nord-Italia, Bayern og Østerrike. Nedbørsfeltene og flommen bevegde seg så østover og nordøstover.

Etter flommen i 2002 ble det stort fokus på midlertidig og permanente elveforbygninger og flombarrierer.

Midlertidige flombarrierer blir i hovedsak bygget opp ved hjelp av fleksible materialer som polyester-”pølser”, sandsekker eller aluminium- og stålvegger. På denne måten blir vannet hindret i å flomme over elvebreddene og oversvømme bygninger og konstruksjoner.

For å bedre flomsikringen og hindre utgraving og erosjon av løsmassene kan det konstrueres en vanntett barriere fra terrengoverflaten ned til bergoverflaten. Dette kan utføres ved hjelp av en vanntett spuntvegg. Nødvendige provisoriske barrierer blir så montert på toppen av dette ved flom, se Figur 51 nedenfor.



*Figur 51 Prinsippskisse for provisorisk barriere med tetting av løsmasser til berg, SWECO Praha*

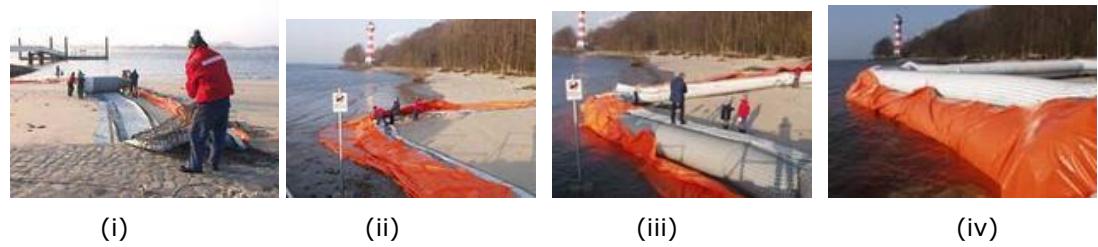
Figur 53 til Figur 59 viser eksempler på typiske flombarrierer for vassdrag.



*Figur 52 Bruk av sandsekker under flommen i Dresden, Tyskland, april 2006*



Figur 53 Elveforbygning, sandfylte polyestermembraner, Novi Sad, Serbia



Figur 54 Mobil dike - vannfylte polyestermembraner

- i) Plastmembranen rulles ut
- ii) Den første "pølsen" fyller med vann
- iii) Begge de nedre "pølsene" er fylt med vann – demningen er 90 cm høy
- iv) Tredje "pølsen" er fylt med vann – demningen er 165 cm høy



Figur 55 Midlertidig barriere - vegg av stål og aluminium. Shrewsbury og Bewdley, England, februar 2006



Figur 56 Midlertidig barriere - vegg av aluminium, Florida, USA



Köln, Tyskland



Praha, Tsjekkia

Figur 57 Bruk av spuntvegg for tetting av løsmasser over berg



Praha

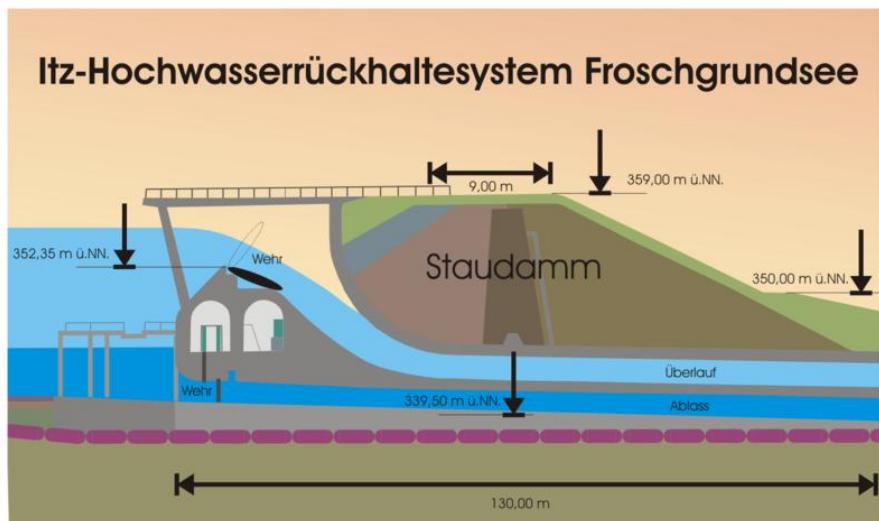


Hamburg-Harburg



Middelburg, Nederland

Figur 58 Permanente vegger

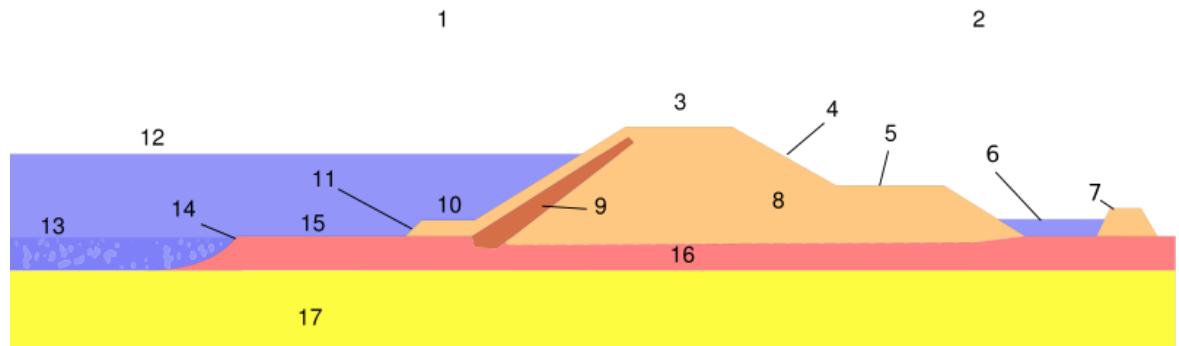


Figur 59 Prinzipskisse demning med overløp, Bayern, Tyskland

### 5.2.7. Større konstruksjoner – fyllingsdammer

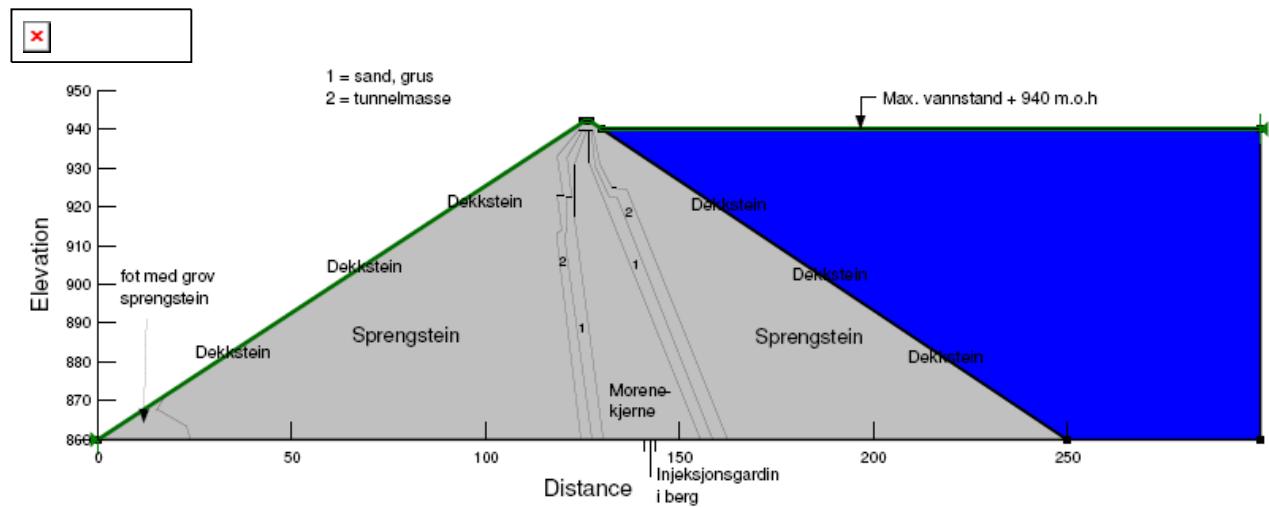
For å beskytte kystsonen mot kombinasjonen av stormflo og bølger kan det være nødvendig å kombinere en molokonstruksjon med en barriereløsning, se Figur 60. Moloen kan i prinsippet bygges opp med løsmasser, men det er nødvendig med et tetningslag (9) med materiale med lav permeabilitet for å hindre at vann lekker gjennom konstruksjonen.

Denne type konstruksjoner brukes i vanndyp opp til ca 20 meter,



Figur 60 Prinsippskisse for dike med tetningskjerne

Ved større vanndyp kan det være aktuelt å bruke prinsippene fra fyllingsdammer bygget for å magasinere vann på høyfjellet i Norge, se Figur 61 og Figur 62. Denne type konstruksjoner har en morenekjerne med omliggende lag av sand, grus og tunnelmasse. Resten av konstruksjonen består av sprengstein. I Norge er disse dammene bygget tørt, og det blir en stor anleggsteknisk utfordring og eventuelt bygge slike konstruksjoner under vann.



*Figur 61 Prinsippskisse - tverrsnitt Sysendammen*

*Høyde 81 meter, bredde 250 meter, lengde 1160 meter. Reguleringshøyde 66 meter.*



*Figur 62 Storglomvassdammen*

## 5.3 En ytre fjordbarriere

### 5.3.1. Ytre barriere - definisjon

Området som blir berørt av de ytre barrierer er vist på figuren under.



Figur 63 Det ytre fjordsystem

Ved å stenge stormfloen ute fra det gule området på Figur 79 vil en kunne beskytte en strandlinje på mer enn 500 km.

For å få dette til, blir det nødvendig å konstruere barrierer over fire fjorder:

- Raunefjorden (Bergen-Bjørøy-Lille Sotra)
- Hjeltefjorden (Sotra-Askøy)
- Herdlefjorden (Askøy-Herdla-Holsnøy)
- Kvernafjorden (Holsnøy-Flatøy-Knarvik)

Som et alternativ til å bygge barrierer over Kvernafjorden kan barrierene flyttes lengre nordover til Radfjorden (Holsnøy-Radøy) og Radsundet. De etterfølgende avsnitt viser detaljer knyttet til hver fjordkrysning. Snitt er presentert i vedlegg 1.

De ytre barrierene vil nødvendigvis føre til innsnevring, delvis stengning og i ytterste konsekvens permanent stengning av hele Byfjord-systemet (Byfjorden, Salhusfjorden, Herdlefjorden, Osterfjorden og Sørfjorden) mot havet.

Det er vanskelig å se nytteverdien av så radikale inngrep hvis ikke det kan ses i sammenheng med andre samfunnsøkonomiske tiltak som for eksempel *Tversambandet* (se neste avsnitt) eller havnivåøkning i størrelsesorden 2 meter per århundre.

En ytre beskyttelse vil kun skjerme landområdene innenfor i begrensede perioder når havnivået stiger over et visst nivå som f. eks. ved stormflo. Det betyr at infrastrukturen vil måtte tilpasse seg den generelle havnivåstigningen, samt ordinære variasjoner ved flo og fjære. Ved en ytre beskyttelse vil det bety at dagens kaier vil måtte bygges om og heves tilstrekkelig for å møte denne generelle havstigningen. I utgangspunktet vil det medføre en nivåøkning på 75 cm for alle kaiene.

### 5.3.2. **Tversambandet**

Tversambandet, som er lansert av Askøy kommune med tanke på å åpne nye areal for bosetning og næringsutvikling i Askøy, Meland og Radøy er vist på Figur 64.

Tversambandet er tenkt som en ytre ring rundt Bergen og sammenfaller med de områdene og fjordkrysningene som er aktuelle i det ytre barriere alternativet.

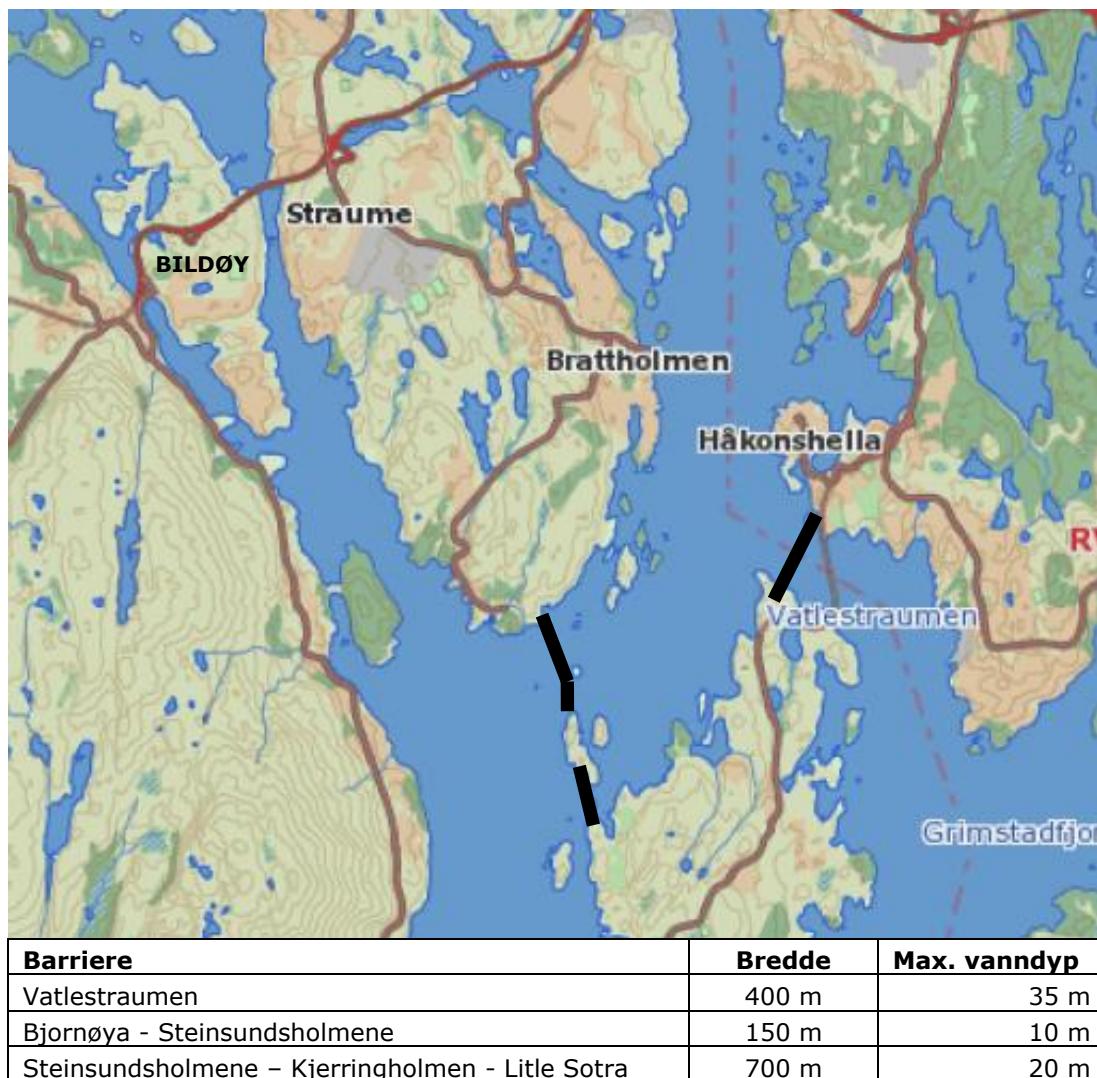


Figur 64 Tversambandet (Bergens Tidende)

### **5.3.3. Raunefjorden nord (Bergen – Little Sotra)**

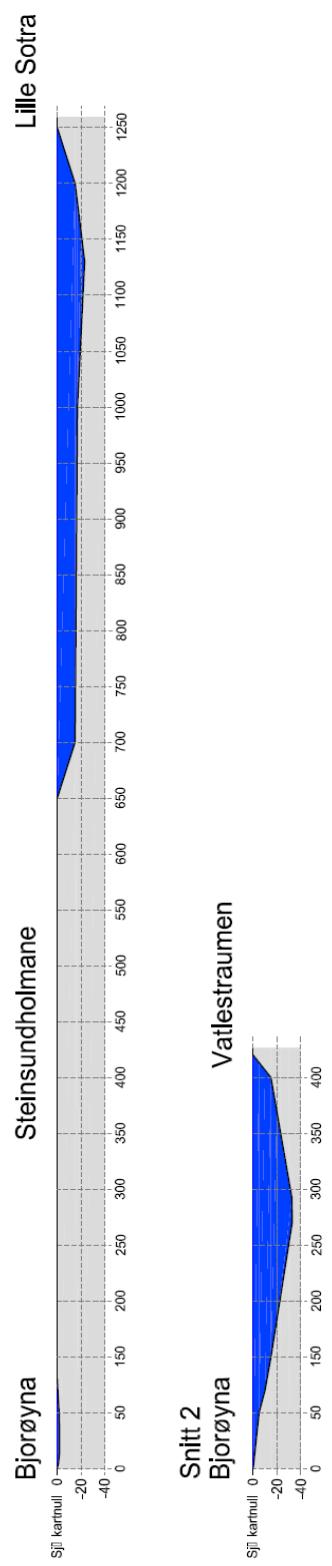
For å stenge ute stormflo fra sør, er det nødvendig med barrierekonstruksjoner i den nordlige delen av Raunefjorden. Det må etableres barrierer over Vatlestraumen og fra Bjørøyna til Little Sotra, som indikert på Figur 65.

Sundene på begge sidene av Bildøy vil bli holdt åpne, noe som vil medføre betydelig tidevannsstrømmer i dette området.



*Figur 65 Raunefjorden nord (kartgrunnlag Gule Sider)*

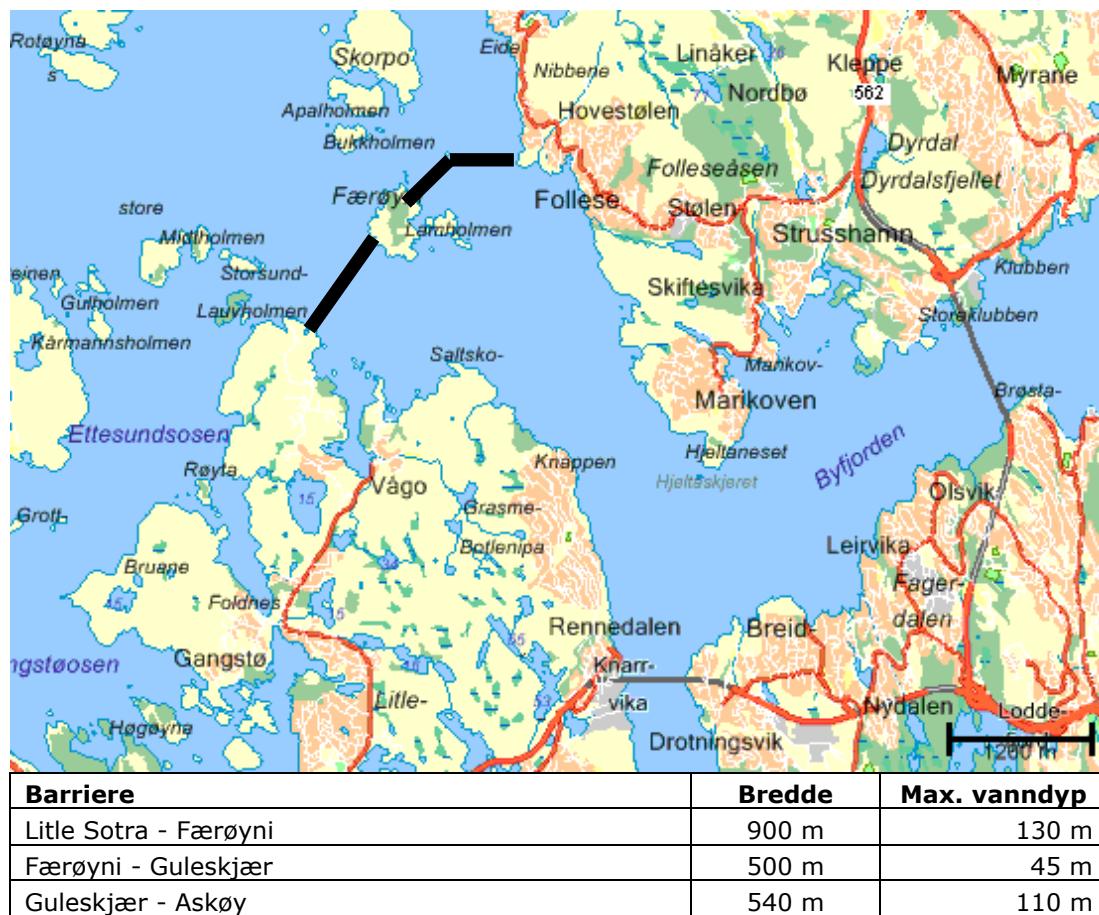
Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



Figur 66 Raunefjorden nord - tverrsnitt

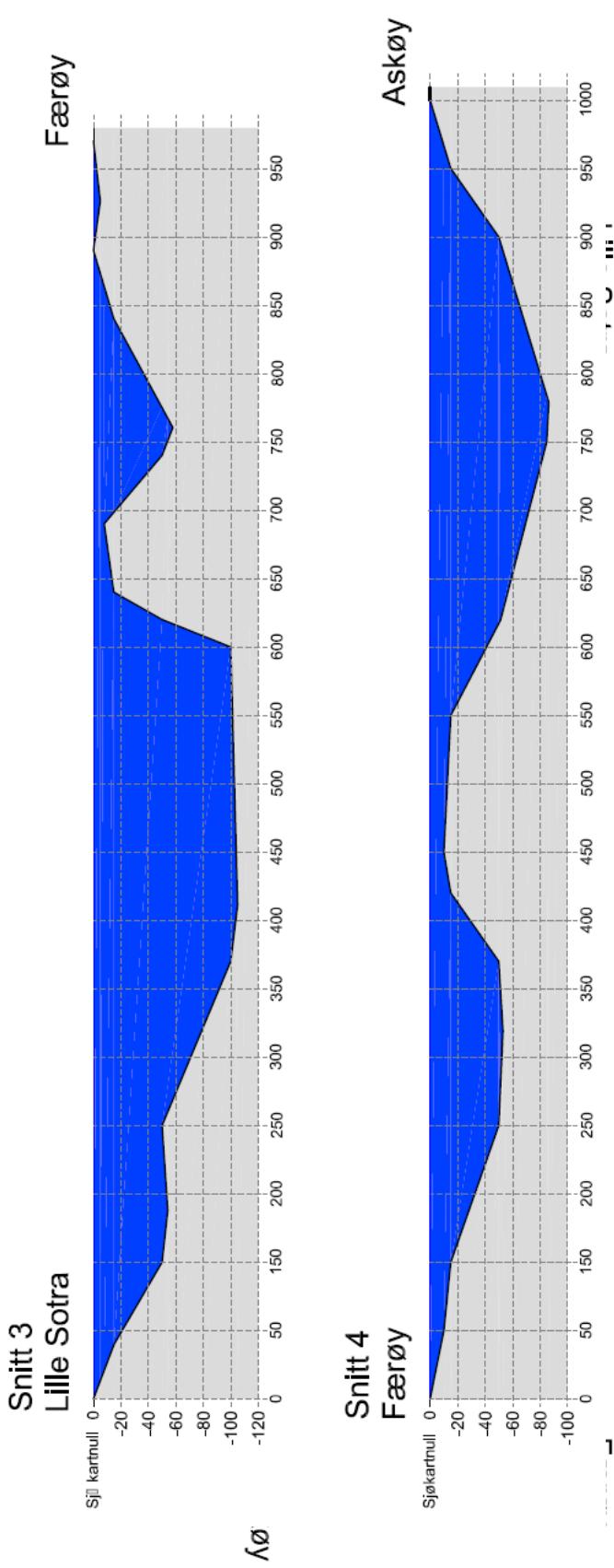
#### **5.3.4. Hjeltefjorden sør (Little Sotra – Askøy)**

For å stenge ute stormflo fra nordvest, er det nødvendig med barrierekonstruksjoner i Hjeltefjorden. Dette området er det mest krevende område å etablere barrierer på grunn av stort vanndyp (over 130 meter) og relativt store avstander.



Figur 67 Hjeltefjorden sør (kartgrunnlag Gule Sider)

Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



Figur 68 Hjeltefjorden sør – tverrsnitt

### 5.3.5. Herdlefjorden nord (Askøy – Holsnøy)

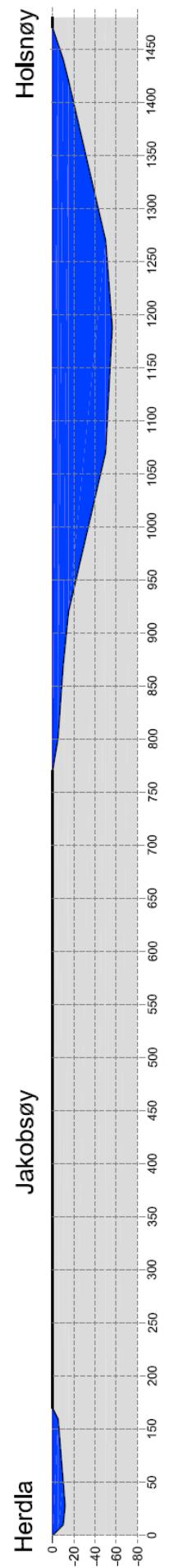
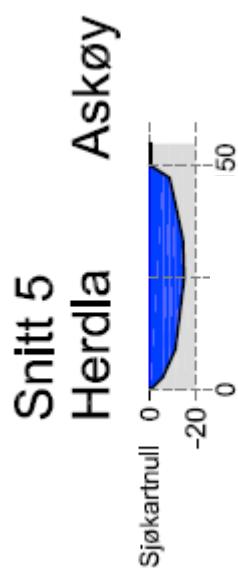
For å stenge ute stormflo nordfra gjennom Herdlefjorden er det nødvendig med barrierekonstruksjoner fra Askøy via Herdla til Holsnøy.



Figur 69 Herdlefjorden nord (kartgrunnlag Gule Sider)

Fra Herdla til Holsnøy er det skissert to alternativer. Det korteste er fra Kallsøyni via Jakobsøyni til Iltangen, men innebærer relativt stort vanndyp. En krysning over Herdelfaket er lengre, men vanndypet er bare 10 meter.

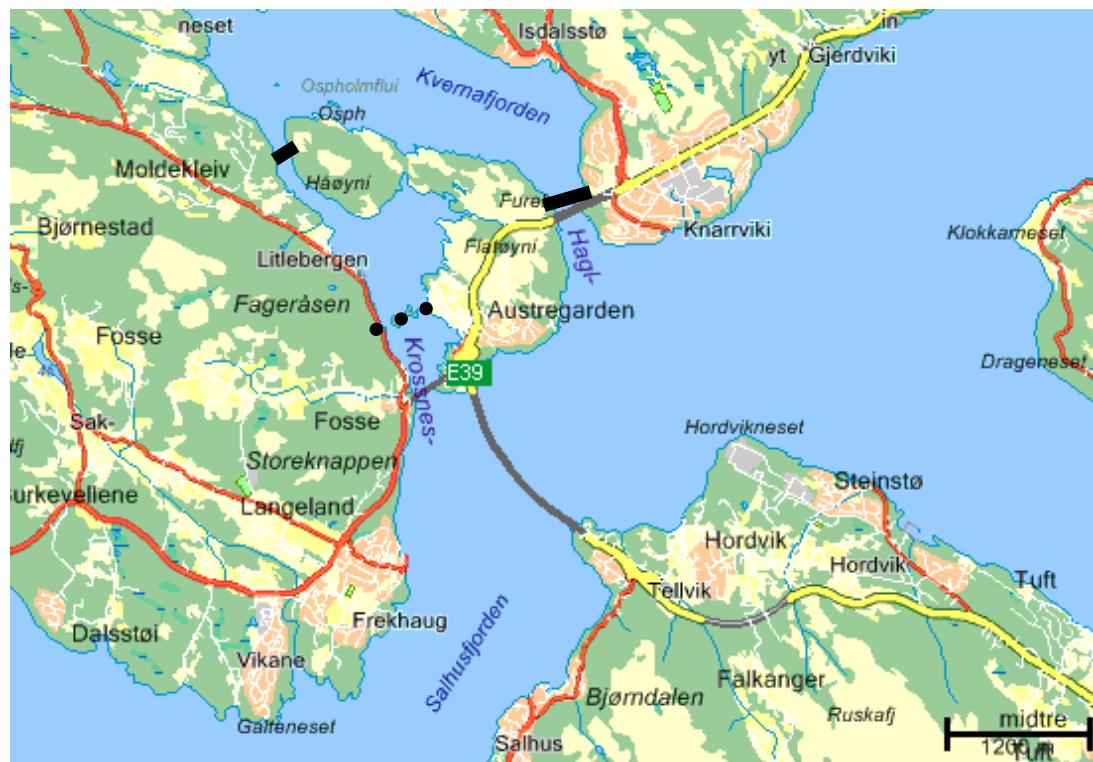
Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



*Figur 70 Herdlefjorden nord - tverrsnitt*

### 5.3.6. Kvernafjorden (Holsnøy – Knarvik)

For å stenge ute stormflo fra nord gjennom Radfjorden og Radsundet/Alverstraumen, er det nødvendig med barrierekonstruksjoner ved Knarvik.

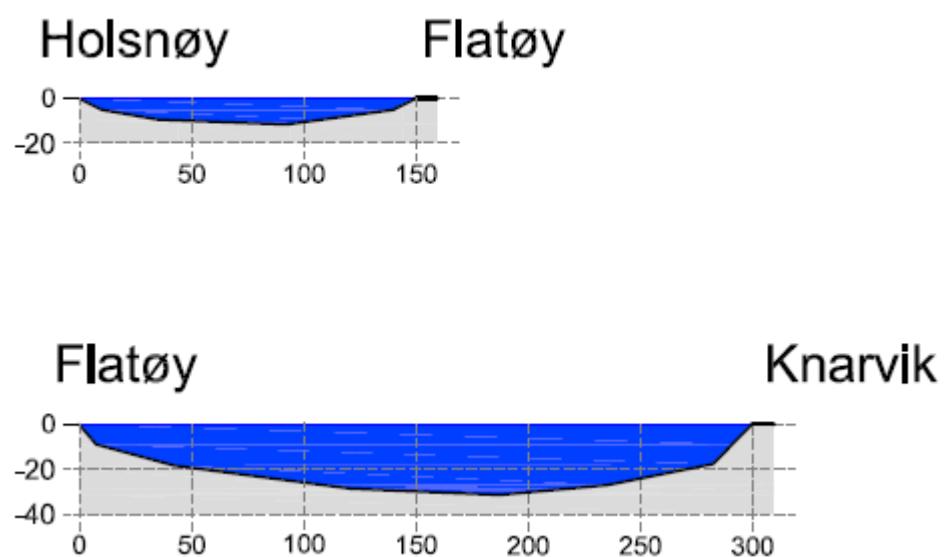


Barriere	Bredde	Max. vanndyp
Holsnøy – Høgset Alternativ 1 (heltrukket linje)	150 m	15 m
Holsnøy – Flatøyni Alternativ 2 (stiplet linje):	270 m	20 m
Faltøyni - Knarvik	230 m	50 m

Figur 71 Kvernafjorden (kartgrunnlag Gule Sider)

Alternativt er det mulig å etablere en barriere lengre nord ved Bongno i Radfjorden og i Radsundet ved Bruknappen eller Askeland. Ved dette alternativet beskyttes ca 30 km strandlinje i Radfjorden og ca 20 km strandlinje i Radsundet. Alternativet medfører ca 1 000 000 m<sup>3</sup> mer fyllmasse, se Tabell 7. Bebyggelsen langs sjølinjen i dette området består i hovedsak av private hytter, naust og kaier. Nutteverdien av dette alternativet vurderes som relativt beskjeden.

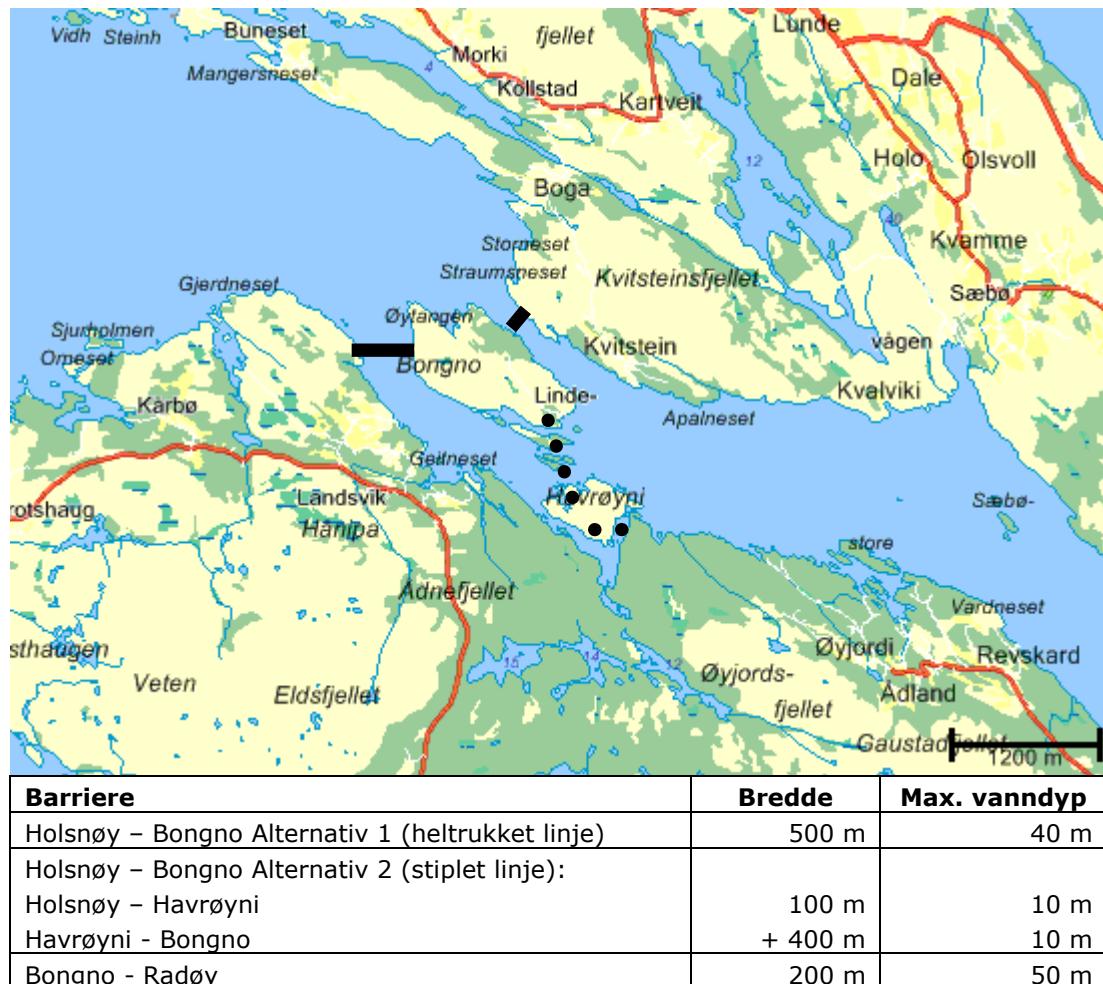
Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



Figur 72 Kvernafjorden - tverrsnitt

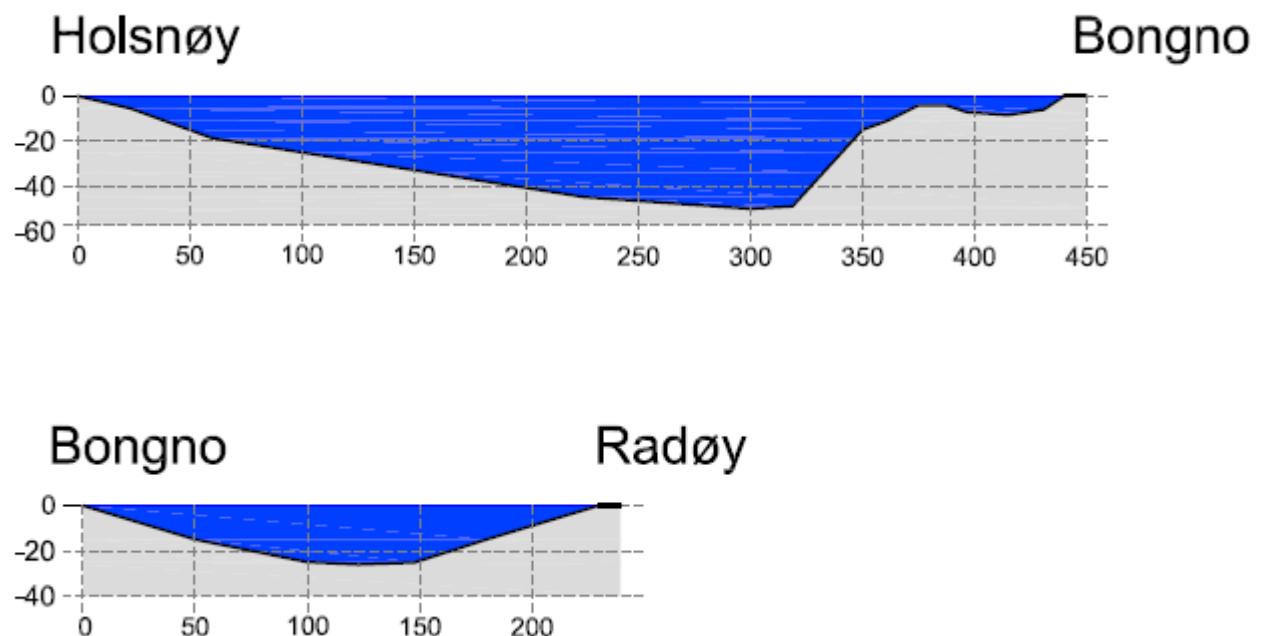
### 5.3.7. Radfjorden nord (Halsnøy – Radøy ved Bongno)

Ved å etablere barrieren ved Bongno, beskyttes hele området mellom Halsnøy og Radøy



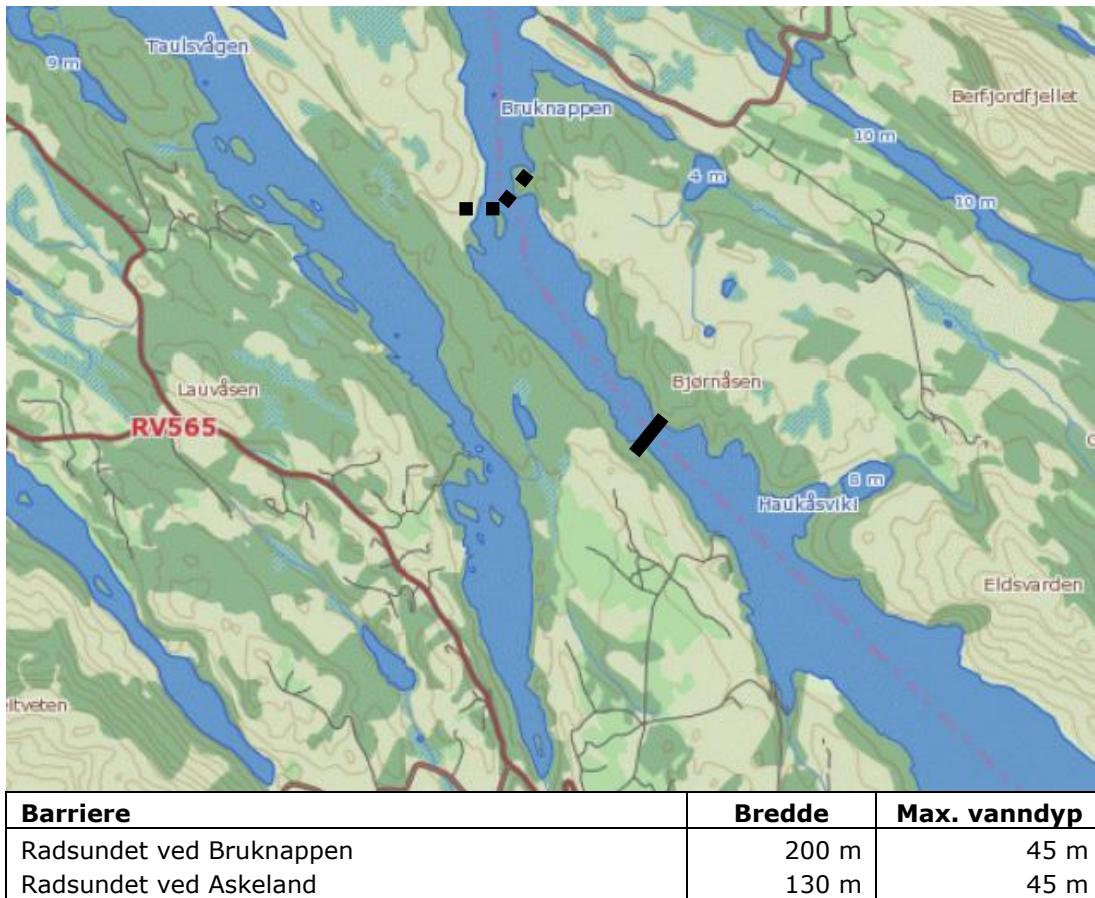
Figur 73 Alternativ plassering ved Bongno (kartgrunnlag Gule Sider)

Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



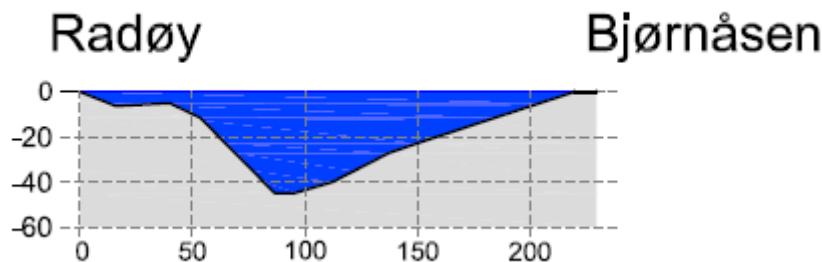
*Figur 74 Alternativ plassering ved Bongno – tverrsnitt*

For å erstatte barriermen ved Knarvik må det i tillegg etableres en barriere i Radsundet.



Figur 75 Alternativ plassering i Radsundet (kartgrunnlag Gule Sider)

Tverrsnitt er vist på figuren nedenfor.



Figur 76 Alternativ plassering i Radsundet - tverrsnitt

### **5.3.8. Ytre barrierer – konstruksjoner**

I kapittel 5.2 er det presentert erfaringer med barrierer mot flom og stormflo andre steder i Europa. Type konstruksjoner og begrensninger som blir benyttet er presentert i tabellen under.

*Tabell 6 Type tiltak mot flom og stormflo*

Type	Tiltak	Vannstandsfordeling	Forutsetninger
Midlertidig	Sandsekker	1 meter	Varsling Tilgjengelig arbeidskraft
Midlertidig	Plastmembraner	2 meter	Varsling Tilgjengelig arbeidskraft
Midlertidig	Vegger i aluminium eller stål	2 meter	Varsling Tilgjengelig arbeidskraft
Permanent	Spuntvegg	-	Etablerer vanntett barriere fra terrengoverflaten til berg
Permanent	Vegger i stål eller betong	3 meter	
Permanent	Mindre demninger	10 meter	
Permanent	Molo med tetningskjerne	10 meter	Vanndyp mindre enn 20 meter

For vanndyp større enn ca 20 meter vil det være naturlig å bruke fyllingsdammer, betongkonstruksjoner eller alternative innovative løsninger.

#### **5.3.8.1. Fylling**

Fyllingsdammer kan bygges som barrierer over innløp for å hindre vannets naturlige strømning. Fyllingen må ha en tetningskjerne med lav permeabilitet som hindrer gjennomstrømning av vann, se Figur 61. Det ytre barrieresystemet har flere fjordkrysninger med vanndyp over 20 meter og største vanndyp er mer enn 130 meter. Anleggsarbeidene vil derfor bli teknisk krevende og kostbare.

Det naturlige vil være å konstruere en fylling med tetningskjerne opp til kote -20. Selve stormflobarrieren plasseres på toppen av fyllingen og kan for eksempel ha en utforming som vist i kapittel 5.2. Enkelte av fjordkrysningene bør antagelig stenges permanent ved å fylle opp til over dimensjonerende stormflonivå, for på denne måten å gjøre de tekniske installasjonene på toppen færre og driften enklere.

Vedlegg 1 viser tverrsnitt av fjordkrysningene presentert ovenfor. Tabell 7 viser et grovt estimat på mengde fyllmasse for å fylle opp fjordkrysningene til kote 0.

*Tabell 7 Estimert mengde fyllmasse ved fylling opp til kote 0*

Fjordkrysning	Estimert mengde fyllmasse
Raunefjorden nord	
- Vatlestraumen	250.000 m <sup>3</sup>
- Bjørnøyna-Little Sotra	500.000 m <sup>3</sup>
Hjeltefjorden sør	
- Little Sotra-Færøy	6.000.000 m <sup>3</sup>
- Færøy-Askøy	3.000.000 m <sup>3</sup>
Herdlefjorden nord	
- Askøy-Herdla	50.000 m <sup>3</sup>
- Herdla-Holsnøy	2.000.000 m <sup>3</sup>
Kvernafjorden	
- Holsnøy-Flatøyni	20.000 m <sup>3</sup>
- Flatøyni-Knarvik	200.000 m <sup>3</sup>
Alternativ Holsnøy-Bongno-Radøy + Radsundet	1.200.000 m <sup>3</sup>

Total mengde fyllmasse vil ligge et sted mellom 10 millioner og 15 millioner m<sup>3</sup> masse. Dette utgjør ca 4 ganger steinvolumet som ble brukt i Sysendammen. Kostnadene er vanskelig å estimere, men det regnes med at etablering av tetningskjerne under vann på store vanndyp blir meget krevende anleggsteknisk. En kostnad på mellom 5 og 10 milliarder 2008-kroner er ikke usannsynlig. I tillegg kommer kostnader knyttet til stormflobarrierer på toppen av fyllingene. Totalkostnadene for det ytre barrierealternativet vil sannsynligvis ligge på flere titalls milliarder kroner.

Et slikt tiltak vil dessuten medføre svært store og alvorlige konsekvenser for natur og miljø, samt begrense skipsfart i området. I tillegg medfører tiltaket store utfordringer både teknisk og økonomisk. Nytteverdien av å gjøre et så radikalt inngrep er per i dag liten.

Havnivåøkningen går meget sakte, og denne rapporten viser at det av den grunn vil gå mer enn 40 år før det overhodet er aktuelt å sette i gang tiltak.

Bygging av en ytre barrierer bør kun vurderes videre hvis havnivåstigningen nærmer seg 2 meter per århundre eller de samfunnsøkonomiske bieffektene av bedret landtransportsystem Bergen-Sotra-Askøy-Holsnøy-Radøy-Bergen er vurdert å balansere de uheldige virkningene.

Ved en havnivåstigning på 2 meter per århundre vil sannsynligvis det beste alternativet være å stenge Byfjordssystemet (Byfjorden, Salhusfjorden, Herdlefjorden, Osterfjorden og Sørfjorden, se Figur 79) permanent for kommunikasjon med havet.

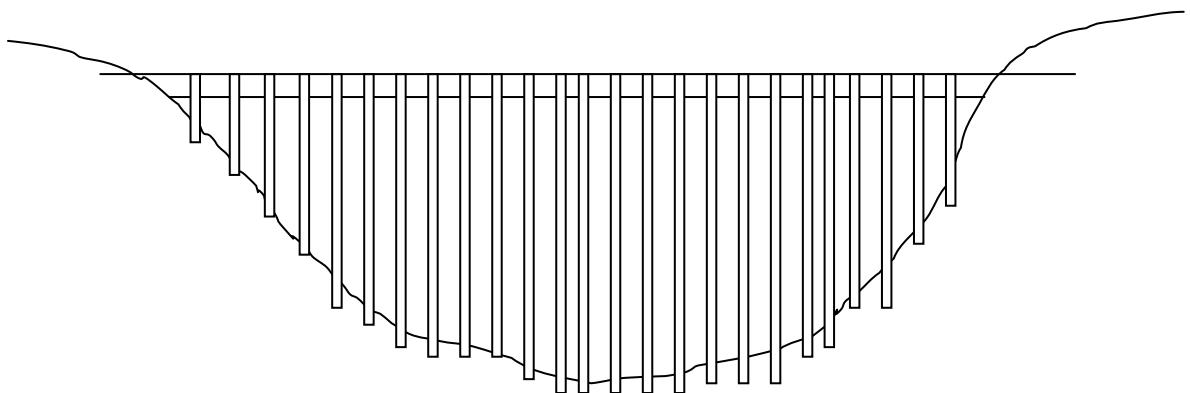
### **5.3.8.2. Betongkonstruksjon**

Fjordstengsler vil også kunne bygges i betong. Basert på erfaring fra bygging av betongdemninger og offshorekonstruksjoner er det teknisk mulig å få oppført

undersjøiske betongvegger for dyp ned til 130 m. Men det er vanskelig å se for seg at betongalternativet vil være økonomisk konkurransedyktig i forhold til en steinfylling med tettekjerne.

#### **5.3.8.3. Innovative løsninger**

Det finnes innovative løsninger for å etablere en barriere i vann. Et eksempel kan være å etablere en vegg av is ved de aktuelle fjordkrysningene, se prinsippskisse nedenfor. Det er her tenkt at det settes ned provisoriske rør hvor det sirkuleres flytende nitrogen med temperatur -196 °C. Det vil danne seg is rundt rørene og de vil etter hvert fryse sammen og danne en isvegg som vann ikke kan trenge gjennom. Denne vil kunne holdes nedkjølt i den perioden stormfloen varer. Etter stormflohendelsen slås anlegget av, isen vil smelte og fryserørene fjernes.



*Figur 77 Etablering av kontinuerlig isvegg*

Det vil kreves store mengder energi for å etablere en slik isvegg. For å gjøre dette i for eksempel Raunefjorden nord vil det anslagsvis medføre et energiforbruk på ca 1 million kWh.

I tillegg kommer utfordringer knyttet til forankring av konstruksjonen i sjøbunn og etablering av en barriere over havnivå.

#### **5.3.8.4. Teknologisk utvikling de neste 10-årene**

En økt havnivåstigning vil tvinge frem nye og bedre løsninger for å sikre seg mot havet. Det vil kontinuerlig foregå en teknologisk utvikling som vil bidra til dette.

Teknologisk utvikling vil også gjøre prinsippløsningene som er foreslått i denne rapporten

mer kostnadseffektive.

### **5.3.9. Miljøkonsekvenser for fjordsystemet**

#### **5.3.9.1. Topografiske forhold i Byfjordsystemet**

Byfjordsystemet består av Byfjorden, Salhusfjorden, Herdlefjorden, Osterfjorden og Sørfjorden (Figur 79). Overflatearealet er ca 240 km<sup>2</sup> og største dyp er ca 600 m. Terskeldypet ved Færøy i den sørlige del av Hjeltefjorden er ca 130 m, mens største dyp i innløpene i Raunefjorden, Herdlefjorden (de Naue) og Bognøystrømmen er henholdsvis 40 m, 30 m og 40 m. Det totale munningsareal mot kystvannet i innløpene til Byfjord-systemet er ca 125.000 m<sup>2</sup> hvorav innløpet i Hjeltefjorden ved Færøy utgjør ca 80 %. Det totale volumet av Byfjordsystemet er ca 47 km<sup>3</sup> mens volumet over terskeldypet (130 m) er ca 23 km<sup>3</sup> dvs. ca halvparten av totalvolumet.

#### **5.3.9.2. Vurdering av effekter ved oppfylling av innløpene til Byfjord-systemet.**

Konsekvensene for tidevannsstrøm og det marine miljø ved å bygge det ytre barriereforsvaret er vurdert ved hjelp av den numeriske modellen *Fjord Env. vers 3.3* (Stigebrandt, 2001) og tidligere observasjoner i Byfjordsystemet. Tre alternativer for stengning av terskelområdene er vurdert, se Tabell 8.

Tabell 8 Alternativer for stengning av terskelområder

Alternativ	Type stengning	Kommentar
1	Terskelområdet ved Færøy i Hjeltefjorden fylles opp til 20 meters dyp. Resten av innløpene er naturlige. Terskeldypet er ca 40 meter.	Alternativet viser effekten av å snevre inn det viktigste terskelområdet.
2	Alle terskelområdene fylles opp til 20 meters dyp. Terskeldypet er ca 20 meter.	Viser effekten av minimumsinngrep.
3	Terskelområdet ved Færøy i Hjeltefjorden fylles opp til 20 meters dyp. Resten av innløpene stenges. Terskeldypet er ca 20 meter.	Viser effekten av maksimumsinngrep

Tabell 9 viser konsekvensene av de tre alternativene. Følgende parametre er vurdert:

- Endring i tidevannsstrøm (endring i forhold til dagens middelverdi på 0,16 m/s)
- Midlere oppholdstid for vann over terskeldypet (24 dager per i dag)
- Tid mellom hver totalinnstrømning til dypvannet
- Saltholdighet og dybden av brakkvannslaget
- Oksygeninnhold i dypvannet under terselnivå (dagens nivå: 5,1 ml/l)

*Tabell 9 Konsekvenser av innsnevring og stengning av terskelområder*

Alternativ	Tidevann (m/s)	Oppholdstid (døgn)	Total-innstrømning	Saltholdighet og brakkvann	Oksygeninnhold
1	0,35	12	10-dobles	Små endringer	0 ml/l
2	0,45	13	Betydelig lengre	Små endringer	Oksygenfritt vann (hydrogensulfid)
3	0,70	8	Betydelig lengre	Redusert saltholdighet i øvre lag og nye dypere brakkvannslag	Oksygenfritt vann (hydrogensulfid)

Under alternativ 1 kan økte tidevannsstrømmer eventuelt skape problem for skipsfarten. Det vil være risiko for periodevis oksygenfritt dypvann. Under alternativ 2 vil økningen i tidevannsstrømmene kunne skape problem for skipsfarten. Dypvannet vil i perioder bli oksygenfritt, med dannelse av hydrogensulfid, som vil ta livet av alt marint liv.

Under alternativ 3 vil den betydelige økningen i tidevannsstrømmene skape problem for skipsfarten. Dypvannet vil i perioder bli oksygenfritt, med dannelse av hydrogensulfid, som vil ta livet av alt marint liv.

Konklusjonen er at miljøkonsekvensene av en innsnevring og stengning av fjordsystemene, spesielt i Hjeltefjorden, vil medføre alvorlige miljøkonsekvenser for marint liv og tidevansstrømmer.

### **5.3.10. Trafikk/logistikk**

Bergen og omland havn er Norges største havn målt i tonnasje og i antall skipsanløp. En ytre barriereløsning vil påvirke båttrafikken i fjordene rundt Bergen.

*Tabell 10 Skipsanløp Bergen og omland havn 2007*

Innenriks - indre havn	15 902
Innenriks - øvrige distrikt	5 450
Utenriks - indre havn	2 845
Utenriks - øvrige distrikt	2 034
<b>Totaltall</b>	
Innenriks	21 352
Utenriks	4 879
<b>Totalt</b>	<b>26 231</b>

Kilde: Bergen og Omland havnevesen

Innenfor normale variasjoner i havnivået vil barrierene som har en åpne/lukke mulighet, være åpen. Barrierene vil kun bli lukket ved stormflo. En stormfloperiode vil normalt kunne være i tre til fire dager. Men innenfor disse periodene vil barrierene kunne åpnes ved lavvann.



Figur 78 Bergen indre havn

De største havnene som vil bli berørt av de ytre barrierene vil være Bergen Havn, Knarrevik, Mjølkevikvarden, Eikefett og Vaksdal. Havner nært Bergen som vil bli liggende utenfor ytre barrierer omfatter blant annet Mongstad, CCB, Sture, Kollsnes og Haakonsvern. Men selv om disse havnene vil ligge utenfor barrierene vil noen av transportveiene til havnene gå gjennom barrierene og derfor kunne påvirke trafikken til disse havnene.

Barrierekonstruksjonene vil føre til økte strømningshastigheter – ref. kapittel 7. I alternativ 2, hvor det etableres en terskel med dybde 20 m i alle fjordinnløpene vil strømningshastigheten tredobles fra dagens verdi. Det er allerede ved dagens strømforhold krevende å manøvrere større båter gjennom Vatlestraumen. Økte strømninger vil ytterligere forsterke problemene. I tillegg til økte strømningsforhold, vil barrierekonstruksjonene føre til reduserte seilingsbredder. Øvre del av barrierene som skal sørge for åpne/lukke mekanismen vil kreve en viss utstrekning og bli plassert med en viss avstand til hverandre (ref. for eksempel Thames Barrier). Disse konstruksjonene vil vanskelig gjøre manøvrering gjennom fjordene.

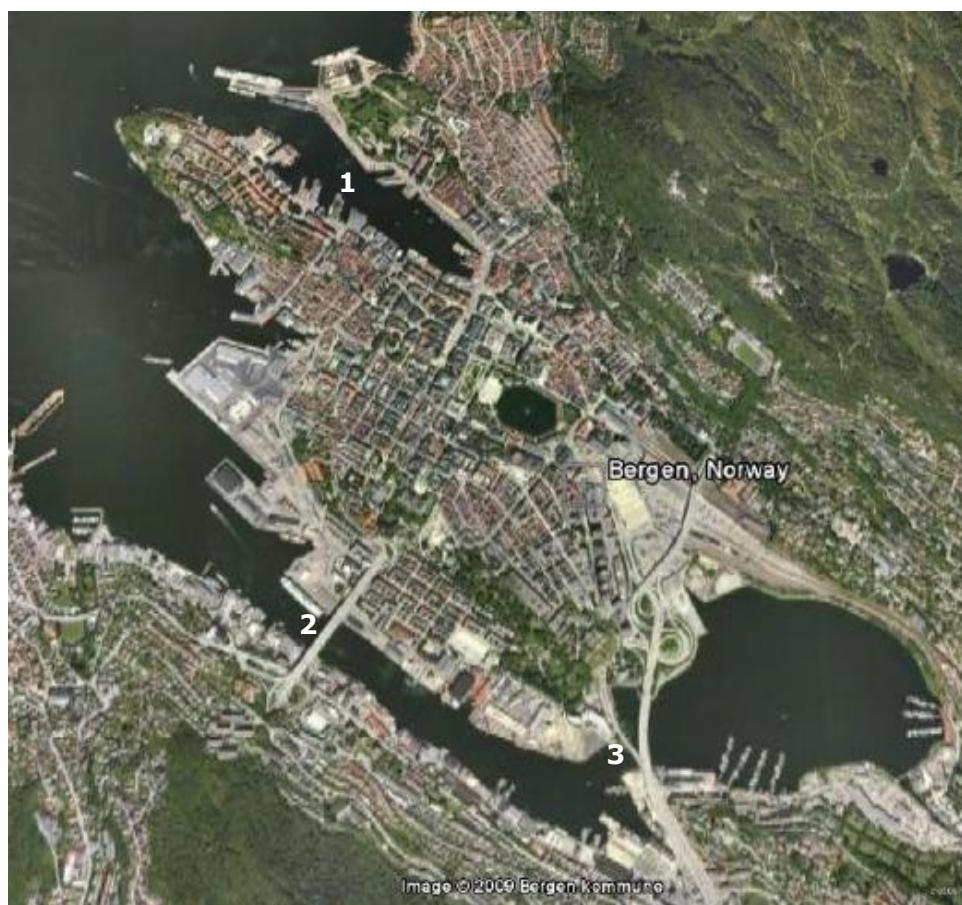
Ytre barrierer vil også legge hindringer for bruk av fritidsbåter. Både i perioder når barrierene er stengt og pga økt strømningsforhold når barrierene er åpne. Noen barrierer kan også bli permanent stengt og derfor helt hindre båttrafikk i å passere.

For å kunne forsvere etablering av ytre barrierer vil det være nødvendig å se på hvilke kostnadsøkninger skipstrafikken påføres satt opp mot hva det vil koste å etablere lokale sikringstiltak ved de konstruksjonene som skal bevares. Ved en infrastruktur på land tilpasset en økning i havnivå vil en sikre fortsatt fri skipstrafikk.

## 5.4 Indre havnebarrierer

### 5.4.1. Innledning

Indre barrierer defineres som områder som er egnet for etablering av konstruktive barrierer. Dette betyr at det bør være relativ kort horisontal avstand over sundet og relativt beskjedent vanndyp. Områdene som peker seg ut er: Vågen, Strømmen og Damsgårdssundet. Ved etablering av en barriere i Damsgårdssundet er det ikke behov for tiltak i Strømmen. Oversiktskartet nedenfor viser områdene som blir berørt av de indre barrierer.



Figur 79 Bergen indre havn. Plassering av konstruktive barrierer (kartgrunnlag Google)

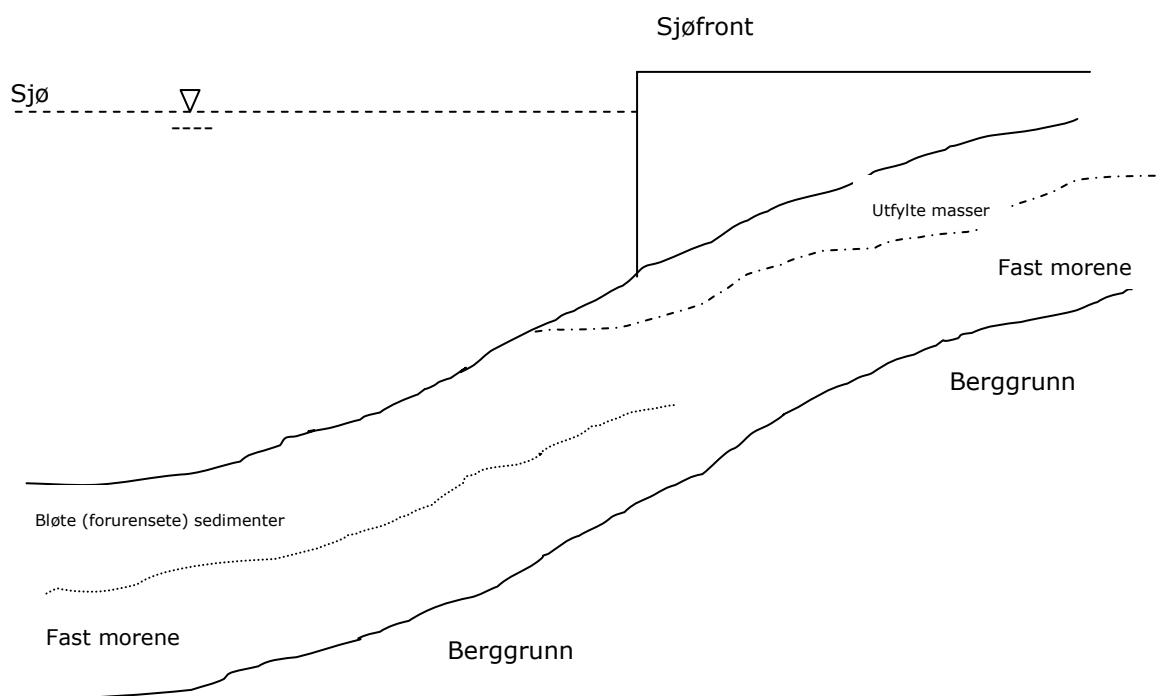
1) Vågen, 2) Damsgårdssundet, 3) Strømmen

I tillegg foreslås det en løsning som beskytter en enkelt konstruksjon, en bygning eller ett anlegg mot stormflo. Det bemerkes at prinsippene for denne konstruksjonsløsningen også kan brukes utenfor det indre havneområdet, for eksempel i Sandviken.

En lokal beskyttelse av kaiene mot økt havnivå kan utføres ved å bygge en vegg mot

sjøen av f. eks. stålspunt eller betong. For å sikre fortsatt bruk av kaiene som i dag, er det naturlig å se for seg at veggkonstruksjonene bygges til et nivå tilsvarende 75 cm over dagens kaier. Dette vil sikre funksjonen til kaiene, men vil ikke beskytte øvrig infrastruktur mot ekstremhøyvann, til det er nivå av skjermveggen for lavt. Det betyr at hvis kaiene både skal fungere tilfredsstillende for båttrafikken og samtidig sikre beskyttelse av bakenforliggende infrastruktur som ligger på et nivå lavere enn kote +2,37 vil det måtte legges til rette for at skjermveggene kan bygges på når det er meldt stormflo.

Langs sjøfronten i Bergen, er det relativt kort avstand fra sjøfronten til bakenforliggende berggrunn og/eller opprinnelig strandlinje fra rundt år 1000-1100 (se vedlegg x1). Området innenfor denne strandlinjen antas å ha tette masser i grunnen (fast morene), mens arealet utenfor er i hovedsak utfylte masser åpen for vannsirkulasjon, det vil si at grunnvannsstanden varierer med flo og fjære.



Figur 80 Sjøfronten i Bergen - prinsippsskisse

Tidligere var det åpning mellom Store- og Lille Lungegårdsvann som en del av det indre fjordsystem. Dette området er fylt ut etter hvert som byen krevde større arealer. Grunnvannsstanden i disse utfylte områdene vil variere med flo og fjære i Store Lungegårdsvann. Mellom Lille Lungegårdsvann og Vågen ligger det en fjellrygg som hindrer at vannstandsnivået i Store Lungegårdsvann påvirker Vågen, og omvendt. Områdene kan derfor behandles uavhengig av hverandre og det er ikke nødvendig med tetting av løsmasser i området Lille Lungegårdsvann - Vågen.

#### **5.4.2. Forurensete masser**

I 2002 og 2005 ble det utført kartlegging av overflatesedimentene i området Vågen, Puddefjorden, Damsgårdssundet og Store Lungegårdsvann. Sjøbunnsedimentene i Bergen havn er meget sterkt forurenset (Fylkesmannen i Hordaland, 2002; 2005). Det ble observert til dels høye konsentrasjoner av kvikksølv (Hg), polyaromatiske hydrokarboner (PAH) og polyklorerte bifenyler (PCB). I forbindelse med bygge- og anleggsarbeidet under vann som berører sjøbunnsedimentene er det fare for at forurenset masse virvles opp i vannmassene og spres videre til fisk og skalldyr. Det må derfor gjøres spesielle tiltak som for eksempel bruk av siltgardiner, tildekking eller fjerning av sedimentene, deponering på land eller i sjø eller behandling/rensing av massene. Tidligere utredninger konkluderte med at deponering i Store Lungegaardsvann etterfulgt av tildekning vil være det mest kostnadseffektive tiltaket.

I forbindelse med etablering av barrierer i indre havn, vil det være nødvendig med omfattende tiltak for opprydding av forurensede sjøbunnsedimenter og hindre videre spredning av forurensing.

#### **5.4.3. Kulturminner**

Ved inngrep i sjøbunnen i indre havn i Bergen må fylkeskommunens kulturavdeling kontaktes. Staten har eiendomsrett til eventuelle kulturminner.

Når det er fare for at marine kulturminner kan skades eller gå tapt som følge av etablering av indre barrierer, må det gjennomføres arkeologiske undersøkelser før tiltaket starter opp. Dette er både tidkrevende og kostbart og krever planlegging i god tid før eventuelle anleggsarbeider starter. Utgiftene til undersøkelser og gransking av marine kulturminner, samt tiltak for å verne dem bæres av tiltakshaveren (Kulturminneloven §§ 9 og 10).

Spesielt for Vågen vil det være nødvendig med omfattende undersjøiske undersøkelser for å kartlegging og sikring av marine kulturminner.

#### **5.4.4. Indre barrierer – plassering**

##### **5.4.4.1. Vågen**

Vågen er omlag 1,1 km lang fra Skoltegrunnskaien til Vågsbunnen, og 100 til 250 m bred. En terskel deler Vågen i to basseng. Største vanndyp i indre basseng er ca. 14 m, og terskelen som skiller indre og ytre basseng ligger på 7,5-10 m dyp. Det dypeste punktet i ytre basseng ligger også på ca. 14 m, men rett utenfor dette bassenget går det bratt ned til over 300 meters dyp i Byfjorden.



*Figur 81 Vågen med mulig plassering av stormflo barriere (kartgrunnlag Google)*

Det naturlige området for etablering av en barriere i Vågen er vist på figuren ovenfor. På denne måten unngås det at Skoltegrunnskaien blir berørt av barriereløsningen, og dette kaiområdet vil kunne disponeres på samme måte som i dag.

En plassering mot ytre del av Skoltegrunnskaien ville i tillegg kreve meget omfattende tetting av kaien fra utsiden, og dette anses ikke som en god løsning.

Den stiplete linjen antyder plassering av stormflobarriermen, mens de røde linjene viser hvor det må tettes fra overflaten ned til fast morene eller berg.

Vanndypet i dette området er ca 10 meter og sjøbunnen består av ca 1-2 meter kvikksølvforurensset bløtt sediment som sannsynligvis inneholder betydelige forekomster av kulturminner. Under det bløte topplaget finnes det et lag med sand og grus. 2-3 meter under sjøbunn er det forventet å finne fast impermeabel morene.

Ved å plassere en barriere i dette området vil det indre havneområdet i Vågen inkludert Bryggen være beskyttet mot stormflo.

#### **5.4.4.2. Damsgårdssundet**

Damsgårdssundet er på sitt trangeste ved Puddefjordsbroen, se kartskisse nedenfor. I dette området er det ca 150 meter over sundet, vanndyp er 12 til 15 meter.

Overflatesedimentene er sterkt forurensset av kvikksølv og/eller PCB. Sjøbunnen antas å bestå av bløte lag ned til en dybde på mange meter etterfulgt av fast morene.



Figur 82 Barriere Damsgårdssundet (kartgrunnlag Google)

Den stiplete linjen antyder plassering av stormflobarriermen, mens de røde linjene viser hvor det må tettes fra overflaten ned til fast morene eller berg.

Ved etablering av en stromflobarriere i Damsgårdssundet er det ikke behov for tiltak ved Strømmen, se neste punkt.

#### **5.4.4.3. Strømmen**

Det grunne området under gamle Nygårdsbro kalles for Strømmen, og danner en terskel mellom Store Lungegårdsvann og Solheimsviken. Over Strømmen er det nå 3 bruer: Gamle og Nye Nygårdsbru, samt en ny bro som ble bygget i forbindelse med Bybane-prosjektet. Det grunneste området i Strømmen er under Gamle Nygårdsbro. Gamle Nygårdsbro er en steinhvelvbru med 5 hvelv, se foto nedenfor. Under Gamle Nygårdsbro på nordsiden er det et rektangulært hovedløp for småbåttrafikk til og fra Store Lungegårdsvann. Dette løpet er anslagsvis 10 meter bredt og 2-3 meter dypt. Vanndypet under de 5 hvelvene er under 1 meter. Etablering av en stormflobarriere i Strømmen medfører derfor svært små anleggstekniske inngrep. Den stiplete linjen antyder plassering av stormflobarriieren, mens de røde linjene viser hvor det må tettes fra overflaten ned til fast morene eller berg.



*Figur 83 Strømmen*



Figur 84 Barriere ved Gamle Nygårdsbro (kartgrunnlag Google)

#### 5.4.5. Indre barrierer – konstruksjoner

##### 5.4.5.1. Vanntett vegg langs sjøfronten

Det etableres tilstrekkelig tett vegg/skjerm mot sjøsiden slik at vannstanden på innsiden av skjermen er tilnærmet uavhengig av døgnvariasjoner som skapes av flo og fjære. Middelvannstanden på innsiden av skjermen følger imidlertid havets middelvannstand som bygger seg opp over tid. Barrieren må være tilstrekkelig tett til å hindre større utslag av flo og fjære på innsiden, det vil si at det er ikke krav til absolutt tetthet av skjermen. Sjødybder langs Bergens kaifronter varierer typisk mellom 2 m og 20 m. For deler av sjøfronten kan det tenkes at tetteskjermen plasseres innenfor utstikkende pirer og kaier, og at man derved aksepterer at deler av slike konstruksjoner blir lagt under vann i visse høyvannsperioder. Alternativt kan det gjøres tiltak for å heve eksisterende kaier og pirer.

Vanntette vegger mot sjøen kan bygges ut i etapper. Likeledes kan slik løsning bygges ut for separate områder, for eksempel langs Bryggen i Vågen og for delområder i Sandviken og andre steder med sårbare konstruksjoner. I hver ende av en etappe eller utbygging, må det etableres tetting mot bakenforliggende terreng/bergoverflate, noe som det ligger godt til rette for i hele området.

Når det gjelder kryssing av tetteskjerm for overflatevann, må det etableres tilbakeslagsventil. Dette betyr at overflatevann bør samles til færre utslipspunkter.

Det finnes flere alternativer for å etablere tett skjerm/vegg se Del 2 av rapporten. Innenfor visse strekninger kan man også variere mellom ulike metoder for å tilfredsstille de stedlige forhold med hensyn til estetikk, fremkommelighet og teknisk gjennomførbarhet.

#### **5.4.5.1.1. Spunt**

Spuntvegger brukes som midlertidig eller permanente konstruksjonselement for stabilisering eller tetting av løsmasser. En spunt består av elementer av tre, stål eller betong som rammes, vibreres eller bores ned i løsmassene. Elementene installeres side ved side slik at den danner en sammenhengende vegg. Spunt er mye brukt for stabilisering av løsmasser ved utgraving av for eksempel en byggetomt. Spunt brukes også som permanente kaikonstruksjoner. Spunten kan gjøres vanntett ved at skjøter og eventuelle hull tettes. Løsmasser under spunten kan tettes ved injeksjon av tettemiddel.

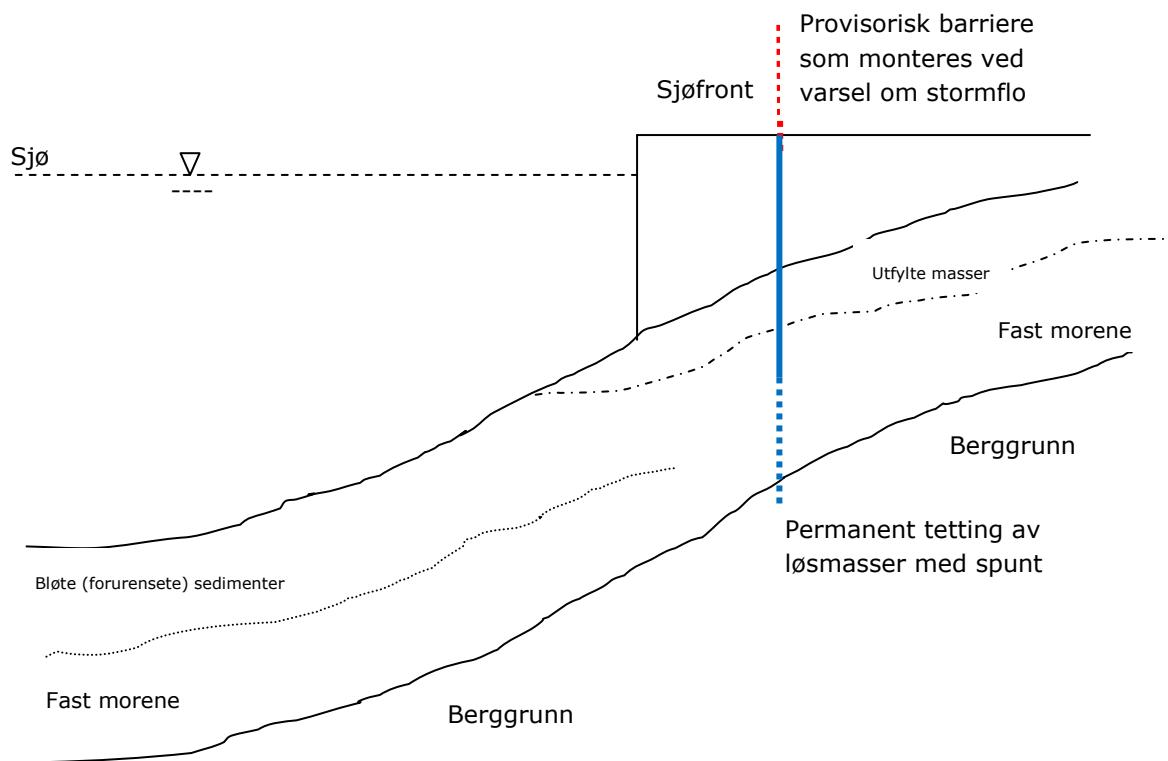


I forbindelse med flombarrierer er spunt brukt en rekke steder i Europa, se Del 2 av rapporten.

I Bergen ligger forholdene godt til rette for bruk av spunt som et element i en stormflobarriere. Langs sjøfronten ligger berggrunnen fra 0 til ca 20 meter under terrenngoverflaten. Over berggrunn ligger det et lag med fast morene som spunten kan rammes inn i. Om nødvendig kan spunten rammes helt ned til bergoverflaten. På denne måten etableres en vanntett vegg mot sjøen.

Metoden medfører relativt små inngrep på terrenngoverflaten. På grunn av at stålplater settes ned i et aggressivt miljø vil en spunt måtte vedlikeholdes eventuelt erstattes med en ny spunt etter 50 til 100 år. Spunten kan rammes på utsiden av eksisterende kaifront, eller på innsiden av massivkaier som vist på Figur 85.

Løsningen er meget fleksibel, da den kan beskytte en enkelt bygning/konstruksjon eller et større område som for eksempel gamle Bryggen.



Figur 85 Sjøfronten i Bergen - prinsippkisse spunt

#### 5.4.5.1.2. Cellespunt

En cellespunt består typisk av spuntnåler som settes i en ring og danner en celle. Cellene fylles med løsmasser etter at spunten er ferdig installert. Når to naboceller er fylt opp med løsmasser etableres forbindelsesbuer som gjør at konstruksjonen blir kontinuerlig og impermeabel.

Denne metoden har vært benyttet som flombarriere i Williamson, West Virginia, USA, se Figur 86.



Figur 86 Flombeskyttelse ved hjelp av cellespunkt, Williamson, West Virginia, USA

#### **5.4.5.2. Tett barriere for avstegning av Vågen, Damsgårdssundet og Strømmen**

##### **5.4.5.2.1. Prinsipp**

I motsetning til tiltak beskrevet i 5.4.5.1, skaper disse tiltakene mer eller mindre hindringer for skipstrafikk.

Som vist i Del 2 av rapporten finnes ulike steder rundt om i verden som har store utfordringer knyttet til flomvann i elver og stormflo i havet. Et felles prinsipp for de nevnte barrierer er at de er konstruert slik at skipstrafikk kan passere barrieren uhindret når det ikke er meldt stormflo.

I Bergen kan det være aktuelt å benytte den samme prinsippløsning som den som er vist for Venezia i Del 2 av rapporten. Et eventuelt lignende prosjekt i Bergen ville dog bli i en betydelig mindre skala enn de nevnte barrierekonstruksjonene.

Slike barriereløsninger med integrerte barrierekonstruksjoner vil ikke være til hinder for skipstrafikk. Det bør imidlertid ikke etableres større åpninger enn strengt tatt nødvendig, da kostnader med bygging og drift av bevegelige konstruksjoner vil øke betydelig med størrelsen. Basert på undersøkelse av skipstrafikk og skipsstørrelser i Bergens indre havn, vil en minimum seilingsbredde være ca. 30 m og seilingsdybde ned mot 10 m.

For ikke å skape for store begrensninger for båttrafikken må nødvendig seilingsbredde og dybde vurderes nærmere hvis løsningen velges.

Åpningen på hver side av barrierekonstruksjonen bør bygges som tette, stabile cellespunktkonstruksjoner på sjøsiden, og tettet mot landsiden med stålspunt og fylling mot berg/tette morenemasser.

Barriereporten forutsettes stengt i perioder med stormflo. En enkel port vil da stenge all sjøtrafikk og medføre store restriksjoner på trafikken i de timene stormfloen varer. Bruk av sluse, det vil si etablering av to dokkporter med en bestemt avstand kan etableres for å opprettholde en viss trafikk i perioden hvor man må foreta avstengning.

#### **5.4.5.2.2. *Utførelsesmetode***

##### Permanent barriere

En permanent barriere kan etableres i form av steinfylling med ramming av tett spuntvegg i fyllingen. Det tettes mot landsiden med stålspunt og fylling mot berg/tette morenemasser.

##### Stormflo-barriere

En stormflobarriere basert på Venezia-løsningen vil bestå av et visst antall prefabrikerte senkekasser utført i armert betong som vist i figur. Senkekassene bygges opp med rom for ballastering med vann og fast masse (betong), samt adkomst for inspeksjon. Senkekassene er utformet slik at barriereporten vil ligge nedsenket i kassen i normal (ikke-virksom) tilstand. I denne tilstanden vil senkekasse med port være nedsenket i sjøbunnen slik at sjøverts trafikk uhindret kan passere barrieren.

I tilfelle varsel om en forestående stormflo, kan barriereporten bli rotert oppover ved hjelp av oppdrift, og det etableres en tett barriere mellom Byfjorden og Vågen/Damsgårdssundet. Slik etableres en forskjell i vann-nivået på begge sider av barrieren.

En kan tenke seg at senkekassene kan prefabrikkeres på land i en tørrdokk (for eksempel på Hanøytangen) eller direkte på sjø, og deretter fløtes til barrierelokaliteten og senkes ned på en på forhånd bearbeidet sjøbunn.

Åpningen på hver side av barriereporten bygges som cellespunktkonstruksjoner. Konstruksjonen består av sirkulære celler, oppstilt på en rekke og bygget opp med flate spuntnåler. Vanligste størrelse for kaiformål er 10-20 m i diameter. De sirkulære cellene er bygget sammen med buer av spunt. Cellene fylles med friksjonsmasser av sand, grus eller tunnelsteinmasser.

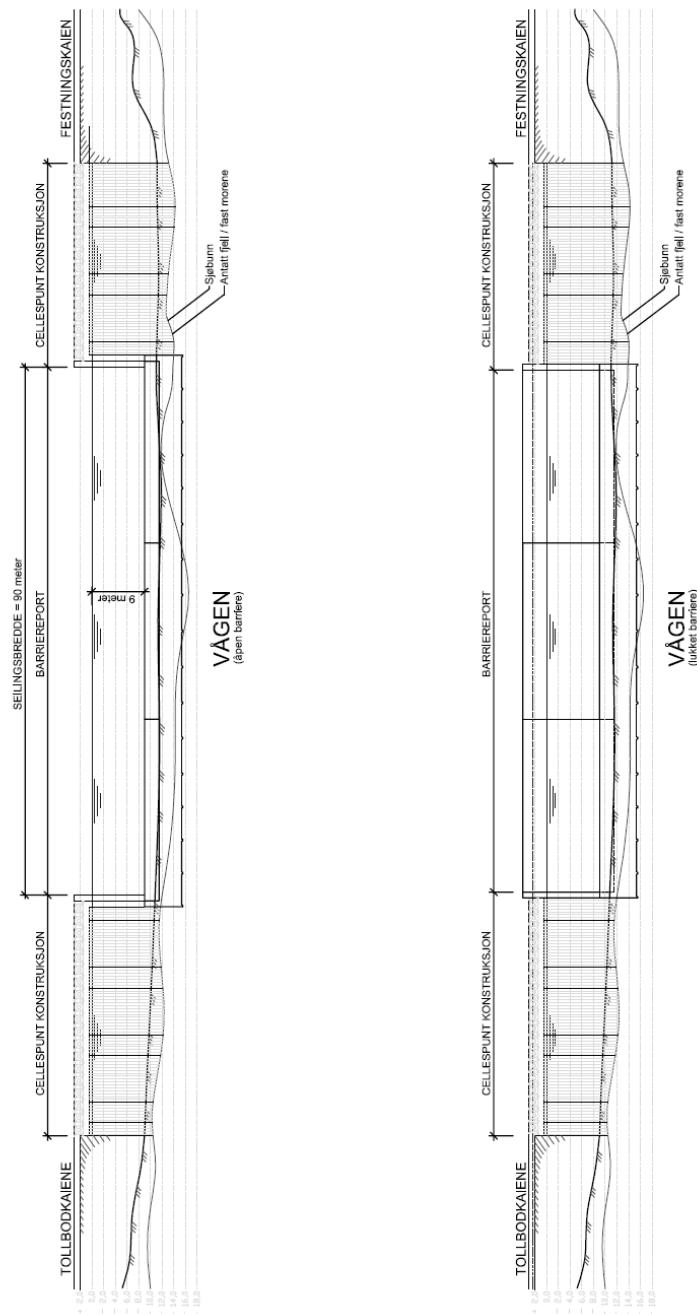
En cellespunktkai er mest aktuell ved vanndyp på 10-25 m, og dersom det er store laster som virker på kaien. Eventuelle bløte silt- og leirmasser bør mudres bort før byggingen.

Ved å benytte en cellespunktkonstruksjon kan barrieren samtidig benyttes både som kaikonstruksjon med fortøyning av skip og som fundament for bygninger, utstyr etc.

Etter utførelse av nødvendige grunnarbeider og etablering av oppfylte celler, utføres ulike betongarbeider i form av kaiskjørt og kaidekke. Etter installasjon av senkekasser med barriereport på sjøbunnen, bygges vertikale veggkonstruksjoner for tetting mellom cellekonstruksjonen og barriereporten. Senkekasser tilbakefylles med oppgravde sjøbunnmasser eller eventuelt tilførte steinmasser.

### 5.4.5.2.3. Barriere Vågen

Figur 87 viser hvordan en barriere kan etableres mellom Tollbodkaiene og Festningskaien. Cellespunkt kan benyttes for å snevre inn tverrsnittet noe for på den måten redusere behovet for kostbare sjøbunnsinstallasjoner. Barriereførtene monteres i sjøbunn etter samme prinsipp som det er som er brukt i Venezia.



Figur 87 Barriere Vågen - tverrsnitt

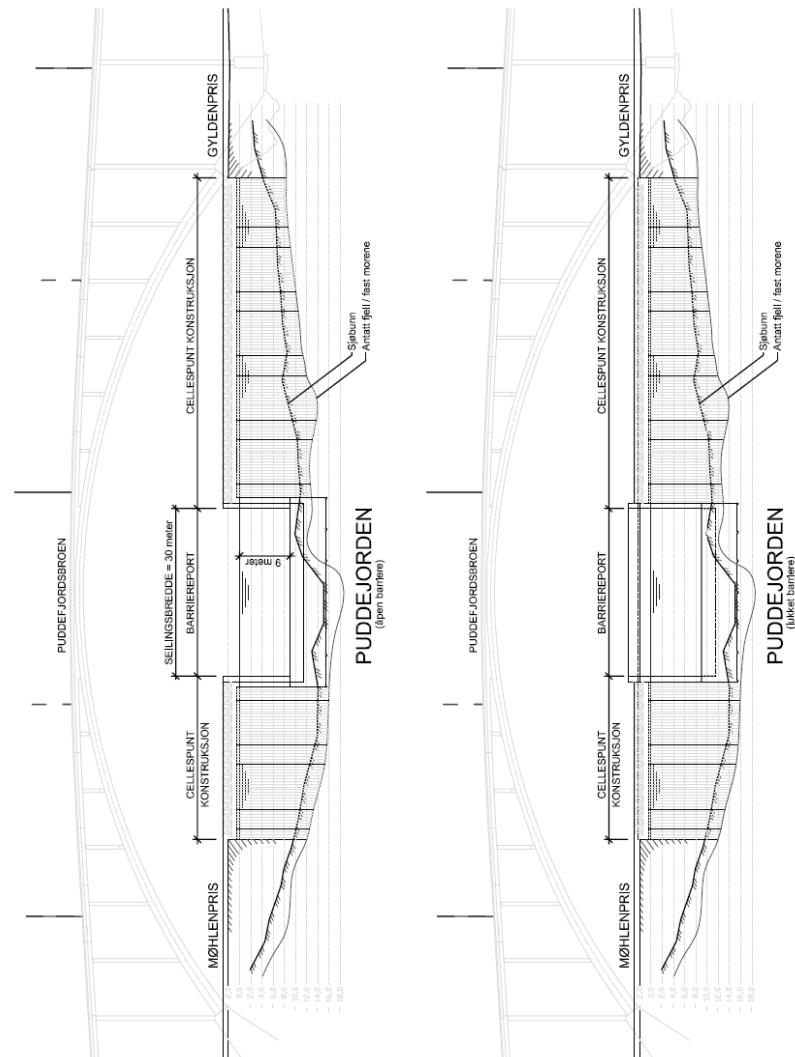
Dette gir en seilingsbredde på 90 meter, som antas å være tilstrekkelig med dagens trafikk. Bergen og omegn havnevesen må naturligvis konsulteres i fremtidige faser av prosjektet.

Kostnadene med denne type løsning antas å ligge i området en halv milliard kroner.

#### **5.4.5.2.4. Barriere Damsgårdssundet**

I Damsgårdssundet kan det benyttes samme løsning som for Vågen, se Figur 88.

Kostnadene med denne type løsning antas å ligge i området en halv milliard kroner.



*Figur 88 Barriere Damsgårdssundet - tverrsnitt*

#### **5.4.5.2.5. Barriere Strømmen**

Den enkleste metoden for Strømmen vil være å stenge innløpet permanent. Dette kan gjøres enkelt ved å fylle igjen med stein og eventuelt bygge en vanntett betongkonstruksjon eller installere en spunt. Fra et byfornyingsperspektiv vil det også være interessant å gjøre Store Lungegårdsvann om til et friskt ferskvanns basseng. Ulempen med dette er at det stenger for all ferdsel med småbåter til og fra Store Lungegårdsvann. I tillegg ville det måtte gjøres tiltak for utløp fra innsjøen.

Dette antas at en permanent barriere i Strømmen kan bygges innenfor en kostnadsramme på 10 millioner kroner.

På grunn av det meget moderate vanndypet (maks 3 meter) vil et annet alternativ være å lage en beredskapsplan med midlertidige barrierer, som vist i Del 2 av rapporten. Med 4-5 dagers varsling av stormflo vil det være tilstrekkelig med tid til å installere provisoriske flomforbygninger.

#### **5.4.5.3. Gamle Bryggen**

Gamle Bryggen er fredet i henhold til Lov om kulturminner §4. I de siste årene er det dokumentert stor skade på deler av kulturlagene på Bryggen. Skadene skyldes sannsynligvis endringer og en senkning av grunnvannsstanden i området. I tillegg er fronten mot Vågen utsatt for oversvømmelse ved springflo. Fortauet foran midtre del av Bryggen ligger på kote +0,9 meter. Som vist på figur 25 i del 2 ligger høyeste astronomiske vannstand på kote +0,9 meter og maksimal observert vannstand på kote +1,52 meter. Dette området blir derfor jevnlig oversvømmet, se Figur 89.



Figur 89 Oversvømmelse på Bryggen (foto Bergens Tidende)

Stormflo med gjentaksintervall 1 år ligger på kote +1,1 og gjentaksintervall 20 år på kote +1,4.

Området har allerede i dag akutte problemer knyttet til senket grunnvannsstand i indre deler av middelalderbyen og stormflo som oversvømmer sjøfronten.

Begge disse problemene kan fra et teknisk synspunkt løses ved bruk av spunt-løsningen som er vist tidligere i denne rapporten.

Ved å ramme en vanntett spunt rundt hele gamle Bryggen vil grunnvannstanden innenfor området kunne kontrolleres og justeres etter behov. Samtidig vil spunten hindre at stormflo oversvømmer området.

Ramming av spunt vil ødelegge kulturlagene i en begrenset bredde der spunten settes ned. Det er derfor behov for samarbeid med Riksantikvaren som har det overordnede ansvaret med restaureringen på Bryggen.

Kostnadene med å etablere en vanntett spunt rundt Bryggen er estimert til å ligge i området 20 til 30 millioner kroner.

#### **5.4.5.4. Nødvendige avklaringer og utredninger**

Løsningene som er presentert i det foregående er på skissestadiet. I en eventuell senere prosjektfase er den en rekke avklaringer og utredninger som gjøres. Problemstillinger knyttet til forurenset sjøbunn og kulturminner er allerede nevnt. I tillegg må det gjøres nærmere vurderinger knyttet til:

- Innseiling- og manøvreringsforhold for skipstrafikk.
- Trafikkgrunnlag og trafikkbeskrivelse.
- Merking.
- Regulering av skipstrafikk og havnevirksomhet.
- Vanndyp, grunnforhold, geotekniske undersøkelser.

Relevante myndigheter som bør kontaktes i en fremtidig prosjektfase er:

- Bergen og omegn havnevesen.
- Kystverket.
- Direktoratet for sprengstoff og beredskap (DSB).
- Fylkeskommunens kulturavdeling.
- Riksantikvaren.
- Statens forurensingstilsyn.
- Arbeidstilsynet.

#### **5.4.6. Miljøkonsekvenser for havnebassenget**

Møter tidevannet en innsnevring eller en særlig grunn terskel mens det innenfor er et dypere og mer åpent område, vil strømmen kunne bli så mye bremset at det ikke blir full tidevannshøyde på innsiden av terskelen eller innsnevringen. En slik virkning kalles for *strupning* av tidevannsstrømmen. I vårt nærområde har vi mange eksempler på dette som for eksempel i Lurefjorden og i Mofjorden. Vi ser det samme fenomenet også i mindre bassenger som Lygrepollen og Lindåspollene. I slike lokaliteter vil tidevannsforskjellen bli redusert samtidig som høyvann og lavvann inntreffer senere enn utenfor. Nordåsvannet er kanskje det mest kjente av slike lokaliteter. Her kommer flo sjø nesten to timer etter tidevannet på kysten og tidevannsforskjellen er redusert til under det halve.

##### Store Lungegårdsvann.

Overflatearealet til Store Lungegårdsvann er på ca 0,44 km<sup>2</sup>. Med dagens innløpsareal (ca 60 m<sup>2</sup>) ved gamle Nygårdsbro er det ingenstrupning av tidevannet og tidevannsforskjellen er den samme som i Puddefjorden og i Byfjorden, det vil si i middel ca 120 cm mellom høyvann og lavvann. Ved en evt. fremtidig økning av havnivået på for eksempel 70 cm vil høyvannsnivået øke til ca 190 cm over dagens midlere nivå for lavvann i Store Lungegårdsvann og Puddefjorden. For å beholde samme høyvannsnivå i Store Lungegårdsvann i fremtiden kan innløpsarealet reduseres slik at høyvannsnivået senkes med 70 cm, det vil si fra 120 cm til 50 cm, som er ca 40 % av den naturlige tidevannsforskjellen i Bergensområdet.

Ved bruk av modellen Fjord Env. vers 3.3 er det beregnet at innløpsarealet ved Gamle Nygårdsbro må reduseres til ca 4 m<sup>2</sup> for å oppnå denne effekten. På grunn av det reduserte innløpsarealet vil imidlertid midlere tidevannstrøm øke fra ca 0,6 m/sek til ca 4 m/sek, det vil si med en faktor på ca 6. I dagens situasjoner er det dårlige oksygenforhold (oksygenfritt ?) i de dypere lag av Store Lungegårdsvann. De betydelig økte strømhastighetene ved en innsnevring av innløpet vil føre til økt vertikalblanding og dermed en betydelig bedring av oksygenforholdene i de dypere delene av Store Lungegårdsvann.

##### Puddefjorden

Overflatearealet til Puddefjorden innenfor Puddefjordsbroen er ca 0,2 km<sup>2</sup> mens det totale overflatearealet innenfor Puddefjordsbroen, inkludert Store Lungegårdsvann, er ca 0,64 km<sup>2</sup>. Innløpsarealet ved Puddefjordsbroen er ca 1000 m<sup>2</sup>. Ved bruk av modellen Fjord Env. vers 3.3 er det beregnet at innløpsarealet ved Puddefjordsbroen må reduseres til ca 5,5 m<sup>2</sup> for å redusere et evt framtidig høyvannsnivå med ca 70 cm, det vil si fra ca 190 cm til 120 cm over dagens midlere nivå for lavvann. Midlere tidevannsstrøm vil øke betydelig: fra 0.05 m/s til ca 4 m/s. Da tidevannsforskjellen er redusert til ca 40 % av den naturlige forskjellen (fra 120 cm til 50 cm) innenfor Puddefjordsbroen vil dette, med dagens innløp, føre til en betydelig redusert tidevannsstrøm i innløpet til Store Lungegårdsvann og dermed redusert vertikalblanding. Dette kan føre til en betydelig forverring av oksygenforholdene i de dypere delene av Store Lungegårdsvann. Det kan evt. kompenseres for ved å redusere innløpsarealet til Store Lungegårdsvann som beskrevet foran. En slik reduksjon vil imidlertid også føre til et noe mindre innløpsareal

ved Puddefjordsbroen. Oksygenforholdene kan evt. også bedres ved et dykket utslipp av ferskvann i Store Lungegårdsvann.

#### **5.4.7. Trafikk /logistikk**

Forslag til felles barrierer i Vågen og Puddefjorden vil bli utformet med bredde større enn 30 m slik at skipstrafikken ikke skal bli hemmet når barrierene er i åpen tilstand. En lukket barriereport vil imidlertid stenge for all trafikk i de timene som porten er stengt.

Lokale barrieretiltak vil i utgangspunktet ikke legge hindringer for båttrafikken. I situasjoner hvor midlertidige barrierer etableres på kaien vil det derimot være behov for spesialløsninger for å ivareta kaifunksjonene.

Ut i fra et logistikksted vil naturlig nok en tilpasning av kainivået til det endrede havnivået være å foretrekke. Bare slik vil skipstrafikken uhindret kunne fungere selv under stormflo.



*Figur 90 Båttrafikk på Vågen*

## **5.5 Skjerming av enkeltområder og bygg**

I de foregående kapitler er det vist at sjøfronten i Bergen er av en annen karakter enn for områder andre steder i Europa, som er truet av stigende havnivå og flom (se for eksempel Figur 80 Sjøfronten i Bergen - prinsippskisse og kapittel 5.4.5.1 Vanntett vegg langs sjøfronten).

Det er forholdsvis begrenset dybde til berggrunn eller fast morene, og terrenget stiger raskt innover på land. Forholdene ligger derfor meget godt til rette for å skjeme enkeltområder eller enkelte bygg, fremfor omfattende tiltak med konstruktive barrierer i innløpet til Vågen og Damsgårdssundet.

En løsning med skjerming av enkeltstående områder eller bygg vil i tillegg gi en helt annen fleksibilitet og de enkelte tiltak vil i stor grad ha et begrenset omfang og kostnad.

Der er påvist at dette kan være en meget god løsning for Gamle Bryggen. Eiendomsbesittere må vurdere om bygningsmassen er sårbar for havnivåstigning og stormflo, og gjøre de nødvendige tiltak og investeringer sett på bakgrunn av dette.

## **5.6 Kostnadsvurderinger**

Tabellen under gir et overslag over kostnader knyttet til de alternativene som er utredet i denne rapporten.

*Tabell 11: Konsekvenser og kostnadsoverslag*

TILTAK	KONSEKVENSER	KOSTNAD 2008 (NOK)
Ytre barrierer	Tiltaket vil ha meget store miljømessige og økonomiske konsekvenser	>30 milliarder
Indre barriere – Vågen	Nytteverdien er vurdert til å være begrenset.	500 millioner
Indre barriere - Damsgårdssundet	Nytteverdien er vurdert til å være begrenset.	500 millioner
Indre barriere – Strømmen	Nytteverdien er stor, da utfylte områder i Store Lungegårdsvann og Nygårdstangen beskyttes.	<30 millioner
Spuntløsning for Gamle Bryggen	Grunnvannsstanden i området kan kontrolleres, og sjøfronten beskyttes mot stormflo.	<50 millioner
Skjerming av enkeltområder og bygg	Fleksibel løsning. Sårbare bygg eller områder kan sikres mot fremtidig havnivåokning og stormflo.	<100.000 per løpemeter

I kapittel 4 er det skissert berørt infrastruktur i Bergensområdet. For at en ytre barriere skal være samfunnsmessig lønnsom må kostnaden ved lokalt å beskytte/tilpasse de samlede konstruksjoner/infrastruktur innenfor samme område være større enn å etablere det ytre barrieresystemet, altså større enn 30 milliarder kroner.

Hvis en ser på hvilke konstruksjoner som befinner seg innenfor ytre barriere, trekker fra de som har en forventet resterende levetid på under 60 år og ser bort fra nye konstruksjoner som vil bli satt opp i denne perioden, så vil det være betydelig rimeligere å gå inn med lokale tiltak enn å etablere en ytre barriere.

## **6. Anbefalt videre arbeid med prioriteringer og tidsplan**

Rapporten viser at det er ”god tid” til å forberede aktuelle tiltak basert på dagens bruk og status på bygninger og anlegg i faresonen.

Imidlertid er det andre utviklingstrekk som vil kreve raskere tiltak og som derfor også bør ses i sammenheng med tiltak for å begrense skadevirkninger av havstigning. Slike tiltak/vurderinger er:

1. Krav i offentlige lovverk, herunder spesielt Plan- og bygningsloven, som sikrer samfunnsøkonomiske planleggingskriterier.
2. Stabile forutsetninger for utvikling av byggeområder i sjøkanten
3. Sikring av verneverdig bebyggelse som allerede nå er i en utsatt posisjon

Pkt. 1 anses som et offentlig anliggende som må ivaretas av de aktuelle departementer.

Pkt. 2 vil være lokale ansvar og må ivaretas gjennom kommunedelplaner (arealdel) og politiske vedtak knyttet til konkrete utbyggingsområder.

Pkt. 3 vil både være offentlig og privat ansvar avhengig av eiendommenes status og finansiering. Her vil også ”sponsoransvar” være naturlige elementer.

I Bergen peker to tiltak seg ut som sentrale prioriteringer:

1. Sikring av Bryggen
2. Stabilisering av Store Lungegårdsvann

### Sikring av Bryggen

Bryggen er vårt fremste kulturminne og er utsatt for bygningsmessig forringelse grunnet senket grunnvann og oversvømmelser.

Rapporten viser at situasjonen med enkle tekniske løsninger og begrenset økonomisk innsats kan stabiliseres. En tett spuntvegg og et reguleringsstiltak for grunnvannsnivå kan være på plass innenfor en 5-års periode og kostnadsramme på 100 mill.kroner.

### Store Lungegårdsvann

Strandsonen rundt store Lungegårdsvann er et sentralt og prioritert byutviklingsområde. Ved å stenge innløpet fra Puddefjorden i Strømmen kan variasjoner i havnivå tilnærmet elimineres og utfyllings- og fundamenteringstiltak for ny bebyggelse reduseres betraktelig. Tiltakene er teknisk enkle og investeringene på et meget lavt nivå.

Tidsaspektet vil sannsynligvis være mest påvirket av en prosess med utflytting av småbåtanlegg, men med politisk vilje bør en 5-års periode for gjennomføring være tilstrekkelig.

Det anbefales også videre arbeid med følgende forhold:

- Videre utvikling av sikringstiltak
- Beredskapsplanlegging i hele det berørte fjordsystem
- Konkretisering av plan- og byggeforskrifter i den berørte strandsonen

## 7. Referanser

Bahr, D. B., M. Dyurgerov, and M. F. Meier (2009), Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03501, doi:10.1029/2008GL036309

Bergenguyen, M., Cazenave, A., Lombard, A., Llovel, W., Viarre, J., Cretaux, J. F. (2008), Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data, *Global Plan. Change*, **62**, 10.1016/j.gloplacha.2007.11.007

Cazenave, A., Lombard, A., Llovel, W. (2008), Present-day sea level rise: A synthesis, *Comptes R. G.*, **340**, 761

Church, J. A., White NJ, Coleman R, Lambeck K, Mitrovica JX (2004), Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period, *J. Climate*, **17**, 2609

Drange, H., B. Marzeion, A. Nesje, A. Sorteberg (2007), Opptil én meter havstigning langs Norskekysten innen år 2100, *CICERONE*, **2**, 29-31

Fylkesmannen i Hordaland. 2002. Tiltaksplan for Bergen havn.

Fylkesmannen i Hordaland. 2005. Bergen havn. Tiltaksplan fase II.

Holgate, S. J. (2007), On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01602

IPCC (2007a). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Norsk oversettelse av deler av rapporten er tilgjengelig her: [http://www.sft.no/artikkel\\_40254.aspx](http://www.sft.no/artikkel_40254.aspx).

IPCC (2007b). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. Norsk oversettelse av deler av rapporten er tilgjengelig her: [http://www.sft.no/artikkel\\_40254.aspx](http://www.sft.no/artikkel_40254.aspx).

Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J. C., Holgate, S. (2006), Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Phys. Res.*, **111**, C09012

Katsman, C. A., W. Hazeleger, S. S. Drijfhout, G. J. van Oldenborgh, G. Burgers (2008), Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt, *Climatic Change*, **91**, 351-374

Rahmstorf S, A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, R. F. Keeling, D. E. Parker, and R. C. J. Somerville (2007a), Recent Climate Observations Compared to Projections, *Science*, **316** 709.

Rahmstorf, S. (2007b), A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise, *Science*, **315**, 368-370

Stigebrandt, A. 2001. FJORDENV- a water quality model for fjords and other inshore waters. Earth Science Centre, Göteborg University, Department of Oceanography, C40 2001. 41 pp.

Vestøl, O. (2006), Determination of postglacial land uplift in Fennoscandia from leveling, tide-gauges and continuous GPS stations using least squares collocation, *J. Geodesy*, **80**, 248-258

Woth, K., R. Weisse og H. Von Storch (2006), Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different climate models, *Ocean Dynamics*, **56**, 3-15