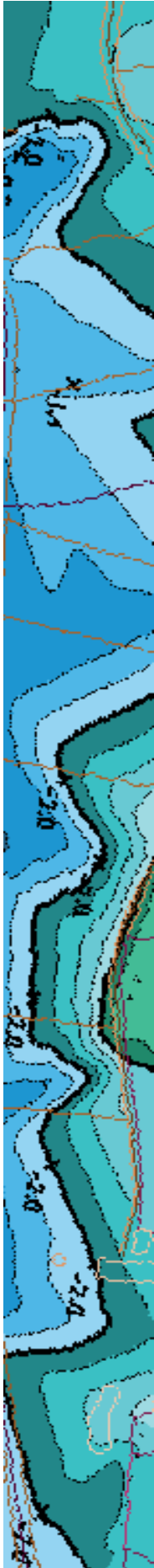


# Risikoanalyse af digebeskyttede områder

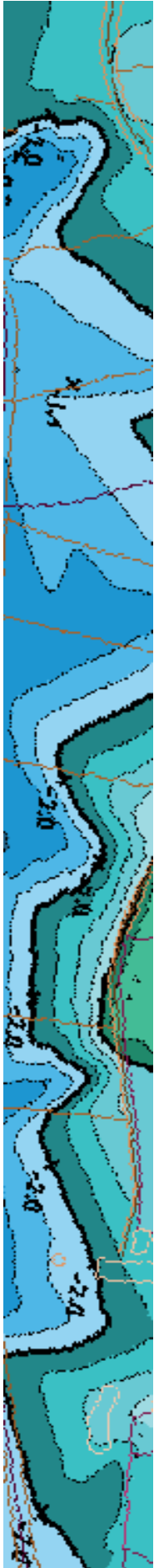




<b>Projekt</b>	Risikoanalyse af digebeskyttede områder
Startdato:	Juli 2002
Slutdato:	December 2005

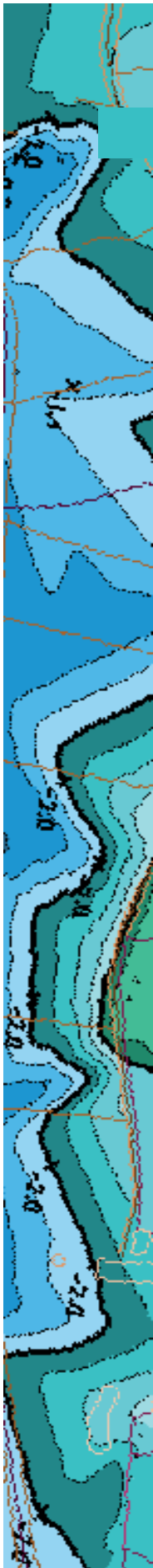
<b>Projektgruppe:</b>	
Projektansvarlig (PA):	Per Sørensen
Projektleder (PL):	Holger Toxvig Madsen
Projektmedarbejdere (PM):	Laurits Michael Bernitt Irene Andersen

Timeregistrering	11524
Kontering	11524
Godkendt af	<i>Per Sørensen</i>
Nøgleord	Risiko, Sandsynlighed, Konsekvens, Overløb, Brud, Klæg, Gennemlokning, Skår, Flodskarn, Ribe Dige, Rejsby Dige, Forskråning, Bagskråning, Juvre Dige, Indre vandstand
Distribution	Internet, Transport- og Energiministeriet, <a href="http://www.kyst.dk">www.kyst.dk</a> , Det Kongelige bibliotek



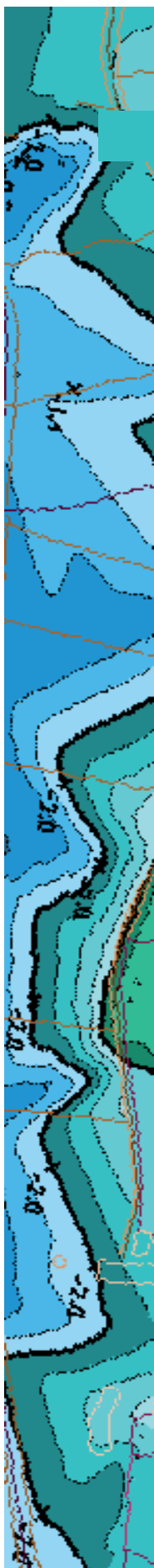
## Risikoanalyse af digebeskyttede områder

Juni 2006



## INDHOLD

<b>1 Indledning</b>	<b>2</b>
<b>2 Risikoanalyse af diger</b>	<b>3</b>
2.1 Teknikkens stade i Danmark	3
2.2 Teknikkens stade internationalt	4
2.3 Beregning af risiko	5
<b>3 Oversvømmelse - Indre vandstand</b>	<b>8</b>
3.1 Forskråningsbrud	8
3.1.1 Model for gennemlokning af et klæglag	9
3.1.2 Model for erosion af kernematerialet	19
3.1.3 Model for et digebruds tidlige udvikling	23
3.2 Det hydraulisk bagskråningsbrud	31
<b>4 Vurdering af konsekvenser</b>	<b>35</b>
<b>5 Konklusion</b>	<b>36</b>
<b>6 Referencemateriale</b>	<b>38</b>
6.1 Datastruktur og database	38
6.2 Referencer	39



## Indledning

Nærværende risikoanalyse for digebeskyttede områder er udarbejdet som en del af Kystdirektoratets (KDI) udviklingsprogram 2002-05, ref. /1/.

Formålet med projektet er at etablere et bedre risikobegreb for digebeskyttede områder, for derved at opnå et bedre beslutningsgrundlag for anlæg og omprojektering. Risikoen opgøres som produktet af sandsynlighed og konsekvens. I relation til diger vil det sige sandsynligheden for de indre vandstande integreret med oversvømmelsens konsekvenser.

Det indre vandspejl beregnes ved at etablere modeller til beskrivelse af henholdsvis forskråningsbruddet og bagskråningsbruddet. I modsætning til tidligere designpraksis, der knytter sig til analyse af enkelte plane principprofiler, er der etableret rummelige modeller der tager digelinjens længdeudstrækning og konstruktive kvaliteter i betragtning.

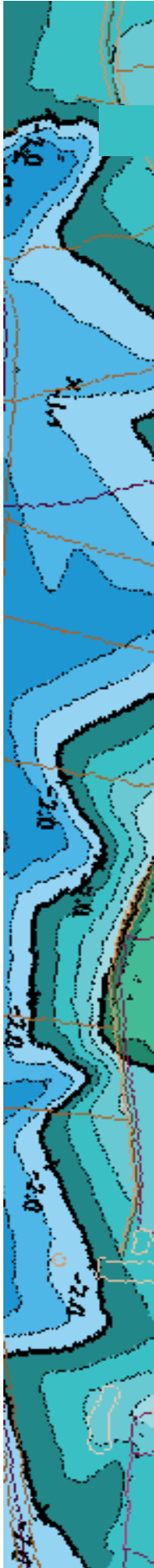
Konsekvenserne opgøres som materielle tab hidrørende fra tab af ejendom, løsøre, infrastruktur, produktionstab samt omkostninger til genetablering og oprydning efter et indre vandspejl. I stil med hidtidig dansk praksis forudsættes det, at der altid etableres et effektivt beredskab til alarmering og evakuering af personer og dermed forhindring af personskader.

Risikoen, knyttet til et bestemt inddiget område, opgøres som en monetær værdi per år. Beslutningsgrundlaget for anlæg og omprojektering vil typisk være en benefit-cost analyse, hvor nutidsværdien af de forskellige alternativets risiko set over en driftshorizont sammenholdes med en anlægsinvestering eller et konstruktivt alternativ.

Nærværende risikoanalyse etablerer og dokumenterer de nødvendige principper og modeller for at beregne risikoen hidrørende fra de to brudtyper forskrånings- og bagskråningsbrud for et digebeskyttet område udsat for en given stormflod.

Lemvig, december 2005  
Laurits Bernitt





## Risikoanalyse af diger

### 2.1 Teknikkens stade i Danmark

Kystdirektoratets seneste analyse af de sønderjyske havdiger er afrapporteret i rapporten, De syd- og Sønderjyske diger, Digerne Sikkerhedsniveau, ref. /2/. Digerne er her karakteriseret ved deres designstyrke. Designstyrken udtrykker det antal år der i middel hengår mellem stormsituationer, der når eller overstiger digets designmæssige styrke. Digets designstyrke er karakteriseret ved en såkaldt middeltidsafstand.

Analysen er en klassisk teknisk profilanalyse, efter Hollands forbillede ref. /3/, hvor man tager udgangspunkt i nærmeste vandstandsstatistik samt et korreleret bølgedatagrundlag. Designvandstanden er den vandstand, der svarer til, at 2 -10 % af bølgerne, graderet i henhold til bagskråningens hældning, formår at nå eller overstige digekronens niveau. Bølgeopløbet beregnes under hensyntagen til forskråningens anlæg. Designvandstandens returperiode svarer til digets styrke.

Metoden repræsenterede et stort fremskridt da den blev indført. Der er imidlertid en række væsentlige tekniske forhold metoden ikke tager hensyn til:

- Miljølastens variation. Høj vandstand og bølger optræder ikke nødvendigvis samtidigt og er af stokastisk natur.
- Kvaliteten og kvantiteten af digets klæglag
- Digets længdeudstrækning
- Oversvømmelsens omfang som funktion af det oversvømmede områdes topografi
- Konstruktioner i diget såsom sluser og underføringer

Den tekniske profilanalyse, ref. /2/, inddrager overhovedet ikke de økonomiske aspekter.

I stormflodsrisikoanalysen 1988, ref. /4/, er der angivet en statistisk metode til at tage miljølasterens variation i regning, ligesom der er taget hensyn til at digerne i almindelighed kan modstå betydeligt større bølgeoverløb end 2% bølgeoverløbet.

Det er væsentligt at fastslå at design og udførelse af klægslag i høj grad er baseret på udokumenterede erfaringer blandt entreprenører og organisationer, der i mange år har beskæftiget sig med digebyggeri.

Den seneste analyse hvor såvel tekniske som økonomiske forhold samarbejdes til et beslutningsgrundlag vedrørende omprojektering af de Sønderjyske diger findes i "Forstærkning af havdigerne i Tønder og Ribe amter", 1973, ref. /5/. Analyse er en klassisk benefit-cost analyse hvor reduktionen i risiko sammenlignes direkte med anlægsomkostningerne. Risikoen baseres på tab såsom ejendomsværdi og produktionsstab.

I henhold til normal dansk praksis, forudsættes der at være etableret et effektivt alarmerings- og evakueringsystem, hvorved sandsynligheden for personskader kan anses for ubetydelig.

## 2.2 Teknikkens stade internationalt

I Holland har man ved lov "Flood Defense Act" (1995) fastsat sikkerhedskrav til oversvømmelsesbeskyttelse. Der opereres i denne lov med sikkerheder i form af overskridelsessandsynligheder varierende fra 1.250 år til 100.000 år.

I de seneste 15 år har det tekniske fokus indenfor analyse af diger været inspireret af pålidelighedsanalysen, ref. /6/. Pålidelighedsanalysen kan gennemføres på forskellige niveauer og bliver ultimativt et rent probabilistisk studie, ref. /7/.

Forudsætningen for at kunne gennemføre et probabilistisk studie er at der kan etableres formaliserede fejlfunktioner for de forskellige problemstillinger. Fejlfunktionerne defineres grundlæggende som forskellen mellem styrke og belastning. Styrke og belastning udtrykkes ved stokastiske parametre. De forskellige problemstillinger organiseres i et fejltræ, hvis ultimative tilstand er oversvømmelsen, ref. /6/. Fejltræet kan blive meget omfattende og kompliceret alt afhængig af hvor mange fejlmekanismer man tager i regning, ref. /8/.

Pålidelighedsanalysen har vundet stor udbredelse, og mange normer er i dag opbygget omkring acceptable fejlsandsynligheder og pålidelighedsindeks, ref. /9/. Den rene pålidelighedsanalyse involverer imidlertid ikke økonomi, ligesom de statistiske metoder i almindelighed indeholder forudsætninger om stationaritet. Efter store anstrengelser vælger det Hollandske Centre for Civil Engineering Research and Codes, Technical Advisory Committee on Water Defences i deres 1990 studie, ref. /6/, at afstå fra at etablere en ny design praksis under hensyntagen til, at der stadig findes mange mangler i vores viden om digets problemstillinger.

Hollændernes tekniske ambition indenfor analyse af diger går dog klart fra de nuværende overskridelsehyppigheder, ref. /3/, mod en egentlig risikoanalyse, hvor det indre vandspejls sandsynligheder bestemmes og integreres med de værdier, der går tabt i konsekvens af oversvømmelserne, ref. /10/.

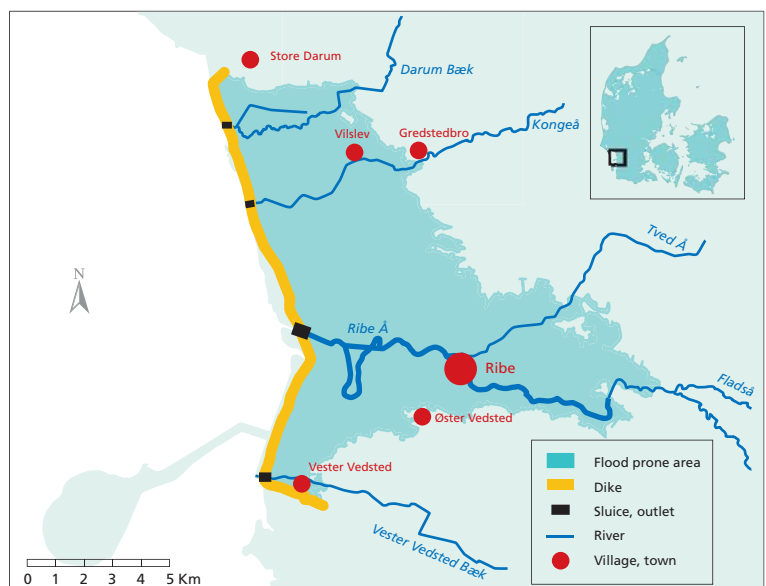
En meget væsentlig del af en fremtidig risikoanalyse vil dreje sig om at fastsætte og vurdere skadernes omfang. Både Hollænderne og Englænderne har gjort sig tanker om disse forhold jf. ref. /6/ og /11/. Såvel materielle som immaterielle forhold tages i betragtning. Ligesom der gøres overvejelser om tab af menneskeliv.

## 2.3 Beregning af risiko

Det moderne risikobegreb, hvor risikoen R opfattes som produktet af sandsynlighed  $P_f$  og konsekvens C, har den oplagte fordel at teknik og økonomi kan knyttes sammen til et enkelt rationelt beslutningsgrundlag.

$$R = P_f \times C \quad (1)$$

I Figur 1 er skitseret et område beskyttet af et dige. Området betegnes en digekog eller blot en kog. Den grundlæggende problemstilling drejer sig om, at der bag digelinjen findes en række værdier der vil gå tabt eller blive skadet såfremt, der trænger vand ind i kogen.

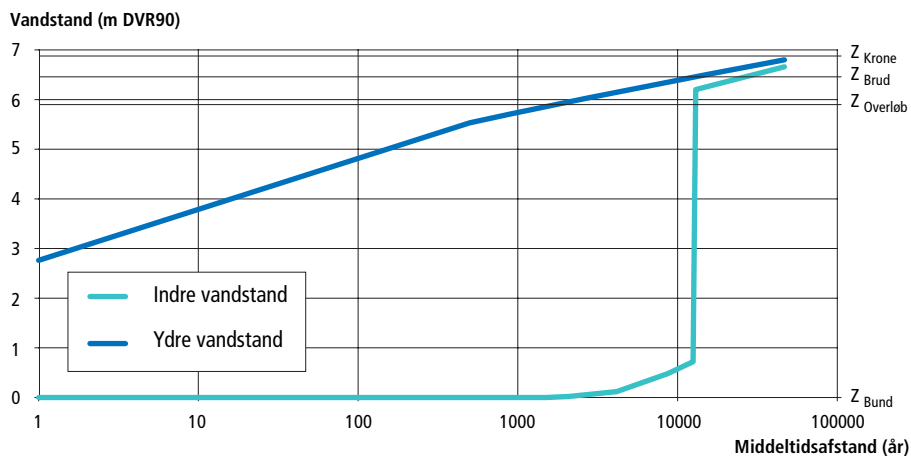


Figur 1 Et digebeskyttet område indeholder nogle værdier som trues af en ydre miljølaster eg. Ribe kog, ref. /12/.

Den skadevoldende begivenhed er et indre vandspejl. Det indre vandspejl opstår som konsekvens af en ydre miljølaster i form af vandstand og bølger, der trænger gennem digelinjen og ind i det beskyttede område. Det tekniske problem består derfor i at forstå og kvantificere de brudmekanismer, der kan nedbryde digelinjen og føre til et indre vandspejl. Mange forfattere har opstillet talrige fejlmekanismer, der har en uspecificeret oversvømmelse til konsekvens. For at kunne an-

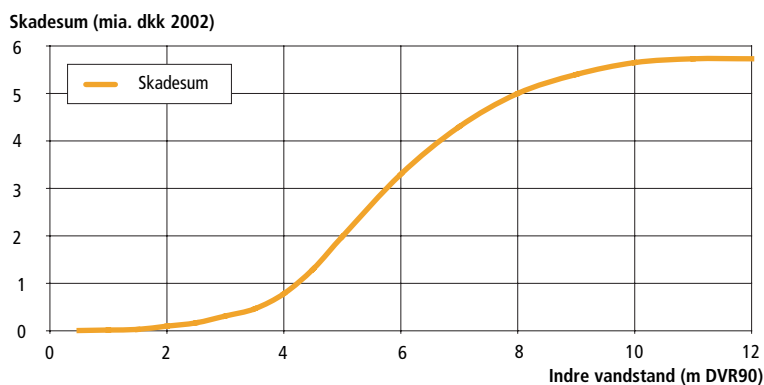


vende risikobegrebet i relation (1) er det imidlertid nødvendigt at kunne knytte en ganske bestemt sandsynlighed til de indre vandstande. De enkelte fejlmekanismer skal derfor være kortlagt i et omfang, så det ydre vandspejl kan transformeres til et indre vandspejl.



Figur 2 Principielle middeltidsfordelinger for det ydre  $F_Y(t)$  og det indre  $F_I(t)$  vandspejl eg. Ribe kog, ref. /12/.

I Figur 2 er foretaget en principiel sammenstilling af det ydre  $F_Y(t)$  og det indre  $F_I(t)$  vandspejls middeltidsfordelinger. En vandstands middeltidsafstand udtrykker det tidsrum der i middel hengår mellem at vandstanden nås eller overskrides. Det ydre vandspejl har langt hovedparten af sin sandsynlighedsmasse koncentreret i den daglige tidevandszone. Imidlertid forekommer der en øvre hale, der indeholder stormflodsvandstande af enhver højde. På et eller andet tidspunkt bliver den ydre vandstand så høj at bølgerne begynder at slå over digekronen. Denne vandstand betegnes  $Z_{\text{Overløb}}$ . Bølgeoverløbet og et eventuelt indvandsproblem vil udgøre de første bidrag til det indre vandspejl. Forøges vandstanden yderligere op imod kronens niveau  $Z_{\text{Krone}}$  vil der på et eller andet tidspunkt opstå et regulært digebrud. Denne vandstand betegnes  $Z_{\text{Brud}}$ . I Figur 2 er angivet hvorledes det indre vandspejls frekvensfunktion starter ved kogens bund,  $Z_{\text{Bund}}$ , og derefter asymptotisk nærmer sig til det ydre vandspejl når den indre vandstand når op i niveau med digekronen. Området fra  $Z_{\text{Bund}}$  og til den indre og den ydre frekvensfunktion er sammenfaldende betegnes modulationsområdet. Det er digets konstruktive kvaliteter der er ansvarlige for denne modulation.



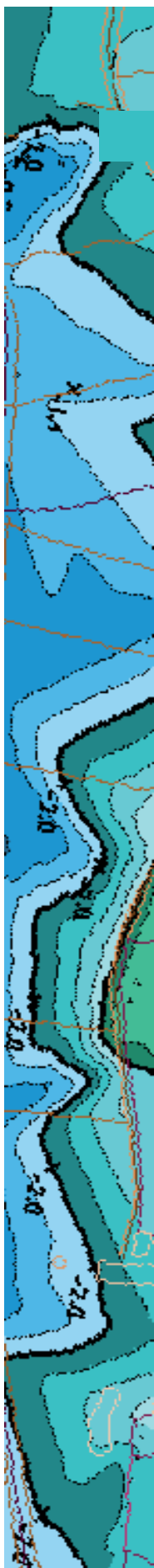
Figur 3 Skadeshypso grafen  $C(z)$  udtrykker skadernes monetære værdi som funktion af den indre vandstand eg. Ribe kog.

Konsekvensen af et indre vandspejl betegnes skadeshypsografen  $C(z)$ . Skadeshypsografen defineres som en monetær værdi som funktion af det indre vandspejl. Skadeshypsografens principielle forventede forløb er angivet i Figur 3. Skadeshypsografen kan sammensættes af både materielle og immaterielle bidrag. Generelt bør der knyttes lige så store anstrengelser til at fastlægge skadeshypsografen som til at bestemme det indre vandspejl.

$$R = \int f_i(z) \cdot C(z) dz \quad (2)$$

Når såvel det indre vandspejls frekvensfunktion  $f_i(t)$  som skadeshypsografen  $C(z)$  er etablerede, beregnes kogens risiko ved at integrere produktet af frekvensfunktionen og skadeshypsografen (2). Der er principielt tale om et uendeligt integral, men sandsynlighedsmassen for de højere vandstande bliver normalt hurtigt så beskeden, at det i praksis kun er vandstandene i modulationsområdet, der bidrager væsentligt. På lignende vis bemærkes at skadesummerne indenfor et geografisk afgrænset område vil antage en konstant værdi fra et passende højt niveau og videre op.

Risikoen  $R$  udtrykkes som en monetær værdi per år henregnet til et bestemt år. Frekvensfunktionen for det indre vandspejl  $f_i(t)$  udtrykker den årlige frekvens af en given indre vandstand, medens skadeshypsografen  $C(z)$  udtrykker skadens monetære omfang.



## Oversvømmelse - Indre vandstand

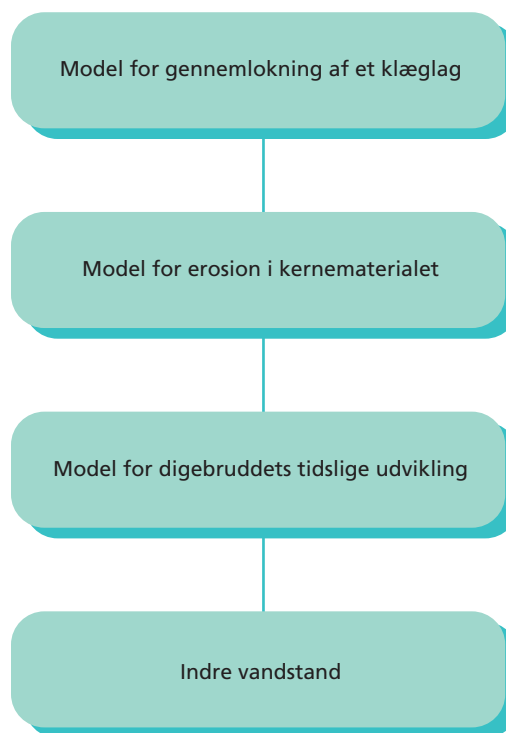
Den indre vandstand er den skadevoldende begivenhed i et digebeskyttet område. De danske dige erfaringer og forsøg som registreret i ref. /13/, /14/, /15/, /16/ og /4/ bekræfter at de centrale problemstillinger har været knyttet til erosion i forskrånning eller bagskrånning. De bedst beskrevne danske digebrud er knyttet til stormen 3. december 1999, ref. /16/.

På baggrund af de danske erfaringer og registreringer udvikles i det følgende dels en model for beregning af indre vandstand som følge af et forskråningsbrud, se afsnit 3.1 og dels en model for beregning af indre vandstand som følge af et bagskråningsbrud, se afsnit 3.2. Af operative hensyn holdes modellerne på et niveau så de kan anvendes indenfor rammerne af et regneark.

De forskellige modeller indeholder et omfattende datamateriale om diger, profiler, jordarter, skår, erosionsdybder, ydre vandstande, bølgekonditioner, indre vandstande samt kalibrerings- og kontrolberegninger. Modellerne og deres datamateriale er organiseret som MS Excell regneark på den tilhørende projekt CD. Projektets datastruktur er sammenfattet i Afsnit 6.1 Datastruktur og databasis.

### 3.1 Forskråningsbrud

Under stormfloderne 3 januar 1976 og 3 december 1999 opstod der meget omfattende skader og regulære digebrud på Rejsby dige, ref. /13/, /14/, /15/ og /16/. Stormfloderne og deres feltdata er ikke simple at fortolke, men efter mange forgæves forsøg er der etableret et sammenhængende og kalibreret kompleks af modeller. Modellerne består dels af en model for stormflodens gennemlokning af et klægslag, dels en model for erosion i en digekerne bestående af klægblandet sand og endelig en model for et digebruds tidlige udvikling. Modelkomplekset til beregning af digebrud som følge af et forskråningsbrud er skitseret i Figur 4.



Figur 4 Modelkompleks til beregning af indre vandstand som følge af et forskråningsbrud, der eroderer sig gennem digekernen.

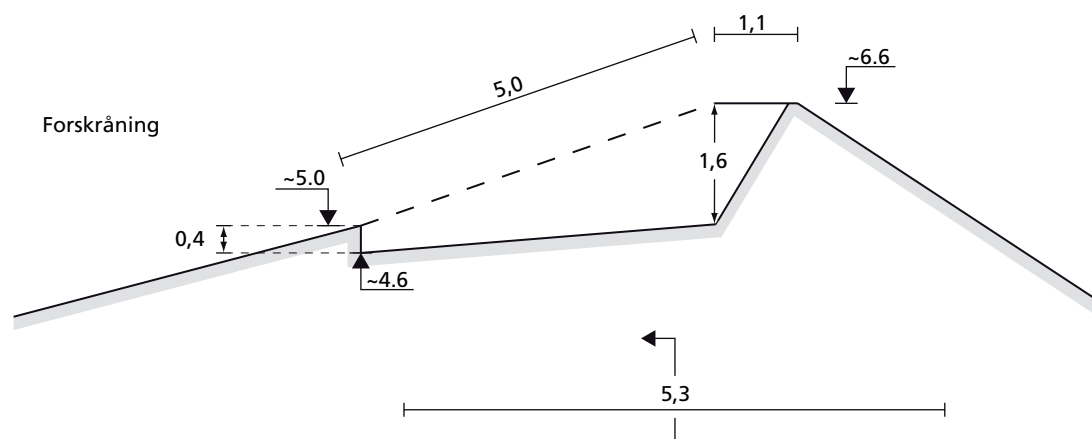
### 3.1.1 Model for gennemlokning af et klægslag

#### Datagrundlag

Fotoflyvningen af Rejsby Dige efter stormfloden 3 januar 1976, ref. /14/, samt de 90 opmålte større digeskader, ref. /13/, udgør det væsentligste grundlag for at etablere en model for gennemlokning af et klægslag. I Figur 5 er angivet et udsnit af fotoflyvningen mellem station 3,0 og 5,0. Af figuren fremgår en del spredte digeskår og skred i bag-skråningen. I Figur 6 er angivet tværprofil og karakteristiske mål for et typisk skår fra opmålingsrapporten, ref. /13/.



Figur 5 Luftfoto fra Rejsby dige efter stormfloden 3. januar 1976, station 3,0 til 5,0 omkring Brøns sluse, ref. 114/. Der fremgår spredte skår i forskråning og kerne samt skred i bagskråningen. De nummererede skader er nærmere opmålt i opmålingsrapporten ref. 113/.

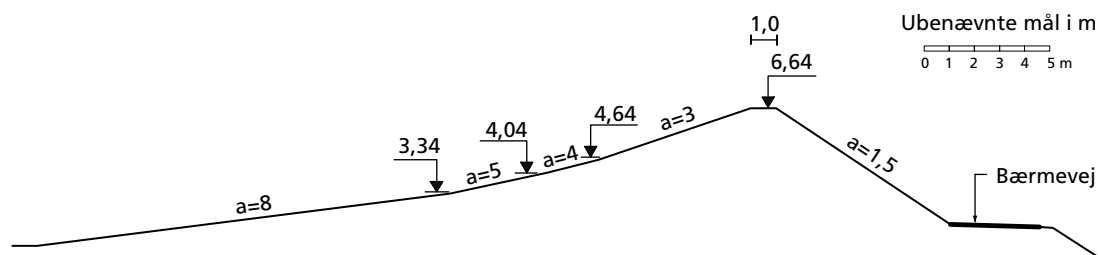


Figur 6 Tværprofil af digeskår fra station 3,1 Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976, ref. /13/.

En minutiøs gennemgang af billederne i fotoflyvningen, ref. /14/ har afsløret at der sammenlagt kan optælles 1280 synlige huller i forskråningen af Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976. Optællingen er afrapporteret i Gennemlokning\_RejsbyJan76.xls, se Afsnit 6.1.

Rejsby diges principprofil er angivet i Figur 7, ref. /18/. Digets forskråning er anlagt med varierende anlæg 8, 5, 4 og 3. Ved at måle alle gennemlokningernes nedre kant i forhold til digekronen og antage en typisk radius på 0,7 m kan hver gennemlokning henføres til en bestemt højdeklasse på forskråningen. At benytte lige netop 0.7 m fører til en fordeling af skader som anført i Tabel 1. Denne fordeling har sit maksimum af skader beliggende i overgangen fra anlæg 3 til 4, hvilket stemmer godt med felterfaringer for skaders opståen.



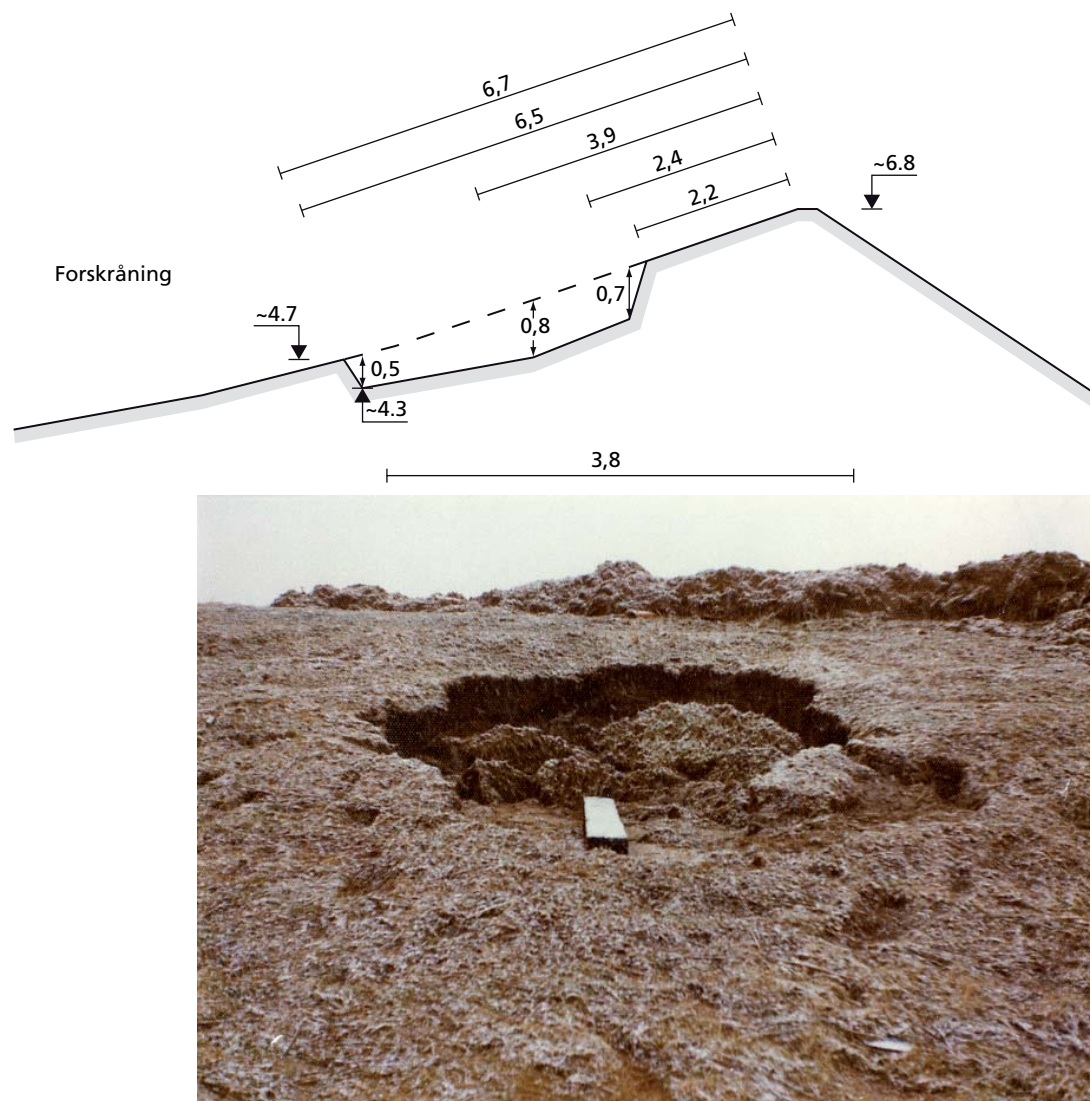


Figur 7 Principprofil for Rejsby dige forud for stormen 3. januar 1976, ref. /18/. Bagskråning med anlæg 1,5 og uden klægdække.

Kote interval (m DVR90)	Anlæg	Antal Gennemloknings
6.64 - 6.44	3	0
6.44 - 6.14	3	9
6.14 - 5.84	3	47
5.84 - 5.54	3	91
5.54 - 5.24	3	116
5.24 - 4.94	3	157
4.94 - 4.64	3	267
4.64 - 4.34	4	219
4.34 - 4.04	4	212
4.04 - 3.74	5	105
3.74 - 3.44	5	47
3.44 - 3.14	7	10
3.14 - 2.84	8	0
2.84 - 2.54	8	0

Tabel 1 Antal gennemloknings af Rejsby Diges forskråning fordelt på 0,3 m højdeklasser baseret på analyse af fotoflyvningen, ref. /14/, efter stormfloden 3 Januar 1976. De enkelte gennemloknings antages at have en radius på 0,7 m.

I forbindelse med en stormflod optræder der store mængder flodskarn. Flodskarn har en tilfældig sammensætning af drivende genstande og affald og fremgår af en del af billederne i opmålingsrapporten, ref. /13/. Strå, græs og affald dominerer, men der forekommer også store faste genstande såsom brædder, trækasser, sveller, træstød, sømærker og konstruktionsdele, se Figur 8. I opmålingsrapporten forekommer der fotografier af 64 skadesteder. I 12 ud af 64 billeder kan der iagttages større faste genstande. Disse faste genstande må anses for nøglen til de talrige spredte og tilsyneladende tilfældige skår som fremgår af flyfotografierne, ref. /14/.



Figur 8 Tværprofil af et digeskår fra station 23,0 på Rejsby dige efter stormfloden den 3. januar 1976 med foto af svelle og flodskarn på digekronen, ref. /13/.

Der findes ingen information om dæklaget på Rejsby dige som det blev anlagt tilbage i 1923-1925. Af opmålingsrapporten, ref. /13/, fremgår der dog en tydelig fortanding ved den nedre forkant af de fleste skår. Fortandingen er udtryk for at der findes et dæklag med større erosiv kvalitet end kernematerialet. Denne fortanding er opmålt i de fleste tilfælde. Ved at beregne middelværdi for fortandingens størrelse og forudsætte at dæklaget er tæt integreret med et græs-dække på 10 cm ansættes dæklagets tykkelse til 0,4 m, jf. Gennemlokning\_RejsbyJan76.xls, Afsnit 6.1.

Dæklagets og kernematerialets kvalitet i Rejsby dige, kan bedømmes ud fra de gennemsnitlige boringsresultater, der findes dokumenteret på grundplan 104-1800-33 nr. 191 af 6 august 1968. For den øvre meter fremgår et typisk klægindhold på 13 %, sandblandet klæg på 45 %, sand 29 % og muld 13 %. De tilsvarende tal for det dybereliggende kernemateriale udgør 5 % klæg, 35 % sandblandet klæg og endelig 60 % sand.

For at kunne tillægge dæklaget på Rejsby dige en kvalitet med hensyn til gennemlokning defineres en kvalitetsskala i henhold til Tabel 2. Herved kan kvaliteten af Rejsby diges dæklag fastsættes til 1.5, idet der bortses fra muldlaget. Klægkvalitet 1.5 svarer til dårlig klæg.

Jordart	Kvalitet	Visuel/fysisk karakteristik
God klæg	3	Blåklæg og klæg
Sandet klæg	2	"Klæg – sand"
Dårlig klæg	1.5	"Klæg – sand – sand"
Sand med klæg	1	"Sand – sand – Klæg" og "Sand – klæg"
Sand	0	"Sand"

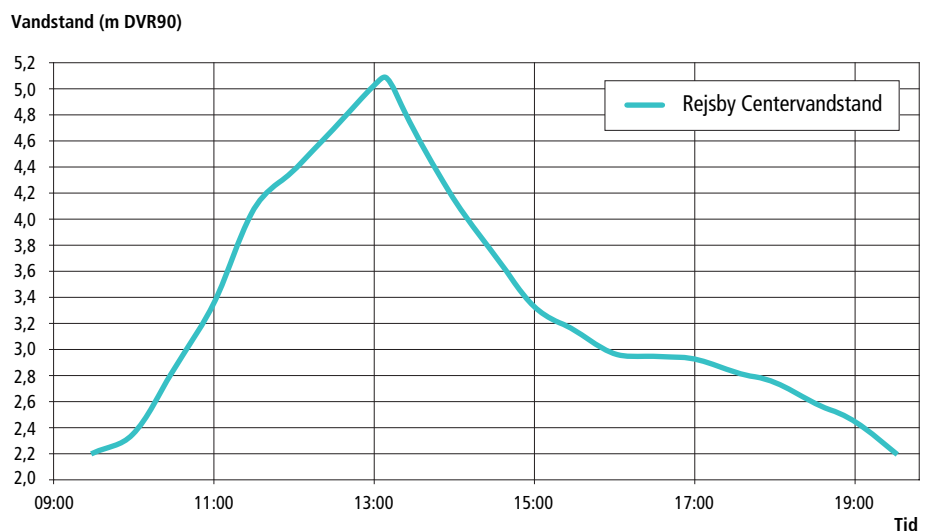
Tabel 2 Kvalitetsskala for dæklag i relation til gennemlokning. De visuelle/fysiske termer er oplyst af KDI's mangeårige formand på Rømø arbejdsplads, Gunnar Mensel.

Vandstandsforholdene langs Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976 er tidligere blevet bestemt i ref. /4/. Maksimalvandstanden langs diget er udtrykt ved relation (1).

$$\eta = 4.08 \text{ cm/km} * St + 486,5 \text{ cm} \quad (1)$$

Hvor  $\eta$  betegner vandstanden i [cm DVR90], St betegner den lineære distance fra station 60 og sydpå langs retningen 176°. Havdigelinjens længde er 13371 m, medens den retlinede længde langs hovedretning 176° er 12540 m. Station 60 er beliggende 1080 retlinede længdemeter fra havdigets nordlige afgrænsning. Den gennemsnitlige maksimalvandstand langs Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976 kan derfor bestemmes til 5.09 m DVR90.

Vandspejlsforløbet eller stormhydrografen under stormfloden antages at være identisk med vandspejlsforløbet ved den nærmeste målestation, Ribe kammerluse, idet kurveforløbet blot parallelforskydes. Middelstormhydrografen langs Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976 er angivet i Figur 9 og findes tabelleret i Gennemlokning\_RejsbyJan76.xls, se Afsnit 6.1.



Figur 9 Middelstormhydrograf langs Rejsby Dige under stormfloden 3 januar 1976.

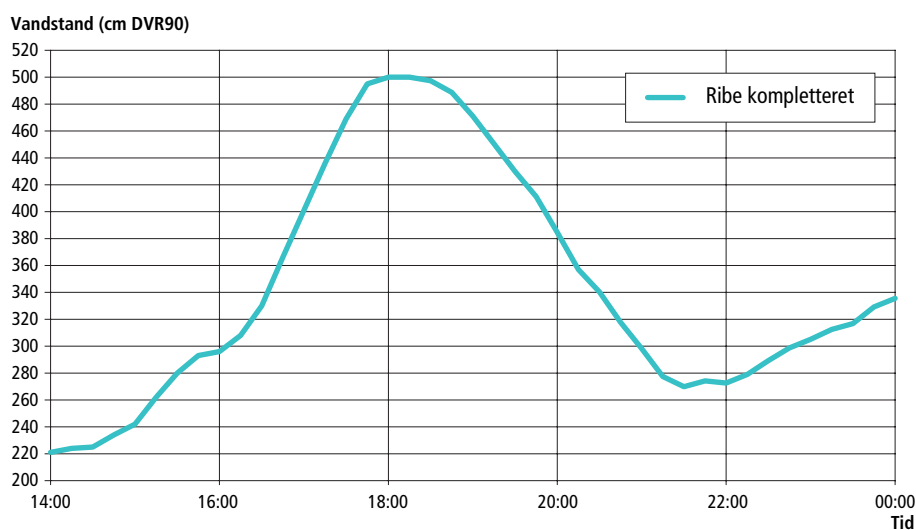
Bølgeforholdene langs Rejsby dige er modelleret som stationære vindsimuleringer i ca 50 m afstand af diget, ref. /19/. På baggrund af disse simuleringer er der dannet følgende lineære relationer for den længdemidlede signifikante bølgehøjde  $H_{m0}$  og den længdemidlede

middelbølgeperiode  $T_m$  langs Rejsby dige som funktion af vandstanden  $\eta$ :

$$H_{m0,Rejsby} = 0.318 \eta - 0.077 \quad (\eta > 3.68 \text{ m DVR90}) \quad (2)$$

$$T_{m,Rejsby} = 1.711 H_{m0} + 1.486 \quad (3)$$

Ribe dige, ref /2/, adskiller sig fra Rejsby dige ved at være beklædt med et ensartet klæglag med en tykkelse på 1 m og af højeste kvalitet. Forskråningen er anlagt med anlæg 10 og bagskråningen med anlæg 3 og beklædt med  $\frac{1}{2}$  m god klæg. Ribe dige blev overhovedet ikke skadet under stormfloden 3 december 1999. Stormhydrografen for Ribe dige under stormfloden 3 december 1999 er afbildet i Figur 10. Da måleren brød ned på højvandstidspunktet er grafen suppleret med data fra Esbjerg.



Figur 10 Stormhydrograf for Ribe dige under stormfloden 3 december 1999. Vandstandsmåleren ved Ribe er kompletteret med data fra Esbjerg

Bølgeforholdene langs Ribe dige er også modelleret som stationære vindsimuleringer i ca 50 m afstand af diget, ref. /19/. På baggrund af disse simuleringer er der dannet følgende lineære relationer for den længdemidlede signifikante bølgehøjde  $H_{m0}$  og den længdemidlede middelbølgeperiode  $T_m$  langs Ribe dige som funktion af vandstanden  $\eta$ :

$$H_{m0,Ribe} = 0.332 \eta - 0.195 \quad (\eta > 3.68 \text{ m DVR90}) \quad (4)$$

$$T_{m,Ribe} = 1.424 H_{m0} + 1.745 \quad (5)$$

### Formulering og kalibrering af model

Opmålingsrapporten, ref. /13/, og fotoflyvningen, ref. /14/, fra Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976 dokumenterer et skadesbillede af tilfældige digeskår set over hele digets længdeudstrækning. At betragte gennemlokning af et klæglag som en plan problemstilling knyttet til et principprofil, jf. teknikens stude afsnit 2.1, harmonerer dårligt med det tilfældige billede af skår, der iagttages efter stormfloden den 3. januar 1976.

Bølgepåvirkningen af diget er af stokastisk natur og digets græs-dække og dæklag er af varierende kvalitet og kvantitet. Disse forhold i sig selv kunne godt give anledning til et stokastisk skadesbillede. Det egentlige stokastiske genererende element formodes imidlertid at være flodskarnets større faste bestanddele, se Figur 8. Alt afhængig af disse faste bestanddeles udformning og deres interaktion med vandstand, bølger, græs-dække og klæglag er det ikke overraskende at der fremkommer et tilfældigt billede af lokale skår.

Til trods for det enkelte skårs stokastiske dannelseshistorie er der alligevel en vis determinisme i stormfloderne. Rejsby dige blev den 3. december 1999, ref. /16/ og /17/, ramt af en lidt kraftigere stormflod end stormfloden i 1976. Digets bagskråning var på daværende tidspunkt blevet omprofileret, hvorimod forskråningen stod uforandret. Skadesbilledet mindede, trods en mindre minutøs opmåling, meget om stormfloden i 1976, blot med den forskel at der opstod to egentlige digebrud. Der er derfor grund til at formode at der kan formuleres en model for antallet af gennemløkninger  $N_k$  som funktion af styrke og belastningsparametre og med generel gyldighed.

Styrkeparametrene er den eksponerede digeoverflades skrå areal  $A_k$ , dæklagets tykkelse inklusiv tørv  $t_k$ , klæglagets kvalitet  $k_k$ , samt skråningens anlæg  $a$ . Belastningsparametrene er stormhydrografen, Figur 9, som igen er bestemmende for hvor mange bølger,  $N_{bølge}$ , der rammer forskråningens forskellige niveauer samt den signifikante bølgehøjde  $H_s$  og middelbølgeperioden  $T_m$ .

Modellen for antal gennemløkninger  $N_k$  som funktion af styrke og belastningsparametre lyder:

$$N_k = K_1 \frac{H_s^\alpha T_m^\beta N_{bølge}}{a^\gamma (t_k k_k)^\delta} A_k \quad (6)$$

Hvor  $K_1$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  og  $\delta$  er karakteristiske konstanter.

Formel (6.) er kalibreret på datamaterialet fra Rejsby dige under stormfloden 1976 og med de parametre der er angivet i datagrundlaget. Kalibreringen er dokumenteret i Gennemløkning\_RejsbyJan76.xls, se Afsnit 6.1.

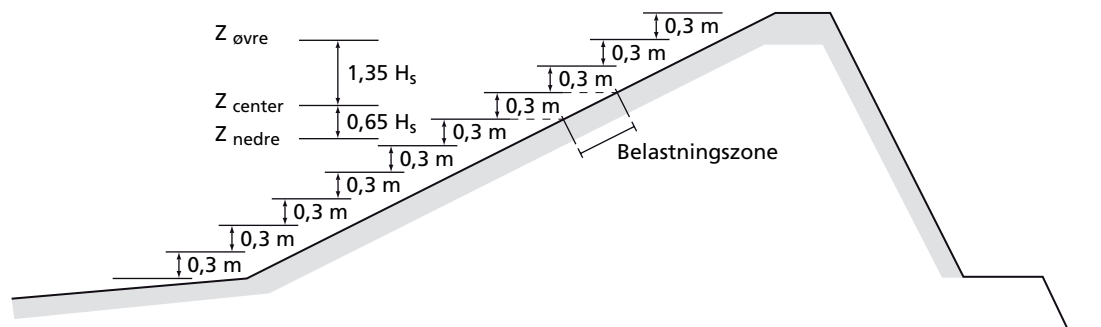
Idet Rejsby parametrene for dæklagets tykkelse og kvalitet er konstante, er potensen  $\delta$  bestemt ved at inddrage Ribe diges skader under stormfloden 3. december 1999. Denne alvorlige stormflod gav ikke anledning til skader på Ribe diges meget stærke forskråning karakteriseret ved anlæg  $a=10$ , klægtykkelse  $t_k = 1\text{m}$  og klægkvalitet  $k_k = 3$ . Denne kalibrering er dokumenteret i Gennemløkning\_RibeDec99.xls, se Afsnit 6.1.

Den bedste løsning til gennemløkningsmodellen (6.) på basis af stormene ved Rejsby dige 1976 og Ribe dige 1999 har frembragt koefficienterne i Tabel 3.

Gennemloknings Koefficient	Værdi
$K_1$	7.96E+22
$\alpha$	35.5
$\beta$	-56
$\gamma$	2.9
$\delta$	5

Tabel 3 Bedste koefficienter for gennemlokningsformel (6) baseret på stormflods-erfaringerne fra Rejsby 1976 og Ribe 1999. Dokumenteret i filerne Gennemlokning\_RejsbyJan76.xls og Gennemlokning\_RibeDec99.xls, Afsnit 6.1.

Der knytter sig en bestemt beregningsformalisme til gennemlokningsformlen. Digets forskråning inddeles i 0.3 m højdeklasser, se Figur 11. Hver højdeklasse er udsat for bølgepåvirkning når vandstanden befinder sig i intervallet fra  $Z_{center} - 0.65 H_s$  og til  $Z_{center} + 1.35 H_s$ .  $H_s$  ansættes beregningsmæssigt til den bølgehøjde der svarer til en vandstand midt i den aktuelle højdeklasse. Når stormhydrografen er kendt kan vandstandens varighed indenfor hvert interval bestemmes. Ud fra bølgeperioden kan antallet af bølger  $N_{bølge}$  herefter bestemmes. Det er væsentligt at notere sig at gennemlokningsformlen (6.) også fører til gennemlokninger i niveauer over stormens maksimalvandstand. Hele zonen der udsættes for bølgebelastning vil blive tildelt et vist antal gennemlokninger. Dette er i overensstemmelse med observationerne fra Rejsby dige under stormen 3. januar 1976, se Tabel 1.



Figur 11 Opdeling af en digeforskråning i højdeklasser og påsætning af last for beregning af antal gennemlokninger.

På baggrund af formel (6.) og koefficienterne i Tabel 3 er antallet af faktisk observerede gennemlokninger i hver højdeklasse på Rejsby Dige under stormfloden 3 januar 1976 sammenlignet med det beregnede antal gennemlokninger, se Tabel 4. Af tabellen fremgår en spredning på 34 gennemlokninger indenfor hver højdeklasse.

I Figur 12 er angivet en definitionsskitse for en gennemlokning. Gennemlokningsen er tidligere beregningsmæssigt tildelt en typisk radius  $R_g$  på 0.7 m som beskrevet i datagrundlaget for Tabel 1. I Figur 12 optræder to karakteristiske distancer, dels den vertikale sætning  $Z_f$  og dels den horizontale afstand fra gennemlokningsens ydre forkant og til gennemlokningsens indvendige center  $Z_{dis}$ . De to størrelser er defineret i (7) og (8).

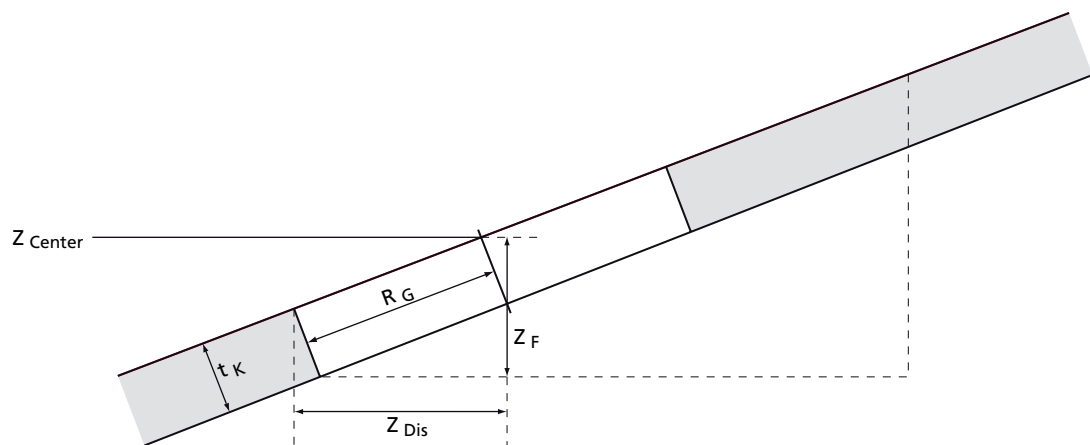
$$Z_f = R_g \sin(\alpha) + t_k \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$Z_{dis} = R_g \cos(\alpha) + t_k \sin(\alpha) \quad (8)$$



Hvor  $R_g$  betegner gennemlokningens radius,  $t_k$  betegner klæglagets tykkelse og  $\alpha$  betegner klæglagets vinkel med vandret.

Modellen i formel (6) er usædvanlig ved sine meget høje potenser for bølgehøjde og periode. Relativt små variationer i disse parametre vil derfor kunne føre til store variationer i det estimerede antal gennemlokninger. Små ændringer i bølgeklimate f.eks. som følge af forlandets variation vil derfor kunne føre til store variationer mht. antallet af skader.



Figur 12 Definitionsskitse for en gennemlokning af et klæglag med angivelse af den vertikale sætning  $Z_f$  og den horizontale afstand fra gennemlokningens ydre forkant og til gennemlokningens indvendige center  $Z_{dis}$

Kote interval (m DVR90)	Anlæg	Antal observerede gennemlokninger	Antal beregnede gennemlokninger	Afvigelse
6.64 - 6.44	3	0	0	0
6.44 - 6.14	3	9	10	1
6.14 - 5.84	3	47	40	-7
5.84 - 5.54	3	91	84	-7
5.54 - 5.24	3	116	136	20
5.24 - 4.94	3	157	197	40
4.94 - 4.64	3	267	242	-25
4.64 - 4.34	4	219	153	-66
4.34 - 4.04	4	212	158	-54
4.04 - 3.74	5	105	102	-3
3.74 - 3.44	5	47	102	55
3.44 - 3.14	7	10	36	26
3.14 - 2.84	8	0	14	14
2.84 - 2.54	8	0	6	6

Tabel 4 Sammenligning af observerede og beregnede antal gennemlokninger af Rejsby Diges forskrånning efter stormfloden 3 januar 1976, se kalibreringsgrundlag Gennemlokning\_RejsbyJan76.xls, Afsnit 6.1.

Modellens kalibrering hviler bl.a. på stationære vindbølgesimuleringer som ydermere er længdemidlede over henholdsvis Rejsby dige og Ribe dige. Vindhastighedsintervallet for simuleringerne er 30.6 til 31.8 m/s. Modellen er stærkt sensitiv overfor de anvendte bølgeklimate og der bør udvises stor forsigtighed overfor bølgeklimate der afviger meget fra Rejsby og Ribe relationerne.

Som indledningsvis påpeget formodes de større faste genstande i flodskarnet at være udslagsgivende for antallet af gennemlokninger. Denne faktor eksisterer der ingen nærmere information omkring, men enhver storm må formodes at besidde sit eget karakteristiske indhold af "erosive agenter". Koefficienterne i Tabel 3 må formodes at være specifikke for stormen 3 januar 1976 og er i den forstand erfaringsværdier. Formel (6) bør derfor i højere grad benyttes som en generatorfunktion for gennemlokninger end en forudsigelse af det eksakte antal af gennemlokninger. Når gennemlokningsmodellen (6) med koefficienterne i Tabel (3) forudsiger en enkelt gennemlokning i en given højdeklasse indikerer det at de fysiske omstændigheder mht. belastning og styrke blot mangler at blive tilført en vis mængde erosive agenter for at der vil opstå en gennemlokning.

Som et eksempel på at en storm uden erosive agenter ikke fører til gennemlokning, kan nævnes det Hollandske fuldskalaeksperiment i Delta renden, ref. /20/. En græsklædt digeforskråning med anlæg 4 og et klægslag på 0.8 m tykkelse og af høj kvalitet blev overført til Delta renden. I 11 timer blev forskråningen udsat for bølger med  $H_s = 1.4$  m og  $T_p = 4.7$  s. Ved forsøgets afslutning var bølgerne ikke nået dybere ned i klægslaget end 0.15 m.

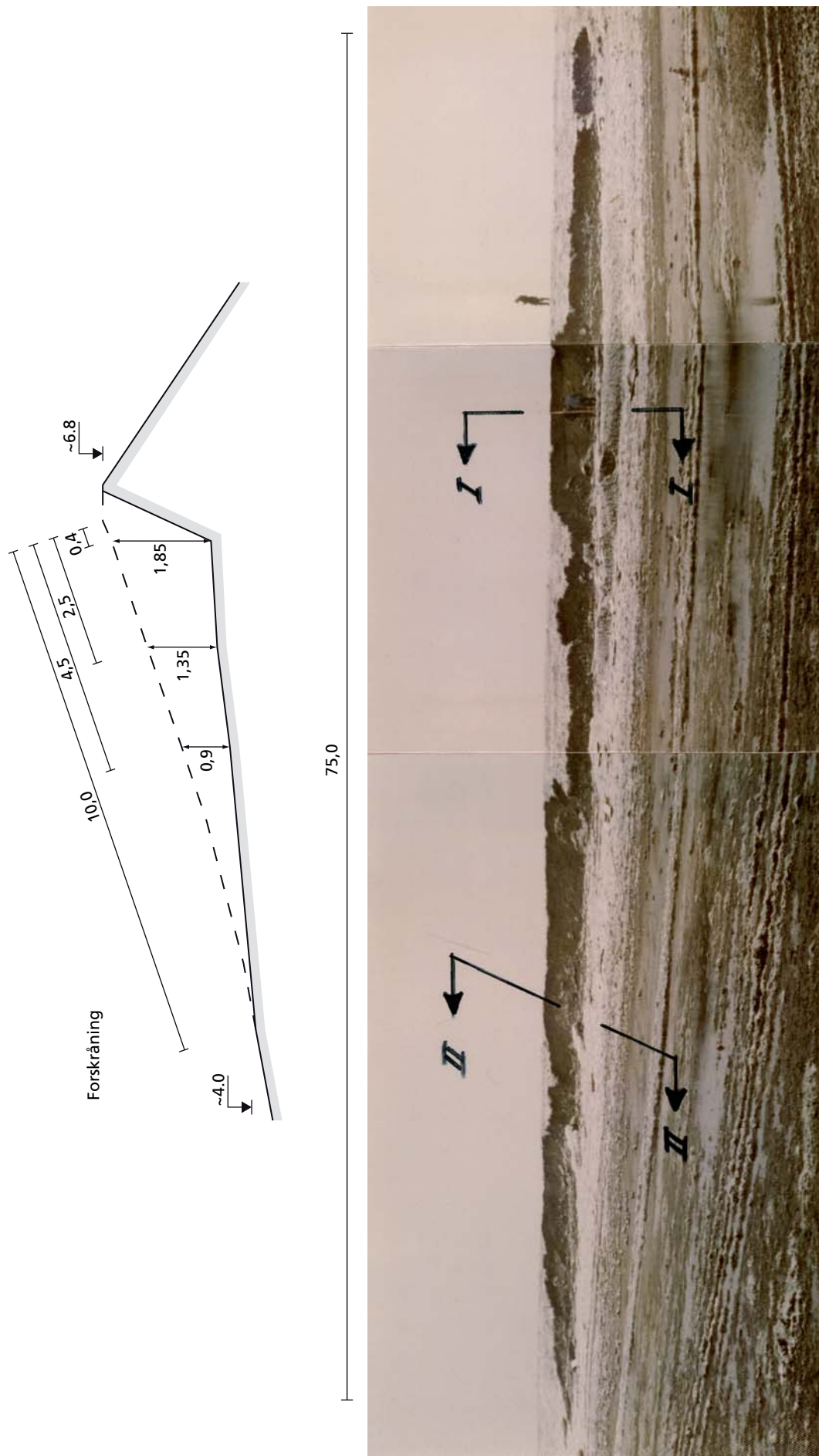
### 3.1.2 Model for erosion af kernematerialet

#### Datagrundlag

Opmålingsrapporten fra Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976, ref. /13/, indeholder målinger af de største digeskårs vandrette erosionsdybder. I Figur 6 er vist en typisk opmåling. Alt i alt findes 81 dybdemålinger af skårene i opmålingsrapporten, ref. /13/. De dybeste skår når op til 10 m ind i digekernen, se Figur 13. I Tabel 5 fremgår de maksimale målte erosionsdybder fordelt på 0.3 m højdeklasser fra digekronen og ned. Skårene henregnes til den laveste bundkote, som altid er beliggende ude i skårets forkant.

Kote interval (m DVR90)	Anlæg	Dybeste erosion (m)
6.64 - 6.44	3	Na
6.44 - 6.14	3	Na
6.14 - 5.84	3	3.9
5.84 - 5.54	3	4.2
5.54 - 5.24	3	5.9
5.24 - 4.94	3	7.9
4.94 - 4.64	3	9.5
4.64 - 4.34	4	10
4.34 - 4.04	4	6.5
4.04 - 3.74	5	Ingen målinger
3.74 - 3.44	5	Ingen målinger
3.44 - 3.14	7	Ingen målinger
3.14 - 2.84	8	Ingen målinger
2.84 - 2.54	8	Ingen målinger

Tabel 5 Maksimale erosionsdybder i Rejsby Diges forskråning efter stormfloden 3 Januar 1976 fordelt på 0,3 m højdeklasser, ref. /13/. Erosionerne henregnes til skårets laveste bundkote ude i digeskårets forkant og er målt parallelt med forskråningen.



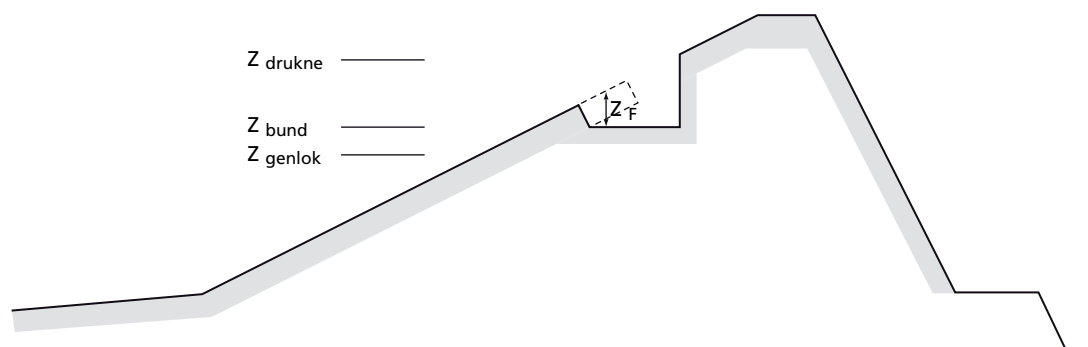
Figur 13 Tværprofil af det dybeste digeskår fra station 40,1 profil I-I, Rejsby dige efter stormfloden 3. januar 1976, ref. 113/.

Dæklagets og kernematerialets kvalitet i Rejsby dige, kan bedømmes ud fra de gennemsnitlige boringsresultater, der findes dokumenteret på grundplan 104-1800-33 nr. 191 af 6 august 1968. For den øvre meter fremgår et typisk klægindhold på 13 %, sandblandet klæg på 45 %, sand 29 % og muld 13 %. De tilsvarende tal for det dybereliggende kernemateriale udgør 5 % klæg, 35 % sandblandet klæg og endelig 60 % sand. I henhold til Tabel 2 kan kvaliteten af Rejsby diges kernemateriale derfor fastsættes til 0.85. På grund af anlægsmetoden med spandkædemaskine fra fyldgrav vides kernen at være inhomogen.

Vandstands- og bølgeforholdene under stormen 3 januar 1976 er beskrevet under datagrundlag i afsnit 3.1.1.

### Formulering og kalibrering af model

Digeskår i forskråningen har et karakteristisk trekantet profil med en flad bund og en stejl bagvæg, se Figur 6, 8 og 11. Efter at have etableret en model for gennemlokninger af dæklaget, se 3.1.1, er det nærliggende at antage, at erosionen i kernematerialet er en mere deterministisk proces, hvor hver enkelt bølge er ansvarlig for en vis erosion af det forholdsvis blødere kernemateriale. De erosive agenter er stadig til stede, se Figur 8, men spiller en forholdsvis mindre rolle jo større skåret bliver. Erosionsmekanismen formodes nu i højere grad at være udskylning og underminering af klægslaget med efterfølgende nedbrækning til følge. Der tages udgangspunkt i et principprofil som angivet i Figur 14. Skåret er karakteriseret ved en vandret bund, en lodret bagvæg og en karakteristisk sætning i forhold til gennemlokningens forkant.



Figur 14 Principskitse for et digeskår, med angivelse af den indledende gennemlokning samt karakteristiske ydre vandstands niveauer.

Ingen af de opmålte skår i opmålingsrapporten, ref. /13/, har formået at bryde igennem Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976, om end der forekommer en del sænkninger af kronen. Den gennemsnitlige maksimale vandstand ned langs diget er bestemt til 5.09 [m DVR90] hvilket skal sammenholdes med at de laveste gennemløkninger er beliggende i kote 3.14 – 3.44 m DVR90. jvf Tabel 1. Der forekommer derfor en stor mængde gennemløkninger under maksimalvandstandens niveau. Disse gennemløkninger når aldrig at udvikle sig til markante skår. Dette tages som indikation for at erosionsprocessen ophører, når skårene bliver dækket af en vis vanddybde i forhold til den aktuelle bølgehøjde. Skårene antages at drukne, når vandstanden når et vist niveau over skårets bund.

De maksimale erosionsdybder i Tabel 5 forekommer i niveauer lige under maksimalvandstanden på 5.09 m DVR90. Der forekommer også omfattende og dybe erosioner hvis bundniveauer er beliggende op til 0.9 m over maksimalvandstanden. Skårene dybde formodes at være afhængig af det antal bølger de har været udsat for.

Med udgangspunkt i klæggennemlokningsmodellen beskrevet i afsnit 3.1.1 er der formuleret følgende model for den vandrette kerneerosion  $E_d$ :

$$E_d = K_2 \sum_{Z_{\text{genlok}}}^{Z_i} H_s(Z_i)^\kappa t(Z_i)/T_m(Z_i) \quad (9)$$

Hvor  $K_2$  og  $\kappa$  markerer karakteristiske fysiske konstanter. Summa markerer tidsintegration over alle vandstande fra vandstanden der førte til gennemlokning  $Z_{\text{genlok}}$  og til en vandstand hvor erosionen ophører enten som følge af at skåret er druknet,  $Z_{\text{drukne}}$ , eller at vandstanden er faldet under gennemlokningsvandstanden  $Z_{\text{genlok}}$  for skår beliggende over vandspejlet eller at vandstanden er faldet til et niveau under skårets bundkote,  $Z_{\text{bundkote}}$ .  $T(Z_i)$  markerer det tidsrum hvor bølgeconditionen karakteriseret ved den signifikante højde  $H_s(Z_i)$  og middelperioden  $T_m(Z_i)$  har påvirket skåret. Bølgehøjder og perioder henregnes til diskrete vandstandsintervaller på typisk 0.3 m og karakteriseret ved middelvandstandene  $Z_i$ .

Formel (9) er kalibreret på de opmålte maksimale erosionsdybder i Tabel 5, hvorved druknekriteriet og koefficienterne i Tabel 6 er blevet bestemt.

Druknekriterie og koefficienter	Værdi
$(Z_i - Z_{\text{skår}})/H_s(Z_i) \leq$	0.8
$K_2$	0.000628
$\kappa$	4.5

Tabel 6 Druknekriterie og bedste koefficienter for gennemlokningsformel (9) baseret på stormflodserfaringerne fra Rejsbyopmålingerne 1976, ref. 1131. Kalibreringen er dokumenteret i filerne Rejsby\_kerneerosion.xls, Afsnit 6.1.

Beregningsformalismen knyttet til kerneerosionsformlen (9) er magen til den formalisme der knyttes til gennemlokningsmodellen (6). Digets forskråning inddeles i 0.3 m højdeklasser, se Figur 11. Afhængigt af analysens formål antages enten et ydre vandspejlsforløb eller også benyttes et historisk vandspejlsforløb. Dette vandspejlsforløb betegnes stormhydrografen, se Figur 9. Først bestemmes den totale varighed hvor vandstanden overskrider den vandstand der førte til gennemlokning eller skårets bundkote. Dernæst opdeles den totale varighed i de perioder vandspejlet befinder sig i de berørte højdeklasser og dermed bølgeconditioner. Ud fra disse varigheder kan erosionen summeres i henhold til formel (9), idet der skal kontrolleres for druknekriteriet i Tabel 6. Beregningen etableres mest hensigtsmæssigt som et regneark, se Rejsby\_kerneerosion.xls, Afsnit 6.1.

Den totale vandrette erosion E består dels af kerneerosionen beskrevet ved (9) samt af den halve gennemløkning svarende til  $Z_{dis}$  i formel (8). I Tabel 7 er de opmålte maksimale erosioner, projiceret på vandret, sammenholdt med de beregnede erosioner i henhold til formel (9) og Tabel 6 og under hensyn til stormhydrografen og bølgekonditionerne for stormfloden 3 januar 1976 som beskrevet i afsnit 3.1.1. Modellen rammer i middel de målte erosioner, idet der knytter sig en spredning på 1.25 m til erosionsdybderne.

Kote interval (m DVR90)	Anlæg	Dybeste målte erosion vandret proj. (m)	Beregnet total erosion E (m)
6.64 - 6.44	3	Na	
6.44 - 6.14	3	Na	
6.14 - 5.84	3	3.9	3.5
5.84 - 5.54	3	4.2	5.8
5.54 - 5.24	3	5.9	7.0
5.24 - 4.94	3	7.9	7.8
4.94 - 4.64	3	9.5	8.3
4.64 - 4.34	4	10	8.8
4.34 - 4.04	4	6.5	5.1
4.04 - 3.74	5	Ingen målinger	
3.74 - 3.44	5	Ingen målinger	
3.44 - 3.14	7	Antages 0.8	2.3
3.14 - 2.84	8	Ingen målinger	
2.84 - 2.54	8	Ingen målinger	

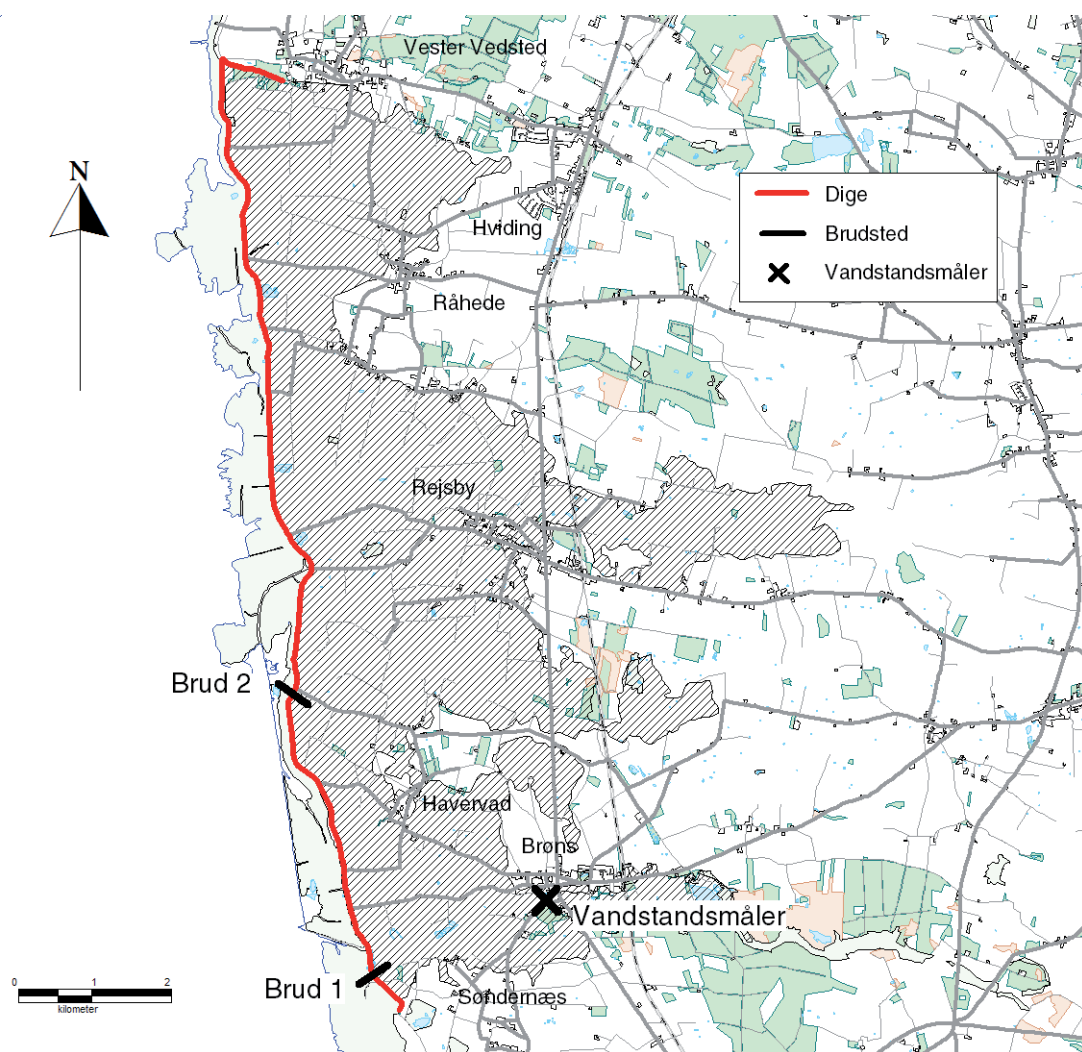
Tabel 7 Sammenligning af målte og beregnede maksimale erosionsdybder i Rejsby Diges forskræning efter stormfloden 3 Januar 1976 fordelt på 0,3 m højdeklasser. Erosionerne henregnes til skårets laveste bundkote og måles fra skårets øvre ydre forkant.

### 3.1.3 Model for et digebruds tidlige udvikling

#### Datagrundlag

Under stormen den 3 december 1999 brød havet igennem Rejsby dige syd for Brøns sluse, se Figur 15. Diget brød faktisk 2 steder, ref. /16/ og /17/. Kun det sydlige brud ved Brøns førte til indløb af store vandmængder. I Figur 16 ses Brønsbruddet som det tog sig ud lørdag den 4. december 1999, dagen efter stormfloden. Fra besigtigelsesrapporten, ref. /16/, fremgår en samlet længde på 85 m, maksimal bredde 42 m og maksimal dybde 5.75 m.



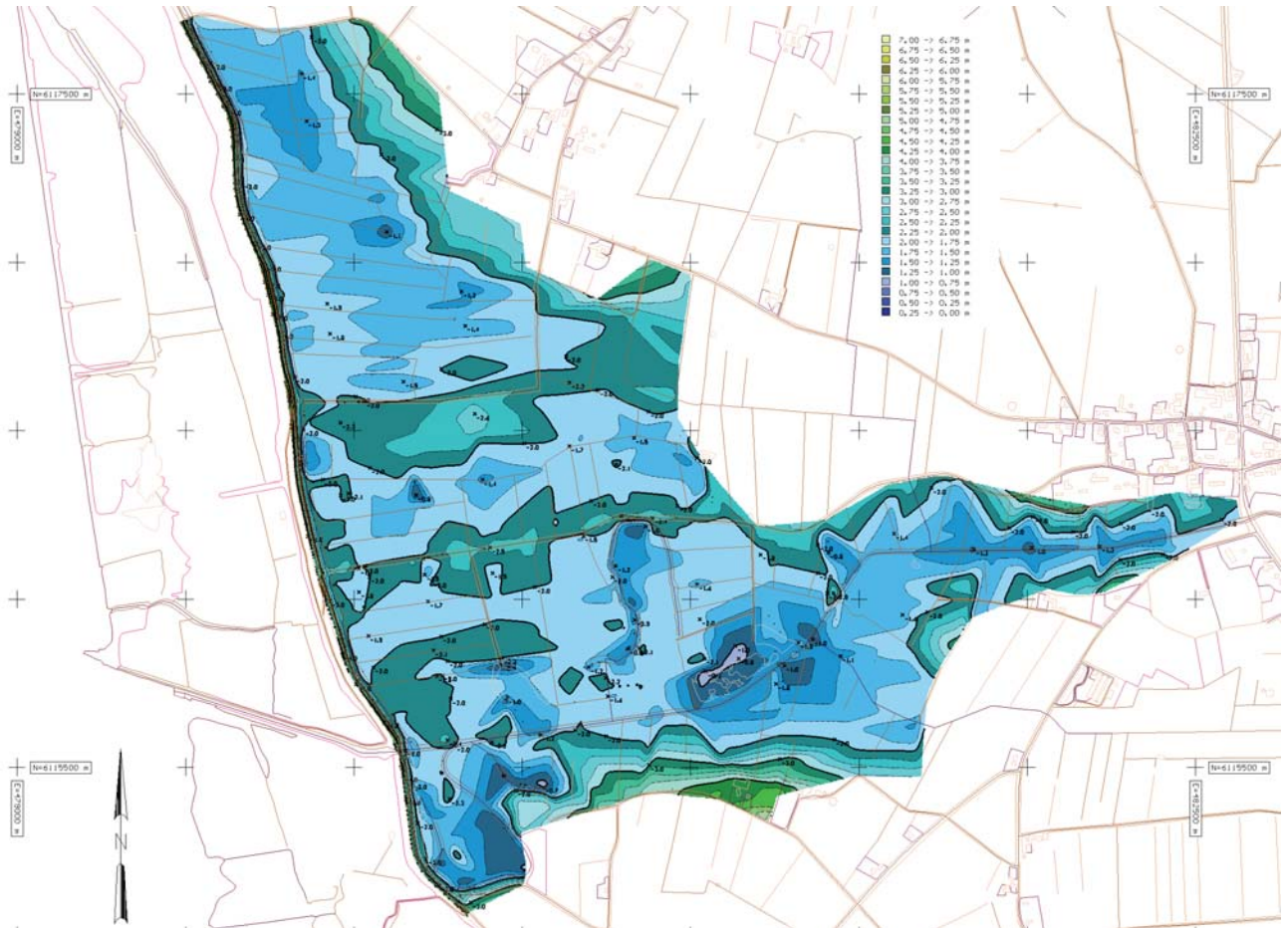


Figur 15 Kort over Rejsby dige med angivelse af brudstedet efter stormen 3 december 1999 syd for Brøns sluse, samt position af indvandsstationen ved Brøns kirke.



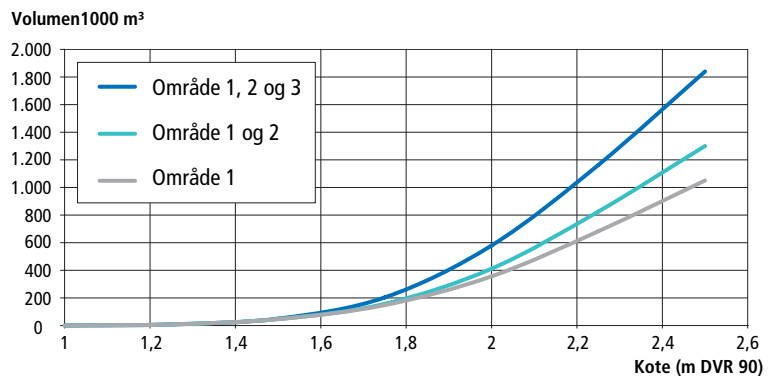
Figur 16 Foto af de oversvømmede enge omkring Brøns samt brudsted i Rejsby dige som det tog sig ud lørdag den 4 december 1999, dagen efter stormfloden, ref. I17I.

Med henblik på at udvikle en brudmodel for diger af Rejsby typen foretog Kystdirektoratet den 14. september 2005 en opmåling af det oversvømmede område. På baggrund af opmålingen blev der udviklet en terrænmodel, se Figur 17. Af Figur 17 fremgår at det oversvømmede område har to indre tærskler, begge i niveau 2,00 til 2,25 m DVR90. De respektive områder betegnes område 1, 2 og 3, hvor område 1 er primærområdet, som brudstedet indfylder direkte.



Figur 17 Terrænmodel af området omkring Brøns sluse og brudstedet der blev oversvømmet af stormfloden 3 december 1999. Opmålt af Kystdirektoratet 14. september 2005.

I Figur 18 er hypsograferne for de 3 tærskelområder angivet. Magasinkapaciteten i niveau 2.5 m DVR90 udgør godt 1.8 mio [m<sup>3</sup>] for totalområdet.



Figur 18 Hypsografer for tærskelområder der blev oversvømmet af stormfloden 3 december 1999, omkring Brøns sluse. Baseret på opmåling af Kystdirektoratet 14. september 2005.

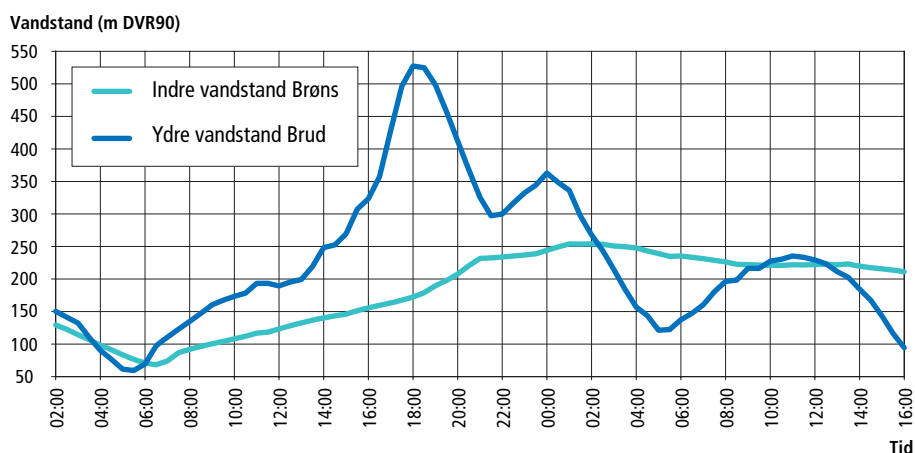
De ydre vandstandsforhold under stormfloden 3 december 1999 er ikke målt lokalt. Nærmeste station er Ribe kammerluse. Ved at gennemføre en analyse af maksimalvandstanden nord og syd for Rømødæmningen efter samme retningslinjer som førte til relation (1) i afsnit 3.1.1, ref. /4/, kan ekstremvandstanden beregnes ned langs Rejsby dige.

Maksimalvandstanden langs Rejsby dige under stormfloden 3 december 1999 kan beskrives ved relation (10).

$$\eta = 2.12 \text{ cm/km} * St + 504 \text{ cm} \quad (10)$$

Hvor  $\eta$  betegner vandstanden i [cm DVR90], St betegner den lineære distance fra station 60 og sydpå langs retningen 176°. Havgelinjens længde er 13371 m, medens den retlinede længde langs hovedretning 176° er 12540 m. Station 60 er beliggende 1080 retlinede længdemeter fra havdigets nordlige afgrænsning. Maksimalvandstanden 3 december 1999 ud for brudstedet syd for Brøns sluse kan derfor bestemmes til 5.27 m DVR90. Vandspejlsforløbet antages identisk med vandstandsforløbet ved Ribe kammerluse blot forskudt til niveauet bestemt ved relation (10), se Figur 19.

Sønderjyllands Amt's vandstandsmåler ved Brøns kirke, se Figur 15, fungerede under hele stormfloden og data er angivet i Figur 19 sammen med ydre vandstand. Den indre vandstand når normalt ikke over niveauet 1.5 m DVR90.



Figur 19 Ydre stormhydrograf ud for Brønsbruddet samt indre vandstand ved Brøns kirke under stormfloden 3 december 1999. Indvandsdata stillet til rådighed af Sønderjyllands Amt.

I forbindelse med opmålingen 14. september 2005 blev den stadig tydelige flodskærslinje koteret til 2.3 m DVR90 ved Søndernæs i området SV hjørne. Flodskærslinjen er stærkt relateret til maksimalvandspejlet.

Bølgeforholdene langs Rejsby dige kan tilnærmes som beskrevet i afsnit 3.1.1 datagrundlag.

Rejsby diges principprofil er angivet i Figur 7, idet bagskråningen i 1982-83 er blevet ombygget til anlæg 2.8. Dæklag og klægkvalitet er beskrevet i afsnit 3.1.1, datagrundlag.

## Analyse og kalibrering af model

Den indre vandstand i det oversvømmede område kulminerer i ca 2.5 m DVR90, svarende til en vandmængde på godt 1.8 mio m<sup>3</sup>. Denne vandmængde stammer dels fra bølgeoverløb og indvand og dels fra brudindløbet.

Det gennemsnitlige bølgeoverløb fra brydende bølger  $Q$  kan i henhold til J.W. van der Meer og J.P.F.M. Janssen (1994), ref. /21/, beskrives ved

$$Q = Q_b (g H_s)^{3/2} (\tan(\alpha)/S_{op})^{1/2} \quad (11)$$

$$Q_b = 0.06 \exp(-5.2 R_b) \quad \xi_{op} < 2 \quad (12)$$

$$R_b = R_c/H_s (S_{op}/\tan(\alpha))^{1/2} (\gamma_b \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta)^{-1} \quad 0.3 < R_b < 2 \quad (13)$$

Hvor  $Q$  betegner overløbet i [m<sup>3</sup>/s/m],  $Q_b$  betegner det dimensionsløse overløb fra brydende bølger,  $g$  er tyngde accelerationen,  $H_s$  er den signifikante bølgehøjde,  $\alpha$  betegner skråningsvinklen med vandret og målt fra  $H_s$  under vandspejlet og til digekronen,  $S_{op}$  er bølgestejlheden under hensyntagen til peakbølgeperioden  $T_p$ ,  $R_b$  den dimensionsløse overhøjde af kronen,  $R_c$  kronens overhøjde i forhold til aktuelt vandspejl,  $\gamma_b$  reduktionskoefficient for en bæreme i forskråningen,  $\gamma_h$  reduktionskoefficient for lavt forland,  $\gamma_f$  reduktionskoefficient for skråningens ruhed og  $\gamma_\beta$  reduktionskoefficient for skråt bølgeindfald. Parameteren  $\xi_{op}$  betegner bølgebrydningsparameteren.

Maksimalvandstanden på 5.27 m DVR90 samt de korrelerede bølger med  $H_s = 1,60$  m og  $T_p = 5,1$  s vil føre til et maksimalt bølgeoverløb på 0.034 [m<sup>3</sup>/s/m]. Dette svarer til at område 1 med en digelinje på ca 1000 m modtager en indstrømning på 34 m<sup>3</sup>/s. Det væsentlige bølgeoverløb finder sted ved vandstande over 4.6 m DVR90.

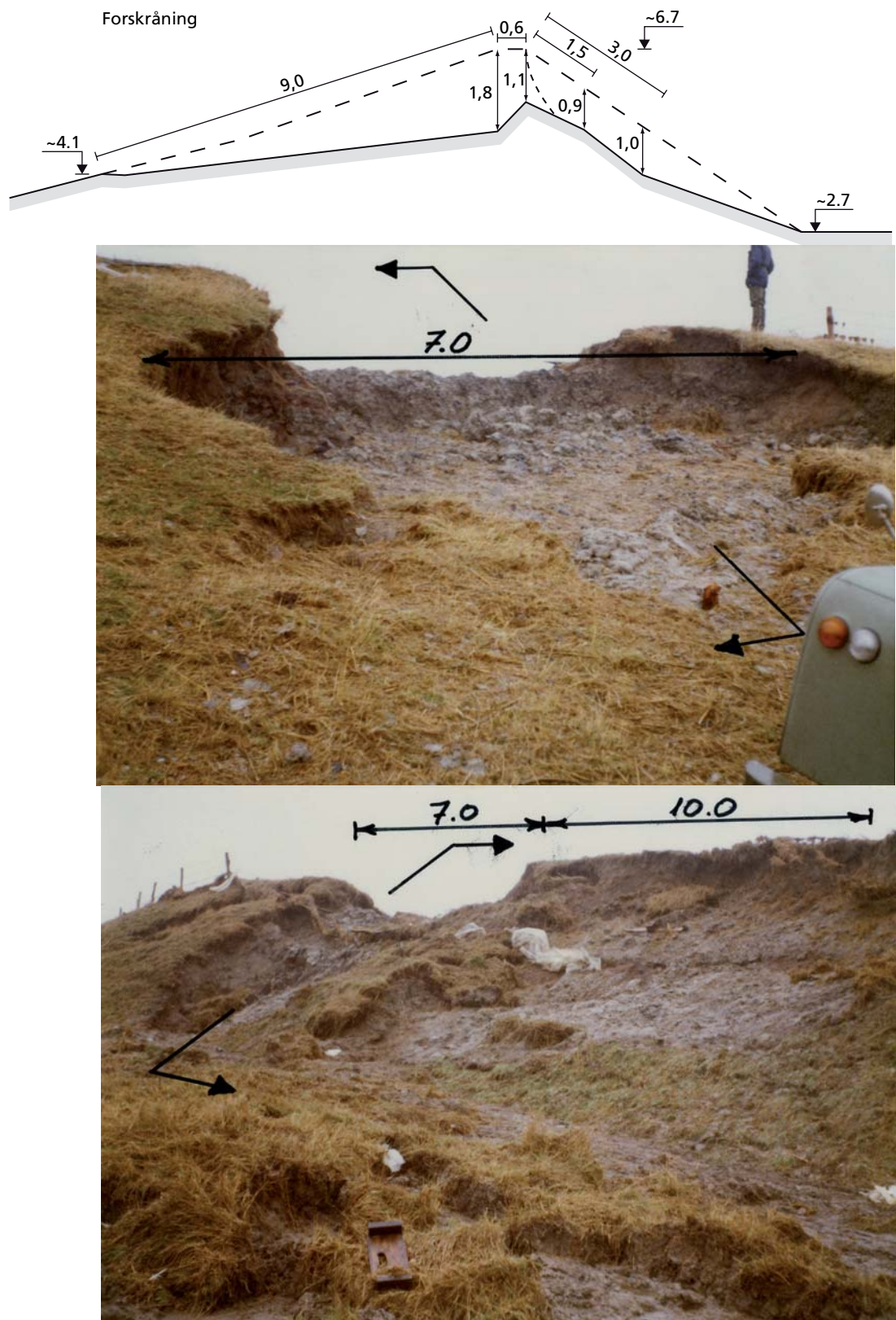
Ved at integrere bølgeoverløbet til område 1 findes en samlet overløbsmængde på 140.000 m<sup>3</sup> under stormen 3 december 1999. Bølgeindstrømningsmængden til totalområdet, svarende til en digelinje på 2700 m bliver 380.000 m<sup>3</sup>. Bølgebidraget udgør dermed et betydeligt bidrag til det samlede magasinivolumen.

Brøns å og slusen bidrager i dagene omkring stormfloden med ca 2.1 m<sup>3</sup>/s, hvilket udgør et mindre bidrag.

Med udgangspunkt i det indre vandspejl og hypso grafen, Figur 18, kan de øjeblikkelige tilstrømningsrater bestemmes. Sammenholdes disse rater med bølgeoverløbet opnås bedre overensstemmelse ved at forsinke stormhydro grafen ½ time, således at maksimalvandstanden indtræffer 18:30.

Det indre vandspejl, se Figur 19, er målt oppe ved Brøns kirke i en situation med vestlig hård kuling til storm. Vandspejlet er derfor stuvet op. Omkring kl 21:00 flader det indre vandspejl i Figur 19 ud. Det vurderes at den indre tærskel, som vides at være beliggende i niveauet 2.0 til 2.25 m DVR90, bliver overskyllet i denne situation. På denne baggrund vurderes det gennemsnitlige vandspejl i de oversvømmede områder at ligge ca 10 cm under vandstanden ved Brønsmåleren.





Figur 20 Forskråningserosion og hydraulisk erosion af bagskråningen på Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976, st. 4,3 Brøns sluse, ref. I13/.

Ved at gennemføre dels en generel gennemlokningsberegning i henhold til afsnit 3.1.1 og dels en kerneerosionsberegning i henhold til afsnit 3.1.2 estimeres diget at være gennembrudt den 3 december 1999 kl. 19:24 ( $\sigma = 20$  min) med skårbund i kote 5.69 og ydre

tærskel i kote 6.07 m DVR90 og ydre vandstand 5.06 m DVR90, se Forskråningsbrud\_Rejsby99.xls, Afsnit 6.1. Bølgeoverløbet i henhold til (11), (12), (13) andrager på dette tidspunkt 0.064 m<sup>3</sup>/s/m i brudstedet. Stormen førte også til beregningsmæssig gennemerosion af kernen i niveau 5.39 m [DVR], men lidt senere.

Bruddets videre udvikling antages herefter at foregå som et hydraulisk bagskråningsbrud, hvor strømhastighederne er så store, at blottet kernemateriale og afbrækkede dæklag føres bort, se Figur 19 fra Rejsby dige efter stormen 3 januar 1976. Erosionen antages at arbejde sig ned i kernematerialet og frem til den øvre forlandskant. Herefter antages erosionen at udvikler sig på langs af digelinjen, så længe der er den fornødne erosive kapacitet.

Brudviddens B(t) tidsudvikling antages at forløbe proportionalt med en potens af den maksimale potentielle indløbshastighed. Relationen lyder

$$dB(t)/dt = K_3 (g (\eta_{ydre} - \eta_{indre}))^{p/2} \quad (14)$$

Hvor t betegner tiden, K<sub>3</sub> betegner en karakteristisk konstant, g er tyngdeaccelerationen,  $\eta_{ydre}$  betegner den ydre vandstand,  $\eta_{indre}$  betegner den indre vandstand og p betegner en potens af den potentielle indstrømningshastighed.

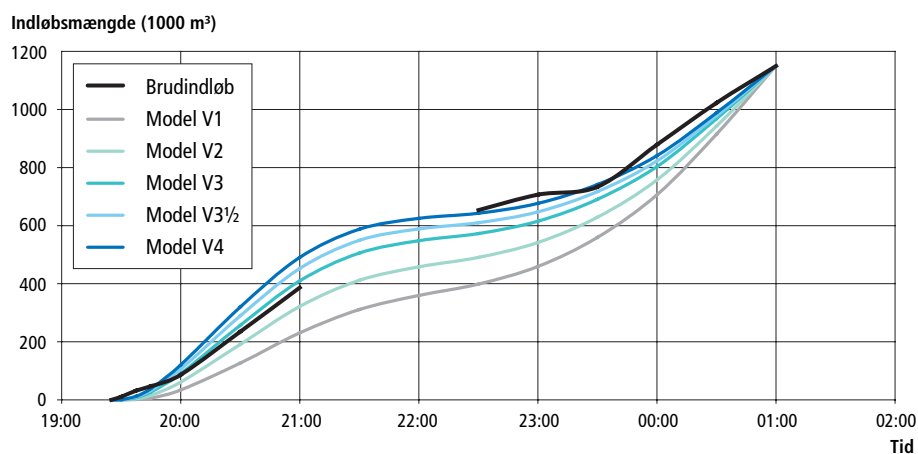
I Figur 21 er forskellige modeller for indstrømningen sammenholdt med det faktisk indstrømmede volumen under hensyntagen til indvand og bølgeoverløb. Bruddet antages at stå fuldt udviklet med en længde på 85 m, se Figur 16, da den indre maksimalvandstand nås den 4 december 1999 kl 01:00. I forbindelse med overløbet af de indre tærskler, Figur 17, er det ikke muligt at angive noget indre vandspejl. Brudindløbet er derfor angivet ved en brudt kurve, hvor første del markerer indfyldningen af primærområdet og anden del markerer indfyldningen af totalområdet.

Den mest velegnede af modellerne er V3-modellen svarende til koefficientsættet og tærskelværdien angivet i Tabel 8 og dokumenteret i Indfyldningsmodel\_1.xls, Afsnit 6.1. På grund af indløbstærsklens høje niveau foregår hele indstrømningen til den indre maksimalvandstand nås kl 01:00, som kritisk strømning. Erosionsraten er højest omkring bruddets start med 1,3 cm/s og falder derefter jævnt til 0,2 cm/s.

Parameter	Værdi
K <sub>3</sub>	0.0000266
P	3
Ydre tærskel	2.70 m DVR90

Tabel 8 Mest velegnede koefficienter og tærskelværdier for Brøns brudmodellen, se Indfyldningsmodel\_1, Afsnit 6.1.

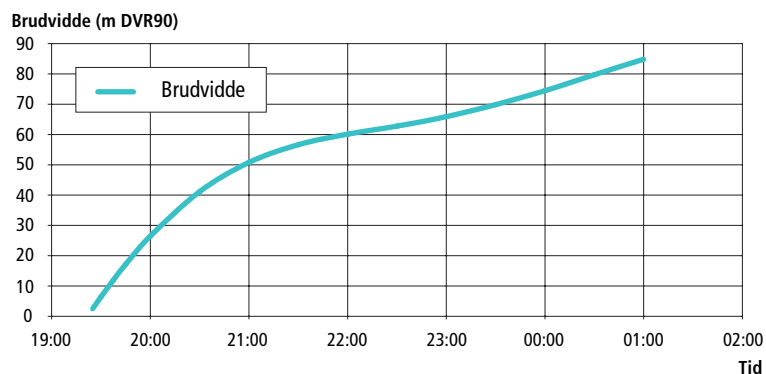




Figur 21 Sammenligning af forskellige modellers indløbsvolumener med det faktiske brudindløb, ref. Indfyldningsmodel\_1.xls, Afsnit 6.1, Brøns bruddet, Rejsby dige 3. december 1999.

I forbindelse med Brøns brudmodellen formel (14) og Tabel 8 er det væsentligt at notere, at modellen er udarbejdet for et dige med et ringe dæklag med kvalitet 1.5 og et sandet kernemateriale med kvalitet 0.85 og præget af uensartethed. Modellen udviser en standardafvigelse på 39.000 m<sup>3</sup> i forhold til det konstaterede brudindløb.

I Figur 22 er brudvidden  $B(t)$  angivet som funktion af tiden for Brøns modellen. Modellen er i god overensstemmelse med de få Hollandske bruderfaringer, ref. /6/



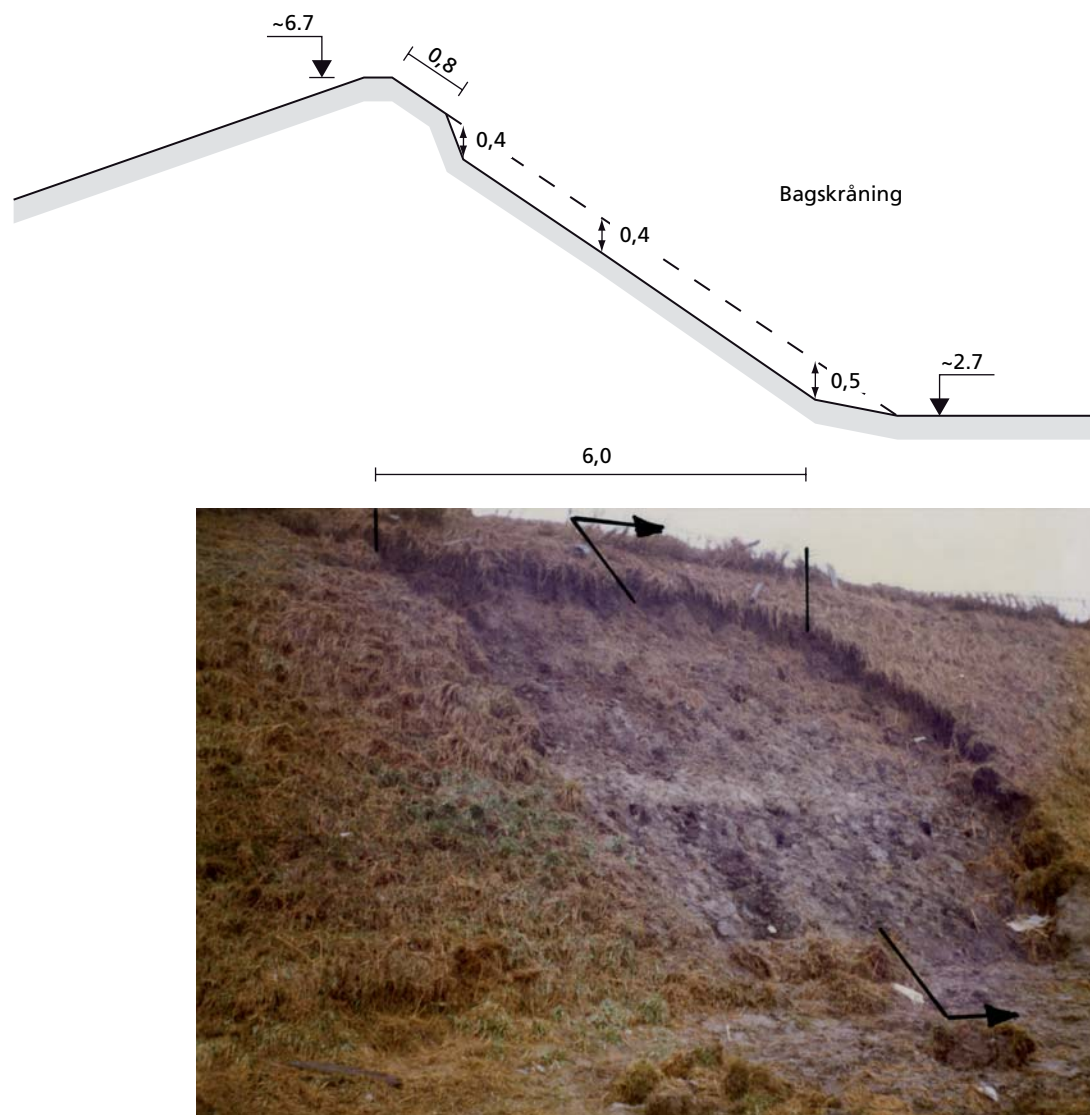
Figur 22 Brøns bruddets udvikling som funktion af tiden ifølge Brøns brudmodellen, ref. Indfyldningsmodel\_1.xls, Afsnit 6.1, Brøns bruddet, Rejsby dige 3. december 1999.

## 3.2 Det hydraulisk bagskråningsbrud

### Definition

Det hydrauliske bagskråningsbrud er forårsaget af erosion fra såvel den overfladiske strømning som den indre strømning og de trykgradienter der optræder i denne forbindelse. Det hydrauliske bagskråningsbrud kan blive indledt med et geoteknisk brud, men de geotekniske brud er i almindelighed ikke noget problem ved digebagskråninger med fladere anlæg end anlæg 2. I ref. /22/ findes geotekniske stabilitetsanalyser for en række danske digebrud, samt analyse af samtlige større Vadehavsdiger. Under alle omstændigheder fører det geotekniske brud blot til en ny stabil tilstand. Det geotekniske brud har derfor kun betydning for så vidt det fører til forøget bølgeoverløb, indre strømning, trykgradienter eller direkte indstrømning.

Et karakterisk forstadium til det hydrauliske bagskråningsbrud er sætning eller nedstyrtning af et eventuelt klægdække på bagskråningen, se Figur 23. Den type skader iagttages på alle danske bagskråninger med anlæg op til 3, ref. /13/, /14/ og /17/. Der er simpelthen tale om, at det relativt tætte lag, man har beklædt bagskråningen med som erosionsbeskyttelse, bliver løftet af, ref. /22/. Afløftningen finder sted, når der er trængt tilstrækkeligt meget vand ind i diget, og der er sket den fornødne trykopbygning. Hvis digets bagskråning er beklædt med et tættere lag og der ellers ikke er etableret tilstrækkelige drænforhold, vil det kun være et spørgsmål om permeabilitet og dermed om tid, før det tætte lag sætter sig eller glider helt af. I praksis vil der altid findes sprækker, gange og materialemæssige imperfektioner, der kan befordre en lokal trykopbygning.



Figur 23 Kappenedstyrning på Rejsby dige omkring station 4,6 efter stormfloden 3 januar 1976, ref. /13/.

Indre strømning og lokal trykopbygning der medfører geoteknisk brud, er en af de erosive mekanismer i det hydrauliske brud, ref. /23/. En anden og mere direkte mekanisme er erosion som følge af kraftig strøm, se Figur 20. Bølgeoverløb, indre strømme og direkte indstrømning er hovedårsagerne til det hydrauliske bagskråningsbrud.

#### Datagrundlag

Under stormfloden 3. december 1999 omstod der 7 digebrud i Juvre dige på østsiden af Rønmø, se Figur 24 og ref. /17/. Alle bruddene opstod på de lave strækninger af diget med kroneskote 4.89 m DVR90. Diget har ikke i nævneværdig grad været påvirket af bølger men vandstanden har været meget høj.

Anvendes ekstremvandstandsmodellen beskrevet i afsnit 3.1.2, relation 10 og under hensyntagen til en hovedgradient på 5.9 cm/km langs retning 107° N, kan vandstanden ved Juvre dige beregnes til 4.91 m DVR90. Diget har derfor været belastet af simpelt overløb.

Den østvendte del af Juvre dige er ikke direkte bølgebelastet under stormflod. Der foreligger imidlertid observation fra Rønmødæmningen, 30 januar 2000, Johanson, Varde af langperiodiske svingninger med en højdevariation på 40 cm ved Juvredigets tilslutning.

Den samlede længde af de lave digestrækninger på Juvre dige fra Rønmødæmningen og mod nord er 3170 m i henhold til ref. /18/. Diget er opbygget på samme måde som Rejsby dige, ref. /18/.



Figur 24 Foto af brud på Juvre dige under stormfloden 3 december 1999, ref. /17/.

Ved gennemgang af fotoflyvningen, ref. /14/, og opmålingsrapporten, ref. /13/, for stormflodsskaderne på Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976 kan der konstateres 14 forstadier til hydrauliske bagskråningsbrud. Lokaliteternes stationer er angivet i Tabel 9.

Lokalitet for hydraulisk bagskråningsbrud	Station
1	3,0
2	3,4
3	4,3
4	4,6
5	4,8
6	5,3
7	6,5
8	7,5
9	9,6
10	9,7
11	10,0
12	10,1
13	19,2
14	21,0

Tabel 9 Lokaliteter med forstadier til hydrauliske bagskråningsbrud på Rejsby dige efter stormfloden 3 januar 1976. ref. /14/ og /13/.

Bølge og vandstandsforholdene ved Rejsby dige under stormfloden 3 januar 1976 er beskrevet i afsnit 3.1.1.

### Analyse og modelformulering

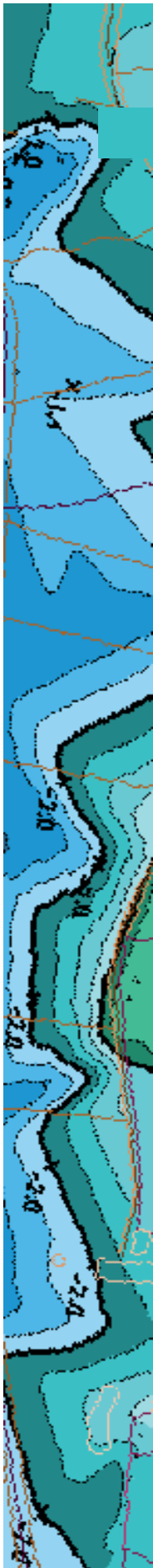
Af egentlige hydrauliske bagskråningsbrud, som med sikkerhed kan henregnes til denne type brud kendes kun de 7 brud på Juvre dige under stormen 3 december 1999, ref. /17/. Denne digestrækning oplevede decideret fralandsvind i stormsituationen, hvorfor forskråningsbrud som følge af gennemlokning og kerneerosion kan udelukkes. Med udgangspunkt i vandstandsmodellen relation (10) kan det konstateres, at det ydre vandspejl har stået i niveau med digekronen. De bølgevariationer vandstanden, selv på en fralandskyst vil være påvirket af, har derfor kunnet give anledning til ganske store overløb. Dette tilfældige overløb i kombination med digeklædningens varierende styrke har ført til 7 brud. Det konstateres derfor, at der er opstået 1 brud for hver 450 m overstrømmet digelinje.

I relation til det hydrauliske bagskråningsbrud opfattes længden  $L_{hb} = 450$  m som en karakteristisk længdekonstant.

Under stormfloden 3 januar 1976 optræder der alt i alt 14 forstadier til et hydraulisk bagskråningsbrud på Rejsby dige. De første 12 af disse forstadier ligger grupperet på den sydlige del af diget, som var udsat for de højeste vandstande i henhold til vandstandsmodellen i relation (1). Ekstremvandstanden i dette område har varieret mellem 5,25 og 5,31 m DVR90. Benyttes de vandstandskorrigerede bølgerelationer (2) og (3) kan det typiske bølgeoverløb på strækningen estimeres til 0,035 m<sup>3</sup>/s/m i henhold til overløbsformlerne (11), (12) og (13). Dette maksimale bølgeoverløb fra brydende bølger førte ikke til gennembrud, men stærk beskadigelse.

Som beskrevet i afsnit 3.1.3 under analysen af digebruddet syd for Brøns under stormfloden 3 december 1999, forekom der en maksimal overløbsrate fra brydende bølger på 0.064 m<sup>3</sup>/s/m i brudstedet inden der udviklede sig et decideret brud.

På baggrund af de omfattende skader og brud på den sydlige del af Rejsby dige under stormfloderne i 1976 og 1999 antages det at overløbsraten 0,060 m<sup>3</sup>/s/m fra brydende bølger er kritisk i relation til udvikling af et hydraulisk bagskråningsbrud. Denne rate er 6 gange højere end den overløbsrate, Hollandsk designpraksis for klægklædte bagskrånninger, i øjeblikket opererer med, ref. /3/.



## Vurdering af konsekvenser

Risikoanalysen består dels af en kortlægning af de indre vandspejls sandsynligheder dels en vurdering af de indre vandspejls konsekvenser eller skader. Skaderne sammenstilles som funktion af den indre vandstand i en såkaldt skadeshypsograf, se Figur 3.

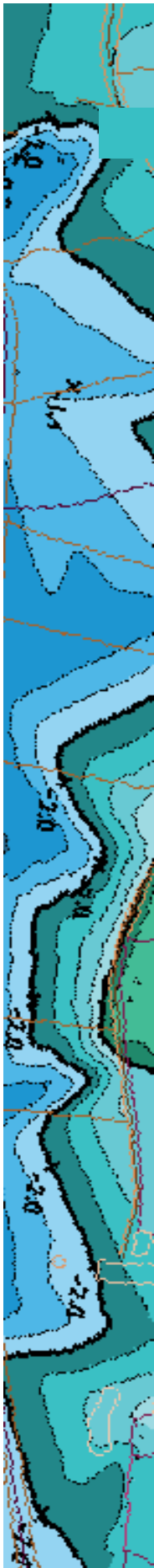
Skaderne kan sammensættes af såvel direkte materielle tab som immaterielle tab. De materielle tab kan omfatte fast ejendom, løsøre, produktionsmidler, råvarer, færdigvarer, afgrøder, besætning, infrastruktur samt omkostninger til oprydning og genetablering.

De immaterielle tab kan omfatte tabt arbejdsfortjeneste, tabt omsætning, tabt økonomisk aktivitet, tab af livskvalitet, sociale omkostninger, kulturelle tab, betydningen af relokalisering af personer, virksomheder og institutioner samt miljømæssige tab.

Ved prioriteringen af en risikoanalyse er det nødvendigt at lægge ligelig omhu i såvel bestemmelsen af de indre vandspejl som fastlæggelsen af skadernes omfang.

I tilfælde af at der ikke er etableret varslingsystemer og evakueringsplaner for et digebeskyttet område, kan der ikke ses bort fra risikoen for personskader.





## Konklusion

Nærværende rapport har fastlagt principperne for en risikoanalyse af et digebeskyttet område.

I rapporten er etableret en række modeller til at beregne indre vandspejl som følge af brudmåderne forskråningsbrud og bagskråningsbrud. Modellerne for forskråningsbruddet består dels af Rejsby gennemlokningsmodellen, formel (6) og Tabel 3, Rejsby kerneerosionsmodellen, formel (9) og Tabel (6) samt Brøns brudmodellen, formel (14) og Tabel (8). Modellerne for det hydrauliske bagskråningsbrud omfatter den karakteristiske længdekonstant  $L_{hb}$  udledt fra Juvre digebruddene samt den kritiske bølgeoverløbsrate på 0.06 m<sup>3</sup>/s/m i kombination med en brudmodel.

Forudsætningen for at kunne kvalitetssikre og videreudvikle modellerne er, at der til stadighed foregår en omhyggelig og systematisk dataindsamling i forbindelse med skader eller brud på diger. Særligt i forbindelse med brud på diger er det vigtigt, at opretholde et beredskab, der kan rykke ud og indhente den nødvendige information, inden skaderne bliver udbedrede, hvilket Kystdirektoratet også vil tilstræbe fremover.

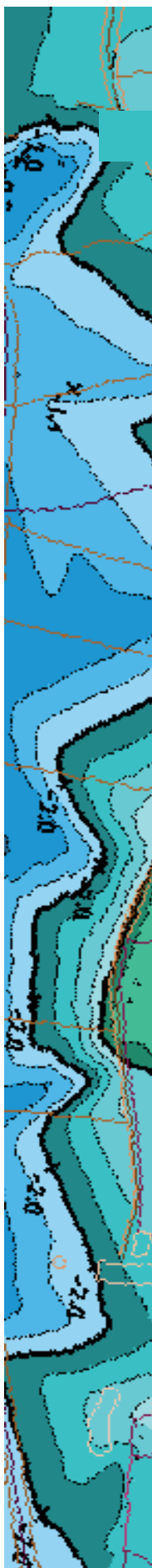
Der bør lægges vægt på at indsamle og dokumentere følgende informationstyper:

- Vandstandsmålinger og dækning med vandstandsdata
- Bølgedata umiddelbart foran digerne
- Registrering af samtlige gennemloknings position og niveau
- Registrering af klæglagets kvalitet og kvantitet
- Registrering af "erosive agenter" blandt flodskarnet
- Fortanding, længde, bredde, dybde, position og niveau af de største skår samt foto
- Opmåling og fotografering af brudsteder

- Opmåling af brudstedernes tærskelniveau
- Opmåling af brudstedernes vidder i oprindeligt kroneniveau
- Dokumentation af brudstedernes klægbeklædning
- Dokumentation af indre brudvandstande

Følgende udviklingsaktiviteter bør overvejes:

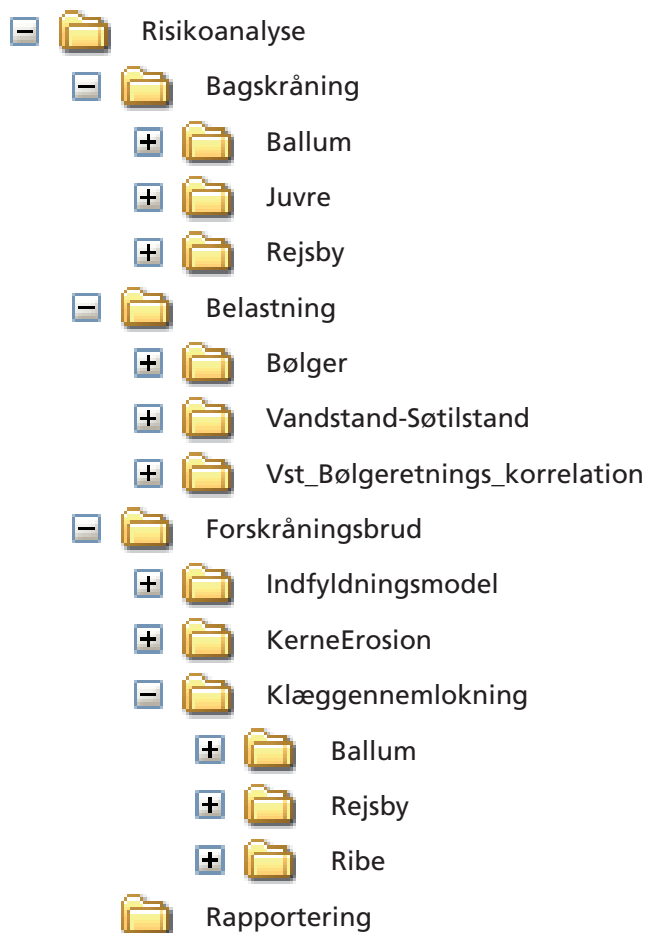
- Tværfaglige studier af skadeshypsografer i samarbejde med f.eks. økonomer og forsikringsfolk
- Løbende validering, vedligehold og udvikling af samtlige brudmodeller
- Risiko for personskader ved digebrud
- Risiko ved sammenbrud af sluser og underføringer
- Fastlæggelse af en kvalitetsskala for klæg
- Fusion af brudsteder ved massiv forekomst af brudtypen hydraulisk bagskråningsbrud
- Yderligere dokumentation for det hydrauliske bagskråningsbrud
- Udvidelse af anvendelsesområdet for bølgeoverløbsformler til vandstande tæt på og over kroneniveau



## Referencemateriale

### 6.1 Datastruktur og databasis

Risikoanalysens modeller og datamateriale er samlet på vedlagte project CD. Data, modeller, kalibreringer og analyser er organiseret som MS Excel regneark, tekstfiler og grafik i datastrukturen i Figur 25.



Figur 25 Datastruktur og databasis for "Risikoanalyse af digebeskyttede områder".

## 6.2 Referencer

- /1/ Kystdirektoratet: Udviklingsprogram 2002 - 05, 2002.
- /2/ Kystinspektoratet: De syd- og sønderjyske diger, Digernes Sikkerhedsniveau, Januar 1999.
- /3/ Technical Advisory Committee: Wave run-up and overtopping, Technical Advisory Committee on Protection against Inundation, The Hague 1974.
- /4/ Kystinspektoratet 1988: Stormflodrisikoanalyse, De indre danske farvande, December 1988.
- /5/ Ministeriet for offentlige arbejder: Forstærkning af havdigerne i Tønder og Ribe amter, Økonomisk vurdering, Udvalget vedr. sikkerhedsforanstaltninger mod stormflodsfaren ved havdigerne i Tønder og Ribe amter, Sekretariatet, Januar 1973.
- /6/ Centre for Civil Engineering Research and Codes: Probabilistic Design of Flood Defences, Report 141, Technical Advisory Committee on Water Defences, the Netherlands, June 1990.
- /7/ Ditlevsen, O.; Madsen, H.O.: Structural Reliability Methods, John Wiley and Sons, Chichester, 1996.
- /8/ COMRISK: Risk Assessment for the Wadden Sea, Subproject SP7, Interreg III B North Sea Region Programme of the European Union, Kystdirektoratet, September 2004.
- /9/ [www.ibk.baug.ethz.cz/fa/](http://www.ibk.baug.ethz.cz/fa/): Decision Making and Risk Acceptance, Presentation by M. Faber, 21 October 2002, Ingeniørhuset Copenhagen.
- /10/ Technical Advisory Committee for the Water Defenses (TAW): From Exceedance Probability towards Flooding Probability", The Hague 2000 (in Dutch).
- /11/ British Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF): Flood and Coastal Defence Project Appraisal Guidance, Economic Appraisal, FCD-PAG3, A Procedural Guide for Operating Authorities, Flood and Coastal Defence with Emergencies Division, December 1999.
- /12/ Laurits Bernitt (2005): Risikoanalyse af Ribe Kog – Basisår 2002, Kystdirektoratet December 2005.
- /13/ Kystinspektoratet: Opmåling af digeskader, stormfloden 3. Januar 1976, intern rapport, 1976.
- /14/ Kystinspektoratet: Fotoflyvning af Rejsby Dige efter stormen 3 Januar 1976, intern rapport.
- /15/ ISVA: Analyse af Digeskader under stormfloden 3. januar 1976, Rejsby Dige, Ole Nielsen og Holger Toxvig, Reg. No. 50-10-06.
- /16/ Kystinspektoratet: Orkan, 3. december 1999, interne noter og fotos fra Ballum Dige, Rejsby Dige, Rømø Dæmningen og Juvre Dige, Per Sørensens besigtigelse 7 december 1999.

- /17/ Kystinspektoratet: Orkanen den 3. december 1999, noter og fotos fra Rømødæmningen, Rømø, Juvre dige, Ballum dige, Rejsby dige, Gunnar Mensels besigtigelser 4, 7 og 8 december 1999.
- /18/ Kystinspektoratet, Digeoversigt Syd- og Sønderjylland, Februar 1997.
- /19/ DHI: Bølgeforhold i Vadehavet, Oktober 1998.
- /20/ G.M. Smith, J.W. W. Seiffert and J. W. van der Meer: "Erosion and Overtopping of a Grass Dike, Large Scale Model Test", Coastal Engineering 1994.
- /21/ J. W. van der Meer and J. P. F. M. Janssen: Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes and Revetments, Delft Hydraulics, August 1994.
- /22/ GEO: Digeanlæg, Stabilitet af bagskråninger, Geoteknisk vurdering, GEO projekt 25044, 21 januar 2004.
- /23/ Kystdirektoratet: Stormflodsrisikoanalyse, Bagskråningsbrud i diger udsat for bølgeoverløb, Notat nr. 13, Maj 1990.