

**DANMARKS METEOROLOGISKE  
INSTITUT**

**— TEKNISK RAPPORT —**

**02-19**

**Verifikation af vandstandsprognoser:  
2001**

**Jacob Woge Nielsen**



**København 2002**

**ISSN 0906-897X (trykt)**  
**ISSN 1399-1388 (online)**

# **Verifikation af vandstandsprognoser: 2001**

**Jacob Woge Nielsen**  
**e-mail: [jw@dmi.dk](mailto:jw@dmi.dk)**

**Danmarks Meteorologiske Institut, København, Danmark**

# Indhold

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Stormflodsvarslingssystemet DKSS98</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Data</b>	<b>6</b>
3.1	Observationer . . . . .	6
3.2	Prognoser . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Fejlmål</b>	<b>9</b>
4.1	Residual . . . . .	9
4.2	Spidsfejl . . . . .	9
4.3	Succesrater . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Resultater</b>	<b>11</b>
5.1	Nøgletal . . . . .	11
5.2	Prognoselængden . . . . .	11
5.3	Succesrater . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Sammenligning med forudgående år</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Konklusion</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Appendices</b>	<b>15</b>
8.1	A - stationsliste . . . . .	16
8.2	B - observeret statistik . . . . .	17
8.3	C - nulpunktskorrektioner . . . . .	18
8.4	D - beregningsmetoder . . . . .	19
8.5	E - stationsstatistik (HIR) . . . . .	21
8.6	F - stationsstatistik (UKM) . . . . .	22
8.7	G - Højvande og prognosefejl (HIR) . . . . .	23
8.8	H - Højvande og prognosefejl (UKM) . . . . .	30

# 1 Introduktion

I denne rapport verificeres DMIs operationelle vandstandsprognoser for 2001. Prognoserne er beregnet med DMIs stormflodsvarslingssystem *DKSS98*, og kan ses hver dag på DMIs Internetside <http://www.dmi.dk/vejr> under *Vandstand*.

Prognoserne sammenlignes med den observerede vandstand ved en række danske kyststationer. Der beregnes statistiske fejlmål for hver station, og nøgletal ved at midle over samtlige stationer. Prognoser for de højeste højvande undersøges særskilt, og der beregnes en succesrate til brug for DMIs resultatkontrakt.

Stormflodsvarslingssystemet *DKSS98* har været i brug siden efteråret 1999. Kernen udgøres af havmodellen *Mike21*, som er udviklet af "DHI - Institut for Vand og Miljø"(DHI) og venligst stillet til rådighed til brug for DMIs stormflodsvarsling. *Mike21* beregner vandstandsvariationer forårsaget af vind, lufttryk og tidevand.

*Mike21* beregner også strømprognoser. De verificeres ikke, dels af mangel på observationer, dels fordi systemet kun beregner en vertikalt midlet strøm.

I det følgende beskrives det operationelle stormflodsvarslingssystem (kap. 2), datagrundlaget i form af observeret og forudsagt vandstand (kap. 3), og de statistiske fejlmål der bliver anvendt til at vurdere prognosernes kvalitet (kap. 4). Resultatet af verifikationen for 2001 beskrives i kap. 5, og sammenlignes med foregående år (kap. 6). Kap. 7 er en konklusion. Udførlige resultater for hver enkelt station er henvist til Appendix, og rapporten afsluttes med lister over referencer, figurer og tabeller.

Rapporten indgår i en serie af DMI-rapporter om stormflodsverifikation, begyndt i 1994 og siden 1999 udgivet på dansk.

## 2 Stormflodsvarslingsystemet DKSS98

DMIs stormflodsvarslingsystem DKSS98 har været i operationel brug siden 1. september 1999. Systemet er siden revideret flere gange:

- sept. 1999: DKSS98 afløser det tidligere system DKSS90
- okt. 2000: recalibrering, ny Vadehavsbathymetri
- juni 2001: tidsskridt reduceret fra 15 minutter til 10 minutter
- dec. 2001: nye moduler for Limfjorden, Lillebælt og Øresund

DKSS98 består af tre komponenter, koblet sammen til et enkelt system:

- en dybdeintegreret hydrodynamisk (*HD*) model
- en numerisk vejrmodel (*NWP*)
- information om tidevandet i Nordatlanten

### *HD modellen*

Den hydrodynamiske model *Mike21* er kernen i systemet. *Mike21* er udviklet af DHI [1] og stillet til rådighed for DMI til operationel brug. Modellen løser de dybdeintegrerede ligninger for havets strømning under indflydelse af vind, lufttryk og tidevand, og de deraf følgende vandstandsvariationer. Modellen anvender s.k. *nesting*, hvor flere beregningsnet er lagt inde i hinanden. Det giver større detaljeringsgrad lokalt, hvilket er af stor betydning i Vadehavet og Bælthavet. DKSS98 modelområdet består af i alt 7 beregningsnet (fig. 1) samt [8],[10].

### *NWP modellen*

Vejrmodellen er DMIs limited area prognosemodel Hirlam-E (HIR), som anvendes til vejrudsigter for Danmark [21]. Hirlam-E har en tidlig/runlig opløsning på 1 time/16 km. Et parallelt back-up system anvender i stedet prognoser fra den engelske vejrmodel UK-lam (UKM, opl. 6 timer/1.25°<sup>1</sup>). Back-up systemet giver generelt farvandsvagten ekstra information, og kan forfremmes til primær prognose hvis Hirlam-E prognosen er forsinket, eller anses for at være mindre god. Begge opsætninger er fuldt operationelle, og bliver verificeret og sammenlignet i denne rapport.

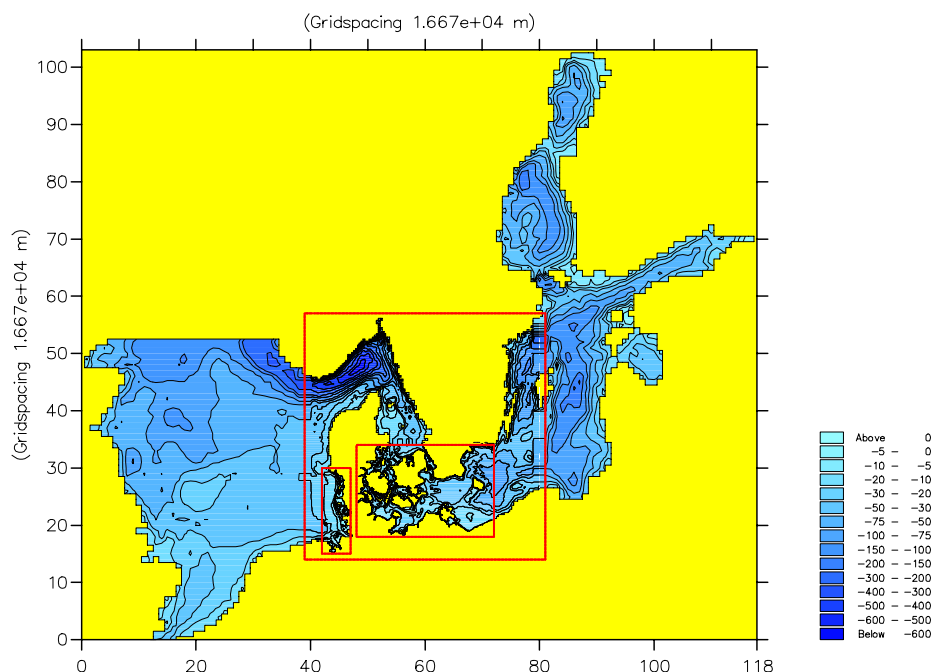
Vejrmodellen leverer prognoser for trykket i havoverfladens niveau (mslp) og vinden i 10m højde (U10). Vind og tryk interpoleres til HD-modellens 9 sømile net, og 10m vinden omregnes til overfladestress ved brug af en vindhastighedsafhængig vindfriktionsparameter [22], [8]. I Hirlam arkiveres en speciel vind til anvendelse i stormflodsvarslingsystemet. Med anvendelse af denne vind sikres at *Mike21* netop påtrykkes Hirlams bundstress, uafhængigt af grænselagsformuleringen i Hirlam. Af praktiske årsager er det ikke muligt at anvende Hirlams bundstress direkte. Bundstresset i UK-lam er ikke tilgængeligt; her anvendes 10 meter vinden.

### *Tidevandet*

Tidevandet fra Atlanterhavet foreskrives ved modellens afgrænsning mod resten af verdenshavet, omtrent langs breddegraderne 51°N og 59°N (de udgør ikke eksakt breddecirkler). Langs nordranden anvendes 10 konstituenten til at beskrive tidevandet:  $M_2, S_2, N_2, K_2, \mu_2, K_1, O_1, P_1, M_4, MS_4$ . Konstituenterne er bestemt af DHI på basis af detaljerede kort udarbejdet af den tyske Kriegsmarine i 1943 [3] samt anden, nyere information [22]. Sammenligning med nyere kort baseret på satellitaltimetri har vist en god overensstemmelse (O. Andersen/KMS, pers. komm.). I den Engelske Kanal anvendes tidekonstituenterne  $M_2, S_2, K_1, O_1$  samt 4- og 6-timers shallow-water bidrag, taget fra

---

<sup>1</sup>UKM har højere opløsning, men DMI modtager prognoserne i grov opløsning. Tidligere blev UKM vinden forstærket kunstigt med 10% over Nordsøen og med 1-2 m/s over Bælthavet, for at kompensere for den grove opløsning. Denne korrektion er ikke længere i brug.



**Figur 1.** DKSS98 modelområdet, med i alt 7 beregningsnet anbragt inde i hinanden (nesting). Det groveste net dækker hele Nordsø-Østersø området med en maskevidde på 16668 m (9 sømil). Maskevidden reduceres trinvist med en faktor 3, således at Vadehavet og Bælthavet begge beskrives med en maskevidde på 1852 m (1 sømil), Lillebælt og Øresund med blot 617m. Limfjorden udgør et separat modul med en maskevidde på 750m. De fintmaskede beregningsnet sikrer fri gennemstrømning gennem Bælterne og Øresund. Dybdekortene er etableret som led i det EU-finansierede DYNOCs projekt hvor basis er et 1 sømils net. Modellens åbne tidevandsrande er lagt langs snittene Shetland-Bergen (ca. 59°N), og Dungeness-Wissant i den Britiske Kanal (ca. 51°N).

Admiralty Tables 1999 [9] i Dungeness (England) og Wissant (Belgien). Vandstanden langs modelranden foreskrives som summen af tidevandet og invers barometer. Indstrømningen ved sydranden går i retning 37°T (dvs. omtrent mod nordøst). Indstrømningen ved nordranden er vinkelret på randen (dvs. næsten stik syd).

#### Afvikling

DKSS98 afvikles efter en fast rutine hver dag kl. 00, 06, 12 og 18 UTC. Den primære (HIR) opsætning afvikles ved alle 4 terminer, UKM opsætningen kun ved 00 og 12 UTC terminerne. Prognoselængden er 2 døgn (HIR), resp. 1½ døgn (UKM). Hver DKSS98-kørsel startes op med en mellemregning fra den forrige kørsel. Der indgår ikke vandstandsobservationer i selve modelberegningen.

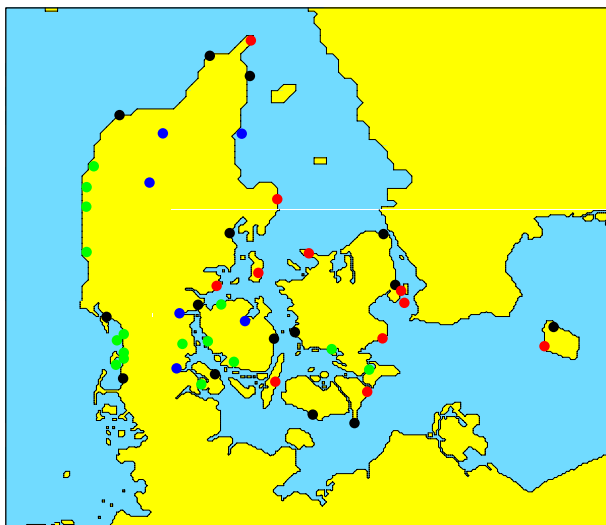
En DKSS98-kørsel beregner kort over vandstand og dybdemidlet strøm gældende for hvert kvarter (siden juni 2001: hvert 10. minut), hvilket svarer til observationsfrekvensen (se afsnit 3.1). Herudfra trækkes tidsserier for de lokaliteter hvor der står en vandstands- eller strømmåler. Prognoser for vandstand efterbehandles (se kap. 3) og sendes til DMIs farvandsvagt og andre brugere. Prognoser og observationer vises sammen på DMIs Internetside <http://www.dmi.dk/vejr> under *Vandstand*. Strømpnoser for nogle få lokaliteter vises på samme side under *Til søs*.

### 3 Data

Datagrundlaget er observeret vandstand fra hele 2001 ved en række kyststationer, samt DKSS98 prognoser for vandstand gældende for de samme stationer.

#### 3.1 Observationer

Der anvendes data fra 36 målere, som alle sender til DMI i sand tid. Det er DMIs egne målere, samt målere der drives af Farvandsvæsenet (FRV), Kystdirektoratet (KDI) og en række lokale myndigheder (se fig. 2 og appendix A). Vandstanden registreres hvert kvarter (siden primo juni 2001: hvert 10. minut) relativt til DNN med en præcision på 1 cm<sup>1</sup>.



**Figur 2.** Placering af vandstandsmålere. Sort=DMI, rød=FRV, grøn=KDI, blå=lokal myndighed. On-line observationer, tidevand og 12 timers prognose for alle stationer findes på DMIs Internet side <http://www.dmi.dk/vejr> under *Vandstande*.

Den totale datamængde er ca. 1.9 mio. vandstandsobservationer. Middel datadækningen er 95%, og 24 målere har en datadækning over 99%. Flg. målere har dårlig datadækning:

- Hals Barre (85% mgl. data)
- Nordre Røse (47% mgl. data)

Ved slusestationerne i Vadehavet (markeret med \*) i tabel 4), Vidå Sluse, Ribe Kammersluse, og Ballum Sluse, påvirkes registreringen ved lavvande af sluseportene og er dermed ikke altid repræsentativ for vandstanden i det frie hav. Fra og med 2001 indgår disse stationer alligevel i verifikationen på lige fod med de øvrige.

I Thyborøn, Torsminde og Hvide Sande (KDI stationer) findes dels en kystmåler og dels en havnemåler. Kystmålere har vist tendens til langsomt at drive opad mod højere registrering, hvorefter de nulstilles igen. I varslingen anvendes i højere grad havnemålerne i Torsminde og Hvide Sande (ikke

<sup>1</sup>FRVs målere registrerer på varierende minuttal, som afrundes til nærmeste hele kvarter, hvilket giver en kunstig fasefej på op til 7 minutter.



i Thyborøn, hvor havnen ligger helt inde i Limfjorden). I det følgende anvendes alligevel data fra hver stations kystmåler, da den har vist sig at blive bedst gengivet af prognoserne.

2001 var et meget roligt år hvad angår ekstreme højvande. Langs hele Nordsøkysten inkl. Vadehavet, i Skagerrak og i Kattegat er der ikke forekommet et eneste tilfælde ud over det sædvanlige. Kun i den vestlige Østersø, dvs. ved stationerne fra Bornholm til Sydøstjylland, har der været et par situationer med kraftigt forhøjet vandstand:

- 16. november Vestlige Østersø
- 20. december Vestlige Østersø

En detaljeret vandstandsstatistik for hver station, gældende for 2001, er vist i Appendix B. Returneperioder for årets højeste registrering er beregnet efter metoder beskrevet i [2],[19].

Primo juni 2001 gik den største del af målenettet fra kvartersdrift over til 10 minutters drift. Samtidigt blev DKSS98 lagt om at beregne vandstand for hvert 10. minut. Kun Farvandsvæsenets målere registrerer stadig hvert kvarter. Alle tidsserier er interpoleret til intervaller på 10 minutter for hele 2001 inden dataanalysen.

### 3.2 Prognoser

Stormflodssystemet DKSS98 beregner prognoser for vandstand ved samtlige stationer i tabel 4<sup>2</sup>. Prognoselængden er 2 døgn (HIR), resp.  $1\frac{1}{2}$  døgn (UKM), med en tidlig opløsning på 15 minutter (10 min. siden primo juni).

Der beregnes en ny prognose hver 6. time (HIR), resp. hver 12. time (UKM). For hele året foreligger i alt 1460 prognoser (HIR), resp. 730 prognoser (UKM) for hver station. Heraf mangler 8 prognoser for hver opsætning, dvs. en dækningsgrad på ca. 99%.

Den beregnede vandstand efterbehandles i tre trin: opretning af tidevand, nulpunktskorrektion, og filtrering. Tidevandsopretning og nulpunktskorrektion foretages en gang for alle, så snart modelkørslen er slut, mens filtreringen er en løbende proces der foretages hver gang der modtages en ny observation for den pågældende station.

#### *Tidevandsopretning*

Månedssimuleringer med Mike21 uden kobling til en vejmodel fastlægger modellens eget tidevand. En analyse viser, at modellen har fase- og amplitudefejl i visse havområder. Da det astronomiske tidevand er kendt for en række stationer, skiftes Mike21 tidevandet ud med det astronomiske. Hvilke stationer tidevandsopretning er taget i brug ved, fremgår af Appendix C.

#### *Nulpunktskorrektion*

Der er forskel (bias) mellem beregnet og målt middelvandstand ved adskillige stationer. Forskellen kan skyldes at stationens nulpunkt ikke er fastlagt korrekt, eller en unøjagtighed i selve modelberegningen. Prognoserne korrigeres derfor ved brug af middelfejlen for året 1998 (Appendix C). Det forbedrer straks prognosen for stationer med en stor nulpunktsfejl, men fejlen er ikke stabil fra år til år ved alle stationer [4]. For eksempel er nulpunktskorrektionen følsom overfor flytning eller genopmåling af den enkelte station, idet en sådan teknisk ændring ikke altid er koordineret med varslingsystemet. For stationer der oprettes med astronomisk tidevand, er en evt. middelvandstand lagt ind i tidevandsberegningen, hvilket får betydning for de anvendte korrektioner. I det videre forløb

<sup>2</sup>Samt for en række udenlandske stationer, der ikke verificeres.

bruges nulpunktskorrigerede prognoser.

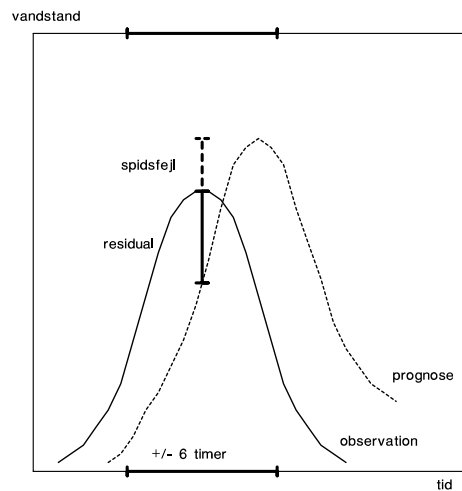
#### *Filtrering*

Prognosen opdateres hver gang der modtages en ny observation, dvs optimalt hvert 15. (10.) minut. Fejlen på prognosen fremskrives statistisk i tid ved brug af et autoregressivt (AR) filter, og prognosen rettes op ved at fratække den fremskrevne fejl. For en beskrivelse af metoden, se [6]. De filtrerede prognoser anvendes løbende i varslingen, men arkiveres og verificeres af praktiske årsager ikke.

## 4 Fejlmål

Der defineres to typer prognosefejl, som skitseret i figur 3.

- *residualet* er prognose minus observation til en given tid
- *spidsfejlen* er forudsagt minus observeret vandstandsmaksimum



Figur 3. Definition af residual og spidsfejl.

Mens residualet er en almindelig tidsserie, udgør spidsfejlen en tabel med værdier for hvert enkelt højvande. Fejlens afhængighed af prognoselængden undersøges for alle stationer under ét. Tidligere undersøgelser har indikeret at en systematisk afhængighed ikke findes [12]. Det skyldes at stormflodsmodellen ikke initialiseres ved brug af observeret vandstand, men kører som et 'stand-alone' system - modellen beregner selv sin starttilstand, og dermed er starttilstanden selv fejlbehæftet.

### 4.1 Residual

Ved at midle residualet på passende vis (se Appendix D) beregnes følgende fejlmål for hver station:

- $me$  = middel fejl (*bias*)
- $rms$  = rms fejl
- $ev$  = forklaret varians
- $cc$  = korrelations-koefficient

Der beregnes nøgletal ved at midle over alle stationer.

### 4.2 Spidsfejl

Spidsfejlen er forskellen mellem forudsagt og observeret højvande (figur 3). Her benyttes de 10 højeste højvande ved hver station, med mindst 6 timer fra et højvande til det næste. Hvis der er forudsagt mere end 1 højvande svarende til det observerede (inden for  $\pm 6$  timer fra højvandstidspunktet),

vælges den højeste prognose. Er der omvendt intet højvande forudsagt, udgår dette højvande af verifikationen. Ekstreme lavvande og falske alarmer verificeres ikke.

Ved at midle spidsfejl-tabellen på passende vis (se Appendix D) beregnes følgende fejlmål for hver station:

- $pe$  = middel spidsfejl (peak bias)
- $pe\%$  = middel spidsfejl i %

Nøgletal beregnes ved at midle over alle stationer.

### 4.3 Succesrater

Ud fra spidsfejl-tabellen beregnes en *succesrate* som andelen af godt forudsagte højvande, dvs. hvor spidsfejlen er under en vis margin. Succesraten er ideelt 100%. Der beregnes succesrater med tre fejlmarginer:

- $h_{10}$  succesrate 10 cm
- $h_{20}$  succesrate 20 cm
- $h_{30}$  succesrate 30 cm

Til brug for DMIs resultatkontrakt beregnes  $h_{30}$  separat for Nordsøkysten (fra Vadehavet til Skagens Gren), og for de indre danske farvande (resten af stationerne). Af praktiske årsager (hurtig afrapportering) anvendes kun stationer arkiveret i DMIs database, hvilket bl.a. betyder at Farvandsvæsenets stationer p.t. ikke indgår i denne beregning. Succesraten til resultatkontrakten fås som middelværdien af disse to tal.

## 5 Resultater

Herunder beskrives og diskuteres resultatet af verifikationen for år 2001. I det følgende refererer *HIR* til Hirlam opsætningen (primær) og *UKM* til UK-lam opsætningen (back-up). Der vises kun stations-midlede fejlmål. Detaljerede resultater for hver station findes i Appendices E-H.

### 5.1 Nøgletal

I tabel 1 angives nøgletal dvs. fejlmål midlet over alle stationer og alle prognoselængder. Værdierne for hver enkelt station er vist i Appendix E-F.

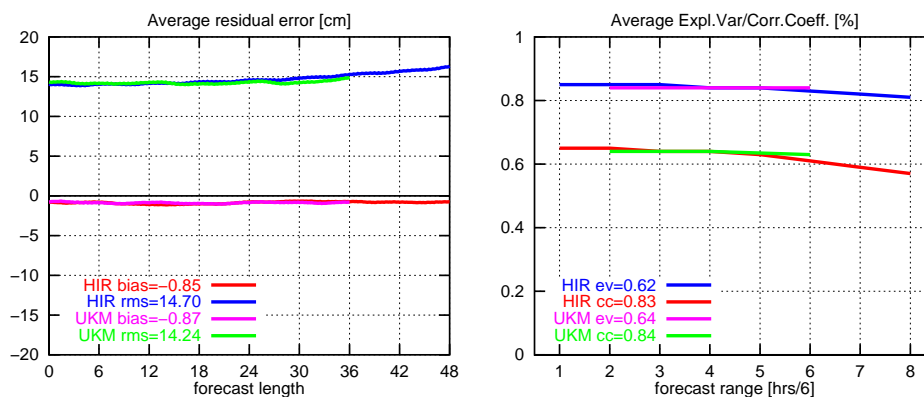
Model	bias	rms	cc	ev	pe	pe
	cm	cm				
HIR	-1	15	.83	.62	-22	-24
UKM	-1	14	.84	.64	-26	-28

**Tabel 1.** Nøgletal for hver opsætning, midlet over alle prognoselængder og over alle stationer.

Systemet har ingen bias i middel, og en rms fejl på 14-15 cm. De højeste vandstande undervurderes med 20-30 cm i middel svarende til en procentvis fejl på knap 25-30%. De to opsætninger er af næsten samme kvalitet hvad angår residualfejl (bias, rms, cc, ev), mens den primære HIR opsætning har mindre spidsfejl end back-up opsætningen.

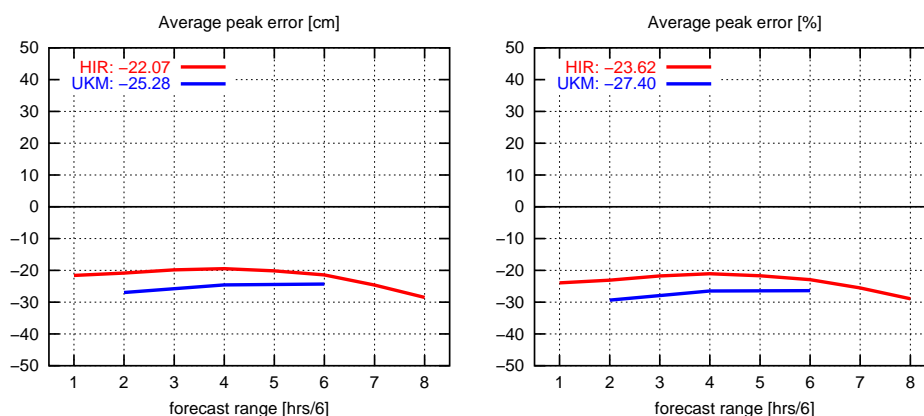
### 5.2 Prognoselængden

Fig. 4 viser afhængigheden af prognoselængden for hvert af fejlmålene i tabel 1, stadig midlet over alle stationer.



**Figur 4.** Residualfejl som funktion af prognoselængden

Systemets bias afhænger ikke af prognoselængden. RMS fejlen vokser jævnt fra 14 cm ved kort prognoselængde, til 16 cm ved 48 timers prognoselængde. Korrelationskoefficienten *cc* og den forklarede varians *ev* aftager begge langsomt med stigende prognoselængde, især ved prognoselængder over 36 timer.



**Figur 5.** Spidsfejl som funktion af prognoselængden

Systemets spidsfejl er negativ (højvande undervurderes), og fejlen øges især på blok 6-8, dvs. prognoselængder over 36 timer. Korttidsprognosen (blok 1-2, 0-12 timers prognoselængde) er ikke systematisk bedre end mellemlange prognoser (12-36 timer).

Fejlen for hvert enkelt højvande på kort sigt (0-6 timer, resp. 0-12 timer) er vist i Appendix G-H.

### 5.3 Succesrater

Tabel 2 viser andelen af godt forudsagte højvande med hhv. 10/20/30cm succeskriterium. Succesraten beregnes dels for alle stationer, dels for de separate områder Nordsø-kysten op til Skagen (Nordsø), og de indre danske farvande fra Skagen til Bornholm (IDF). Denne geografiske opdeling gør succesraten mindre afhængig af hvilke stationer der er til rådighed et givet år (oprettelse/nedlæggelse af stationer mv.). Til beregning af Nordsø/IDF succesrater anvendes kun stationer der er arkiveret i DMIs database, dvs. alle FRV stationer er udeladt (Tabel 4). I alt er anvendt 11 Nordsøstationer og 12 IDF stationer.

Succesrate (%)	Alle		Nordsø		IDF	
	HIR	UKM	HIR	UKM	HIR	UKM
10 cm	21	12	28	19	15	8
20 cm	47	32	55	47	41	21
30 cm	74	60	77	73	71	53

**Tabel 2.** Succesrate for forudsigtelse af de 10 højeste vandstande ved hver station, 2001.

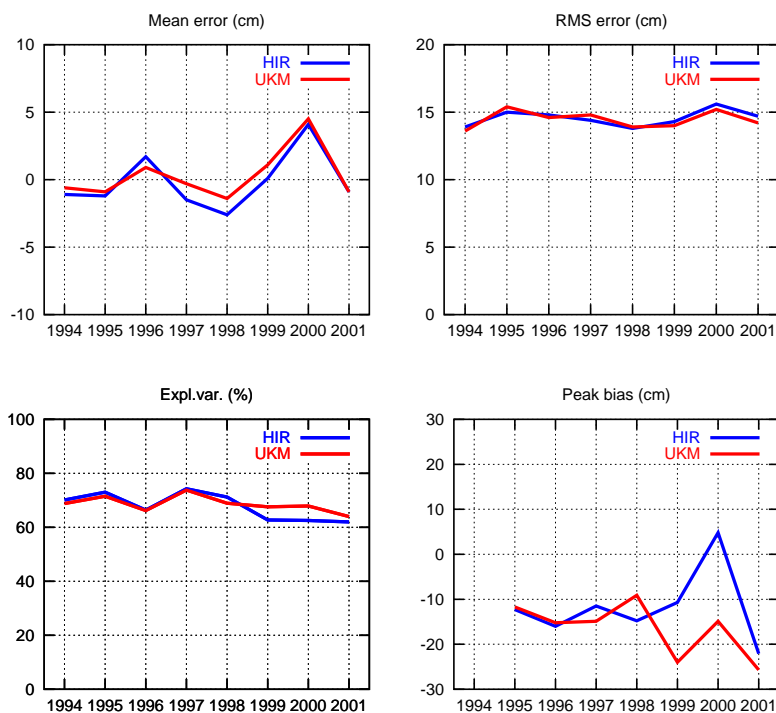
Til brug for DMIs resultatkontrakt beregnes middelværdien af 30 cm succesraten for Nordsø og IDF stationer. HIR resultatet (fremhævet i tabel 3) rapporteres til ministeriet.

HIR	UKM
<b>74</b>	63

**Tabel 3.** Resultatkontrakt

## 6 Sammenligning med forudgående år

Tidsudviklingen af en række nøgletal (1994-2001) er vist i Fig. 6<sup>1</sup>. Datagrundlaget er ikke fuldstændigt homogent fra år til år, på grund af at nye stationer løbende kommer til, manglende data m.v.



Figur 6. Nøgletal, 1994-2001.

Kommentarer:

*ME:* Systemets middel bias er fjernet ved at revidere nulpunkt-korrektionerne i forhold til året før. Tallet bør ikke overstige et par centimeter.

*RMS:* Middel rms fejlen ligger nogenlunde konstant på knap 15 cm.

*EV:* Middel forklaret varians falder gradvist, hvilket skyldes oprettelse af nye stationer i de indre danske farvande.

*MPE:* De højeste højvande undervurderes mere end tidligere år. Det er specielt udtalt i de indre danske farvande. Det skal bemærkes, at 2000 var et dårligt år for HIR opsætningen (overvurdering af vindstyrken i stormsituationer), hvorfor UKM blev anvendt som primær opsætning i årets første 8 måneder (se [7]).

<sup>1</sup> Analysen er forenkelt i forhold til tidligere år, til kun at omfatte de 4 parametre bias, rms fejl, forklaret varians og middel spidsfejl.

## 7 Konklusion

DMIs operationelle vandstandsprognoser for 2001 verificeres. Prognoserne er beregnet med den hydrodynamiske model Mike21, drevet af DMIs vejrmødel Hirlam-E (HIR, primær prognose), eller af den engelske vejrmødel UK-lam (UKM, back-up prognose). Prognoserne sammenlignes med observationer fra 36 danske kyststationer, som alle indgår med lige vægt.

Der beregnes fejlmål, midlet over hele prognoselængden, og nøgletal, midlet over alle stationer. Desuden beregnes en succesrate for de 10 højeste højvande ved hver station.

*Residualfejl:* Der er ingen systematisk bias, og en rms fejl på 14-15 cm i middel. Prognosens kvalitet falder svagt ved prognoselængder over 36 timer.

*Spidsfejl:* Højvande undervurderes generelt med 20-30 cm (25-30%), mest i de indre danske farvande. Også denne fejl øges ved prognoselængder over 36 timer.

*Succesrate:* Med et succeskriterium på 30 cm forudsiges knap 3 ud af 4 højvande med HIR opsætningen, knap 2 ud af 3 med UKM opsætningen.

*Sammenligning:* HIR og UKM prognoserne omtrent lige gode hvad angår residualfejl, men HIR prognoserne for de højeste højvande er markant end UKM prognoserne. I forhold til tidligere år har HIR højvandsprognoserne fået en systematisk negativ bias. Det skyldes nogle få ret dårligt forudsagte højvande i de indre danske farvande, samt at der overhovedet ikke er forekommet højvande af betydning langs hele Nordsøkysten.



## **8 Appendices**

De følgende sider indeholder diverse tabeller og figurer.

Appendix A: stationsliste

Appendix B: observeret statistik

Appendix C: nulpunktskorrektioner

Appendix D: beregningsmetode

Appendix E: HIR stations-statistik

Appendix F: UKM stations-statistik

Appendix G: højvande og HIR prognosefejl

Appendix H: højvande og UKM prognosefejl

## 8.1 A - stationsliste

Station	Nummer	Position	Region	Ejer
Skagen	20002	57°43' N 10°36' E	Skagerrak	FRV
Hirtshals	20047	57°36' N 09°58' E	Skagerrak	DMI
Frederikshavn	20101	57°26' N 10°34' E	Skagerrak	DMI
Hals Barre	20252	56°58' N 10°26' E	Kattegat	L
Løgstør **)	20423	56°58' N 09°15' E	Limfjorden	L
Hanstholm	21009	57°07' N 08°36' E	Skagerrak	DMI
Skive **)	21191	56°34' N 09°03' E	Limfjorden	L
Grenå	22121	56°25' N 10°56' E	Kattegat	FRV
Århus	22331	56°09' N 10°13' E	Kattegat	DMI
Juelsminde	23132	56°43' N 10°01' E	Bælthavet	FRV
Fredericia	23293	55°34' N 09°45' E	Bælthavet	DMI
Kolding	23322	55°30' N 09°29' E	Bælthavet	L
Thyborøn Kyst	24006	56°42' N 08°13' E	Vestkysten	KDI
Ferring	24018	56°32' N 08°07' E	Vestkysten	KDI
Torsminde Kyst	24122	56°22' N 08°07' E	Vestkysten	KDI
Hvide Sande Kyst	24342	56°00' N 08°08' E	Vestkysten	KDI
Esbjerg	25149	55°28' N 08°26' E	Vadehavet	DMI
Ribe Kammersluse *)	25343	55°20' N 08°41' E	Vadehavet	KDI
Havneby	26136	55°05' N 08°34' E	Vadehavet	KDI
Åbenrå	26239	55°03' N 09°26' E	V. Østersø	L
Ballum Sluse *)	26346	55°08' N 08°41' E	Vadehavet	KDI
Vidå Sluse *)	26359	54°58' N 08°40' E	Vadehavet	DMI
Fynshav	26457	55°00' N 09°59' E	V. Østersø	DMI
Ballen	27084	55°49' N 10°38' E	Kattegat	FRV
Odense Fjord **)	28086	55°43' N 10°42' E	Bælthavet	L
Slipshavn	28233	55°17' N 10°50' E	Bælthavet	DMI
Spodsbjerg	28582	54°56' N 10°50' E	Bælthavet	FRV
Odden	29002	55°58' N 11°22' E	Kattegat	FRV
Korsør	29393	55°20' N 11°08' E	Bælthavet	DMI
Hornbæk	30017	56°06' N 12°28' E	Kattegat	DMI
København	30336	55°41' N 12°30' E	Bælthavet	DMI
Nordre Røse	30346	55°38' N 12°41' E	Bælthavet	FRV
Drogden Fyr	30357	55°32' N 12°43' E	Bælthavet	FRV
Rødvig	31063	55°15' N 12°23' E	V. Østersø	FRV
Hesnæs	31493	54°49' N 12°08' E	V. Østersø	FRV
Rødby	31573	54°39' N 11°21' E	V. Østersø	DMI
Gedser	31616	54°34' N 11°56' E	V. Østersø	DMI
Tejn	32048	55°15' N 14°50' E	Østersø	DMI
Rønne	32096	55°06' N 14°41' E	Østersø	FRV

**Tabel 4.** Vandstandsstationer, 2001. Ansvarshavende DMI=Danmarks Meteorologiske Institut; KDI=Kystdirektoratet, FRV=Farvandsvæsenet, L=lokal myndighed. \*) = slusestation, \*\*) = nye stationer, der ikke verificeres endnu.

## 8.2 B - observeret statistik

Station	Lavest cm	Middel cm	Højest cm	St.dev cm	mgl. %	Retur DMI år	Retur KDI år
Skagen	-72	-9	69	21	0		⊙
Hirtshals	-87	-6	71	23	0	⊙	⊙
Frederikshavn	-76	-9	70	21	0	1.1	⊙
Hals Barre	-64	-16	44	17	85		⊙
Hanstholm	-114	-8	87	26	1	⊙	⊙
Grenå	-87	7	101	23	4		
Århus	-84	6	89	22	0	1.2	⊙
Juelsminde	-90	9	95	23	6		
Fredericia	-83	8	85	17	2	1.2	⊙
Kolding	-99	17	145	21	0		4.6
Thyborøn	-128	11	131	33	1	⊙	⊙
Ferring	-120	13	141	34	1		
Torsminde	-109	16	141	36	1	⊙	⊙
Hvide Sande	-127	22	163	40	2	⊙	⊙
Esbjerg	-208	22	202	64	1	1.1	⊙
Ribe K.sluse	-103	31	235	61	2	⊙	⊙
Havneby	-224	18	217	70	0	⊙	⊙
Åbenrå	-129	15	157	25	2		26.6
Ballum Sluse	-17	57	239	41	0	⊙	⊙
Vidå Sluse	-72	35	240	57	0	⊙	⊙
Fynshav	-126	14	152	23	0	4.1	4.4
Ballen	-78	9	93	21	0		
Slipshavn	-73	13	109	22	0	4.1	3.0
Spodsbjerg	-88	1	158	20	0		
Odden	-69	9	96	18	10		
Korsør	-65	10	100	19	0	2.7	⊙
Hornbæk	-79	11	115	21	3	2.1	1.2
København	-70	13	101	19	1	2.3	1.5
Nordre Røse	-39	19	102	16	47		
Drogden Fyr	-124	12	128	20	5		
Rødvig	-144	10	132	21	3		
Hesnæs	-151	17	145	23	0		
Rødby	-145	14	129	23	0	3.1	1.9
Gedser	-121	15	123	22	0	3.2	2.1
Tejn	-66	10	113	19	0	12.7	
Rønne	-87	4	109	19	0		92.7

**Tabel 5.** Observeret statistik, 2001, herunder estimeret returperiode (år) for højeste vandstand. DMI estimeret er baseret på en Gumbelfordeling af årlige maksima, KDI estimeret på en Weibullfordeling og en 'peak over threshold' (POT) metode. blank = ingen analyse foreligger, ⊙ = returperioden for lille til at kunne beregnes.

### 8.3 C - nulpunktskorrektioner

Station	Korrektion
Skagen	-12
Hirtshals	-2
Frederikshavn	-4
Hals Barre	-
Hanstholm	-10
Grenå	6
<i>Århus</i>	1
<i>Juelsminde</i>	2
Fredericia	4
<i>Kolding</i>	22
Thyborøn	-2
Ferring	-2
Torsminde	1
Hvide Sande	-5
Esbjerg	-6
<i>Ribe Sluse</i>	17
Havneby	-9
Aabenraa	7
<i>Ballum Sluse</i>	12
<i>Vidå Sluse</i>	14
Fynshav	3
<i>Ballen</i>	5
<i>Slipshavn</i>	-2
<i>Spodsbjerg</i>	-0
Odden	10
<i>Korsør</i>	13
Hornbæk	0
København	-4
<i>Nordre Røse</i>	15
Drogden	12
Rødvig	12
Hesnæs	17
Rødby	19
Gedser	5
Tejn	12
<i>Rønne</i>	3

**Tabel 6.** Nulpunktskorrektion i cm, beregnet på basis af middelfejl for 1998 hindcasts. "–": ingen korrektion. Tabelværdien adderes til den tidevandsoprettede vandstandsprognose. For de kursiverede værdier adderes i stedet til den rå vandstandsprognose. Der anvendes samme nulpunktskorrektion i begge modelopsætninger.

## 8.4 D - beregningsmetoder

### Residual

Med anvendelse af definitionen  $residual = prognose - observation$  opstilles residualmatricen

*residual(station,analyse,prognoselængde)*

Matricen indeholder fejl for samtlige beregnede vandstandsprognoser. Dimensionerne er

HIR: *residual(36,1460,288)*

UKM: *residual(36,730,216)*

Ved at midle residualet over alle analyser fås modellens middelfejl eller bias:

*bias(station,prognoselængde)*

og videre midling giver modellens bias som funktion af prognoselængden (midlet over alle stationer), for hver station (midlet over prognoselængden), og som et nøgletal (midlet over hele matricen):

*bias1(prognoselængde)*

*bias2(station)*

*BIAS*

Tilsvarende beregnes rms fejl ud fra kvadratet på residualet.

Forklaret varians og korrelations-koefficienter beregnes ved brug af pseudo-tidsserier for prognosen, som sammenstykket af alle 0-6 timers prognoser, hhv. alle 6-12 timers prognoser osv. Dette giver koefficienter for hver af blokkene 0-6, 6-12, 12-18, .. timers prognoselængde:

*ev(station,blok)*

*cc(station,blok)*

For UKM opsætningen anvendes i stedet 12 timers blokke.

Herefter beregnes middelværdier (*cc1, cc2...*) og nøgletal som beskrevet ovenfor.

### Spidsfejl

Spidsfejl-tabellen defineres som

*spidsfejl(station,højvande,blok)*

hvor højvandene nummeres fra 1-10 og blokkene er defineret som ovenfor. Dimensionerne er

HIR: *spidsfejl(36,10,8)*

UKM: *residual(36,10,3)*

idet HIR opsætningen bruger 6 timers blokke, UKM opsætningen 12 timers blokke.

Ved at midle residualen over alle højvande fås modellens middelspidsfejl eller peak bias:

$mpe(station, blok)$

Videre midling giver modellens peak bias for hver prognoselængde-blok (midlet over alle stationer), for hver station (midlet over alle blokke), og som et nøgletal (midlet over hele tabellen):

$mpe1(blok)$

$mpe2(station)$

$MPE$

Der opstilles yderligere en tabel over relative spidsfejl ved at dividere hver fejl med det tilhørende højvande. Derefter beregnes relative spidsfejl  $mpep, mpep1, \dots$  (i %) ved at midle på samme måde som ovenfor.

## 8.5 E - stationsstatistik (HIR)

Station	me cm	rms cm	cc	ev	pe cm	pe% %
Skagen	-2	13	.81	.65	-28	-46
Hirtshals	-1	13	.83	.68	-30	-47
Frederikshavn	4	13	.79	.59	-20	-35
Hals Barre	16	18	.83	-.15	2	12
Hanstholm	2	14	.85	.71	-31	-43
Grenå	-1	16	.71	.50	-29	-37
Århus	-2	14	.77	.58	-30	-37
Juelsminde	-6	17	.74	.45	-31	-36
Fredericia	3	13	.71	.41	-8	-10
Kolding	3	15	.78	.49	-20	-17
Thyborøn	2	16	.89	.77	-33	-28
Ferring	3	14	.91	.82	-28	-22
Torsminde	0	16	.90	.81	-30	-23
Hvide Sande	-2	16	.93	.85	-36	-25
Esbjerg	-4	18	.96	.92	-19	-10
Ribe K.sluse	2	23	.93	.85	-4	-2
Havneby	2	16	.97	.95	-6	-3
Åbenrå	5	14	.86	.68	-19	-17
Ballum Sluse	-10	25	.84	.62	-11	-5
Vidå Sluse	-7	22	.95	.85	-10	-4
Fynshav	3	13	.86	.69	-19	-18
Ballen	-3	13	.78	.59	-29	-35
Slipshavn	-13	19	.79	.26	-37	-40
Spodsbjerg	-1	13	.80	.64	-34	-33
Odden	2	11	.80	.62	-24	-31
Korsør	5	13	.79	.54	-13	-15
Hornbæk	-9	16	.81	.48	-39	-42
København	-12	18	.71	.10	-36	-43
Nordre Røse	-1	11	.73	.51	-21	-26
Drogden Fyr	-2	11	.83	.67	-19	-21
Rødvig	-1	11	.87	.74	-14	-16
Hesnæs	-4	12	.88	.74	-19	-18
Rødby	0	11	.89	.78	-17	-16
Gedser	-3	11	.88	.75	-19	-19
Tejn	0	11	.80	.64	-19	-23
Rønne	0	11	.82	.67	-15	-21

**Tabel 7.** HIR statistik for hver station, midlet over prognoselængder fra 0-48 timer. me=middelfejl eller bias, rms=root mean square fejl, cc=korrelationskoefficient, ev=forklaret varians, pe=spidsfejl, pe%=spidsfejl i %.

## 8.6 F - stationsstatistik (UKM)

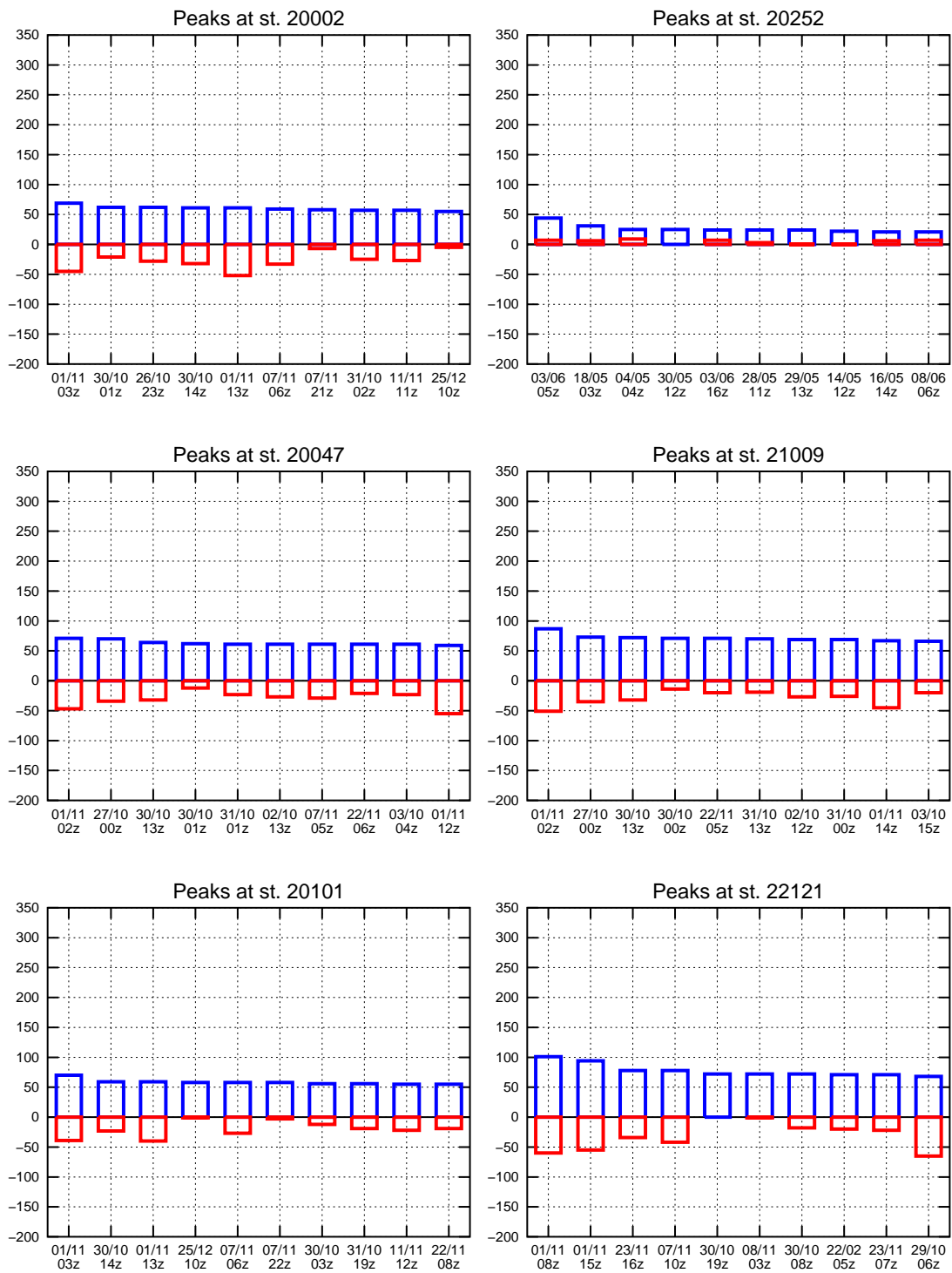
Station	me cm	rms cm	cc	ev	pe cm	pe% %
Skagen	-2	13	.81	.66	-30	-50
Hirtshals	-1	13	.84	.70	-29	-46
Frederikshavn	4	13	.80	.59	-25	-42
Hals Barre	15	18	.83	-.11	1	5
Hanstholm	1	13	.87	.73	-30	-42
Grenå	-2	16	.70	.49	-32	-41
Århus	-2	14	.78	.59	-32	-41
Juelsminde	-5	16	.76	.49	-29	-34
Fredericia	3	12	.75	.50	-13	-17
Kolding	5	13	.82	.62	-28	-26
Thyborøn	2	15	.90	.80	-30	-25
Ferring	2	13	.93	.85	-25	-20
Torsminde	-0	15	.92	.83	-26	-21
Hvide Sande	-2	14	.94	.87	-33	-23
Esbjerg	-5	17	.97	.93	-18	-10
Ribe K.sluse	-0	21	.94	.88	-13	-6
Havneby	1	14	.98	.96	-7	-4
Åbenrå	6	13	.88	.71	-27	-24
Ballum Sluse	-11	25	.85	.62	-12	-5
Vidå Sluse	-9	22	.96	.86	-14	-6
Fynshav	4	12	.88	.74	-24	-22
Ballen	-3	13	.78	.59	-30	-36
Slipshavn	-13	19	.80	.26	-40	-43
Spodsbjerg	-1	12	.80	.64	-36	-36
Odden	2	11	.79	.62	-26	-34
Korsør	6	13	.79	.53	-13	-15
Hornbæk	-9	16	.80	.48	-41	-45
København	-12	18	.70	.11	-41	-49
Nordre Røse	-0	11	.73	.51	-24	-29
Drogden Fyr	-1	12	.82	.65	-28	-31
Rødvig	-1	11	.87	.74	-24	-26
Hesnæs	-3	11	.88	.76	-26	-24
Røbdy	1	10	.90	.80	-22	-21
Gedser	-2	11	.88	.77	-26	-26
Tejn	0	12	.77	.59	-30	-36
Rønne	1	11	.80	.63	-27	-35

**Tabel 8.** UKM statistik for hver station, midlet over prognoselængder fra 0-36 timer. me=middelfejl eller bias, rms=root mean square fejl, cc=korrelationskoefficient, ev=forklaret varians, pe=spidsfejl, pe%=spidsfejl i %.

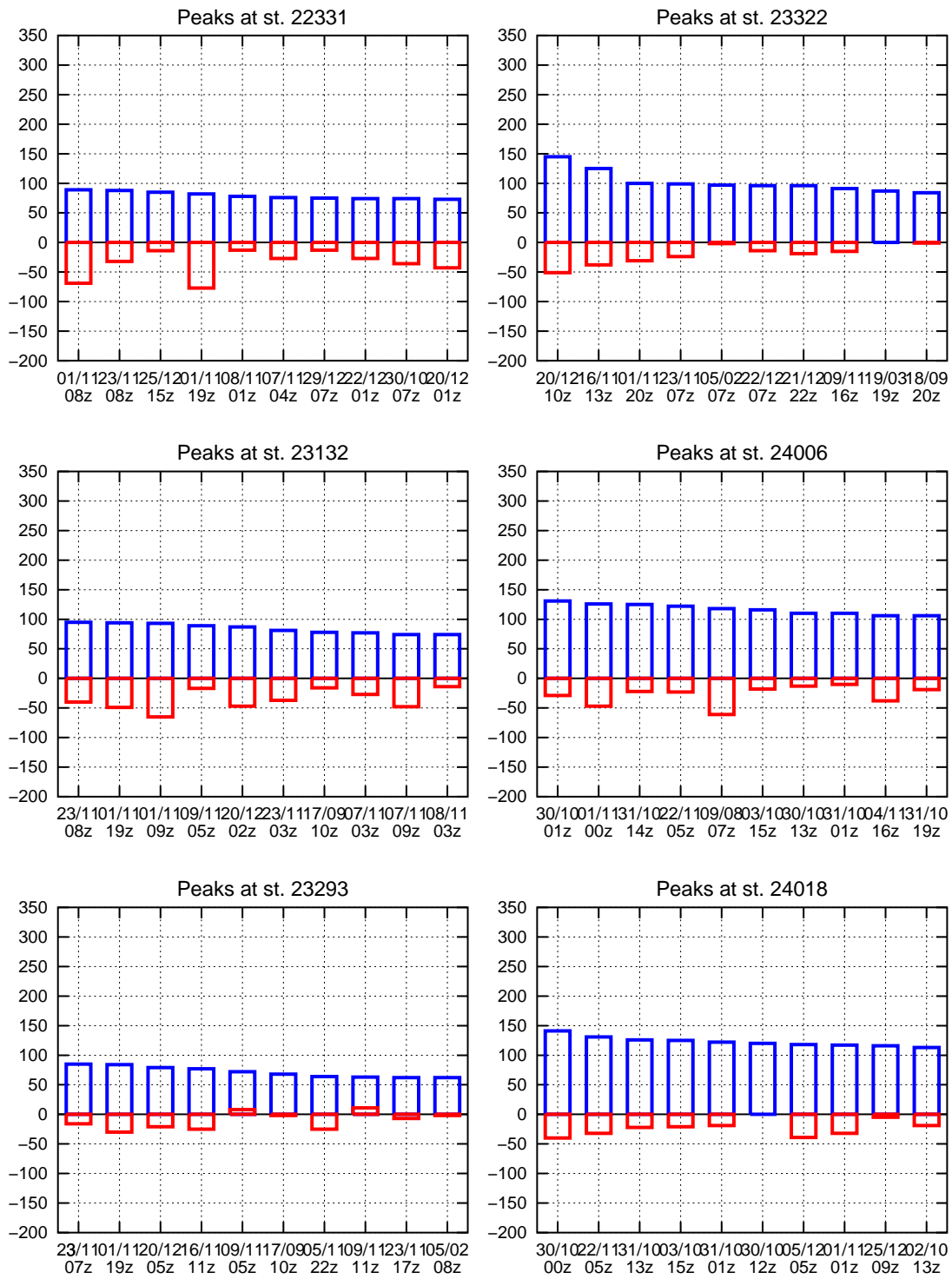


## **8.7 G - Højvande og prognosefejl (HIR)**

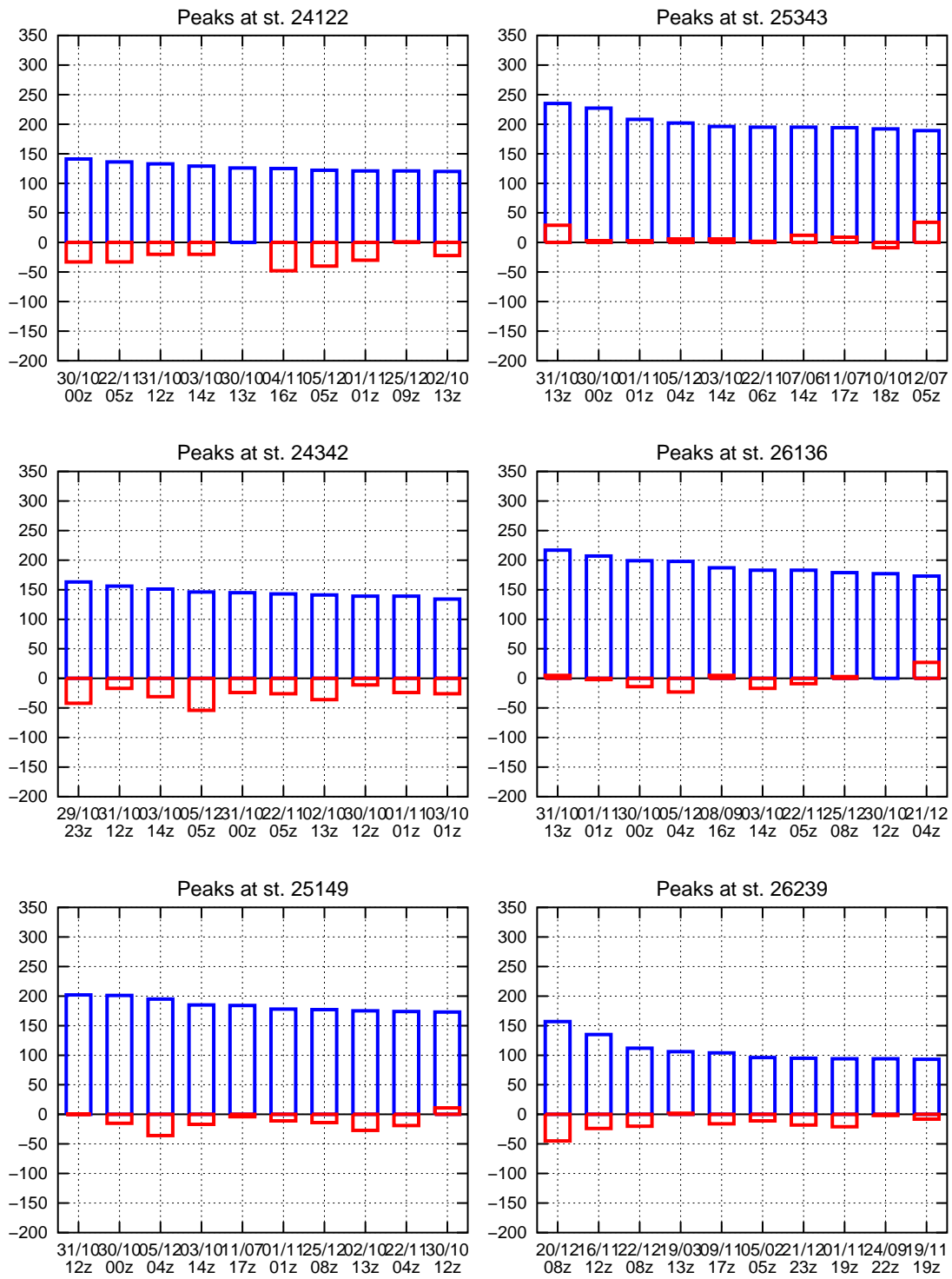
De følgende sider viser de 10 højeste højvande for hver station, samt tilhørende HIR prognosefejl med kort prognoselængde (0-6 timer). Stationsnumrene refererer til tabel 4 i Appendix A.



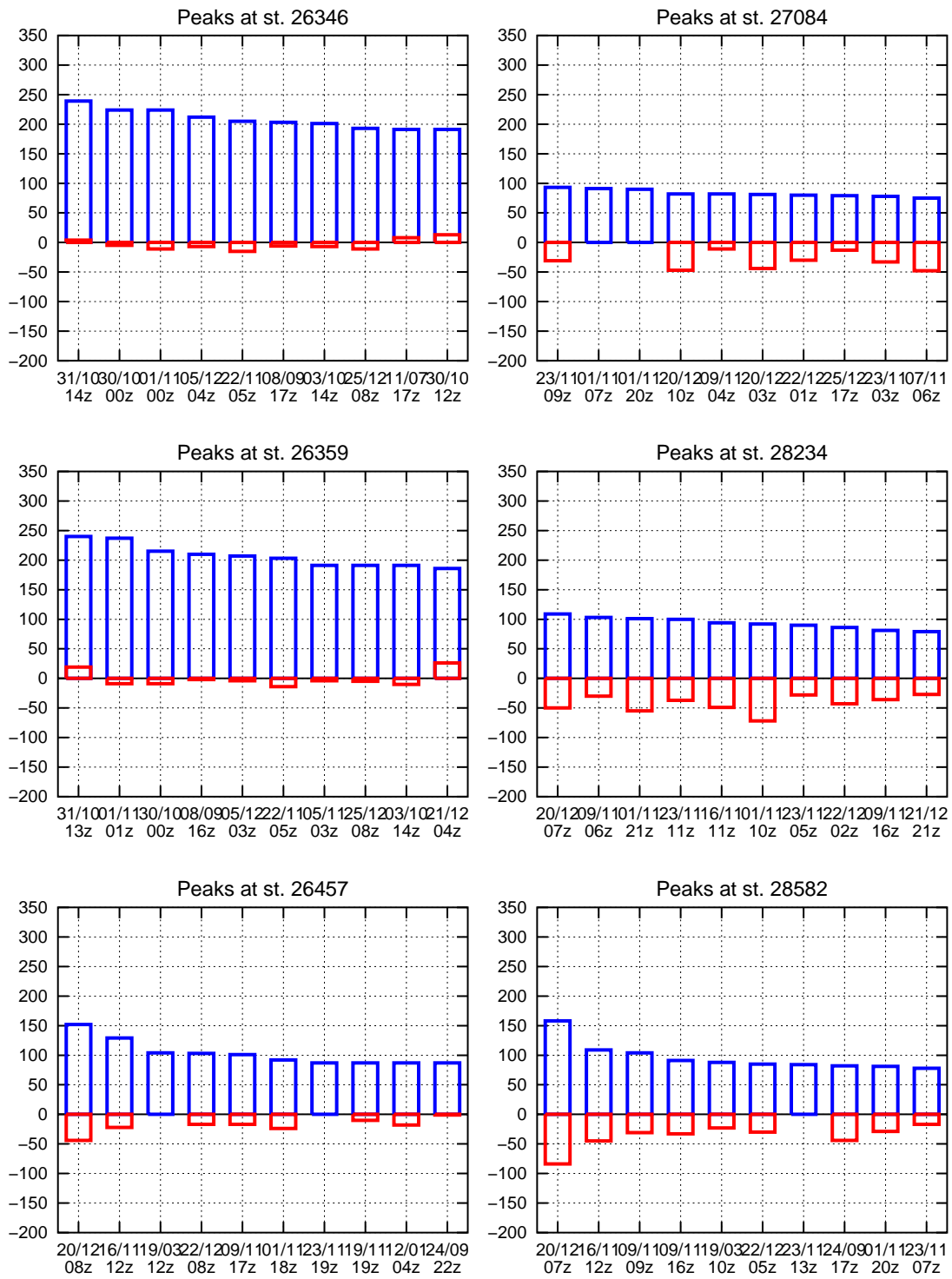
Figur 7. Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.



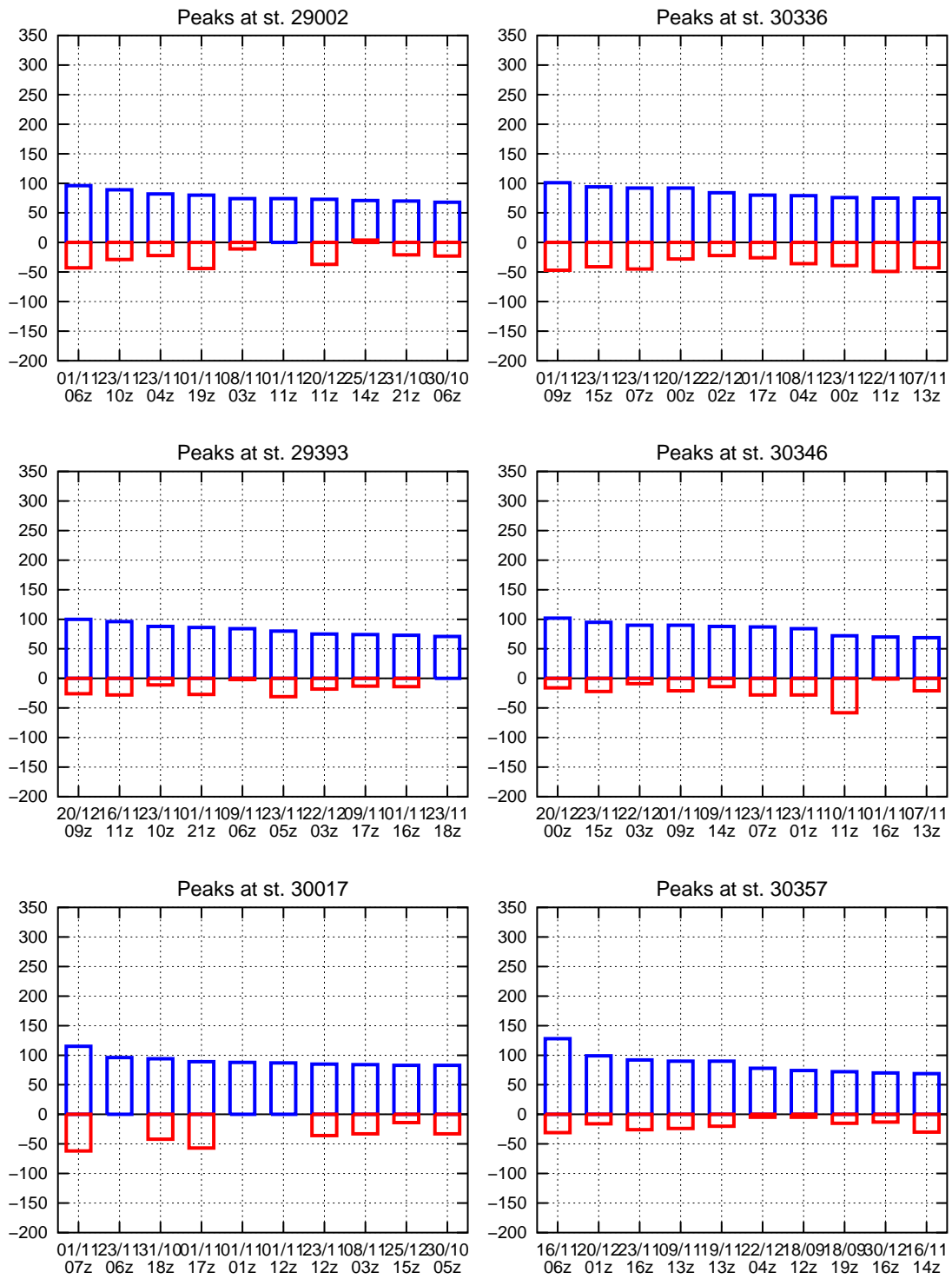
Figur 8. Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.



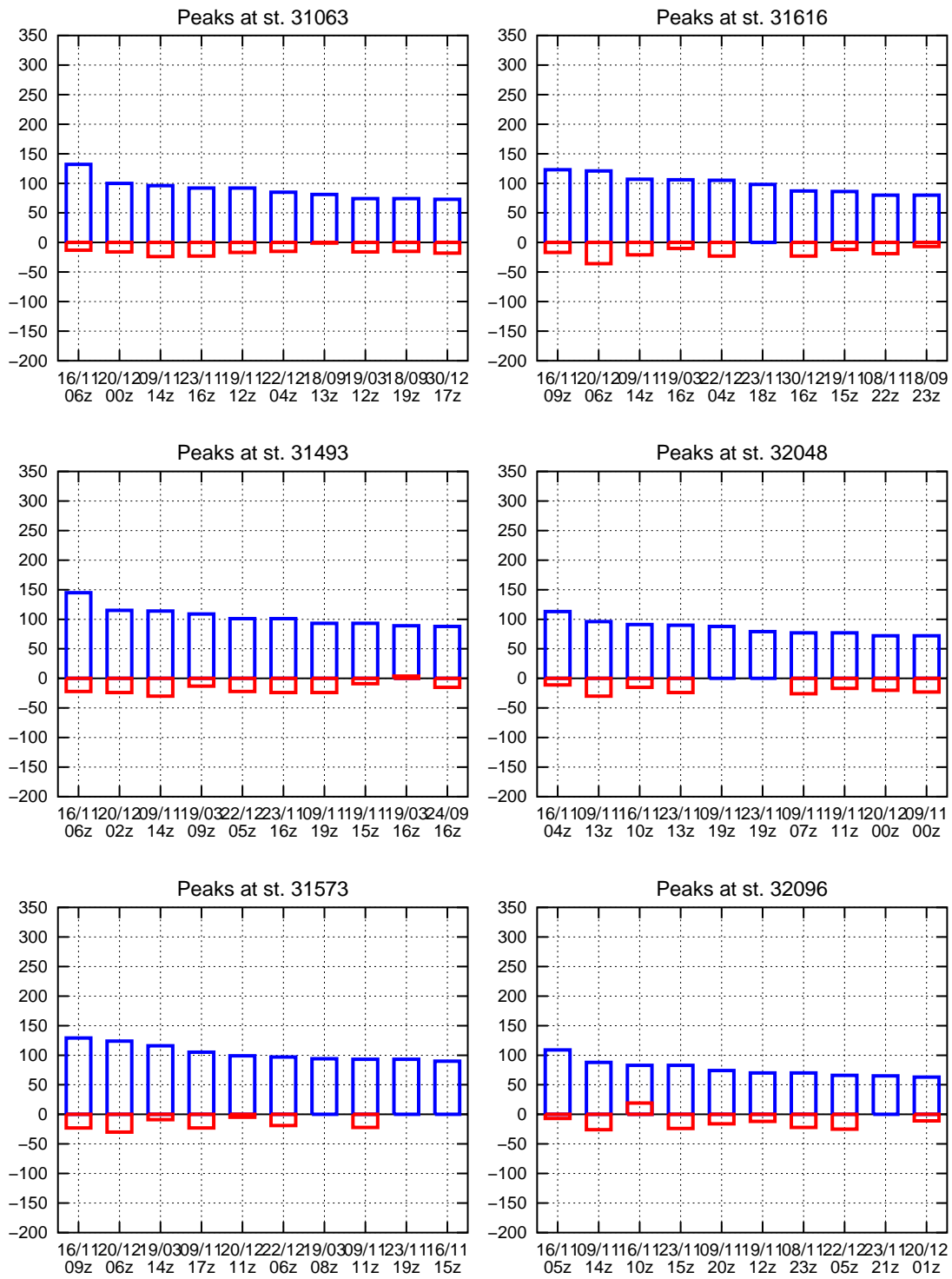
**Figur 9.** Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.



Figur 10. Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.



Figur 11. Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.

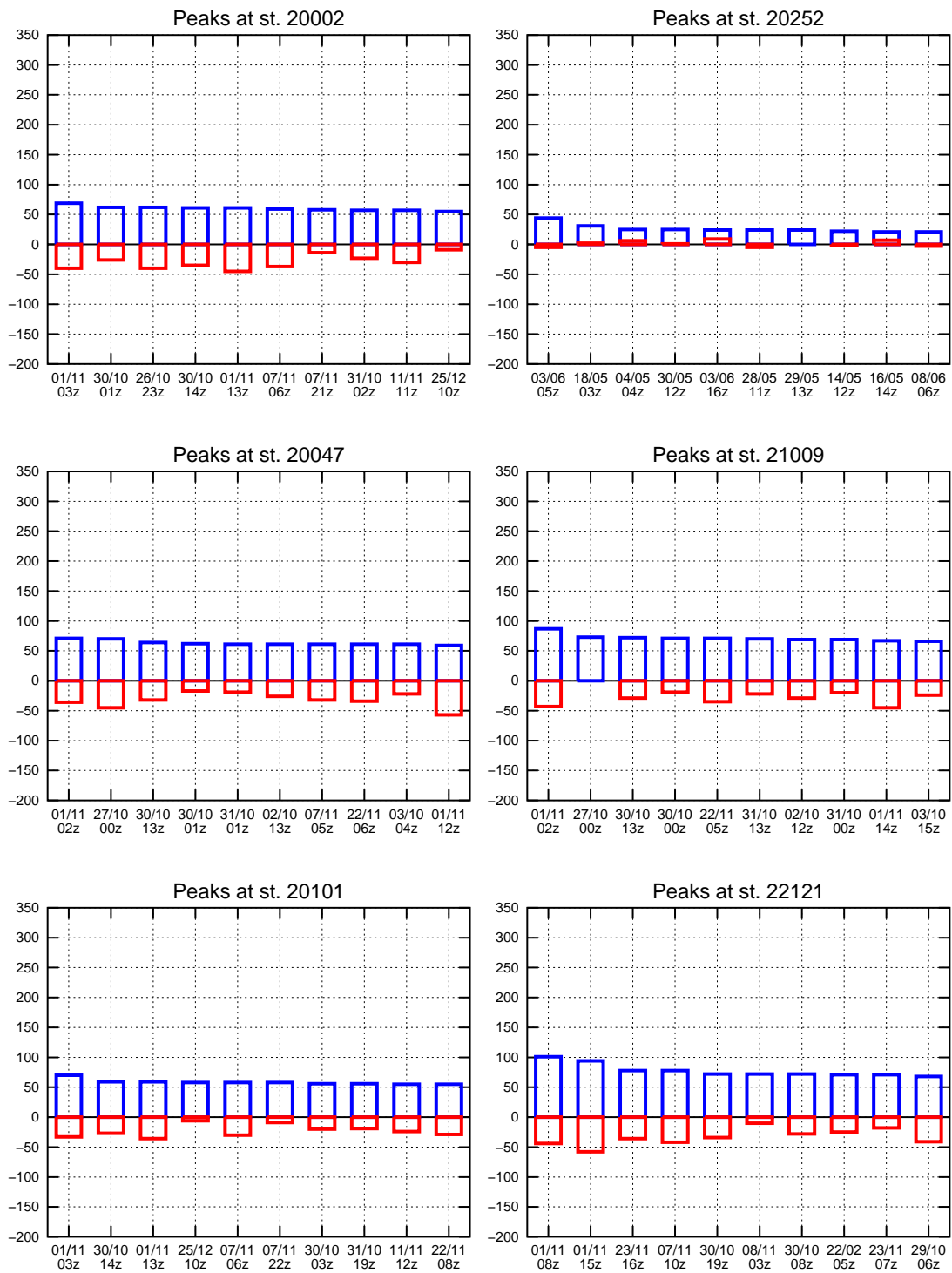


Figur 12. Højvande (blå) og tilhørende HIR prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-6 timer.

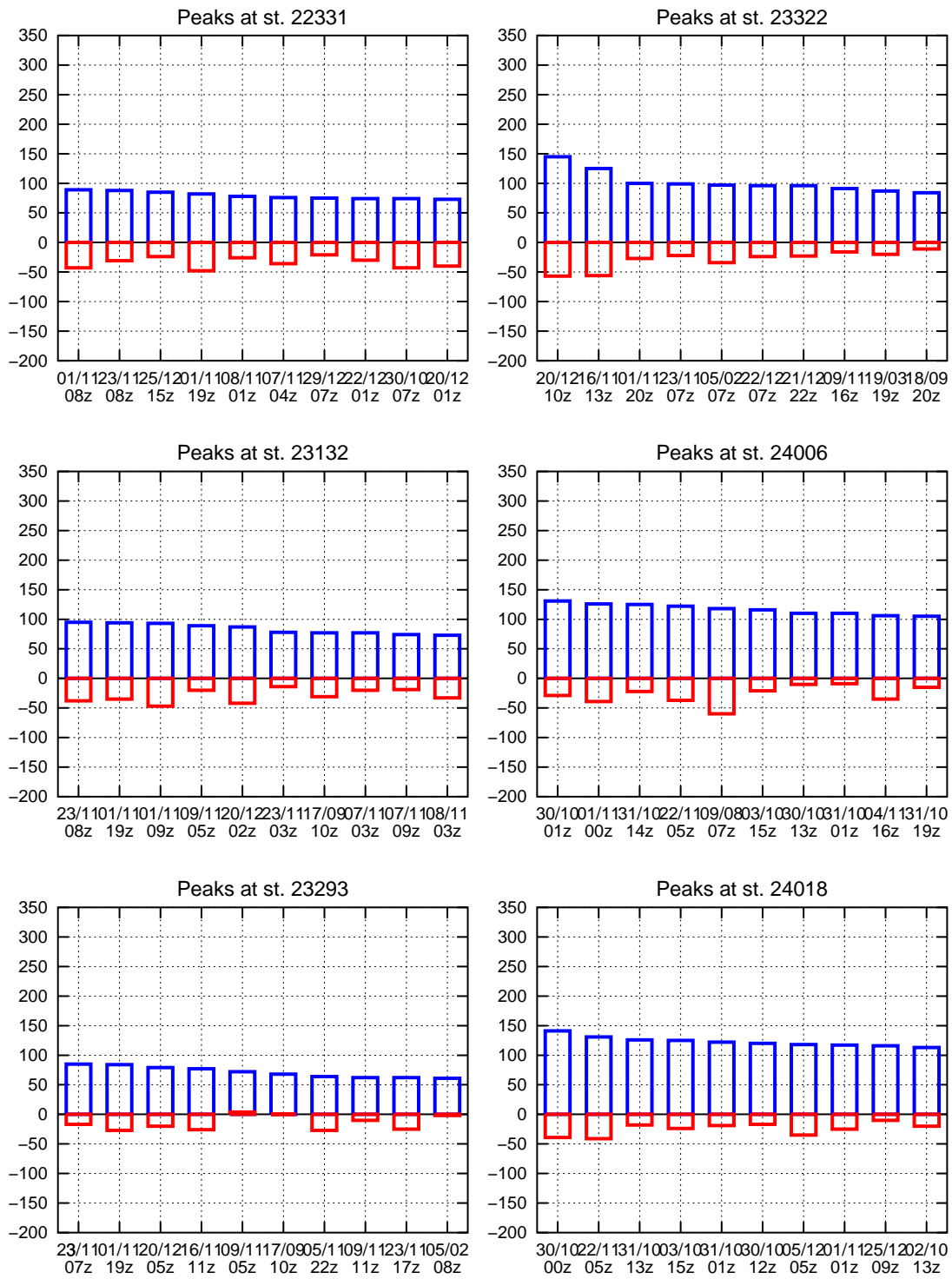
## **8.8 H - Højvande og prognosefejl (UKM)**

De følgende sider viser de 10 højeste højvande for hver station, samt tilhørende UKM prognosefejl med kort prognoselængde (0-12 timer). Stationsnumrene refererer til tabel 4 i Appendix A.

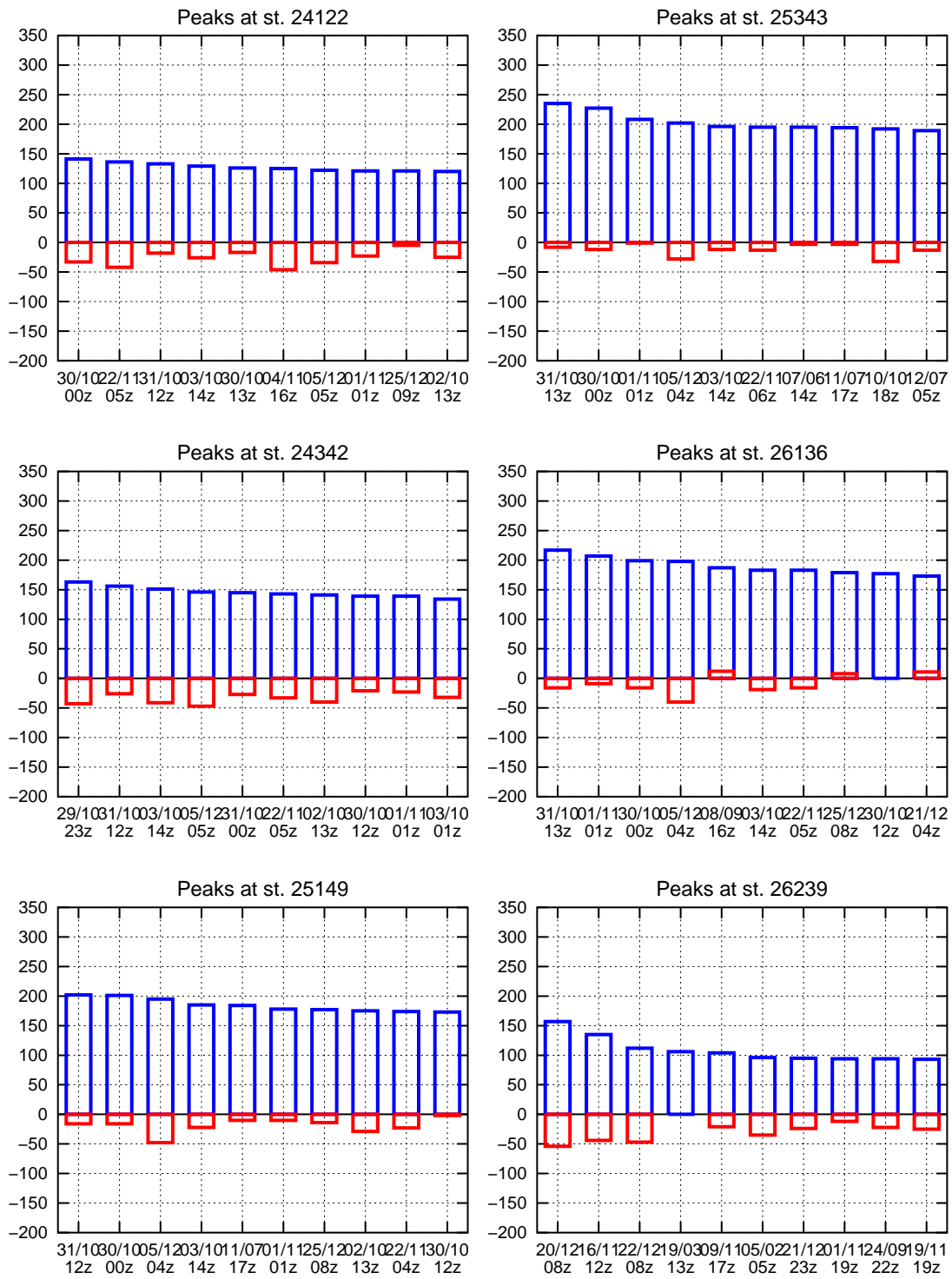




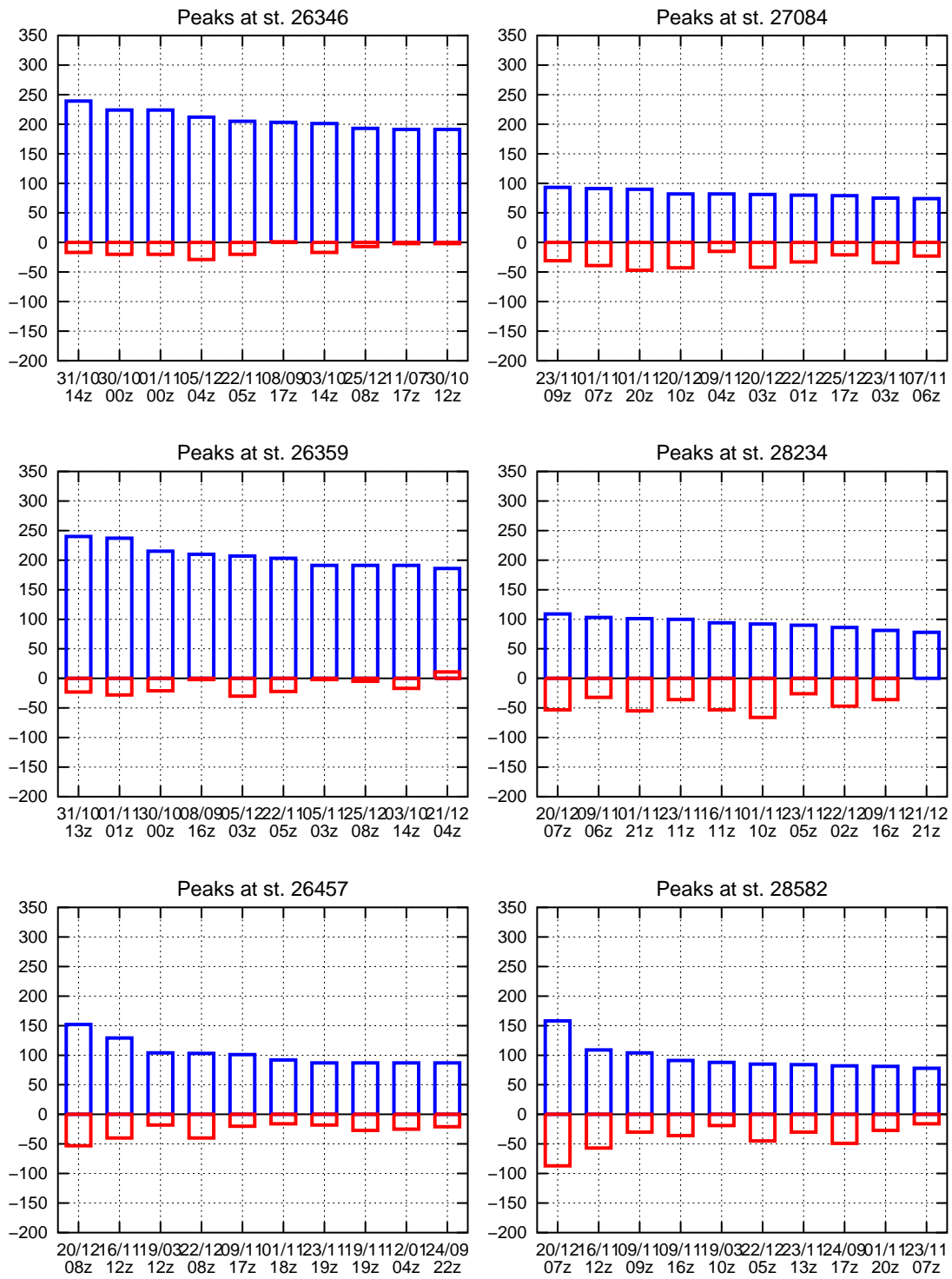
Figur 13. Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.



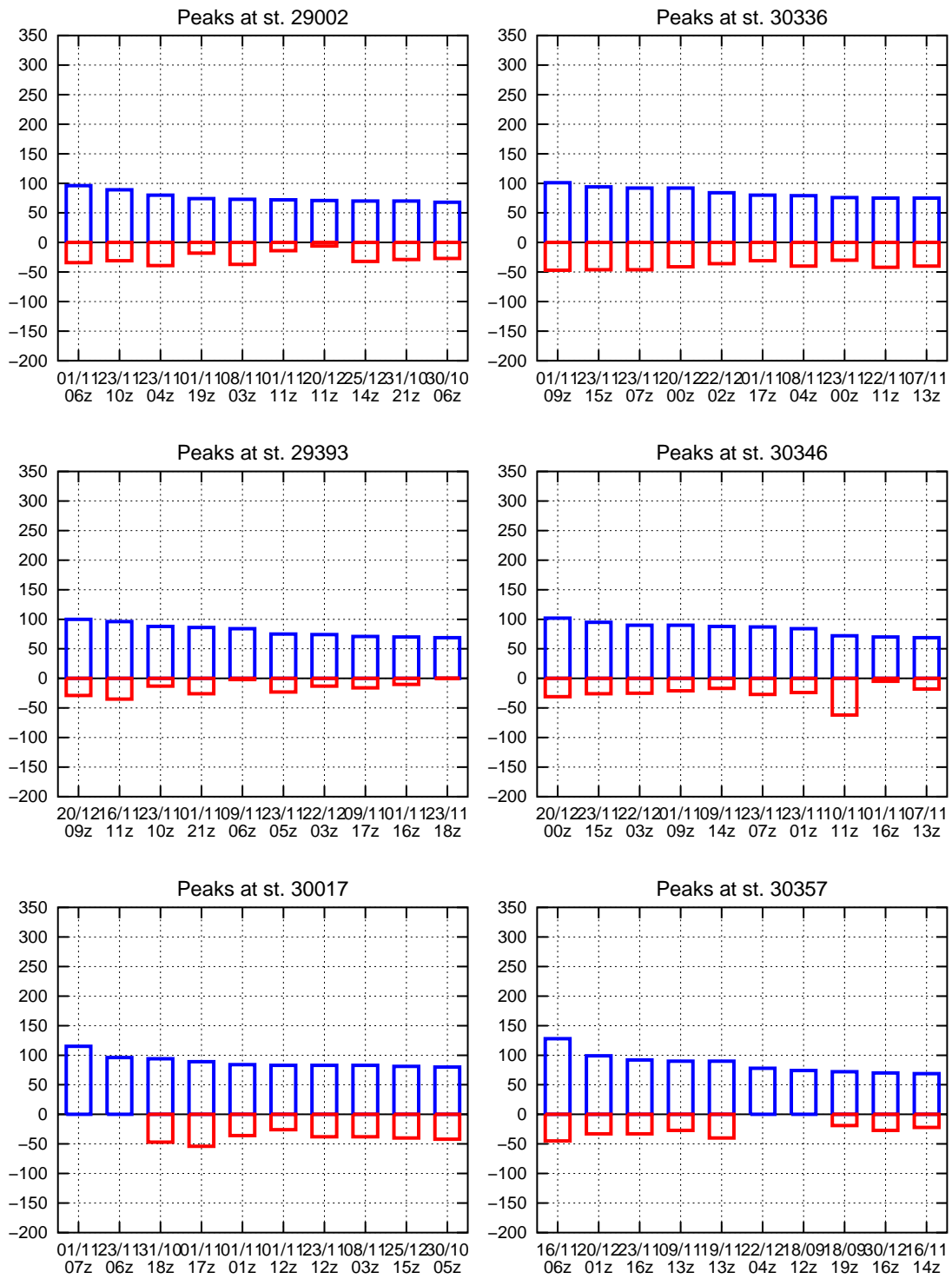
**Figur 14.** Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.



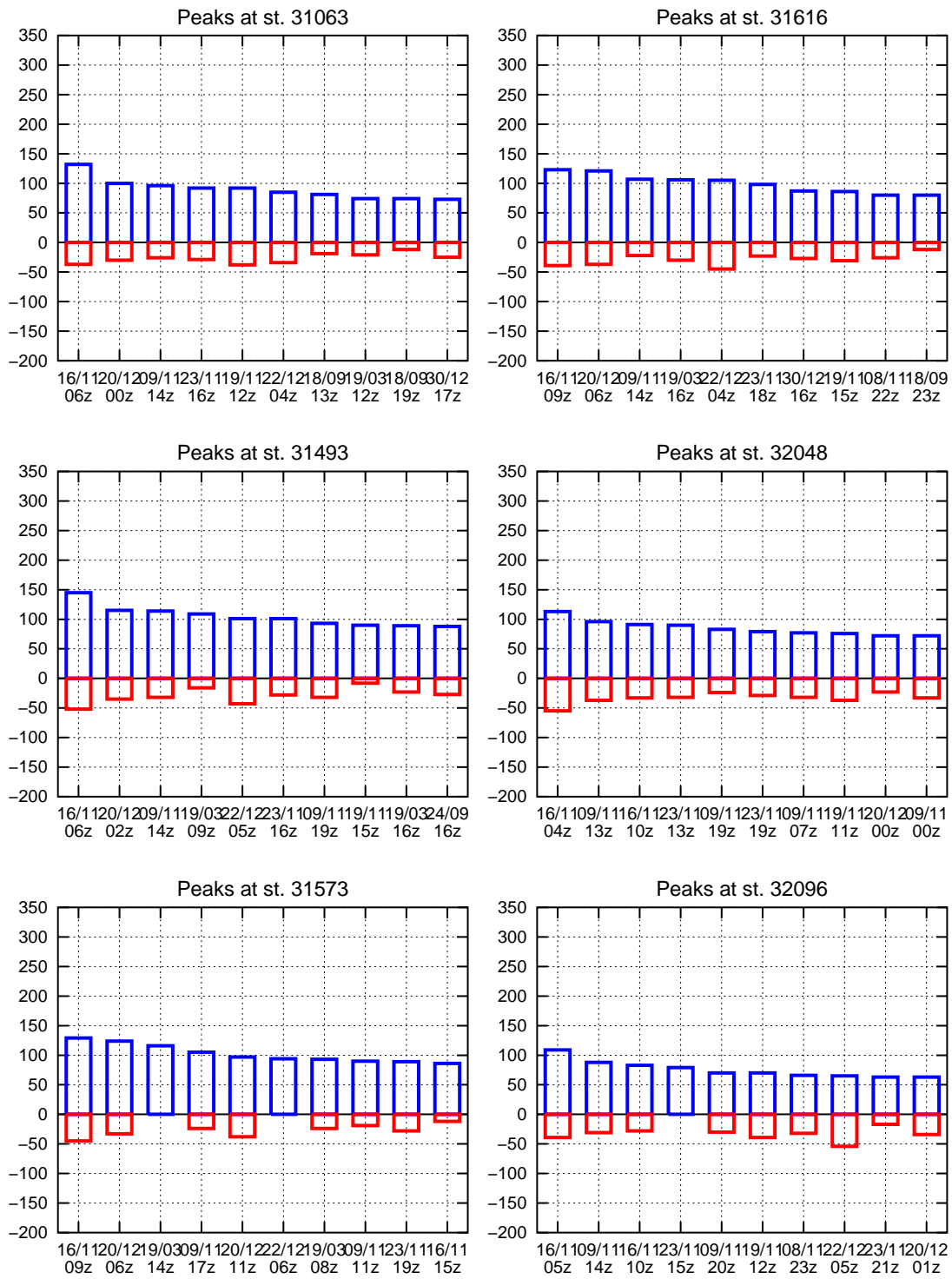
Figur 15. Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.



**Figur 16.** Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.



Figur 17. Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.



Figur 18. Højvande (blå) og tilhørende UKM prognosefejl (rød) på kort sigt, 0-12 timer.

## Litteratur

- [1] DHI. *MIKE 21. User Guide and Reference Manual, Release 2.7*. Dansk Hydraulisk Institut, Hørsholm, Danmark, 1998.
- [2] Kystdirektoratet. *Højvandsstatistikker 1997*, 1997.
- [3] Marineobservatorium. *Karten der Harmonischen Gezeitenkonstanten für das Gebiet der Nordsee*. Oberkommando der Kriegsmarine, Marineobservatorium Wilhelmshaven, Germany, 1942.
- [4] Jacob Woge Nielsen. Verification of Sea Level Forecast: 1997. Technical Report 98-5, Danmarks Meteorologiske Institut, 1998.
- [5] Jacob Woge Nielsen. Verification of Sea Level Forecast: 1998. Technical Report 99-23, Danmarks Meteorologiske Institut, 1999.
- [6] Jacob Woge Nielsen. DMIs operationelle stormflodsvarslingssystem. version 2.0. Technical Report 01-02, Danmarks Meteorologiske Institut, 2001.
- [7] Jacob Woge Nielsen. Verifikation af vandstandsprognoser: 2000. Technical Report 01-14, Danmarks Meteorologiske Institut, 2001.
- [8] Mads Hvid Nielsen. Mike 21 kalibrering 1998-99. Technical Report 99-22, Danmarks Meteorologiske Institut, 1999.
- [9] Hydrographer of the Navy. *Admiralty Tide Tables 1999*, 1999.
- [10] Jesper Larsen og Jacob Woge Nielsen. Opsætning og kalibrering af Mike21 til stormflodsvarsling for Limfjorden. Technical Report 01-07, Danmarks Meteorologiske Institut, 2001.
- [11] Mads Hvid Nielsen og Jacob Woge Nielsen. Stormflodsrapport: Højvandet den 19.-20. november 1999. Technical Report 00-19, Danmarks Meteorologiske Institut, 2000.
- [12] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Verification of Sea Level Forecasts: October 1993 – March 1994. Technical Report 94-11, Danmarks Meteorologiske Institut, 1994.
- [13] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Verification of Sea Level Forecast: 1994. Technical Report 95-4, Danmarks Meteorologiske Institut, 1995.
- [14] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Verification of Sea Level Forecasts: October 1994 – March 1995. Technical Report 95-9, Danmarks Meteorologiske Institut, 1995.
- [15] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Verification of Sea Level Forecasts: 1995. Technical Report 96-2, Danmarks Meteorologiske Institut, 1996.
- [16] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Stormflodsrapport: Højvandet den 29. og 30. oktober 1995. Technical Report 97-2, Danmarks Meteorologiske Institut, 1997.
- [17] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Stormflodsrapport: Højvandet den 6. og 7. november 1995. Technical Report 97-6, Danmarks Meteorologiske Institut, 1997.
- [18] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding. Verification of Sea Level Forecasts: 1996. Technical Report 97-1, Danmarks Meteorologiske Institut, 1997.
- [19] Jacob Woge Nielsen og Karsten Bolding og Lonny Hansen. Extreme sea level highs: A statistical tide gauge data study. Technical Report 96-3, Danmarks Meteorologiske Institut, 1996.

- [20] Jacob Woge Nielsen og Mads Hvid Nielsen. Verifikation af vandstandsprognoser: 1999. Technical Report 00-25, Danmarks Meteorologiske Institut, 2000.
- [21] Bent Hansen Sass, Niels Woetmann Nielsen, Jess U. Jørgensen, Bjarne Amstrup, and Maryanne Kmit. The operational DMI-HIRLAM system. Teknisk Rapport 00-26, DMI, København, Danmark, 2000.
- [22] Hans Jacob Vested, Henrik Rene Jensen, Helmer Petersen, Anne Mette Jørgensen, and Bennert Machenhauer. An operational hydrographic warning system for the North Sea and the Danish Belts. *Continental Shelf Research*, 12(1):65–81, July 1992.



## Tabeller

1	Nøgletal . . . . .	11
2	Succesrater . . . . .	12
3	Resultatkontrakt . . . . .	12
4	Vandstandsstationer . . . . .	16
5	Observeret statistik. . . . .	17
6	Nulpunktskorrektioner . . . . .	18
7	HIR statistik for hver station . . . . .	21
8	UKM statistik for hver station . . . . .	22

## Figurer

1	DKSS98 modelområde . . . . .	5
2	Vandstandsmålere . . . . .	6
3	Residual og spidsfejl . . . . .	9
4	Residualfejl som funktion af prognoselængden . . . . .	11
5	Spidsfejl som funktion af prognoselængden . . . . .	12
6	Nøgletal . . . . .	13
7	Højvande og HIR prognosefejl, st. 20002-22121 . . . . .	24
8	Højvande og HIR prognosefejl, st. 22331-24018 . . . . .	25
9	Højvande og HIR prognosefejl, st. 24122-26239 . . . . .	26
10	Højvande og HIR prognosefejl, st. 26346-28582 . . . . .	27
11	Højvande og HIR prognosefejl, st. 29002-30357 . . . . .	28
12	Højvande og HIR prognosefejl, st. 31063-32096 . . . . .	29
13	Højvande og UKM prognosefejl, st. 20002-22121 . . . . .	31
14	Højvande og UKM prognosefejl, st. 22331-24018 . . . . .	32
15	Højvande og UKM prognosefejl, st. 24122-26239 . . . . .	33
16	Højvande og UKM prognosefejl, st. 26346-28582 . . . . .	34
17	Højvande og UKM prognosefejl, st. 29002-30357 . . . . .	35
18	Højvande og UKM prognosefejl, st. 31063-32096 . . . . .	36