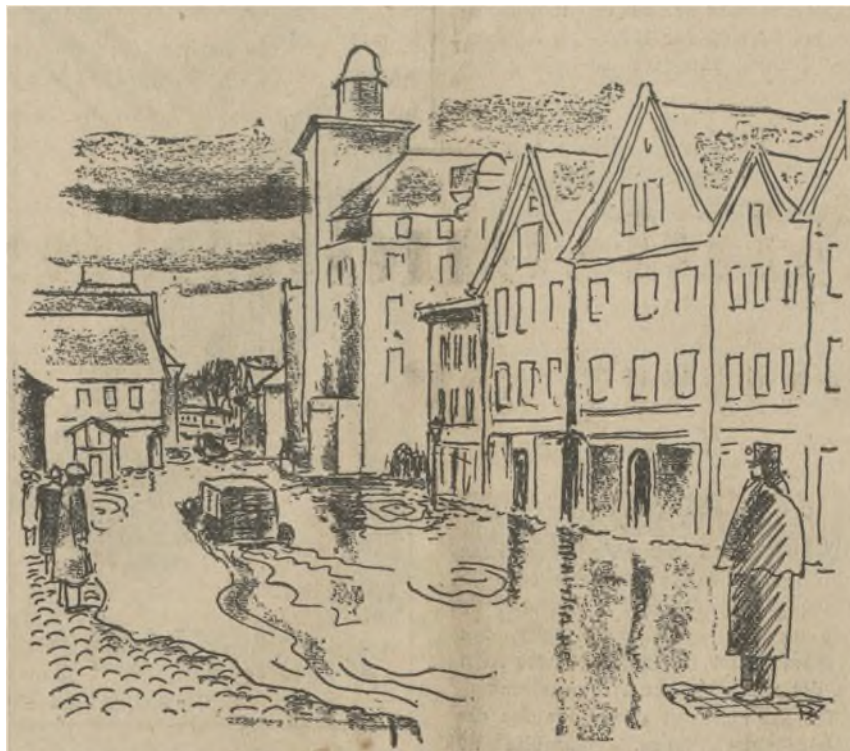


Bybanen til Åsane – BT5.  
Reguleringsplan med teknisk forprosjekt

Til: Bergen kommune  
Fra: NOAV  
Dato: 2019-11-28

## BT5 – stormflo og havnivåstigning

### OPPDATERING AV STORMFLOTALLENE



(Bergens Tidende. 18-01-1934)

04J	Ferdig dokument	2019-11-28	GD	hpd	hpd
03D	For godkjenning	2019-06-12	GD	hpd	hpd
02B	For informasjon/kommentar	2019-04-29	GD	hpd	hpd
01A	Utkast internt	2019-04-04	GD	IDB	
Versjon	Beskrivelse	Dato	Utarb. av	Fagkontroll	Godkj. av

Dette dokumentet er utarbeidet av rådgiver som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører rådgiver. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

## **FORORD**

Som del av registrering og analysefasen for reguleringsplan for byggetrinn 5 for Bybanen med teknisk forprosjekt fra Bergen sentrum til Åsane, er det utført en oppdatering av stormflotallene som er en av premissgiverne for byggehøyde for Bybanen foran Bryggen.

Gerard Dam er fagansvarlig for havstigning og flom i prosjektet har utarbeidet rapporten. Ingri D. Birkeland har gjort kvalitetssikring av rapporten.

Bergen 28.11.2019

## SAMMENDRAG

Bybanetraséen fra Bergen sentrum til Åsane planlegges over Bryggen og Torget. Bryggen og Torget er utsatt for stormflo. Den tidligere Norconsultrapporten fra 2012 anbefaler en stormflosikker kote på 2,0 m NN1954 over Bryggen. Hvis vi bruker dagens høydesystem NN2000 tilsvarer det 1,91m NN2000.

Forutsetninger og beregningsmetoder for tallene fra den tidligere Norconsultrapporten har endret seg. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) har siden 2016 brukt andre og bedre metoder enn tidligere. For Bergen bør det regnes med en havnivåendring på 72 cm i 2100 når man også tar hensyn til usikkerheten i tallene. DSB sine stormflosikre koter for Bergen er oppsummert i Tabell 0.1 uten bølgepåslag. Videre anbefaler DSB at tallene bør avrundes til nærmeste 10 cm før bruk. Dessuten vises varigheten av stormflo for ulike gjentaksintervaller og høyder.

Tabell 0-1: Anbefalte stormflosikre koter (DSB, 2016) og estimert varighet av stormflo periode for Bergen for ulike gjentaksintervaller i 2100 og høyder (NN2000).

Returperiode stormflo	Maks. vannstand	Estimert varighet over høyde 171 cm	Estimert varighet over høyde 181 cm	Estimert varighet over høyde 186 cm	Estimert varighet over høyde 191 cm	Estimert varighet over høyde 200 cm
1 år	<b>174 cm</b>	0t 32m	-	-	-	-
5 år	<b>185 cm</b>	1t 52 m	0t 41m	-	-	-
10 år	<b>190 cm</b>	2t 18m	1t 22m	0t 41m	-	-
20 år (DSB sikkerhetsklasse 1)	<b>194 cm</b>	2t 36m	1t 47m	1t 17m	0t 32m	-
200 år (DSB Sikkerhetsklasse 2)	<b>206 cm</b>	3t 28m	2t 45m	2t 22m	1t 57m	1t 04m
1000 år (DSB Sikkerhetsklasse 3)	<b>213 cm</b>	3t 54m	3t 15m	2t 53m	2t 31m	1t 47m

Estimert varighet av en stormflohendelse for ulike gjentaksintervall og høyder vises også i Tabell 0-1. Blant annet for den anbefalte byggehøyde for Bybanen på 191 cm i konsekvensutredningen fra 2013.

På bakgrunn av framherskende vindretning, Vågens beliggenhet og vindforhold når det er sterkt lavtrykk og høy vannstand, kan det konkluderes med at bølgepåvirkning vil ha neglisjerbar virkning på havnivået under forhold med ekstra stor stormflo på Bryggen og Torget.

**INNHold**

<b>FORORD</b> .....	<b>2</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>3</b>
<b>1. INNLEDNING</b> .....	<b>5</b>
1.1. Introduksjon .....	5
1.2. Tidligere rapport fra Norconsult.....	6
1.3. Innhold.....	6
<b>2. STORMFLO OG HAVSTIGNING</b> .....	<b>7</b>
2.1. Prosessene.....	7
2.2. Observerte stormflohendelser i Bergen.....	8
2.3. Forholdene på Bryggen og Torget.....	10
<b>3. NYE STORMFLOTALL FRA DSB (2016)</b> .....	<b>12</b>
3.1. Introduksjon .....	12
3.2. Framskrivinger for framtidig havnivå .....	12
3.3. Anbefalte kotenivå for kommunal planlegging .....	14
<b>4. SAMMENFALL AV BØLGER OG STORMFLO</b> .....	<b>16</b>
4.1. Introduksjon .....	16
4.2. Teoretisk bølgehøyde og vindretning på Bryggen.....	16
4.3. Teoretisk bølgehøyde og vindretning på Torget .....	17
4.4. Sammenfall av høy vind og høyeste vannstand .....	17
4.5. Konklusjon .....	21
<b>5. Andre betraktninger</b> .....	<b>22</b>
5.1. Varighet av stormflo hendelser .....	22
5.2. Stormflo i resten av Bergen sentrum .....	24
<b>6. KONKLUSJON</b> .....	<b>25</b>
<b>Kilder</b> .....	<b>27</b>
<b>VEDLEGG A: KART MED OVERSVØMT AREAL rundt Bryggen og Vågen</b> .....	<b>28</b>
<b>VEDLEGG B: DETALJERT VANNSTAND OG METEO FOR 5 OBSERVERTE STORMFLOHENDELSER VED BRYGGEN</b> .....	<b>30</b>
<b>VEDLEGG C: Nivåskisse med de viktigste vannstands nivåene og ekstremverdier i Bergen (kartverket.no)</b> .....	<b>35</b>
<b>VEDLEGG D: BEGREPSFORKLARING</b> .....	<b>36</b>

## 1. INNLEDNING

### 1.1. Introduksjon

Bybanens trasé fra Bergen sentrum til Åsane i byggetrinn 5 planlegges over Torget og langs Bryggen (Figur 1-1). Området er utsatt for stormflo og havnivåstigning.

I denne rapporten oppdaterer vi stormflottallene som er en av premisene for byggehøyde for Bybanen over Bryggen. Tidligere har Norconsult (2012) vurdert høyden for Bybanen over Bryggen, men de offisielle tallene har endret seg siden 2012. Her presenterer vi de nyeste tallene for stormflo og havnivåendring for kommunal planlegging ifølge DSB (2016). I tillegg har vi utarbeidet en mer detaljert analyse for bølgepåvirkning i Vågen.



Figur 1-1: Foreslått Bybanetrasé over Bryggen

## 1.2. Tidligere rapport fra Norconsult

Norconsults rapport (2012) ga følgende konklusjon:

*Det anbefales at tunnelinnslag i sentrum legges over kote 401 cm over landkote 0/NN1954. Det vil være 1 ‰ årlig sannsynlighet for at dette nivået kan nåes av bølgeslag i 2100 (For Sandviken og Nyhavn gjelder hhv. 521 og 461 cm). Det åpnes for at banen legges på et lavere nivå, med driftsløsninger som håndterer midlertidig stenging av deler av linjen ved høy vannstand. En aktuell høyde kan være kote 200 cm over landkote 0/NN1954. Dette innebærer 1% sannsynlighet for oversvømmelse pr 2050.*

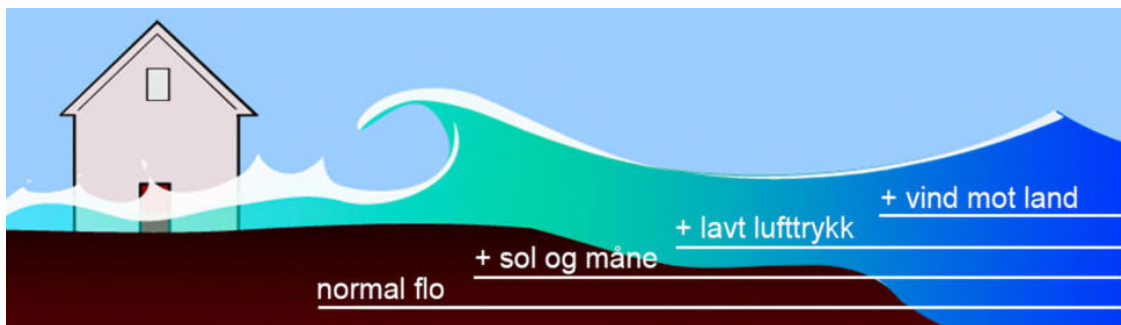
I rapporten fra Norconsult var det referert til høydesystemet NN1954. I dag bruker Bergen Kommune høydesystemet NN2000. Forskjellen mellom NN1954 og NN2000 er 9 cm i Bergen. Det betyr at en høyde på 2 m i NN1954 er **1,91 m** i NN2000. I resten av denne rapporten bruker vi høydesystemet NN2000.

## 1.3. Innhold

Denne rapporten har følgende inndeling: Kapittel 2 beskriver stormfloprosessene og historiske stormflohendelser i Bergen. I kapittel 3 introduserer vi de nye stormfloverdiene for kommunal planlegging, hentet fra DSB. Sammenfall av bølger og ekstrem stormflo behandler vi i kapittel 4. Til slutt gir vi konklusjoner i kapittel 6.

## 2. STORMFLO OG HAVSTIGNING

### 2.1. Prosessene



Figur 2-1: Prosessen under stormflo (kilde: tv2.no).

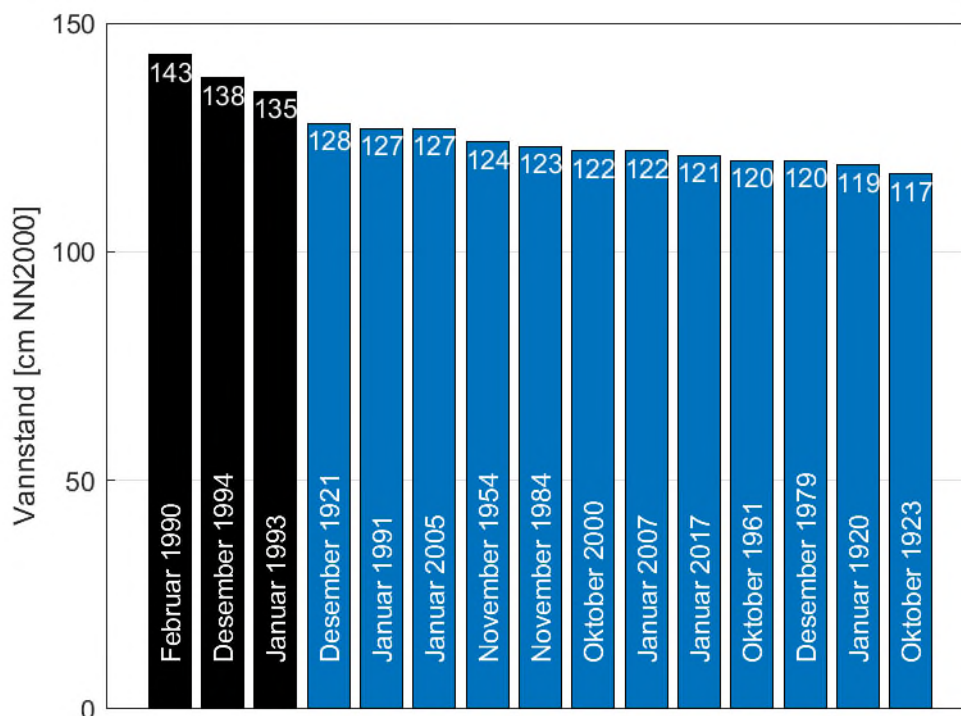
Ved stormflo spiller mange ulike prosesser en rolle (Figur 2-1):

- **Astronomisk tidevann:** Vannstanden i havet endrer seg hele tiden på grunn av tyngdekrefter fra månen og solen. Det har en periode på 12 timer og 25 minutter. I Bergen er forskjell mellom høyvann og lavvann gjennomsnittlig 90 cm. Ved nymåne og fullmåne forsterker tyngdekrefter fra solen og månen hverandre, og tidevannet blir ekstra høyt og lavt. Forskjell mellom høyvann og lavvann blir da gjennomsnittlig 122 cm. Dette kalles springflo og springfjære. Ved halvmåne er forskjellen mindre enn vanlig og dette kalles nippflo og nippfjære. Forskjellen mellom høy- og lavvann er da gjennomsnittlig 58 cm. En springflo – nippcyklus har en periode på 14 dager. Siden bevegelser fra solen og månen er godt kjent kan vi forutsi astronomisk tidevann og det finnes i tidevannstabeller.
- **Avstanden mellom månen til jorden** er ikke konstant og det har betydning for tidevannstandene. Når månen står nærmest jorden heter det at månen er i perigeum. I de tilfellene hvor tidspunktet for perigeum faller sammen med tidspunktet for ny- eller fullmåne kalles det en perigeumsspringflo. Da er altså springflo og -fjære ekstra høyt og lavt.
- Ved ekstra stor stormflo er det en forutsetning at det er **springflo**, det vil si ved nymåne eller fullmåne da høyvann er ekstra høyt.
- Ved stormflo er vannstanden høyere enn man kan forvente sammenlignet med det astronomiske tidevannet. Det skyldes **værvirkning på tidevannet**. Værvirkning på tidevannet skyldes at lufttrykket er lavere enn normal og at vind blåser vann inn mot kysten.
- **Lufttrykkforskjeller** over sjøen forskyver vannmasser og dermed vannstander i sjøen. Det betyr at et lavtrykkssystem som kommer inn over Bergen vil medføre økte vannstander. Som en tommelfingerregel vil 1 hPa lufttrykkreduksjon medføre 1 cm havstigning.
- **Pålandsvind kan blåse vann inn mot kysten.** Her gjelder det at jo grunnere sjøen er jo mer effekt har vinden på økning av vannstanden. På Vestlandet er denne vindefekten derfor begrenset fordi sjøområdene utenfor vestlandskysten er dype. Andre steder som ligger ved en grunn sjø (f.eks. Nederland og Tyskland) er vind dominerende ved en stormflohendelse og vannstand kan være 2-3 m høyere enn astronomisk tidevann. Maksimalt målt værvirkning i Bergen er 95 cm ved den høye floen den 12 januar 2007. Videre kan det nevnes at den dominante vindretningen langs norskekysten kommer fra sørvest. På grunn av jordens rotasjon forskyves vann ved en sørvestlige vind i retning mot kysten. Fenomenet heter Ekman transporten (Richter mfl, 2012).

## 2.2. Observerte stormflohendelser i Bergen

Bergen har opplevd flere hendelser med kraftig stormflo hvor vannet har oversvømt deler av Bryggen ved Dreggekaien. Den høyeste stormflo som er registrert var den 27. februar 1990 med en rekordvannstand på 143 cm NN2000 (Figur 2-2 og Figur 2-3). Astronomisk springflo var høy med nymåne to dager før og med månen i perigeum dagen etter (Gjevik, 2009). I tillegg kom værrets virkning med ca. 75 cm (Vedlegg B, Figur B-1). I Bergen var det nesten ingen vind (< 5m/s) fordi midten av lavtrykkssystemet (950 hPa) var i nærheten av Bergen, mens resten av Europa (Nederland, Tyskland) fikk mye vind og masse (vind)skade.

Den andre og tredje største stormflohendelsene i Bergen var i 1994 og 1993 (Figur 2-2, Figur 2-4 og Figur 2-5). Stormfloen i desember 1994 var med mer vind (10 m/s) i Florida (Vedlegg B, Figur B-2), men stormfloen i januar 1993 (Vedlegg B, Figur B-3) var nesten uten vind.



Figur 2-2: De 15 høyeste stormflohendelser i Bergen siden målingene startet i 1915. Svart viser stormflo-hendelser som er over en 200-års stormflo ved DSB (2016) tallene.





Figur 2-3: Stormflo på Bryggen 27. februar 1990 (Bergens Tidende). Vannet flommet over Dreggekaien og vegen ved Dreggsalmenningen, derfra rant det inn foran Bryggen.



Figur 2-4: Stormflo på Bryggen 8. desember 1994 (Bergens Tidende). Vannet flommet over Dreggekaien og vegen ved Dreggsalmenningen, derfra rant det inn foran Bryggen.



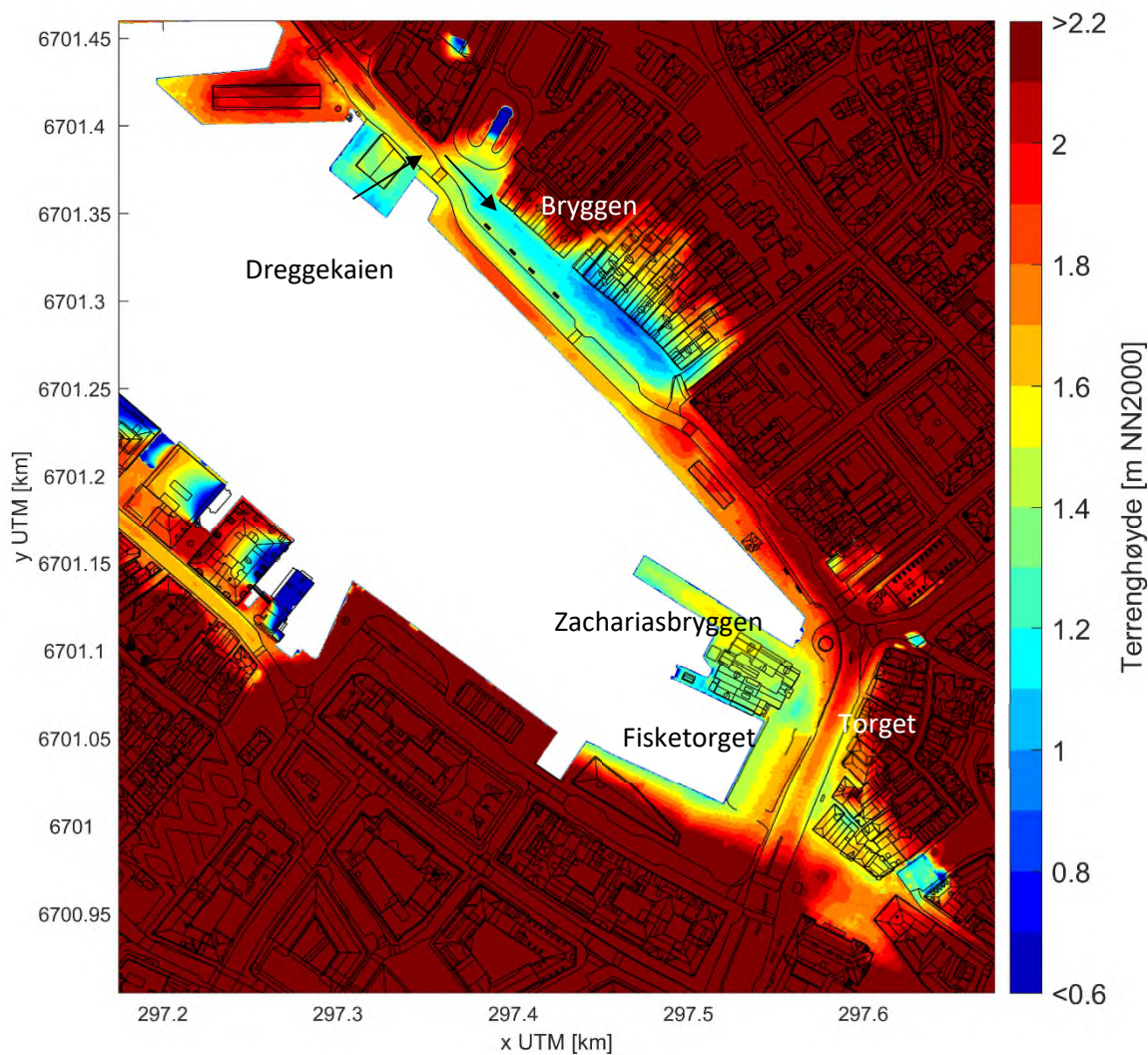
Figur 2-5: Stormflo på Bryggen 11. Januar 1993 (Bergens Tidende). Vannet flommet over Dreggekaien og vegen ved Dreggsalmenningen, derfra rant det inn foran Bryggen.

En annen interessant hendelse var den 12. januar 2007 (Vedlegg B, Figur B-4). Selve stormflovannstanden var ikke så høy (122 cm NN2000) med et astronomisk tidevann som var lavere enn middel høyvann, men værrets virkning utgjorde nesten 1m. Dette er den høyeste observerte værvirkningen på stormflo i Bergen. Faller denne 1m værvirkning sammen med høyeste mulige springflo (=83 cm NN2000) kan vannstanden bli så høy som 1,83m. Det betyr at vannet kan forventes å komme 40 cm høyere enn rekorden fra 1990 som var 1,43 m (Gjevik, 2009). Dette tallet tar ikke hensyn til økt havnivå som følge av klimaendringer.

### 2.3. Forholdene på Bryggen og Torget

Figur 2-6 viser terrenghøyde på Bryggen og Torget. Høydene er basert på laserdata fra 2016 med en oppløsning på 0,25 m. Terrenget foran Bryggen ligger på et lavpunkt (rundt kt +1m NN2000). Kaien foran Bryggen ligger høyere, på kt 1,6-1,8m NN2000. Under de stormfloene som har oversvømt Bryggen har vann kommet inn gjennom Dreggekaien, via vegen og inn til Bryggen, mens kaien foran Bryggen ikke ble oversvømt.

Foreslått Bybanetrasé over Torget følger eksisterende vei. Laveste punkt her i dag er kt +1.7m NN2000. Fisketorget og Zachariasbryggen ligger lavere på ca. 1,4m NN2000.



Figur 2-6: Dagens terreng høyde på Bryggen og Torget (Laserdata, 2016) fra hoydedata.no

### 3. NYE STORMFLOTALL FRA DSB (2016)

#### 3.1. Introduksjon

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) publiserte i 2016 en ny veileder for hvordan man skal ta hensyn til framtidig havnivåendring og stormflo i kommunal planlegging, "[Havnivåstigning og stormflo - samfunnssikkerhet i kommunal planlegging](#)". Tallene publisert i denne veilederen er presentert i dette kapitlet. Tallene er knyttet til ulike gjentaksintervall (20, 200 og 1000-år gjentaksintervall) og sikkerhetsklasser i forhold til TEK17 §7.2. DSB (2016) påpeker at beregningsmetoder for havnivå og stormflo har utviklet seg mye siden forrige DSB-rapport (2011).

For å beregne stormflonivå for de forskjellige sikkerhetsklassene i TEK17 §7.2 er først *dagens gjentaksintervall* for stormflo regnet ut basert på historiske vannstandsmålinger (Tabell 3-1). Deretter plusser man på havnivåstigning for å komme til anbefalte stormflosikre koter for kommunal planlegging (neste paragraf).

Stormflosikre koter for de ulike gjentaksintervallene er definert som:

Tabell 3-1: Dagens gjentaksintervall i Bergen (DSB, 2016)

Gjentaksintervall	Høyde (NN2000)
1000-års returnivå for stormflo (ref. DSB, 2016)	142 cm
200-års returnivå for stormflo (ref. DSB, 2016)	134 cm
20-års returnivå for stormflo (ref. DSB, 2016)	122 cm

De nye DSB tallene (DSB, 2016) er justert ned sammenlignet med de gamle tallene (DSB, 2011), se Tabell 3-2. En 100-års stormflonivå er 18 cm lavere med de nye tallene. En 20-års stormflo er 10 cm lavere. DSB (2016) og NCCS (2015) påpeker at metodene har forbedret seg og at de nye tallene er bedre enn de gamle tallene.

Tabell 3-2: Sammenligning av stormflokoter mellom DSB (2011) og DSB (2016)

Gjentaksintervall	Definert nivå dagens situasjon (NN2000) (DSB, 2016)	Gammel definert nivå dagens situasjon (DSB 2009, 2011) (omregnet til NN2000)
1000 år	142	174
200 år	134	159
100 år	131	149
50 år	128	Ikke definert
20 år	122	132
10 år	118	124
5 år	113	116

#### 3.2. Framskrivinger for framtidig havnivå

Tall som presenteres her er basert på NCCS (2005) rapporten «Sea Level Change for Norway - Past and Present Observations and Projections to 2100». Rapporten inneholder de offisielle tallene og er videre implementert i DSBs veileder (2016).

Havnivåendringen avhenger av hvor stort utslipp av klimagasser vi kommer til å ha fremover. Ulike utslippsscenarioer for klimagasser er beskrevet i den femte hovedrapporten til FNs klimapanel (IPCC), og tre av disse er vurdert:

- RCP2.6 innebærer drastiske utslippskutt allerede fra 2020
- RCP4.5 innebærer små endringer av utslipp fram til 2050 og deretter utslippskutt
- RCP8.5 innebærer at utslippene av klimagasser fortsetter å øke i dagens tempo

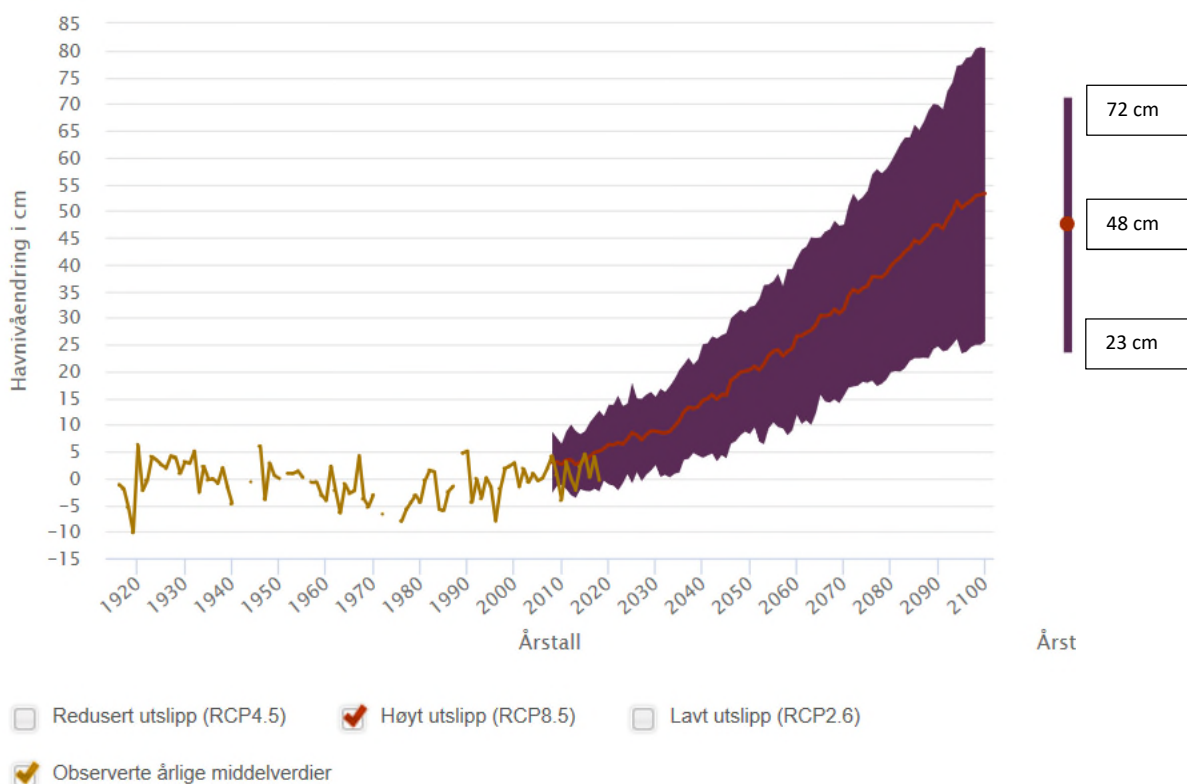
Tabell 3-3: Havnivåstigning i Bergen ved ulike utslippsscenarioer (NCCS, 2015) med 5% og 95% sikkerhetsintervall

Utslippsscenario / Periode	2041-2060	2081-2100	2100
Lavt utslipp (RCP2.6)	16 cm (4 – 28 cm)	23 cm (3 – 42 cm)	23 cm (2 – 45 cm)
Redusert utslipp (RCP4.5)	16 cm (5 – 27 cm)	31 cm (10 – 51 cm)	33 cm (11 – 55 cm)
Høyt utslipp (RCP8.5)	20 cm (8 – 33 cm)	48 cm (23 – 72 cm)	53 cm (26 – 80 cm)

Tabell 3-3 presenterer framskrivinger for framtidig havnivå for årene fram til 2100 sammenlignet med perioden 1996-2005. Tabellen viser framskrivingenes middelerverdier samt nedre og øvre grense (5 og 95 persentil) for det sannsynlige intervallet for havnivåendringene.

For framtidig havnivå har man brukt framskrivingens øvre del (95-persentilen) for utslippsscenario RCP8.5, og for perioden 2081-2100 relativt til 1986-2005. For Bergen gjelder da et tall av 72 cm havnivåstigning (DSB, 2016), se Figur 3-1.

Young & Ribal (2019) har nylig funnet at vindstyrke i oseaner har økt litt i perioden 1985-2018, særlig ekstremverdier. Det betyr at framtidig værvirkning på tidevannet kan bli høyere. Tidligere DSB rapporter har regnet med en økning i høyden på stormflo langs den sørvestlige delen av norskekysten på ca. 10cm fram mot 2100, grunnet økt stormaktivitet og –intensitet (DSB, 2011). I nye DSB-veilederen (2016) er det ikke tatt høyde for endring i værbidrag, istedenfor anbefaler DSB å bruke tallene fra høyt utslippsscenario RCP8.5 og framskrivingenes øvre del (95-persentilen) som klimapåslag. Ved å bruke 95-persentilen (72 cm) i stedet for middelerdien (48 cm), tar man i større grad høyde for usikkerheten knyttet til framtidig værbidrag og havnivåstigning, se Figur 3-1.



Figur 3-1: Beregnet havnivåstigning og usikkerhetsintervall med høyt utslipp scenario (RCP8.5), (Kilde: kartverket.no)

### 3.3. Anbefalte kotenivå for kommunal planlegging

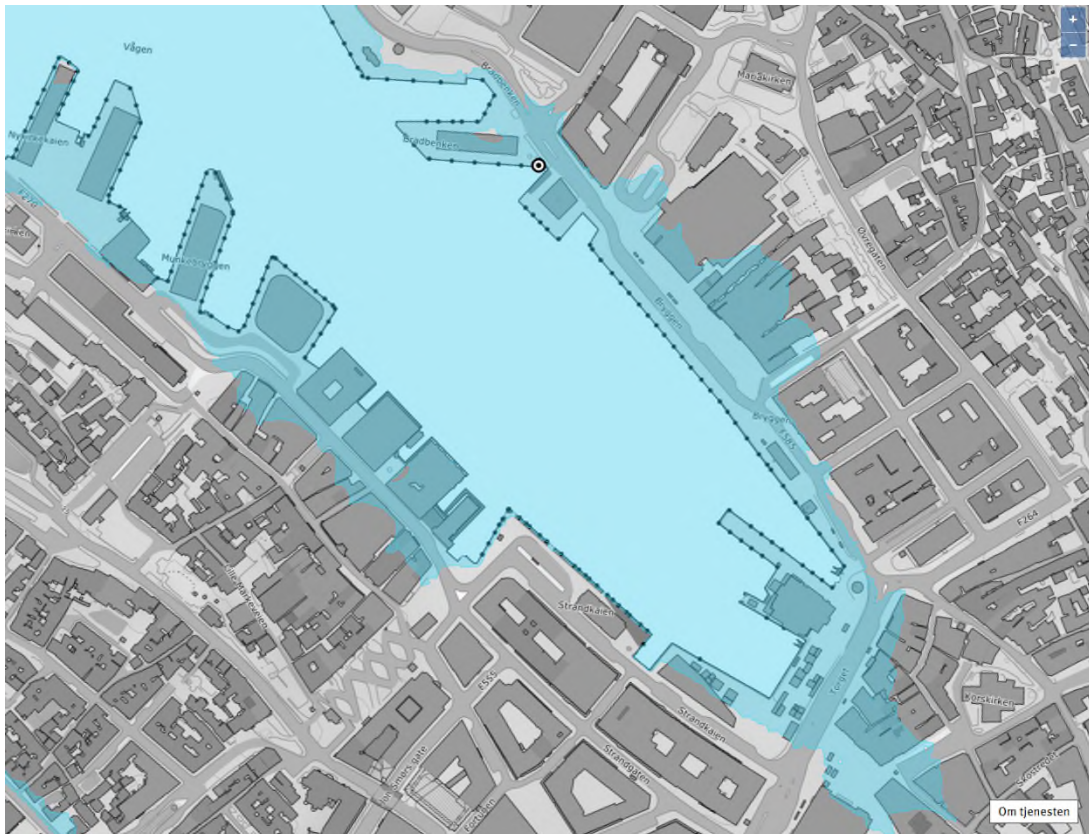
Dagens gjentaksintervall (Tabell 3-1) pluss 72 cm havnivåstigning utgjør tallene som er vist i Tabell 3-4. De er de offisielle tallene er vist for de ulike sikkerhetsklassene definert i TEK10/17 Byggeforskriften.

Tabell 3-4: Anbefalte stormflosikre koter for kommunal planlegging i Bergen (DSB, 2016)

Anbefalte tall fra DSB	Høyde (NN2000)
1000-års returnivå for stormflo (sikkerhetsklasse 3 i TEK10/17) med klimapåslag (ref. DSB, 2016)	<b>213 cm</b>
200-års returnivå for stormflo (sikkerhetsklasse 2 i TEK10/17) med klimapåslag (ref. DSB, 2016)	<b>206 cm</b>
20-års returnivå for stormflo (sikkerhetsklasse 1 i TEK10/17) med klimapåslag (ref. DSB, 2016)	<b>194 cm</b>

Videre anbefales det at tallene bør avrundes til nærmeste 10 cm før bruk.

Kartverket har et verktøy på [sehavniva.no](http://sehavniva.no) som viser oversvømt areal på grunn av stormflo ved dagens og fremtidig situasjon. Figur 3-2 viser oversvømt areal for en 200-års stormflo i fremtiden. Vedlegg A viser alle kartene med oversvømte areal for ulike gjentaksintervaller ved både dagens og fremtidig situasjon.



Figur 3-2: Oversvømt areal i Bergen sentrum (dagens terreng høyde) i 2090 ved en 200-års stormflo hendelse (kilde: sehavniva.no). Vannstand på kote 2,06m NN2000.

## 4. SAMMENFALL AV BØLGER OG STORMFLO

### 4.1. Introduksjon

Vindbølger oppstår som følge av friksjon mellom vind og havoverflate. Jo høyere vindhastighet jo høyere blir bølgene. Bølger blir i første instans generert i samme retning som vind, og jo mer åpen vannflate vinden kan blåse over jo høyere blir bølgene. Figur 4-1 viser høye bølger som slår inn på Skuteviken i Bergen under ekstremværet Nina i 2015. Det skjedde fordi sterke vindkast kom fra nordvestlig retning og bølger ble generert over flere kilometers lengde i Byfjorden.



Figur 4-1: Bølger på Skuteviken i ekstremværet Nina den 10. januar 2015 (Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=PhAn87F0ww0>)

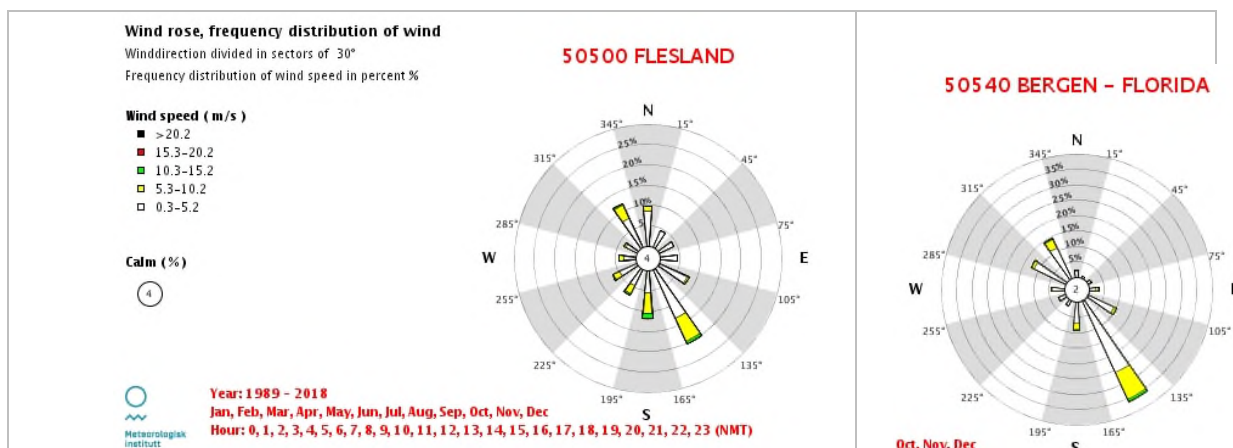
Bryggen og Torget ligger godt beskyttet fra Byfjorden og dermed kom ikke disse bølgene inn på Bryggen. Det betyr at bare lokalt oppståtte bølger i Vågen vil slå innover mot Bryggen. Tidligere har Vågen blir klassifisert i laveste bølgeklasse; klasse 1 (Meteorologisk Institutt, 2006) med en signifikant bølgehøyde på mellom 0 og 0,9m.

### 4.2. Teoretisk bølgehøyde og vindretning på Bryggen

Teoretisk kan man regne ut hvilken bølgehøyde Bryggen kan få med Bretsneiders formel. Her bruker man vindhastighet, vanndybde og lengde over åpent vann. Bølger som kommer loddrett på kaien er mest effektive, det betyr at lengden over åpent vann er ca. 200 meter og dybde er omtrent 8-9 meter. Maksimum målt vindhastighet i Florida er 22m/s. Ved bruk av Bretsneiders formel får vi da en signifikant bølgehøyde på 0,31 m.

Kritisk vindretning på Bryggen følger stort sett gjennom Bergensdalen i en nordvest-sørøstlig retning. Det vises klart i vindrose fra målestasjon Florida (Figur 4-2). Mens målestasjon Flesland kan få vind fra sørvestlige retning, er det veldig usannsynlig at det kommer kraftig vind på Bryggen fra sørvest. Det betyr at kraftig vindhastighet på Bryggen ikke kan komme fra en sørvestlig retning som dermed kan skape bølger på Bryggen.





Figur 4-2: Vindroser for Flesland og Florida (eklima.no)

#### 4.3. Teoretisk bølgehøyde og vindretning på Torget

Kaien ved Fisketorget og Zachariasbryggen ligger litt mer utsatt for bølger enn Bryggen. Ved nordvestlig vind kan lokalt genererte bølger slå inn mot kaien. Ved en lengde over åpent hav på ca. 800 m og en vindhastighet på 22 m/s blir teoretisk signifikant bølgehøyde ca. 0,55 m.

Her har vi følgende betraktninger:

- Under ekstremværet Nina (Figur B-5) var det mye vind fra nordvestlig retning som teoretisk kunne skapt bølger i Vågen som slår inn mot Torget. Maksimum vannstand opptrådte samtidig med minimum lavtrykk. Maksimum vindhastighet (>20 m/s i Florida) var 2 timer senere da vannstanden allerede hadde blitt lavere. Her var det ikke en forutsetning at høy vindhastighet opptrer samtidig med maksimum vannstand.
- Hvis bølger slår inn mot Fisketorget og Zachariasbryggen er det ikke sannsynlig at bølgene når bybanetraséen. Traséen ligger omtrent 30 meter fra kaikanten. Det kan forventes noe bølgeoppkylling på kaikanten, men med en teoretiske maksimum signifikant bølgehøyde på 0,55 m når det ikke til bybanetraséen. Derfor kan vi se bort fra bølger. Vær oppmerksom på at Fisketorget og Zachariasbryggen bør stenges under disse forholdene.

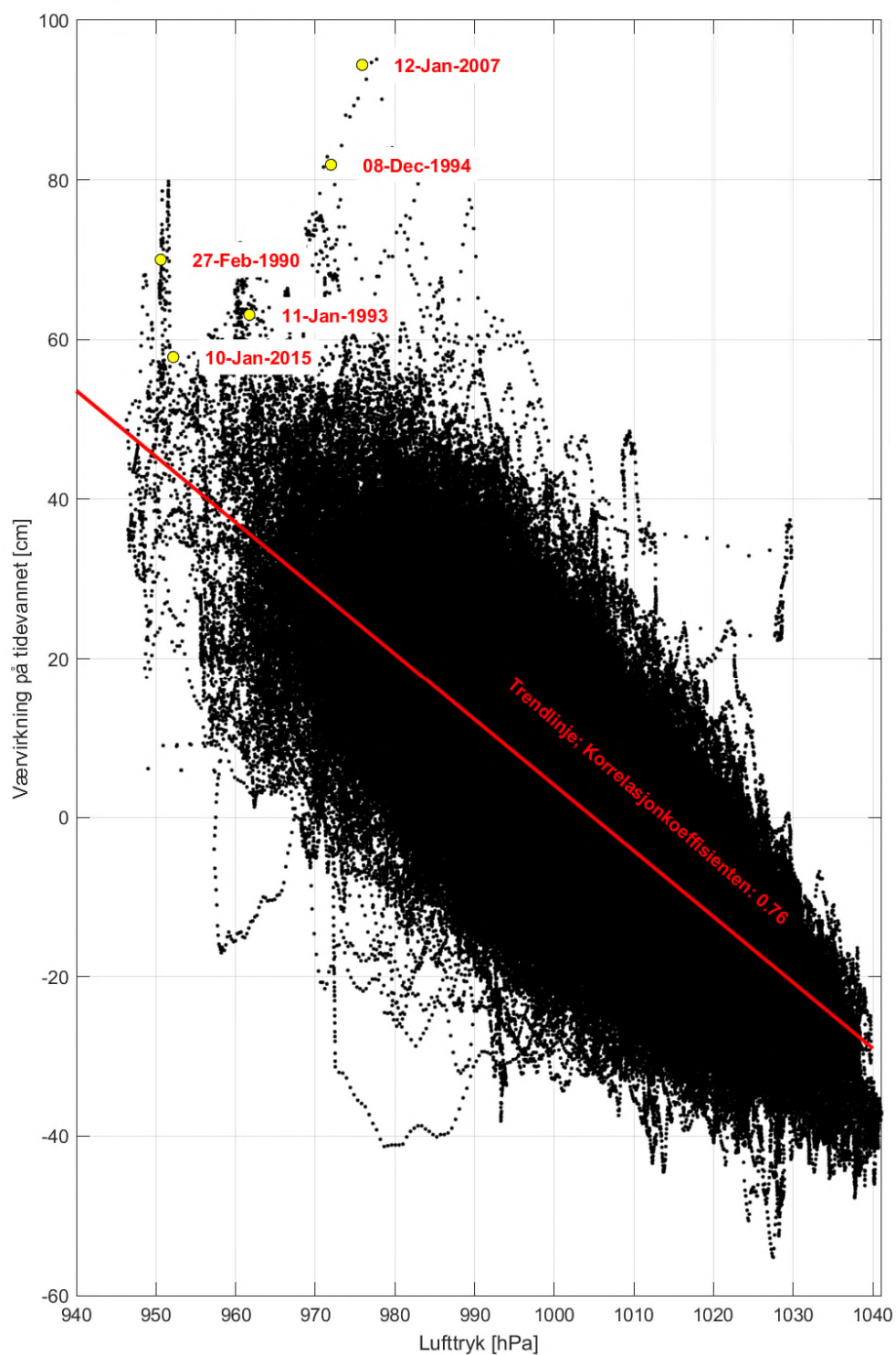
#### 4.4. Sammenfall av høy vind og høyeste vannstand

Vi ser litt mer nøyaktig på sammenfall av høy vind og stormflohendelser. Figur 4-3 viser sammenheng mellom lufttrykk og værvirkning på tidevannet over en 30-års periode. Det vises at lufttrykk og værvirkning har en klar sammenheng og følger stort sett tommelfingerregelen om at 1 hPa reduksjon i lufttrykk utgjør 1cm stigning i vannstand. Rød linje har en korrelasjonskoeffisient på 0,76, noe som betyr at det er en betydelig sammenheng mellom faktorene. Resten av spredningen rundt den røde linjen kan forklares med tidsforsinkelser siden det tar litt tid før vannstanden har innstilt seg etter at lufttrykket har senket/hevet seg. I tillegg kan spredningen forklares med vind som blåser vann inn mot kysten.

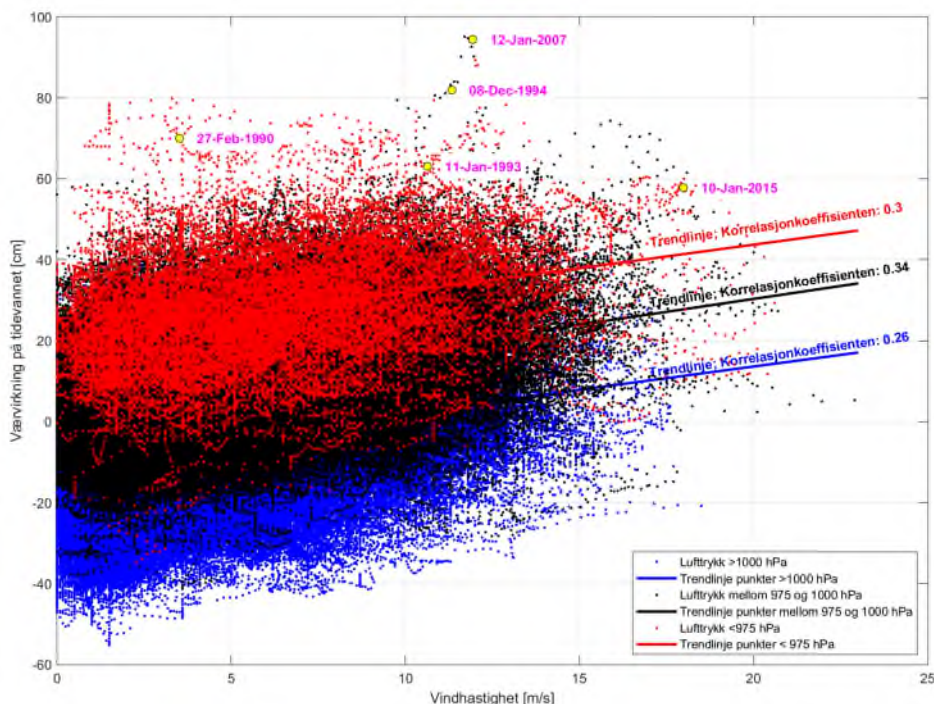
Vi kan også se mer nøyaktig på vind. Figur 4-4 viser sammenheng mellom vindhastighet på Flesland og værvirkning på tidevannet. Her lager vi 3 punktskyer: lavt lufttrykk (<975 hPa), medium lufttrykk (975-1000 hPa) og høyt lufttrykk (>1000 hPa). For de tre punktskyene beregnes det hver sin trendlinje og korrelasjonskoeffisient. Det viser seg at det er en svak korrelasjon mellom vindhastighet og værvirkning på tidevannet i Bergen

(korrelasjonskoeffisient rundt 0,3). Vi har også sett på sammenhengen mellom vindhastighet fra målestasjon Florida og værvirkningen på tidevannet, men korrelasjonskoeffisient blir da enda svakere. Analyse med vindretning ut noen sektorer ga heller ikke noen bedre korrelasjon.

Ut fra denne analysen kan vi konkludere med at høy stormflo stort sett er avhengig av et sammenfall av lavt lufttrykk og springflo. Høy vindhastighet i Bergen er ikke en forutsetning for høy stormflo. Under høyeste stormflo i februar 1990 var Bergen i midten av et kraftig lavtrykkssystem uten mye vind (den sterkeste vinden oppstår flere 100 km fra senteret av lavtrykkssystemet). Resten av Europa fikk mye vind med påfølgende store skader. Bergens Tidene den dato 1993 skrev politiet måtte stenge Bryggen på grunn av for mye folk, men ikke fordi forholdene var farlige. Under den kraftige stormflohendelsen i 1994 var det heller ikke nødvendig å stenge Bryggen for biltrafikk (Bergens Tidene).

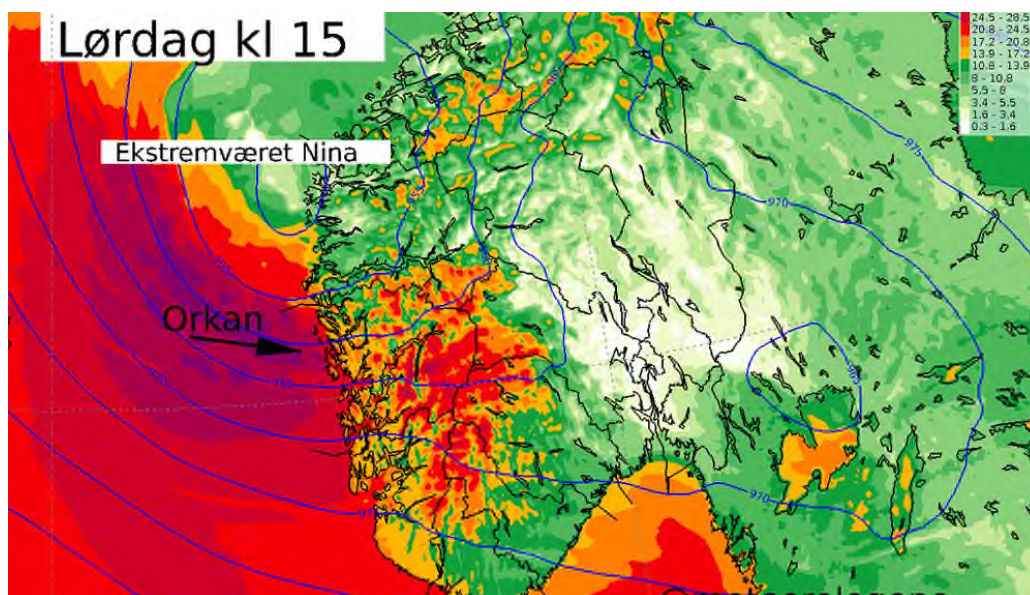


Figur 4-3: Punktdiagram for målt lufttrykk (Flesland) og værvirkning på tidevannet; periode 1989-2018 med intervall på 10 minutter. Gule punktene viser tilsvarende maksimum vannstand på angitte datoer.



Figur 4-4: Punktdiagram med målt vindhastighet (Flesland) og værvirkning på tidevannet; periode 1989-2018 med intervall på 10 minutter. De gule punktene viser tilsvarende maksimum vannstand på angitte datoer.

De høyeste stormfloene i Bergen har ingen vind, eller en havvind fra sør/sørvestlige retning. Det siste utgjør en ekstra vannforskyving mot kysten på grunn av jordens rotasjon (Ekman transport). Ekstremværet Nina (10. januar 2015) skapte høye bølger på Skuteviken på grunn av høy vindhastighet fra nordvestlig retning (Figur 4-5 og Figur B-5). Ved vind fra nordvestlig retning er det ingen ekstra vannforskyvning mot kysten, men heller Ekman transport vekk fra kysten. I tillegg lå stormens øye med laveste lufttrykk nord for Bergen (Figur 4-5). Det betyr at værvirkningen på tidevannet ikke ble så høy, selv om det var orkanvind på havet. Hendelsen er ikke innenfor de 15 høyeste målte vannstandene (Figur 2-2). Derfor er det sannsynlig at en storm med vind fra nordvestlig retning gjør at stormflovannstanden i Bergen ikke blir så høy.



Figur 4-5: Vindhastighet av Ekstremværet 'Nina' (<https://www.yr.no/artikkel/nina-kan-bli-orkan-1.12141944>).

#### 4.5. Konklusjon

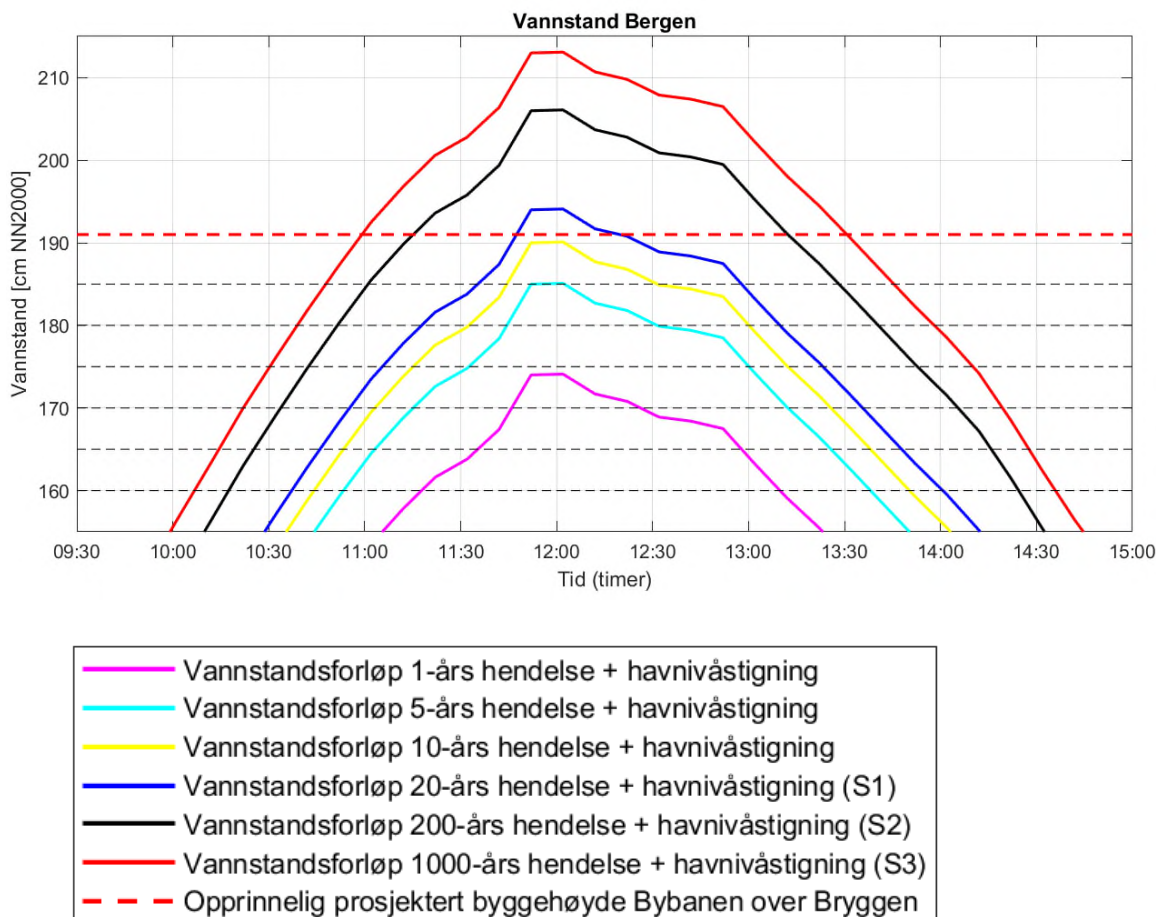
Vi kan neglisjere bølgepåvirkningen på Bryggen og Torget på grunn av:

1. Bryggen og Torget ligger godt beskyttet mot bølger fra Byfjorden, bare bølger som blir generert i Vågen kan slå inn mot Bryggen og Torget.
2. Det er ikke en forutsetning at det blåser mye i Bergen for at ekstrem stormflo skal opptre. Lavt lufttrykk er mye viktigere for værvirkning på tidevannet. Sannsynligheten for sammenfall av høy vind (i en retning som kan generere bølger) og høy stormflo er veldig lav.
3. Vindretning på Bryggen er stort sett nordvest – sørøst, som ikke kan generere store bølger mot Bryggen.
4. Bybanetraséen på Torget ligger ca. 30m fra kaikanten. Bølger som slår inn mot kaikanten vil ikke nå traséen.
5. Bildene fra tidligere stormflohendelser på Bryggen bekrefter at det var (nesten) ingen bølger. Bryggen og veien ble aldri stengt på grunn av farlige forhold.

## 5. Andre betraktninger

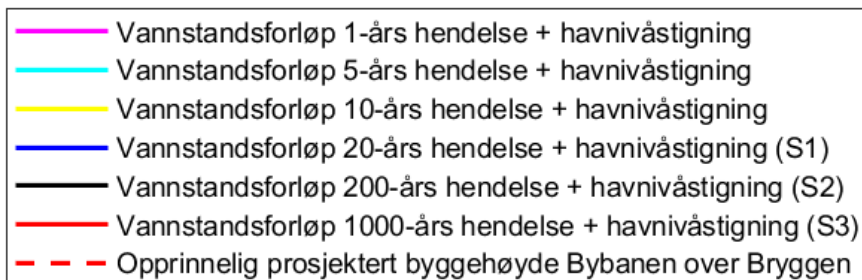
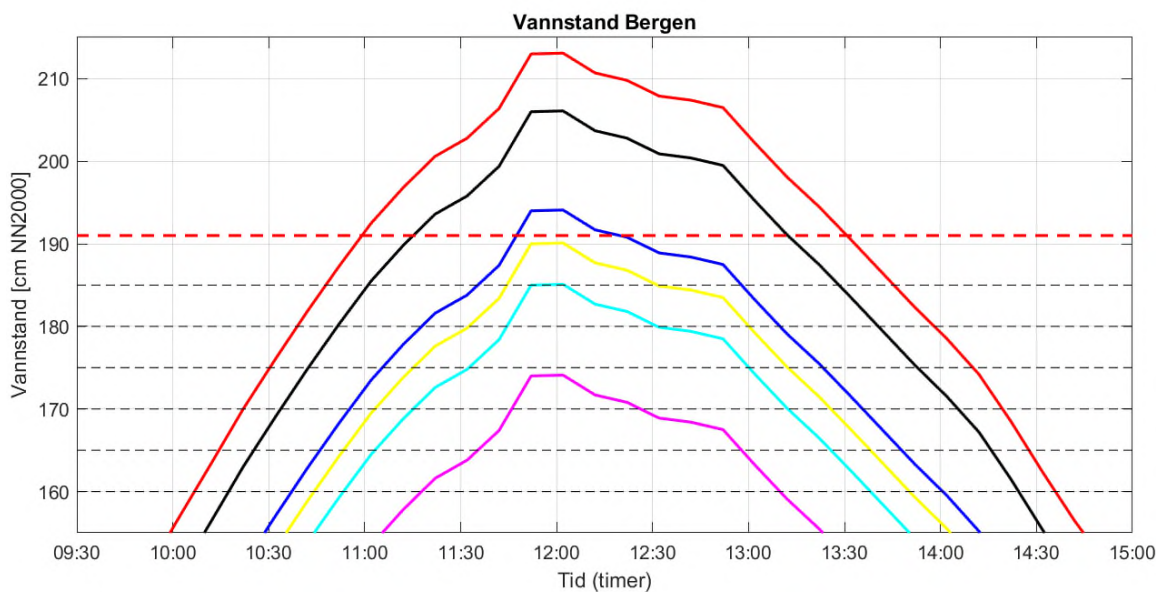
### 5.1. Varighet av stormflo hendelser

Med hensyn til stenging av Bybanen under en stormflohendelse er varigheten en viktig faktor.



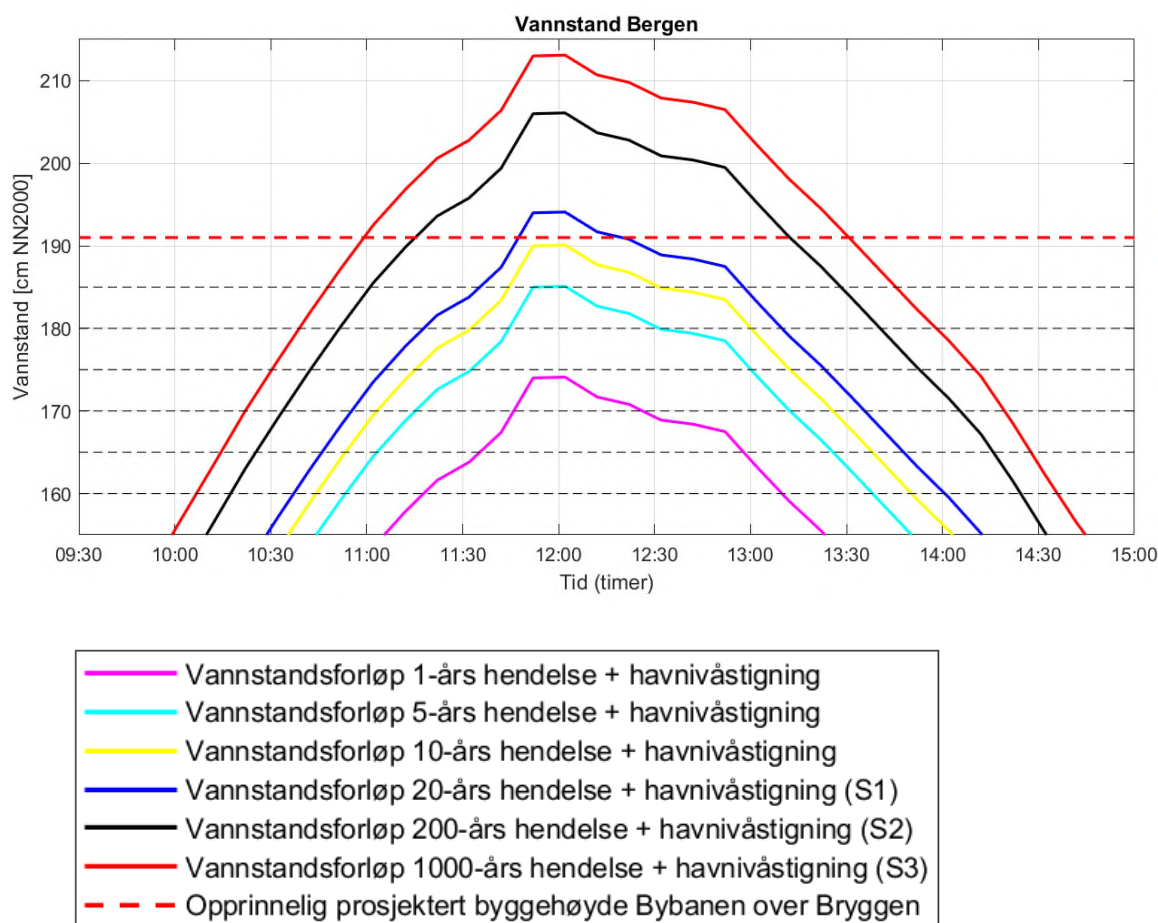
Figur 5-1 viser mulige vannstandsforløp basert på skalering av stormflohendelsen i 1990 (Vedlegg B, Figur B-1). Vi legger til havnivåstigningen på den målte vannstanden til de definerte gjentaksintervallene med klimapåslag (Tabell 3-4). Dette kan ses som et estimat på varighet under en fremtidig stormflohendelse.

Hvis vi tar utgangspunkt i konsekvensutredningens (2013) anbefalte høyde for bybanetraséen over Bryggen (191 cm NN2000), viser



Figur 5-1 at en 20-års hendelse har en varighet på omtrent 32 minutter der vannstanden er over kote 1,91 moh. En 200-års stormflohendelse har her en varighet på omtrent 2 timer, mens en 1000-års hendelse har en varighet på omtrent 2,5 timer over kote 1,91 moh. Lavere gjentakelsesintervaller vises også.

Man må se disse tallene som et estimat på varighet siden stormflohendelser kan ha ulike forløp. Dessuten kan det ta noe tid før alt vannet har rennet av til sjøen igjen.



Figur 5-1: Estimert vannstandsforløp for 20-, 200- og 1000-års stormflohendelser; vannstandsforløp basert på 1990 stormflo hvor havnivåstigning er lagt til den definerte høyden på disse hendelsene;

## 5.2. Stormflo i resten av Bergen sentrum

Resten av Bergen sentrum er også utsatt for stormflo og fremtidig havnivåstigning. Vi gjentar konklusjonen i Norconsults rapport (2012):

«Når prognosene for havnivåøkning og stormflonivåer slår til, vil dette ha alvorlige og omfattende konsekvenser for store deler av Bergen sentrum, mht bebyggelse og infrastruktur. Dette vil kreve overordnede løsninger for hele Bergen sentrum. Det er da et spørsmål om bybanen skal planlegges som del av Bergen sentrum, eller «alene», i forhold til DSBs modell»

Avslutningsvis kan det nevnes at Bryggen også stenges under arrangementer (f.eks. 17. mai og Tall Ships races).



## 6. KONKLUSJON

Den tidligere Norconsultrapporten anbefaler en stormflosikker kote på 2,0 m NN1954 over Bryggen. Hvis vi bruker NN2000 høydesystem tilsvarer det 1,91m NN2000.

Forutsetninger og beregningsmetoder for tallene fra den tidligere Norconsultrapporten har endret seg. DSBs framskrivninger (2016) bruker nå andre og bedre metoder enn tidligere. DSBs metode tar utgangspunkt i dagens gjentakintervall for stormflo og legger til havnivåstigning forventet for år 2100.

Dagens gjentakintervall har lavere definerte nivåer enn før (2009): En 20-års hendelse er definert 10 cm lavere og en 100-års hendelse er 18 cm lavere.

For Bergen er beregnet havnivåendring gjennomsnittlig 48 cm i 2100. DSB påpeker at det er mye usikkerheter knyttet til CO<sub>2</sub>-utslipp, havnivåstigning, endret klima og ekstrem stormflo, og anbefaler derfor å legge til grunn 95 persentil konfidensintervall av høyeste utslipps-scenario i IPCC rapporten, og bruke dette tall for kommunal planlegging for å ta høyde for usikkerheten knyttet til havnivåstigningstallene. Dette gir da en havnivåstigning på 72 cm i 2100. Eventuelle bølgepåvirkninger kommer i tillegg.

DSB (2016) sine stormflosikre koter for Bergen er oppsummert i Tabell 6-1 (uten bølger). Videre anbefales DSB at tallene oppgitt bør rundes av til nærmeste 10 cm før bruk. Dessuten er varigheten av stormflo gitt for ulike gjentakintervaller og høyder.

*Tabell 6-1: Anbefalte stormflosikre koter (DSB, 2016) og estimert varighet av stormflo periode for Bergen for ulike gjentakintervaller i 2100 og høyder (NN2000).*

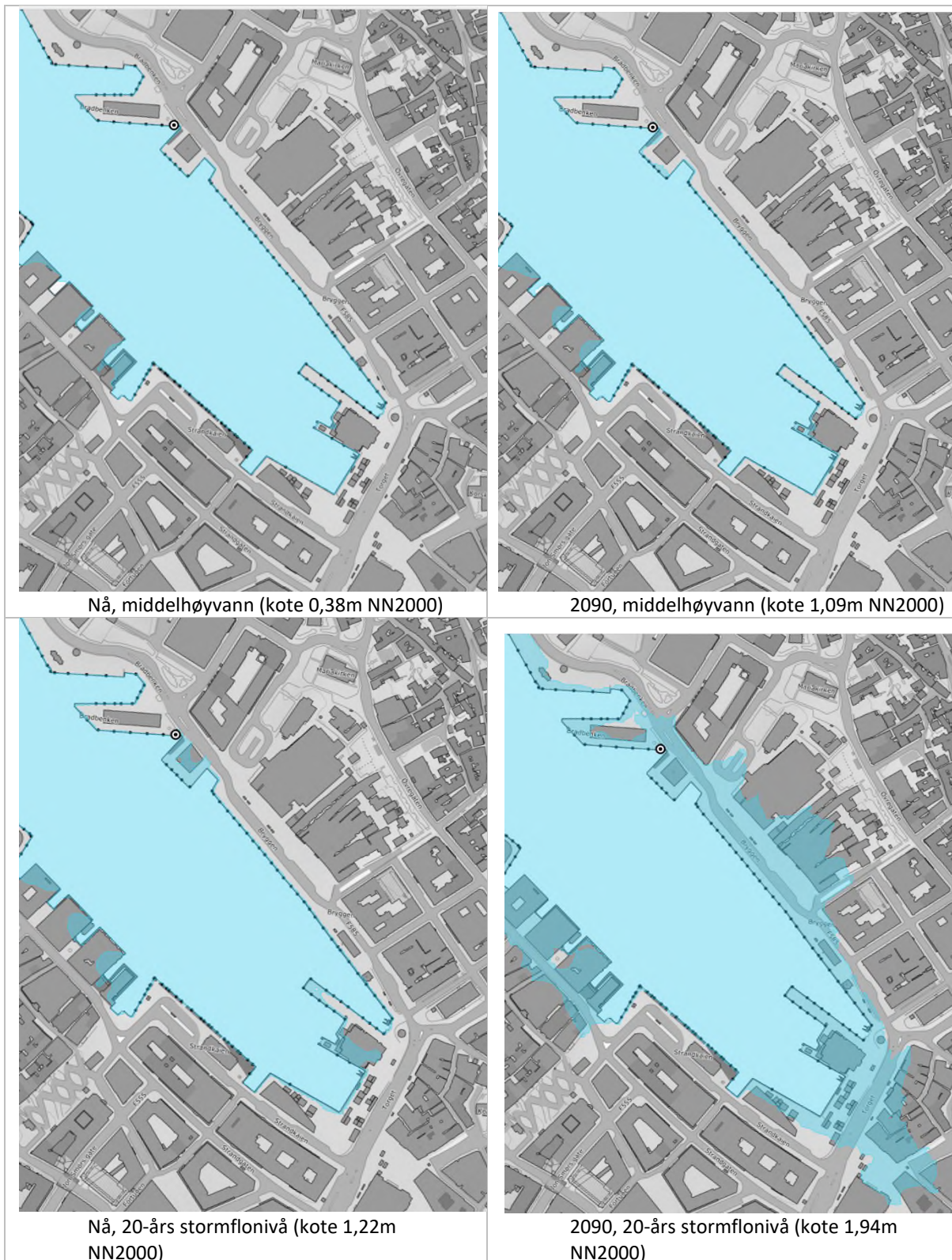
Returperiode stormflo	Maks. vannstand	Estimert varighet over høyde 171 cm	Estimert varighet over høyde 181 cm	Estimert varighet over høyde 186 cm	Estimert varighet over høyde 191 cm	Estimert varighet over høyde 200 cm
1 år	<b>174 cm</b>	0t 32m	-	-	-	-
5 år	<b>185 cm</b>	1t 52 m	0t 41m	-	-	-
10 år	<b>190 cm</b>	2t 18m	1t 22m	0t 41m	-	-
20 år (DSB sikkerhetsklasse 1)	<b>194 cm</b>	2t 36m	1t 47m	1t 17m	0t 32m	-
200 år (DSB Sikkerhetsklasse 2)	<b>206 cm</b>	3t 28m	2t 45m	2t 22m	1t 57m	1t 04m
1000 år (DSB Sikkerhetsklasse 3)	<b>213 cm</b>	3t 54m	3t 15m	2t 53m	2t 31m	1t 47m

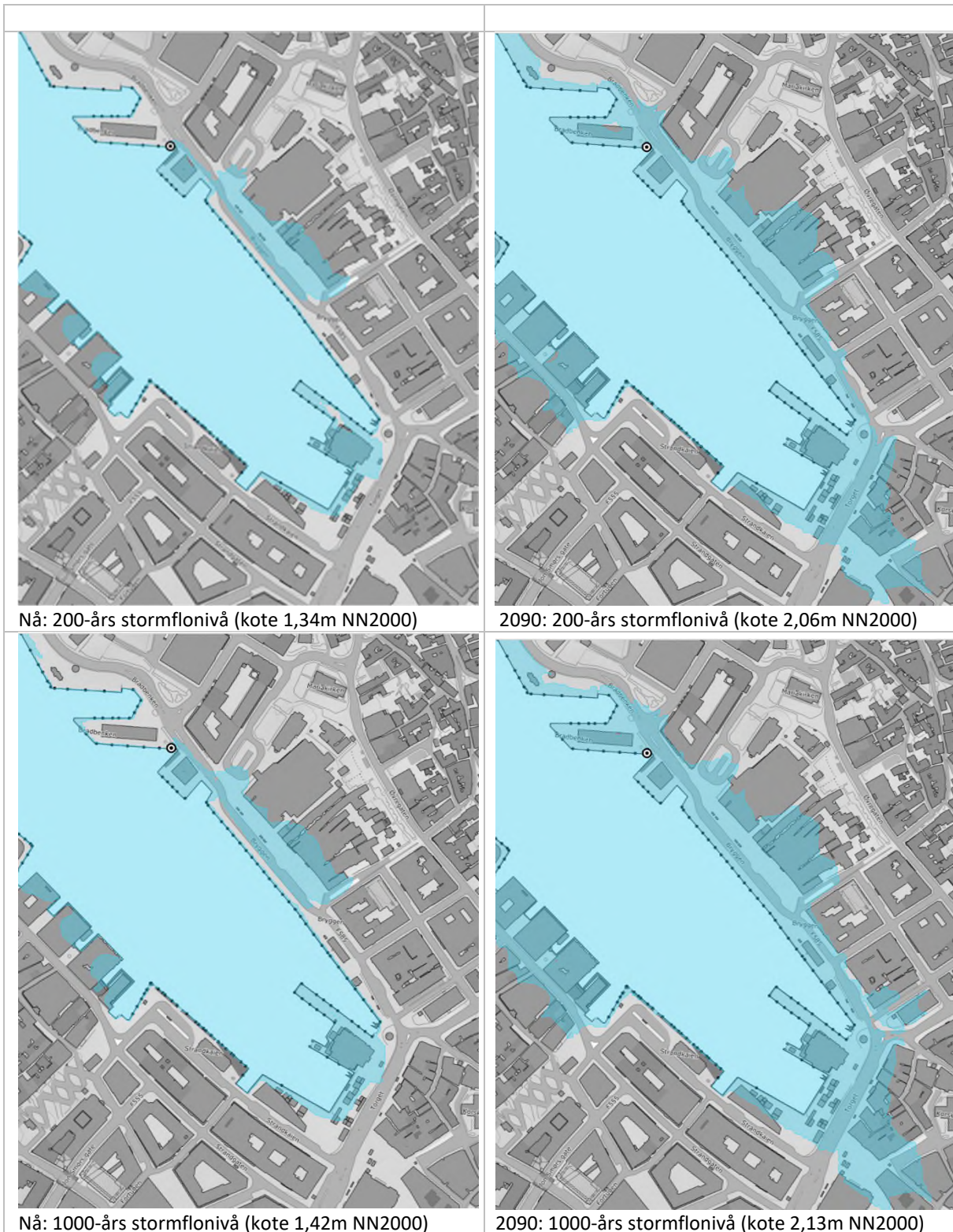
Vi kan neglisjere bølgepåvirkningen på Bryggen på grunn av:

1. Bryggen og Torget ligger godt beskyttet mot bølger fra Byfjorden, bare bølger som blir generert i Vågen kan slå inn mot Bryggen og Torget.
2. Det er ikke en forutsetning at det blåser mye i Bergen for at ekstrem stormflo skal opptre. Lavt lufttrykk er mye viktigere for værvirkning på tidevannet. Sannsynligheten for sammenfall av høy vind (i en retning som kan generere bølger) og høy stormflo er veldig lav.
3. Vindretning på Bryggen er stort sett nordvest – sørøst, som ikke kan generere store bølger mot Bryggen.
4. Bybanetraséen på Torget ligger ca. 30m fra kaikanten. Bølger som slår inn mot kaikanten vil ikke nå traséen.
5. Bildene fra tidligere stormflohendelser på Bryggen bekrefter at det var (nesten) ingen bølger. Bryggen og veien ble aldri stengt på grunn av farlige forhold.

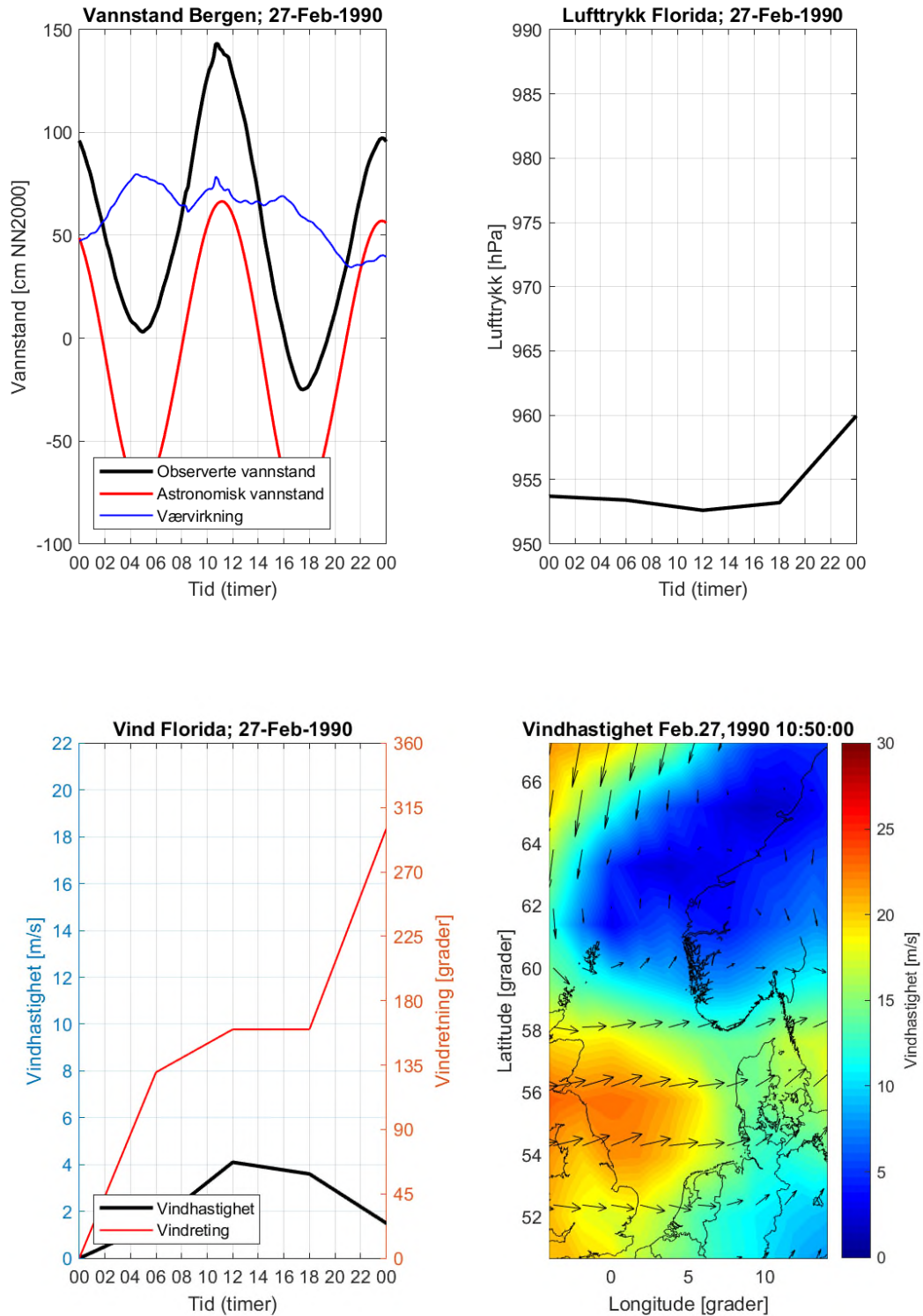
## Kilder

- DSB, 2009, Havnivåstigning, estimater av framtidig havnivåstigning i norske kystkommuner, revidert utgave (2009).
- DSB, 2011, Håndtering av havnivåstigning i kommunal planlegging
- DSB, 2016, Havnivåstigning og Stormflo, samfunnssikkerhet i kommunal planlegging
- Gjevik, B., 2009, Flo og fjære, langs kysten av Norge og Svalbard, Farleia Forlag.
- Meteorologisk institutt, 2006, Vurdering a ekstremverdier av vannstand og bølgehøyder langs sjølinjen i Bergen kommune
- Norconsult, 2012, Havnivåstigning og Bybanen over Torget, Bryggen og Sandviken
- Norconsult, 2012, Havnivåstigning og Bybanen over Torget, Bryggen og Sandviken, Ny rapport fra Bjerknessenteret
- Norconsult, 2013, Konsekvensutredning Bybanen Bergen sentrum – Åsane. Supplerende utregninger om havnivåstigning
- NCCS, 2015, Sea Level Change for Norway, NCCS report 1/2015
- Richter, K., Nilsen, J.E.Ø., Drange, H., 2012, Contributions to sea level variability along the Norwegian Coast for 1960-2010. Journal of Geophysical Research 117, C05038, <https://doi.org/10.1029/2011JC007826>
- Young, I.R., Ribal, A., 2019, Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, Science Vol 364, Issue 6440, pp. 548-552, <https://doi.org/10.1126/science.aav9527>

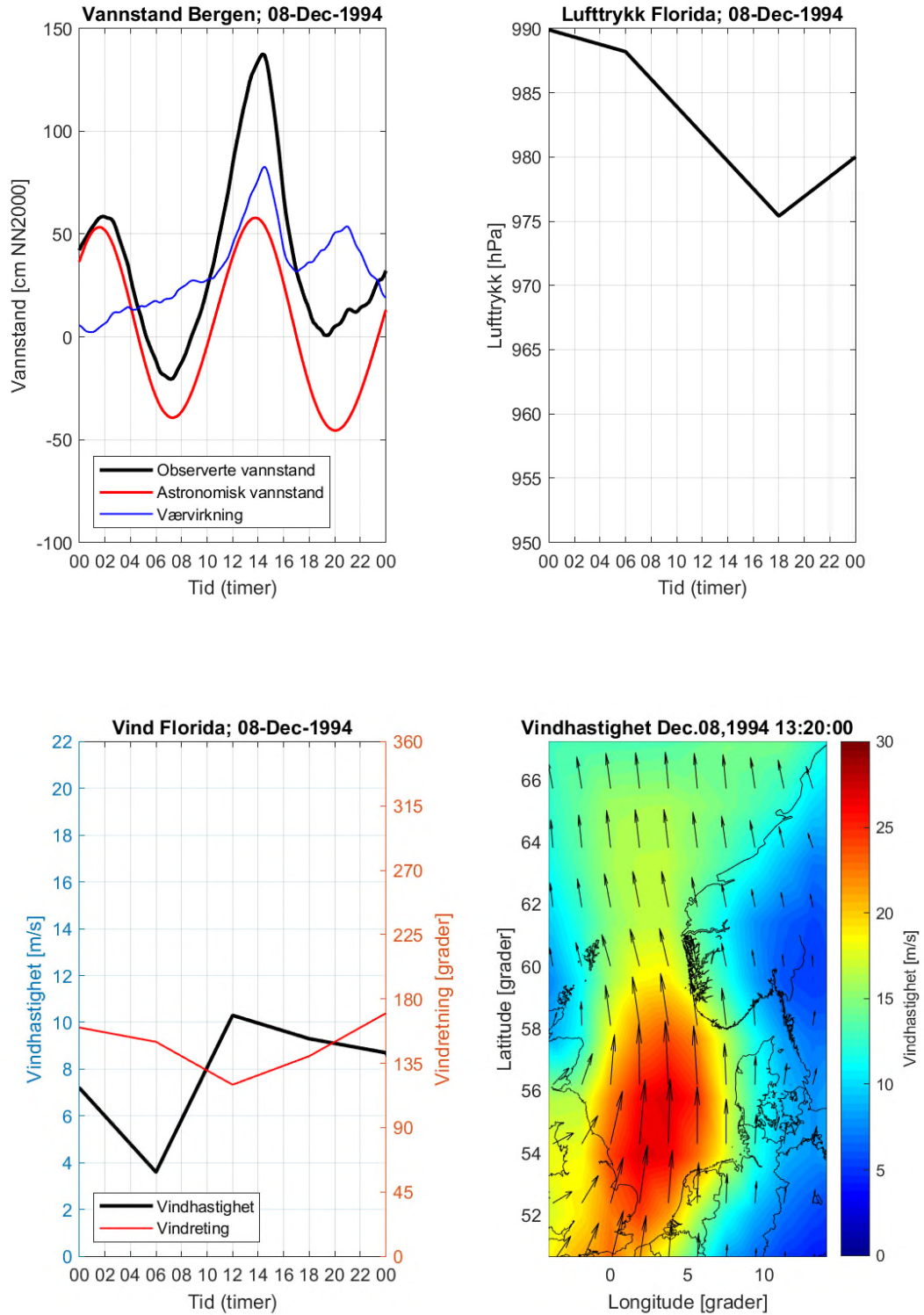
**VEDLEGG A: KART MED OVERSVØMT AREAL rundt Bryggen og Vågen**Kilde: <https://kartverket.no/sehavniva/se-havniva-i-kart>



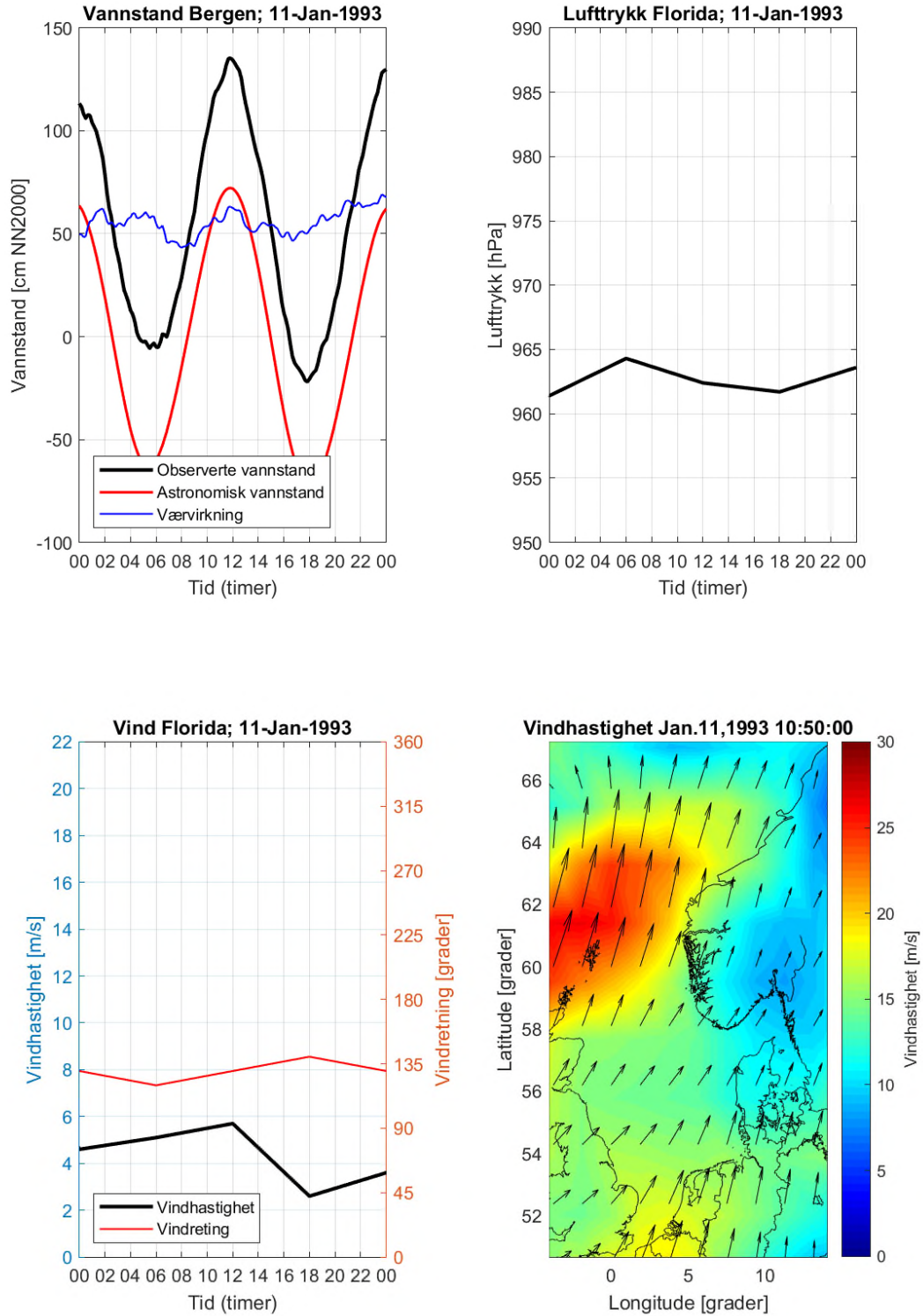
## VEDLEGG B: DETALJERT VANNSTAND OG METEO FOR 5 OBSERVERTE STORMFLOHENDELSER VED BRYGGEN



Figur B-1: Detaljerte vannstand og meteorologiske forhold 27. feb. 1990

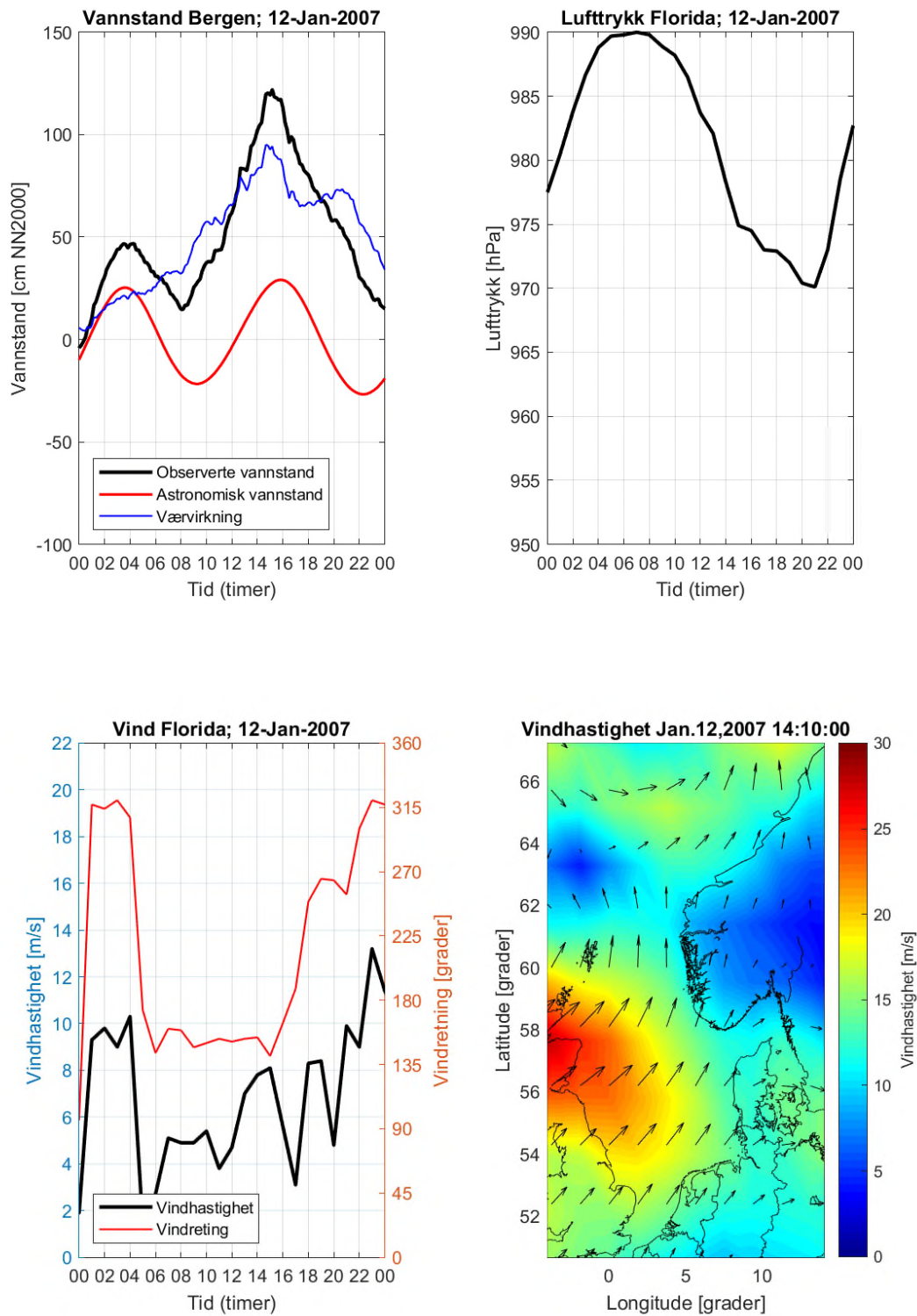


Figur B-2: Detaljert vannstand og meteo 8. des. 1994

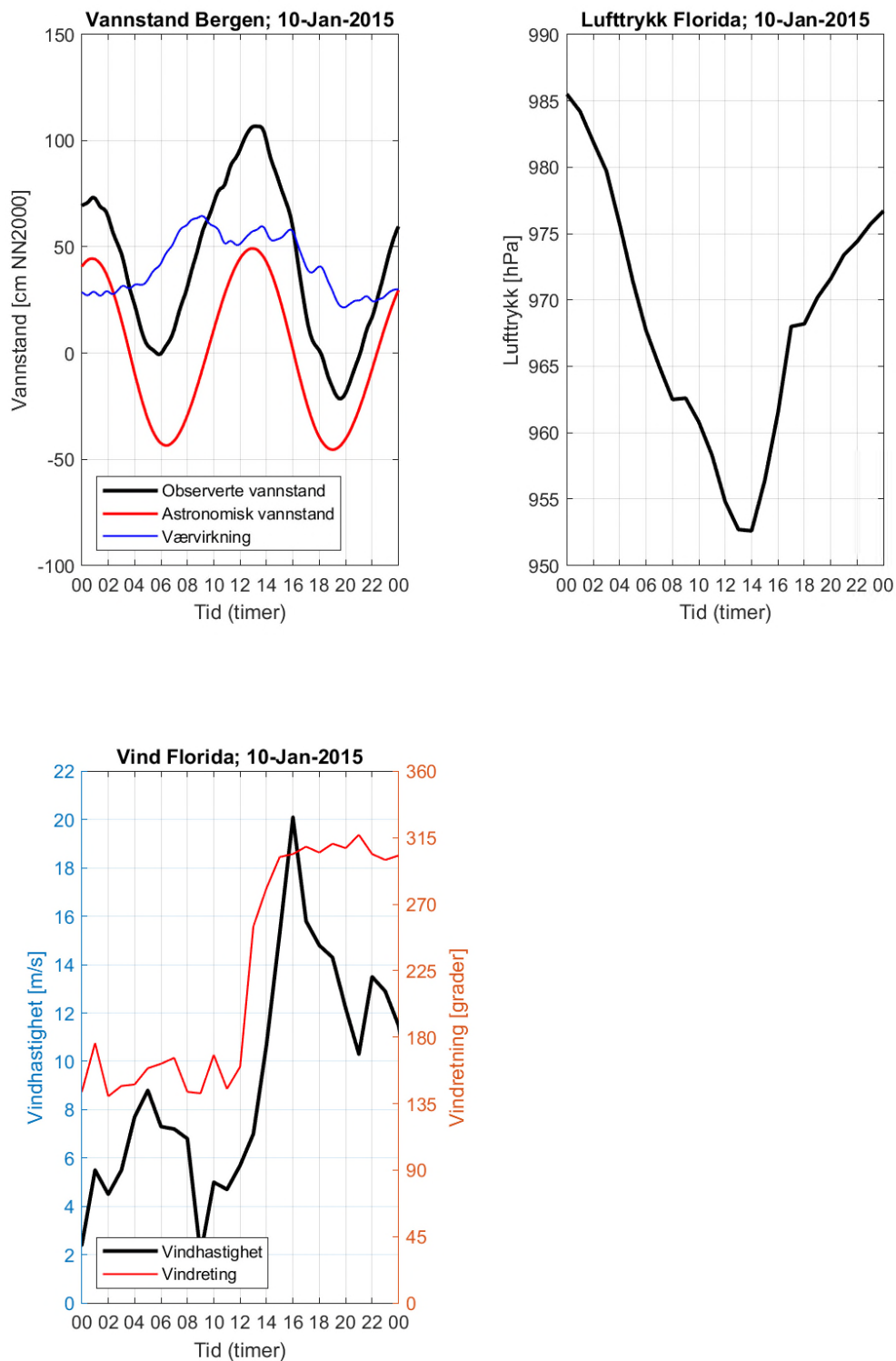


Figur B-3: Detaljerte vannstand og meteorologi 11. jan. 1993



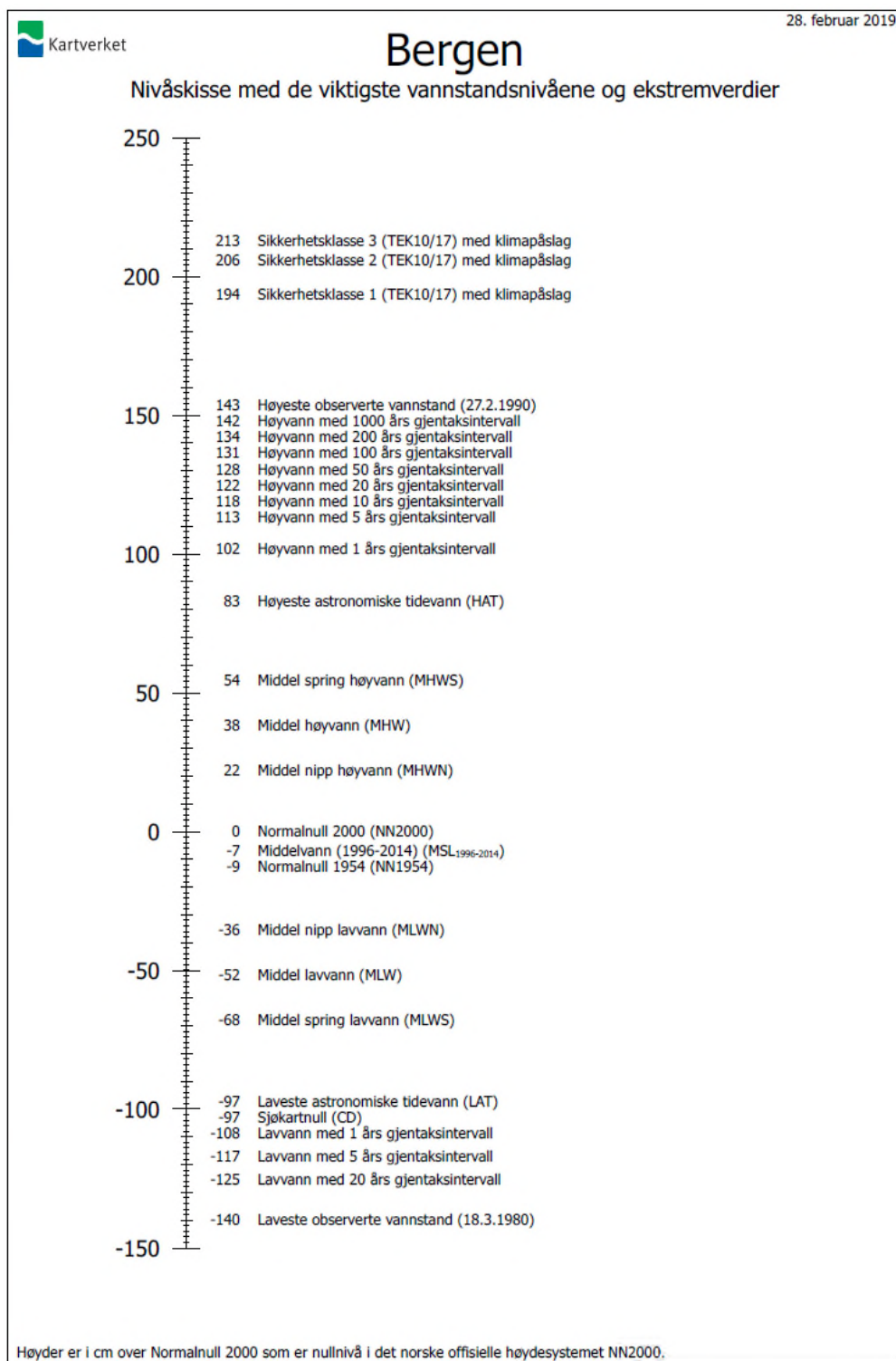


Figur B-4: Detaljerte vannstand og meteorologi 12. jan. 2007



Figur B-5: Detaljerte vannstand og meteorologi 10. jan. 2015

## VEDLEGG C: Nivåskisse med de viktigste vannstands nivåene og ekstremverdier i Bergen (kartverket.no)



## VEDLEGG D: BEGREPSFORKLARING

Kilde: [sehavniva.no](http://sehavniva.no)

### Laveste observerte vannstand (LOWL)

Den laveste observerte vannstanden for denne målestasjonen. Kombinasjonen av lavt tidevann og værrets virkning (vind, lufttrykk og temperatur) kan resultere i ekstra lav vannstand.

### Lavvann med 20 års gjentakintervall (20YMIN)

Statistiske beregninger av hvor hyppig et ekstremt lavvann av en viss størrelse vil opptre. I gjennomsnitt når lavvannet dette nivået en gang i løpet av gjentakintervallet. Det betyr at et ekstremt lavvann med for eksempel 50 års gjentakintervall i gjennomsnitt vil opptre en gang per 50 år. Gjentakintervall kalles også returperiode.

### Sjøkartnull (CD)

Nullnivå for dybder i sjøkart og høyder i tidevannstabellen. Sjøkartnull er fra 1. januar 2000 lagt til laveste astronomiske tidevann (LAT). Langs Sørlandskysten og i Oslofjorden er tidevannsvariasjonene små i forhold til værrets virkning på vannstanden (vind, lufttrykk og temperatur). Sjøkartnull er derfor av sikkerhetsmessige grunner lagt 20 cm lavere enn LAT langs kysten fra svenskegrensen til Utsira og 30 cm lavere enn LAT i indre Oslofjord (innenfor Drøbaksundet).

### Laveste astronomiske tidevann (LAT)

Laveste mulige vannstand under midlere meteorologiske forhold, det vil si uten påvirkning fra blant annet vind, lufttrykk og temperatur. I praksis bestemmes LAT ved å lage tidevannstabeller for 19 år og plukke ut det laveste tidevannet. Tidevannet har blant annet en periode på 18,6 år.

### Middel spring lavvann (MLWS)

Gjennomsnittet av observerte lavvann omkring ny- eller fullmåne (springperiode). I praksis brukes harmoniske konstanter som en tilnærming. I tiden omkring ny- eller fullmåne vil tidevannsamplitudene øke siden tidevannskreftene fra sol og måne virker i samme retning. Dette fører til lavere lavvann enn ellers.

### Middel lavvann (MLW)

Gjennomsnittet av alle observerte lavvann i en periode på 19 år. Kartverket bruker middelvann minus amplituden til den harmoniske konstituenten M2 som en god tilnærming.

### Middel nipp lavvann (MLWN)

Gjennomsnittet av observerte lavvann i tiden omkring halvmåne (nipperiode). I praksis brukes harmoniske konstanter som en tilnærming. Ved halvmåne, når månen er i første eller tredje kvarter, vil tidevannsamplituden bli mindre siden tidevannskreftene fra sol og måne motvirker hverandre. Dette fører til høyere lavvann enn ellers.

### Normalnull 1954 (NN1954)

Nullnivå i og navn på det nasjonale høydesystemet fra 1954 som fortsatt er i bruk i Norge. Normalnull 1954 (NN1954) er også fysisk knyttet til et bestemt fastmerke ved Tregde vannstandsmåler (nær Mandal). Høyden på dette fastmerket er basert på en utjevning fra 1954 av middelvannstandsberegningene for vannstandsmålerne i Oslo, Nevlunghavn, Tregde, Stavanger, Bergen, Kjølisdal og Heimsjø. NN1954 avløses innen år 2017 av Normalnull 2000 (NN2000).

### Middelvann (1996-2014) (MSL)

Gjennomsnittlig høyde av sjøens overflate på et sted over en periode på 19 år. Middelvann beregnes som gjennomsnittet av vannstandsobservasjoner foretatt med faste tidsintervall - fortrinnsvis over en periode på 19 år. Dagens middelvann er beregnet over perioden 1996-2014.

### Normalnull 2000 (NN2000)

Nullnivå i det norske offisielle høydesystemet NN2000

**Middel nipp høyvann (MHWN)**

Gjennomsnittet av observerte høyvann i tiden omkring halvmåne (nipperiode). I praksis brukes harmoniske konstanter som en tilnærming. Ved halvmåne, når månen er i første eller tredje kvarter, vil tidevannsamplituden bli mindre siden tidevannskreftene fra sol og måne motvirker hverandre. Dette fører til lavere høyvann enn ellers.

**Middel høyvann (MHW)**

Gjennomsnittet av alle observerte høyvann i en periode på 19 år. Kartverket bruker middelvann pluss amplituden til den harmoniske konstituenten M2 som en god tilnærming.

**Middel spring høyvann (MHWS)**

Gjennomsnittet av observerte høyvann i tiden omkring ny- eller fullmåne (springperiode). I praksis brukes harmoniske konstanter som en tilnærming. I tiden omkring ny- eller fullmåne vil tidevannsamplitudene øke siden tidevannskreftene fra sol og måne virker i samme retning. Dette fører til høyere høyvann enn ellers.

**Perigeumsstormflo**

Stor springflo ved full eller nymåne når månen samtidig er nær jorden.

**Høyeste astronomiske tidevann (HAT)**

Høyeste mulige vannstand under midlere meteorologiske forhold, det vil si uten påvirkning fra blant annet vind, lufttrykk og temperatur. I praksis bestemmes HAT ved å lage tidevannstabeller for 19 år og plukke ut det høyeste tidevannet. Tidevannet har blant annet en periode på 18,6 år.

**Høyeste observerte vannstand (HOWL)**

Den høyeste observerte vannstanden for denne målestasjonen. Dette er summen av tidevannet og værrets virkning (vind, lufttrykk og temperatur) på dette tidspunktet. Effekten av eventuelle vindbølger vil komme i tillegg.

**Sikkerhetsklasse 1 (TEK10/17) med klimapåslag (SAFE1)**

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap har i 2016 anbefalt at for planleggingsformål som faller inn under Sikkerhetsklasse 1 i TEK10 (og TEK17), skal man bruke returnivå for stormflo med 20-års returnivå og legge til et klimapåslag. Klimapåslaget er anbefalt å være tallene fra RCP8.5 fra rapporten fra FNs klimapanel (2013) for årene 2081-2100 og framskrivningenes 95-persentil.

**Sikkerhetsklasse 2 (TEK10/17) med klimapåslag (SAFE2)**

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap har i 2016 anbefalt at for planleggingsformål som faller inn under Sikkerhetsklasse 2 i TEK 10 (og TEK17), skal man bruke returnivå for stormflo med 200-års returnivå og legge til et klimapåslag. Klimapåslaget er anbefalt å være tallene fra RCP8.5 fra rapporten fra FNs klimapanel (2013) for årene 2081-2100 og framskrivningenes 95-persentil.

**Sikkerhetsklasse 3 (TEK10/17) med klimapåslag (SAFE3)**

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap har i 2016 anbefalt at for planleggingsformål som faller inn under Sikkerhetsklasse 3 i TEK 10 (og TEK17), skal man bruke returnivå for stormflo med 1000-års returnivå og legge til et klimapåslag. Klimapåslaget er anbefalt å være tallene fra RCP8.5 fra rapporten fra FNs klimapanel (2013) for årene 2081-2100 og framskrivningenes 95-persentil.