

Hydraulisk notat, Søborg Sø

Hydraulisk og hydrologisk modellering – grundlag for detailprojekt

04. NOVEMBER 2022

6. version

Projekt navn	Søborg Sø, detailprojektering
Kunde	Skov- og Naturstyrelsen, Nordsjælland
Projektleder	Christian Petersen
WSP Projektnummer	1322100146
Til	Ida Dahl-Nielsen, Morten Elling
Udarbejdet af	Ole Munch Johansen og Kristian Stokbro Thomsen  Mathias Jepsen 
Kvalitetssikret af	Line Bønnelycke Nørgaard
Godkendt af	Christian Petersen
Version	06
Versionsdato	04. november 2022
Første udgivelsesdato	17. marts 2022

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	5
2	MIKE SHE / MIKE 11 model	7
2.1	Kort beskrivelse af modelgrundlaget fra forundersøgelsen	7
2.1.1	Modelopsætning af området ved Søborg sø	7
2.1.2	Opdatering af klimadata, pejledata og afstrømningsdata	7
2.1.3	Modellens evne til at simulere vandbalance – inkludering af nye data fra 2019-2020	7
2.1.4	Modellens evne til at simulere grundvandsforhold – inkludering af nye data fra 2020-2021	9
2.1.5	Konklusioner på modelgrundlaget før tilpasninger	10
2.2	Justeringer i statusmodellen	10
2.2.1	Søborg Sø	10
2.2.2	MIKE11 vandløb	10
2.3	Modelkalibrering af statusmodel	10
2.3.1	Procedure for kalibrering	10
2.3.2	Parametre fra automatisk kalibrering	11
2.3.3	Den tilpassede statusmodels evne til at simulere vandbalance	12
2.3.4	Den tilpassede statusmodels evne til at simulere grundvandsforhold	13
2.4	Projektmodel – justeringer	15
2.4.1	Søborg Sø konceptuel beskrivelse	15
2.4.2	MIKE11 vandløb	16
2.5	Klimascenarie	16
2.6	Modelresultater	17
2.6.1	Grundvandsforhold og afvandingskort	17
2.6.2	Kilder til usikkerhed på terrænnære grundvandsforhold	18
2.6.3	Opfyldning af Søborg Sø og vandspejlsniveau	19
2.6.4	Afstrømningsforhold og vandbalance	19
3	MIKE 11 model til beskrivelse af afløbet fra Søborg Sø	22
3.1	Formål	22
3.2	Modelopsætning	23
3.3	Resultater	23
4	MIKE 11 model til konsekvensvurdering i Søborg Sø Landkanal	25
4.1	Formål	25
4.2	Modelgrundlag	25
4.2.1	Vandløbsgeometri	25

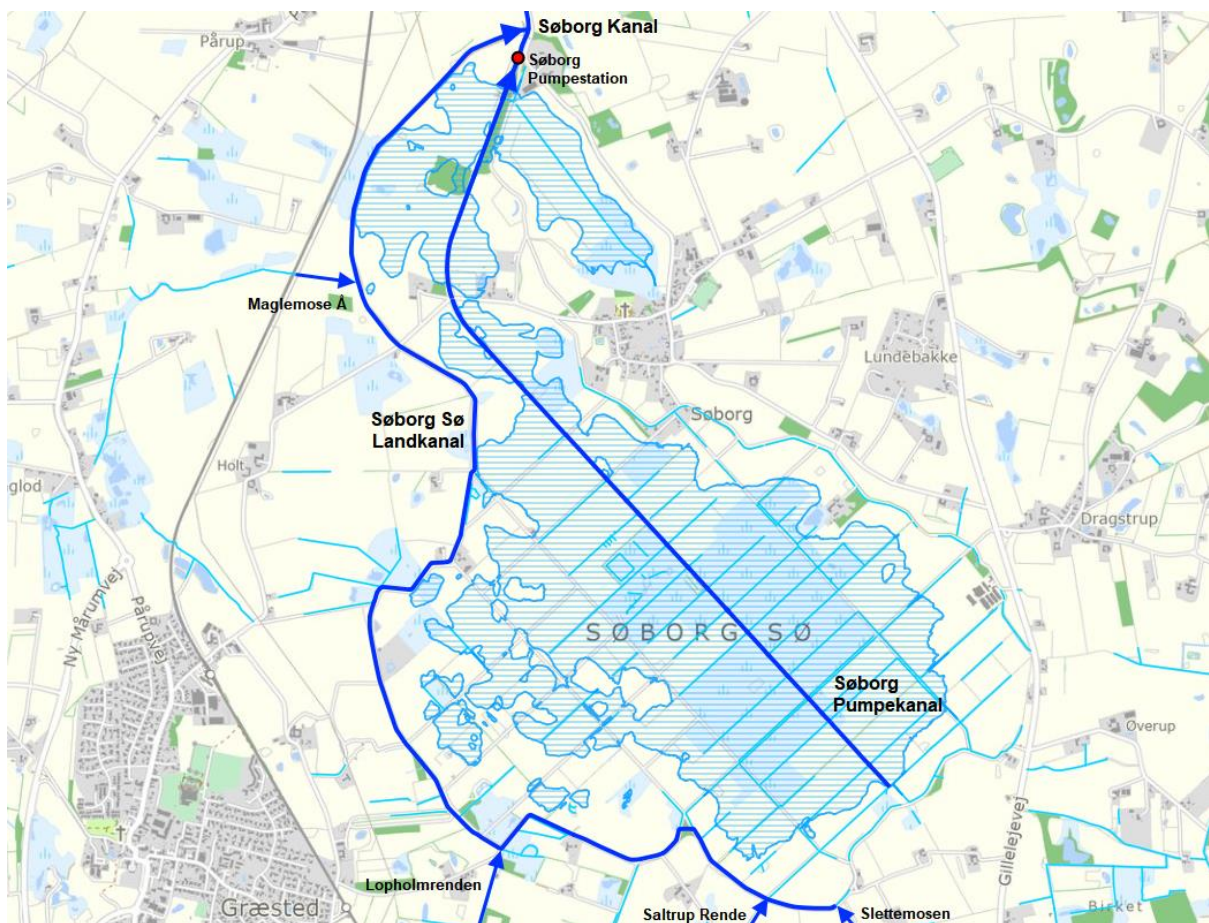
4.2.2	<i>Oplande og randbetingelser</i>	28
4.2.3	<i>Modstandsforhold</i>	30
4.2.4	<i>Beskrivelse af Søborg Sø</i>	31
4.3	Beregningsscenarier	32
4.3.1	<i>Normale afstrømningshændelser i Søborg Sø Landkanal</i>	32
4.3.2	<i>Ekstreme stormflodshændelser fra Kattegat</i>	33
4.3.3	<i>Ekstreme stormflodshændelser i fremtidens klima</i>	37
4.4	Resultater, trykforhold omkring nuværende og fremtidige diger	38
5	Vandudskiftning syd-vest for stialternativ b	46
6	Korrelation af ekstreme hændelser	48
7	Referencer	50

1 INDLEDNING

I dette notat beskrives opsætningen af de hydrologiske og hydrauliske modeller, som danner grundlaget for detailprojektering af Søborg Sø projektet. Modellernes formål er at kunne beskrive afstrømningsforhold og vandstandsforhold i Søborg Sø, Søborg Landkanal og Søborg Kanal før og efter reetablering af søen. Modellerne er opstillet i forundersøgelsen (Niras A/S, 2019) til søprojektet og justeret i forbindelse med dette realiseringsprojekt. Dokumentet udgør dels den tekniske dokumentation af modellerne, og de valg der ligger til grund for projekteringen i projektet. Desuden diskuteres usikkerheder og begrænsninger i modellerens anvendelse.

Nedenfor er angivet de forskellige hydrauliske analyser som notatet berører:

- Nuværende og fremtidig vandbalance i Søborg Sø og opland (Koblet MIKESHE / MIKE 11)
- Nuværende og fremtidig grundvandsstand omkring Søborg Sø (Koblet MIKESHE / MIKE 11)
- Fremtidige strømningskapacitet ved underføringen under Bygaden (MIKE 11)
- Ændrede stuvningsforhold i Søborg Sø Landkanal under normale og ekstreme hændelser (MIKE 11)
- Hydrauliske trykgradienter omkring arronderende diger og fremtidige stier langs Søborg Sø (MIKE 11)
- Strømningsforhold og hydrauliske betragtninger for fremtidige afløbet fra Søborg Sø (MIKE 11)
- Ekstreme stormflodshændelsers effekt på vandstanden i Søborg Sø (MIKE 11)
- Vandudskiftningsforhold i Søborg Sø med og uden stialternativ B
- Risiko for korrelation mellem ekstremhændelser mellem stormflod og vandløbsafstrømning



Figur 1.1 Oversigtskort, Søborg Sø

Grundvandsmodellens formål er at beskrive afstrømningsforhold og vandstandsforhold i Søborg Sø, Søborg Landkanal og Søborg Kanal før og efter reetablering af søen og i et fremtidigt klima. Derudover beskrives ændringer i grundvandsforhold som potentielt kan have konsekvenser for ejendomme og infrastruktur i og omkring projektområdet.

MIKE 11 modellen anvendes til gennemregning af vandspejlsforhold i Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal i ekstrem-situationer. MIKE 11 modellen anvendes ligeledes til detaljeret hydraulisk beregning af udløbet fra Søborg Sø's udformning.

Et af formålene med notatet har været løbende at dokumentere metoder, væsentlige valg og fremdrift i arbejdet med modelanvendelsen således at bygherre har kunne følge med i processen.

2 MIKE SHE / MIKE 11 MODEL

2.1 KORT BESKRIVELSE AF MODELGRUNDLAGET FRA FORUNDERSØGELSEN

I detailprojektet er der bygget videre på modellen fra forundersøgelsen (Niras A/S, 2019). I det følgende beskrives kort de centrale elementer i grundvandsmodellen.

Udgangspunktet for grundvandsmodellen er en model fra grundvandskortlægningen ”Gribskov-modellen” (Orbicon A/S, 2014). I forundersøgelsen har NIRAS lavet en lokal Søborg Sø model, som dækker et mindre område end Gribskov-modellen. Søborg Sø modellen dækker hele oplandet til Søborg Sø og vandløbssystemet, som leder til Søborg Kanal. Randbetingelsen til Søborg Sø modellen er de trykniveauer, som er beregnet i Gribskov-modellen. Formålet med at lave en lokal model har været, at reducere gridstørrelsen i modellen fra 100 m til 50 m uden at beregningstiden er blevet for stor.

Modellen anvender fastholdte trykniveauer af randbetingelser på størstedelen af randen indland og no-flow rand tættere på kysten. Trykranden bliver i praksis en indstrømningsrand til modellen. Det betyder, at modellens overordnede vandbalance bliver relativt følsom overfor de hydrauliske egenskaber i de vandførende magasinlag. Dette er acceptabelt så længe der ikke ændres på hydrauliske egenskaber i disse primære vandførende lag. Faren ved denne randbetingelse til modellen kan være, at modellens overordnede vandbalance bliver meget afhængig af hydrauliske egenskaber for de vandførende lag. I forbindelse med en recalibrering af modellen er det et opmærksomhedspunkt, at den overordnede vandbalance skal bevares.

2.1.1 MODELOPSÆTNING AF OMRÅDET VED SØBORG SØ

Der er ikke en standard-procedure i MIKE SHE til modellering af en søflade med direkte kontakt til grundvandet. Under forundersøgelsen er der valgt en tilgang, hvor Søborg Sø er ”fyldt op” og inkluderet i den mættede zone, idet terræn i søen er sat til kote 2,0 m DVR90, således det fremtidige vandspejl omkring kote 1,0 m DVR90 beregningsteknisk ligger ”under terræn”. I søen er drænniveauet anvendt til at styre vandspejlsniveauet i hvert af de gennemregnede scenarier. Søen er ”fyldt op” med et relativt lavpermeabelt materiale. Omkring søen er der indlagt fladedræn 1,0 meter under terræn konsekvent med en ret lav drænkonduktans.

2.1.2 OPDATERING AF KLIMADATA, PEJLEDATA OG AFSTRØMNINGSDATA

I detailprojektet er der taget udgangspunkt i statusmodellen fra forundersøgelsen og det første step har været at undersøge, hvor god modellens tilpasninger er i forhold til afstrømningsforhold og grundvandspejlinger, som er indsamlet efter forundersøgelsen. Nedenstående er en liste over de nye data, der er lagt ind i modellen.

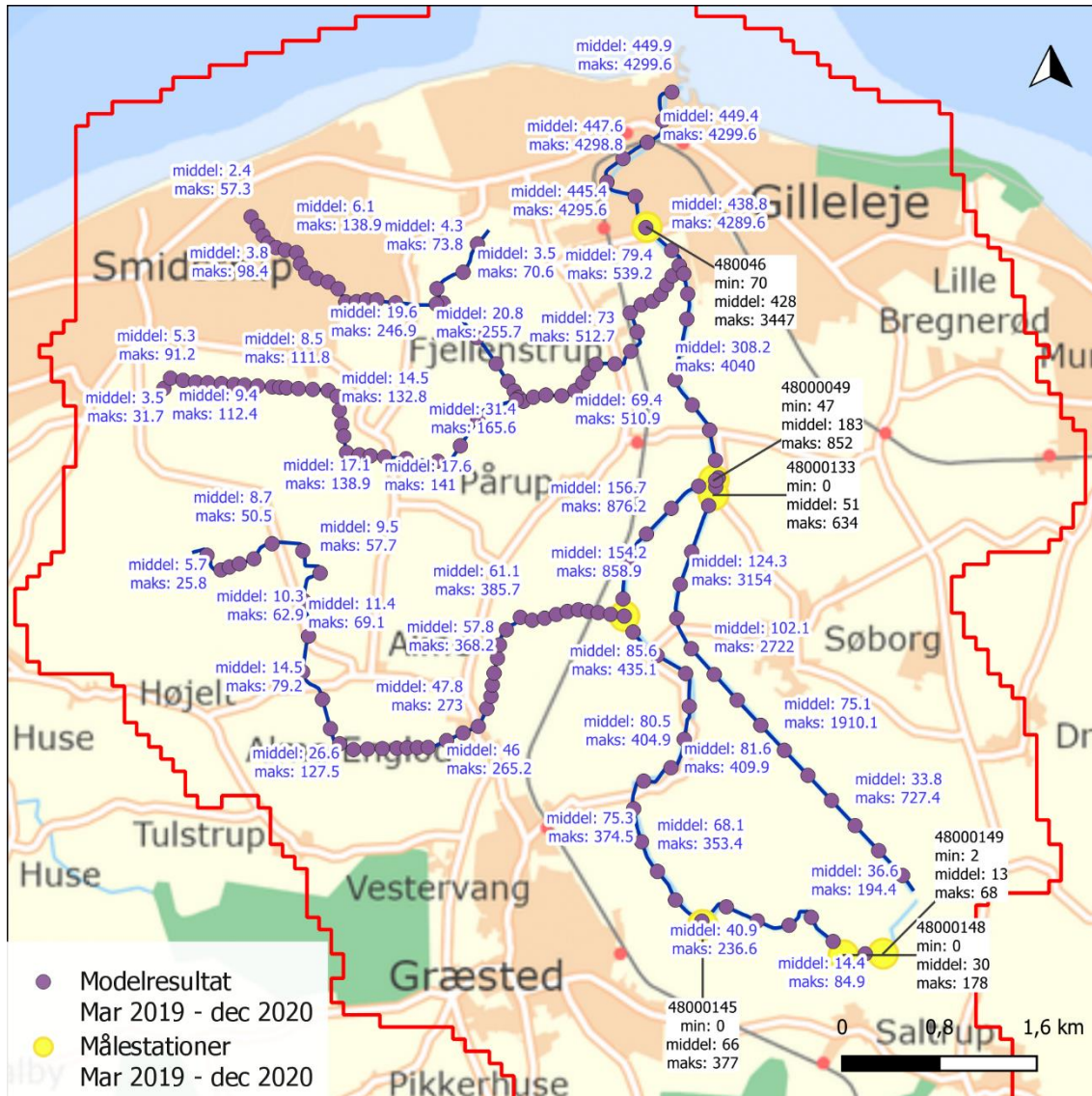
- Klimadata i form af nedbør, potentiel fordampning og temperatur er indlagt frem til og med 8. december 2021. Der anvendes dynamisk vindkorregeret nedbør på 10 x 10 km grid og potentiel fordampning baseret på Makkink-formlen (DMI, 2022).
- Pejledata fra NIRAS’ 15 boringer, 23 tidsserier i alt er indlagt som observationer i MIKE SHE-modellen for perioden juli 2020 til september 2021.
- Vandføringer målt af Orbicon/WSP i 2019 anvendes til sammenligning med modelkørsler.
- I MIKE11 modellen er antallet af beregningspunkter forøget, så der maksimalt er 300 meter imellem Q-punkter og H-punkter for at kunne udtrække vandføringer i de punkter, hvor observationerne findes.

Placeringen af de observationstidsserier, som er tilføjet i modellen, vises under resultater fra indledende modelkørsler i afsnit 2.1.4.

2.1.3 MODELLENS EVNE TIL AT SIMULERE VANDBALANCE – INKLUDERING AF NYE DATA FRA 2019-2020

Der er god overensstemmelse mellem målte og simulerede vandføringer i perioden marts 2019 til december 2020. Dette gælder både middel og maks. hændelser på hele Søborg Sø Landkanal og dens tilløb. Indenfor Søborg Sø

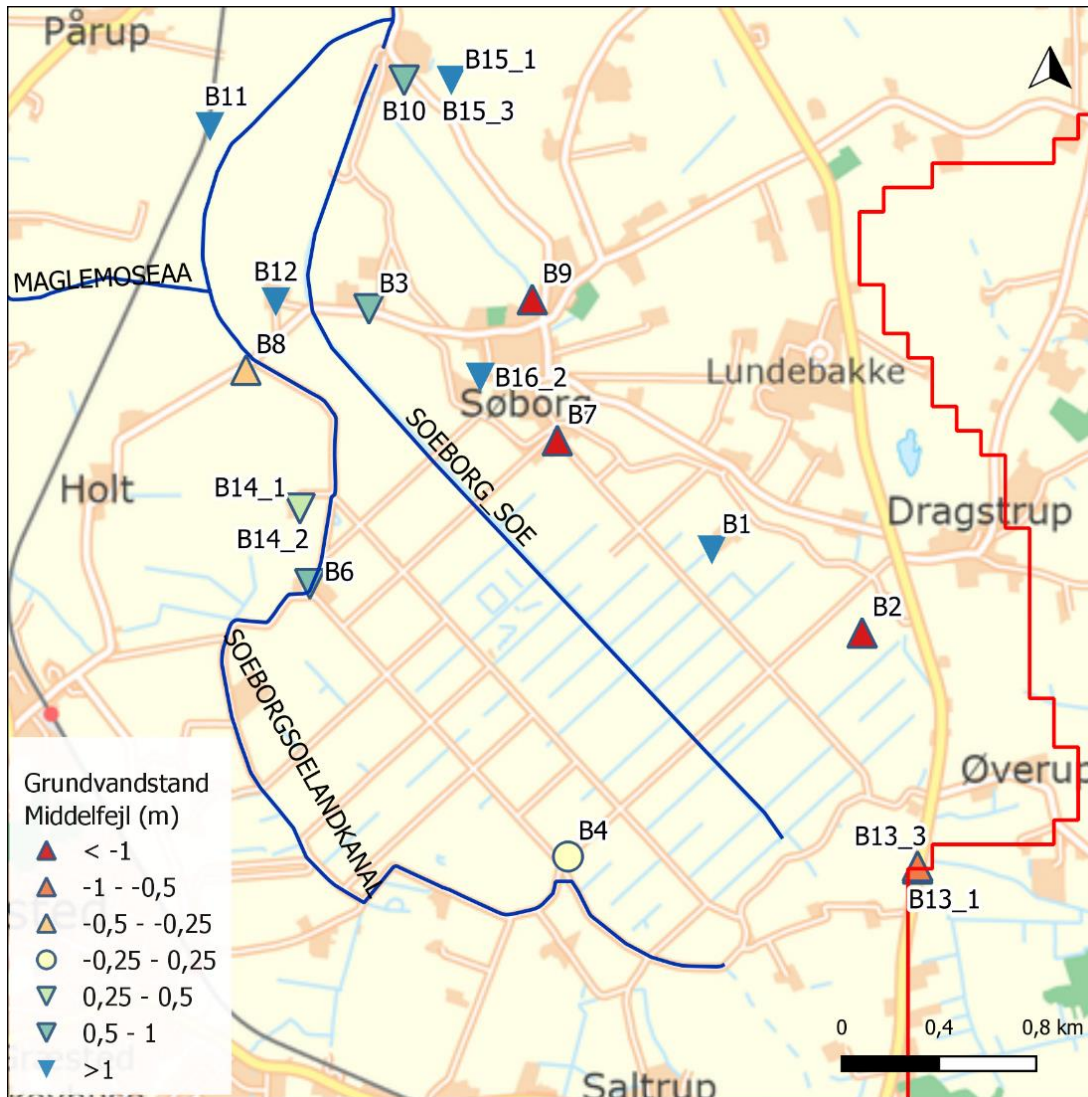
er vandføringen i Søborg Sø kanalen kraftigt overestimeret. Det skyldes primært den valgte drænkoefficient og at man ikke har indbygget eller forsøgt at efterligne udpumpningen fra søen i forundersøgelsens statusmodel. Det påvirker maksimumvandføringen hele vejen ned gennem systemet.



Figur 2.1: Sammenhæng mellem målt og simuleret vandføring i statusmodellen fra forundersøgelsen. De blå labels på figuren viser middel og maks. vandføring (l/s) fra statusmodellen før kalibrering. De sorte labels viser min, middel og maks. flow (l/s) fra de målestationer WSP har overvåget fra marts til december 2020.

2.1.4 MODELLENS EVNE TIL AT SIMULERE GRUNDVANDSFORHOLD – INKLUDERING AF NYE DATA FRA 2020-2021

Der er mindre god overensstemmelse mellem modellen og de indlagte pejletidsserier omkring Søborg Sø. 15 ud af 23 pejletidsserier afviger mere end 1,0 meter i middel fra det observerede.



Figur 2.2: Sammenhæng mellem målt og simuleret trykniveau i terrænnært grundvand i statusmodellen, NIRAS. Resultater er vist før kalibrering.

Følgende procedure følges til at forbedre beskrivelsen:

1. Drænforhold i modellen undersøges ved monitoringsboringerne
2. Geologi i de øverste modellag undersøges
3. Evt. åbenlyse tilpasninger til drænforhold og geologi begrundes og indføres
4. Der kalibreres på modellens øverste geologiske lag med henblik på at opnå:
 - a. Bedre tilpasning til middelgrundvandsforhold
 - b. Bedre tilpasning til variationer i grundvandsforhold.

2.1.5 KONKLUSIONER PÅ MODELGRUNDLAGET FØR TILPASNINGER

Vandbalanceforhold i modellen er generelt i god overensstemmelse med de målinger, som er gennemført i perioden 2019-2020. Maksimumafstrømningen i området indenfor Søborg Sø og nedstrøms Søborg Sø overestimeres kraftigt fordi vand ikke tilbageholdes i søen eller ledes videre i henhold til pumpe-strategi. Derimod ledes vandet blot videre. Drænkonstanten er meget højt sat i søområdet hvilket yderligere minimerer tilbageholdelsen/forsinkelsen af vand. På den måde regner modelopsætningen ikke direkte på videreføring af vandet fra Søborg Sø til Søborg Kanal.

2.2 JUSTERINGER I STATUSMODELLEN

2.2.1 SØBORG SØ

Terræn er erstattet af en ukorrigeret terrænmodel svarende til de nuværende terrænforhold i Søborg Sø. Drænniveau sættes til 1,0 meter under terræn i søen. Drænkonstanten er tilpasset til $3e^{-7} S^{-1}$. Vandet fra søen routes fortsat videre forbi pumpehuset uden egentlig af simulere en pumpning i modellen. Forbedringerne i vandføringsdynamikken (se evt. afsnit 2.3.4) sammenholdt med modellen i forundersøgelsen skyldes primært drænkonstanten i grundvandsmodellen.

2.2.2 MIKE11 VANDLØB

Vandløbene Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal er i modellen ændret til at blive beregnet med en fuld dynamisk beregningsmetode i MIKE11. Tidligere blev der anvendt "kinematisk routing", hvilket betyder, at vandet routes videre nedstrøms og vanddybden beregnes forsimplet uden medtagelse af blandt andet stuvning. Der er sat et maksimalt stedsskridt i MIKE11 modellen på 300 meter således, at der kan udtrækkes vandføringer flere steder ned gennem systemet.

2.3 MODELKALIBRERING AF STATUSMODEL

2.3.1 PROCEDURE FOR KALIBRERING

Til kalibrering af statusmodellen opsættes en automatisk parameter optimering. Selve udførslen gennemføres i DHIs Autocal brugerflade med udgangspunkt i statusmodellens parametre med opdaterede dræn og vandløb jf. ovenstående. Der udvælges en række parametre og dertilhørende parameterspænd til at holde modellen op imod de observerede data i de pejledata fra NIRAS i 15 boringer og vandføringsdata.

Indledningsvist udvælges de parametre, som vurderes at have størst indflydelse på terrænnært trykniveau. Den udvælgelse udføres kvalitativt ud fra de testkørsler, der er foretaget på statusmodellen og på baggrund af erfaringer fra tidligere kalibreringer.

I Tabel 2.1 ses en oversigt over parametrene i modellen som er udvalgt til kalibrering.

Tabel 2.1: Minimum- og maksimumværdier for parametre, der indgår i den automatiske kalibrering. Typen fortæller om parameteren varierer frit (variable) eller er bundet til andre parametre (dependent). Maksimum og minimum angiver det spænd, der er samlet i kørslerne.

Parameter		Type	Maximum (m/s)	Minimum (m/s)
ler1H	<i>Horisontal K-værdi</i>	Variable	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$
ler1V	<i>Vertikal K-værdi</i>	Dependent	ler1H/10	ler1H/10
Sy1	<i>Specifik ydelse for ler lag1</i>	Variable	0,20	0,05
ML_H	<i>Horisontal K-værdi</i>	Variable	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$
ML_V	<i>Vertikal K-værdi</i>	Dependent	ML_H/10	ML_H/10
KS1_H	<i>Horisontal K-værdi</i>	Variable	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
KS1_V	<i>Vertikal K-værdi</i>	Dependent	KS1_H/10	KS1_H/10
KS2_H	<i>Horisontal K-værdi</i>	Dependent	KS1_H	KS1_H
KS2_V	<i>Vertikal K-værdi</i>	Dependent	KS1_H/10	KS1_H/10

Hydraulisk ledningsevne i det højereliggende lerlag *ler1* samt moræneler *ML* indgår som primære vandstandsparametre i kalibreringen. Den vertikale hydrauliske ledningsevne varierer fra $1 \cdot 10^{-7}$ til $1 \cdot 10^{-9}$ m/s – en faktor 10 lavere end horisontale hydrauliske ledningsevne.

Hydraulisk ledningsevne for de to øvre sandlag *KS1* og *KS2* sættes til at være direkte afhængige.

Den dominerende jordtype i de øverste 3 m er ler og her indgår den specifikke ydelse (*Sy*) i kalibreringen, da denne kan være betydende for variationer i det terrænnære grundvand.

Som fejlfunktioner benyttes RMSE for hver parameter, transformeret så parameterenheder ikke har indflydelse på resultatet. Den vægtede sum anvendes for hhv. afvigelser i trykniveau og vandføring i et samlet mål for modellens evne til at simulere de observerede data. Der køres i alt 100 modelsimuleringer med "latin hypercube samplingmetode" med "Shuffled Complex Evolution" optimeringsmetode (DHI A/S, 2017).

2.3.2 PARAMETRE FRA AUTOMATISK KALIBRERING.

I nedenstående tabel præsenteres de optimerede parametre fra modelkalibreringen. Når modellen anvendes til prædiktions af påvirkninger af terrænnært grundvand, vil der være usikkerheder forbundet med resultatet. Kilder til usikkerheder beskrives i afsnit 2.6.2.

For at imødegå usikkerhederne ved kortlægning af grundvandsniveauet, er det valgt at gå videre med 2 modeller, hvor den ene (model A) beskriver de optimalt tilpassede pejleobservationer omkring Søborg Sø og den anden (model C) er en worst-case model, hvor der bevidst udvælges parametre, der med stor sikkerhed overestimerer en fremtidig påvirkning af grundvandsforholdene omkring Søborg Sø. I model C tildeles både det terrænnære ler, som dominerer modellens øverste lag, og moræneler i de dybere dæklag parameterværdier, som ligger i den absolut høje ende af hvad der er realistisk. Når den hydrauliske ledningsevne for toplaget er høj, kan stigninger i grundvandsspejlet omkring søen lettere forplante sig til et større område. Morænelerets egenskaber i model C tillader større tilførsel af grundvand til området omkring søen. Derudover arbejdes også med en Model B. Model B er den model, som er det bedste kompromis mellem pejlinger og afstrømningstidsserierne i kalibreringen. Opsummerende gælder det at:

- **Model A** er den mest realistiske model til beskrivelse af påvirkninger på terrænnært grundvand, men underestimerer sommerafstrømning til/fra Søborg Sø.
- **Model B** er den bedste model til at simulere både grundvands- og afstrømningsforhold og benyttes til prædiktions af afstrømning i både statusscenarie, projektscenarie og klimascenarie.
- **Model C** repræsenterer worst-case i forhold til grundvandsforhold og anvendes til at udpege områder, som ud fra en meget konservativ betragtning kan blive påvirket af stigende grundvandsspejl.

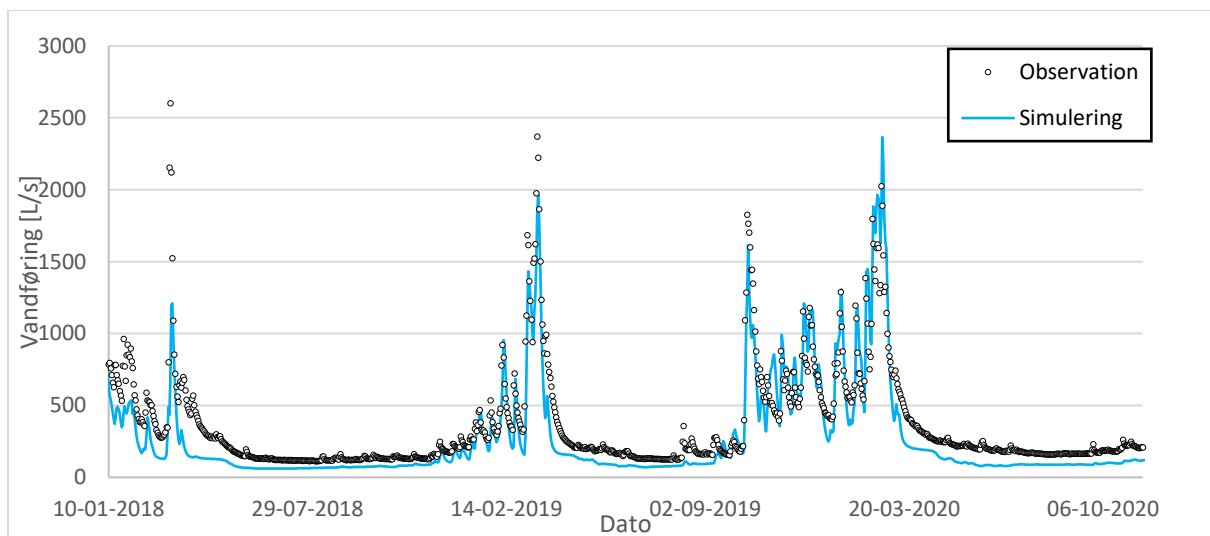
Tabel 2.2 Kalibreringsparametre i modellen og resultater af kalibrering.

Parameter	Enhed	Før kalibrering	A: Bedste tilpasning til pejlinger	B: Bedste tilpasning til pejlinger og afstrømning	C: Worst case tilC: Worst case ift. grundvand
ler1H	m/s	$3,64 * 10^{-6}$	$1,35 * 10^{-7}$	$8,32 * 10^{-8}$	$1,00 * 10^{-5}$
Sy1	-	0,20	0,13	0,35	0,10
ML_H	m/s	$1,70 * 10^{-7}$	$6,73 * 10^{-8}$	$2,80 * 10^{-7}$	$1,00 * 10^{-6}$
KS1_H	m/s	$1,50 * 10^{-4}$	$6,15 * 10^{-5}$	$2,88 * 10^{-4}$	$1,00 * 10^{-4}$

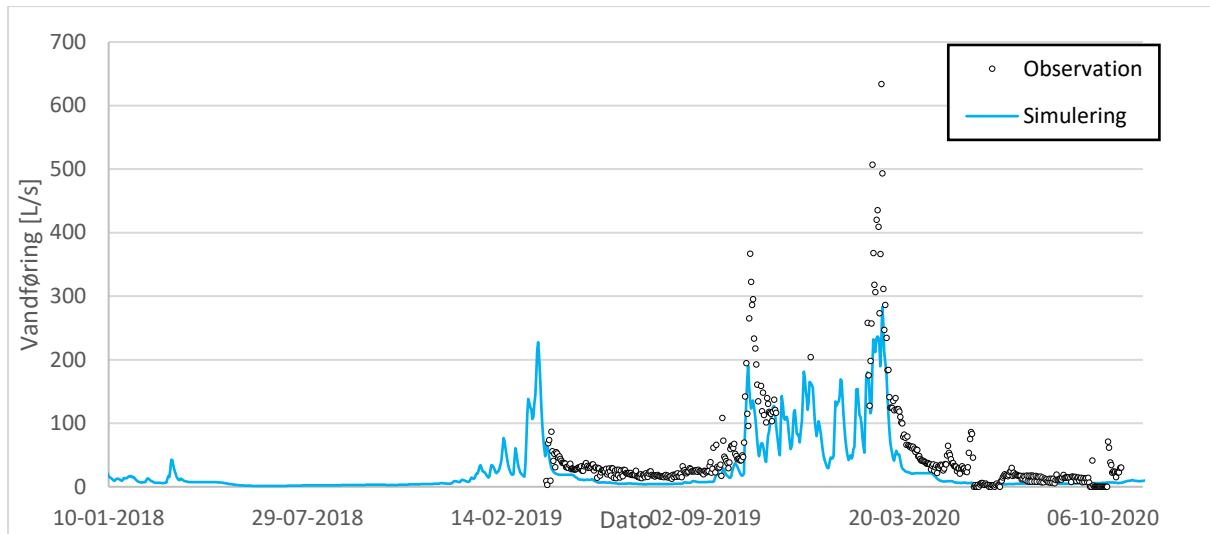
2.3.3 DEN TILPASSEDE STATUSMODELS EVNE TIL AT SIMULERE VANDBALANCE

Drænkonstanten har betydning for afstrømningsdynamikken og særligt betydning for formen af peaks i afstrømningen. Drænkonstanten er kalibreret manuelt og indgår derfor ikke i autokalibreringen. I forhold til modellen fra forundersøgelsen, er der justeret på drænkonstanten. Indenfor selve Søborg Sø var der anvendt en anden tilgang til beskrivelse af søen og en meget høj drænkonstant. I det øvrige opland var drænkonstanten derimod relativt lav. Den er i begge tilfælde sat til $3 * 10^{-7}$ i statusmodellen.

Resultatet ses på nedenstående Figur 2.3 for Søborg Kanal, Parkvej og afløbet fra Søborg Sø nederst på Figur 2.4. I forhold til afstrømning, er det resultatet fra Model B, som vises. Som det ses af Figur 2.3, er den overordnede vandbalance ved Søborg Kanal, v. Parkvej velbeskrevet og afstrømningen fra Søborg Sø, Figur 2.4 matcher også ganske fint den målte vandmængde i pumpekanalen ved søens udløb.



Figur 2.3: Målt og simuleret afstrømning i statusmodellen v. Søborg Kanal v. Parkvej (Model B)



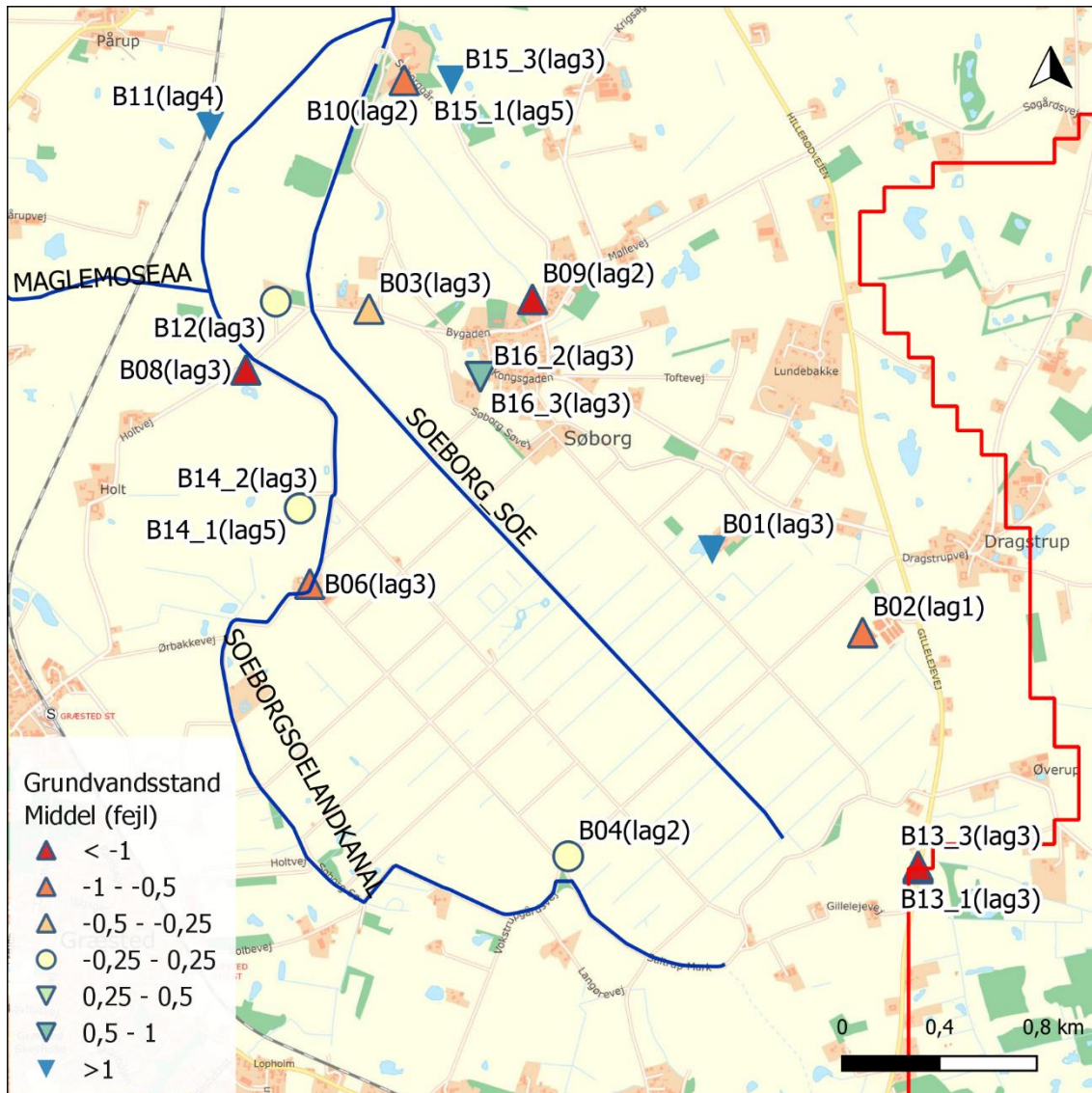
Figur 2.4: Målt og simuleret afstrømning i statusmodellen v. udløbet af Søborg Sø (Model B)

2.3.4 DEN TILPASSEDE STATUSMODELS EVNE TIL AT SIMULERE GRUNDEVANDSFORHOLD

I dette afsnit fremgår modellens nøjagtighed.

Tabel 2.3 Den kalibrerede statusmodells tilpasning til grundvandspejlinger (Model A). ME er middelfejlen mellem model og observation i det aktuelle indtag – positiv værdi betyder, at der simuleres for lavt. R er korrelationskoefficienten, som afspejler tilpasning til variationer i trykniveau uden hensyntagen til middelfejlen.

Pejlings ID	X-UTM	Y-UTM	Dybde top filter (m.u.t.)	Lag nr. i modellen	ME (meter)	R
B1	707.293	6.219.710	4,10	3	1,45	0,61
B2	707.911	6.219.370	3,50	1	-1,30	0,64
B3	705.882	6.220.700	4,20	3	-0,44	0,75
B4	706.701	6.218.450	3,70	2	0,17	0,57
B6	705.639	6.219.570	5,18	3	-0,75	0,62
B7	706.657	6.220.160	4,15	3	-1,77	0,58
B8	705.376	6.220.450	6,45	3	-1,06	0,92
B9	706.554	6.220.740	3,50	2	-1,38	0,55
B10	706.027	6.221.640	3,60	2	-0,92	0,92
B11	705.228	6.221.450	8,10	4	1,15	0,86
B12	705.499	6.220.730	5,90	3	0,23	0,69
B13_1	708.139	6.218.400	12,40	3	-1,42	0,77
B13_2	708.139	6.218.410	11,50	3	-1,44	0,77
B13_3	708.139	6.218.410	6,00	3	-1,30	0,62
B14_1	705.598	6.219.880	12,00	5	-0,25	0,88
B14_2	705.598	6.219.880	9,10	3	0,19	0,79
B14_3	705.598	6.219.880	7,80	3	-0,24	0,74
B15_1	706.221	6.221.640	12,70	5	2,66	0,84
B15_2	706.221	6.221.640	11,20	4	3,05	0,78
B15_3	706.221	6.221.640	7,00	3	1,64	0,96
B16_1	706.340	6.220.420	23,00	6	0,79	0,88
B16_2	706.340	6.220.420	13,00	3	0,02	0,67
B16_3	706.340	6.220.420	11,50	3	0,03	0,68



Figur 2.5: Sammenhæng mellem målt og simuleret trykniveau i terrænnært grundvand i statusmodellen
Resultater er vist efter kalibrering.

Jf. Figur 2.5 er modellens evne til at simulere terrænnære vandstandsforhold optimeret ud fra de 15 borer med i alt 23 filtre, hvori der er monitoreret kontinuert. Det bemærkes ligeledes, at modellen i målepunkter stadigvæk afviger fra målte vandstandsforhold til trods for autokalibreringens parameterisering. I alt afviger simuleringen for 12 ud af 23 mere end 1 meter fra det observerede middelniveau. Middelfejlen når positive og negative afvigelser summeres er blot 4 cm. Der er ingen systematik eller generel bias i afvigelseerne.

2.4 PROJEKTMODEL – JUSTERINGER

Med udgangspunkt i de kalibrerede modeller opstilles en model for den fremtidige Søborg Sø, kaldet projektmodellen. Her er ændret på måden, hvorpå selve Søborg Sø beskrives, hvilket uddybes i det følgende.

2.4.1 SØBORG SØ KONCEPTUEL BESKRIVELSE

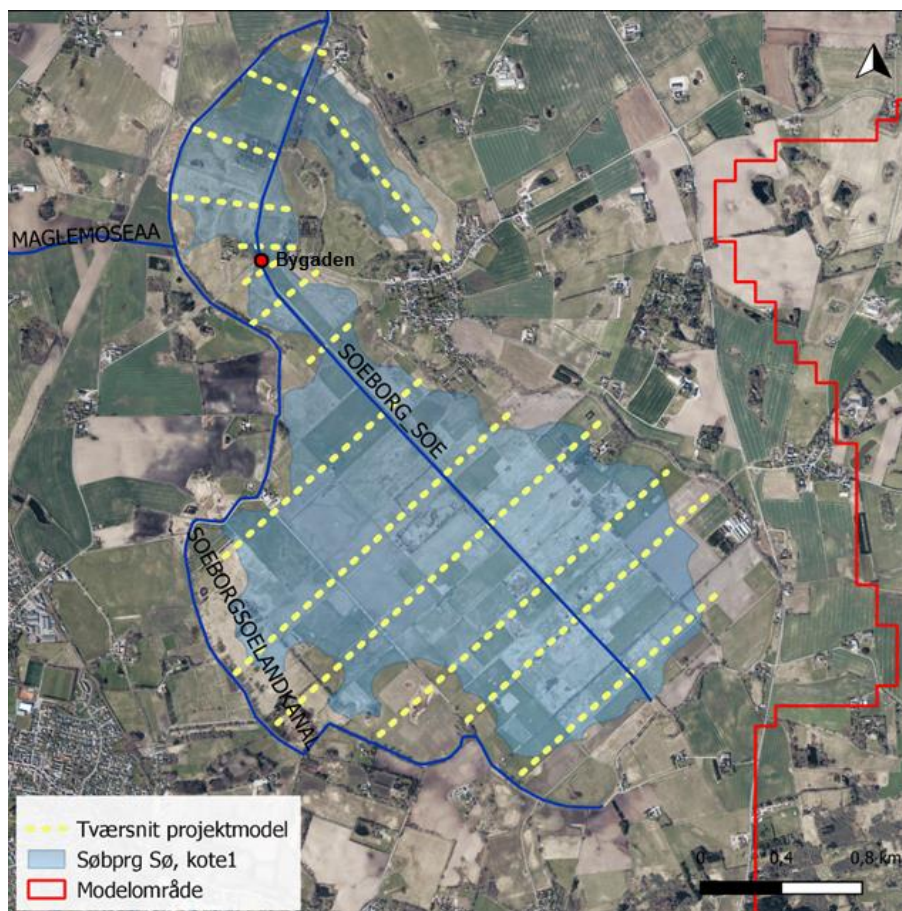
Søborg Sø simuleres i projektmodellen ved at indlægge brede tværsnit i MIKE11 modellen. Ved at anvende muligheden for “flood codes” i MIKE SHE kan det sikres, at udvekslingen med grundvand og fordampning fra søfladen simuleres korrekt, selvom søens vandføring og vandstandsdyamik kun beregnes i MIKE11.

Fladedræn i modellen ved Søborg Sø deaktiveres op til og med kote 1,0 m DVR90 fordi det i praksis forventes, at eksisterende dræning nær søen (hvor terræn er under kote 2,0 m DVR90) vil blive påvirket. Udvekslingen mellem grundvand og søbund beskrives ved en lækagekoefficient.

I forbindelse med opsætningen af modellen, er der indgået dialog med DHI omkring deres bud på den bedste modeltilgang til formålet. Projektmodellen tager udgangspunkt i statusmodellens hydrostrategi, vandløb og randbetingelser, men der tilføjes en række ændringer omkring beskrivelsen af søen.

De “brede tværsnit”, som er indlagt i modellen vises på Figur 2.6. Tværsnittene er indlagt med topografi fra højdemodellen i en 10 m grid version. Tværsnittenes formål er at opnå et retvisende søvolumen ved alle vanddybder og dermed en retvisende dynamik på søens vandspejl.

Der er ikke indlagt en hydraulisk begrænsning ved underføringen af Bygaden i MIKE SHE modellen. Der er foretaget hydrauliske beregninger på forholdene i eksisterende og fremtidige gennemføring, som påpeger, at der hverken i dag eller i fremtiden forekommer hydrologiske begrænsninger ved denne rørføring, som har nogen betydning i praksis.



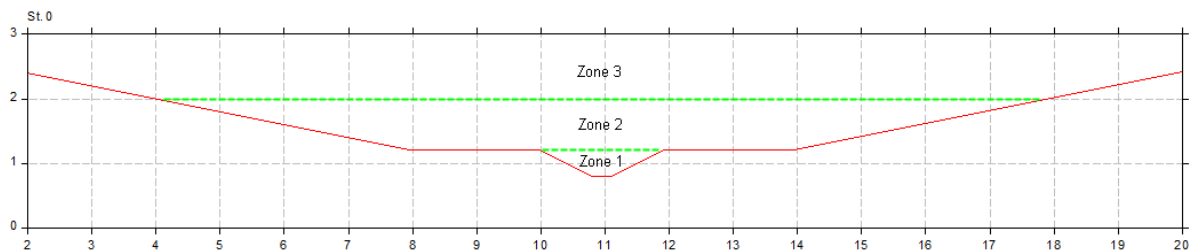
Figur 2.6 Opsætning af Projektmodel med indlæggelse af brede tværsnit i Søborg Sø.

Den beregnede optimale parameterisering af statusmodellen, præsenteret i afsnit 2.3.2, er overført direkte til projektmodellen.

2.4.2 MIKE11 VANDLØB

I projektmodellen er også hovedkanalen, som afvander Søborg Sø pumpelag gjort til et fyldt dynamisk vandløb og der er etableret en "structure" nedstrøms i vandløbet, som definerer en QH-relation.

QH-relationen efterligner afløbets egenskaber og bestemmer dermed, hvor meget vand der kan løbe ind og ud af søen. Når afløbet ikke opbygges direkte i den MIKE11 model, som kobles til MIKE SHE, så skyldes det, at vandhastighederne i afløbet ellers ville kræve et meget lille tidskridt at beregne. Tværsnittet af afløbet ser ud som vist på Figur 2.7.



Figur 2.7 Tværsnitsudformningen på afløbet fra Søborg Sø, hvor der er defineret 3 zoner med forskellig Manningtal.

Projektering af afløbets geometri og vandudvekslingen igennem afløbet beskrives i afsnit 3.2.

2.5 KLIMASCENARIE

Til beregning af ændringer i vandstandsforhold i grundvandet i fremtiden betragtes FN's klimascenarier. Der er af IPCC opstillet forskellige scenarier (RCP) for udledning af CO₂ og dertil koblede klimaforandringer.

Der gennemregnes en modelkørsel med højt CO₂-niveau (RCP8.5) for slutningen af det 21. århundrede (2071-2100). Nedenstående sæsonmæssige ændringer er fra DMIs klimaatlas og anvendes til at fremskrive de nedbørs- og fordampningstidsserier, som modellen bygger på. Den generelle havvandsstigning er på 48 cm og indføres som en fastholdt randbetingelse på Søborg Kanal ved udløbet.

Den procentvise ændring af maks. døgnnedbøren er ikke anvendt i klimaberegningerne i MIKE SHE-modellen. De største afstrømningshændelser finder sted i vintermånederne, hvor ændringen af middelnedbøren er sammenlignelig med ændringen af maks. døgn nedbøren. Middelændringen er af denne grund anvendt for hele serien.

Tabel 2.4 Procentvise, sæson-varierende ændringer for hhv. nedbør og fordampning på Sjælland v. RCP8.5 år 2071-2020. Positiv værdi indikerer en stigning, mens negativ værdi er aftagende.

Sæson	% ændring middelnedbør	% ændring nedbør, maks. døgn	% ændring potentiel fordampning
Vinter	24,47	23,29	2,04
Forår	20,00	22,68	3,77
Sommer	-2,12	19,41	4,03
Efterår	9,78	18,45	7,46

Det bemærkes af Tabel 2.4, at der anvendes sæson-varierende ændringer. Den tidlige opløsning på 3 måneder vurderes at være tilstrækkelig, som input til grundvandsmodellen.

Tidsserierne fremskrives ved at opjustere de eksisterende tidsserier for nedbør og fordampning i perioden 2011-2020 med de procentvise ændringer der fremgår i modellen.

2.6 MODELRESULTATER

I dette afsnit beskrives resultater af de forskellige grundvandsmodeller og scenarier, som anvendes i projektet.

2.6.1 GRUNDVANDSFORHOLD OG AFVANDINGSKORT

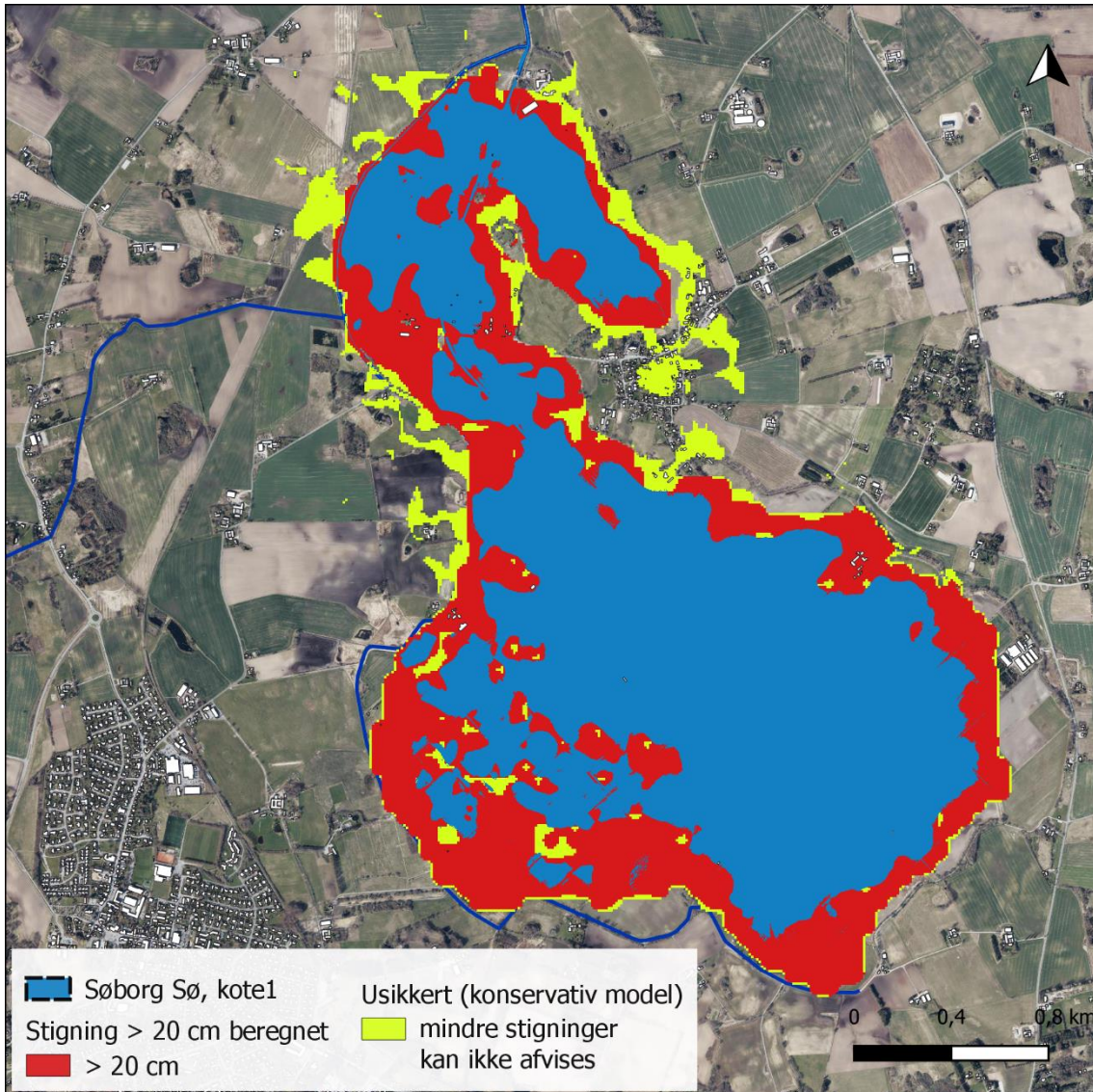
Der er beregnet en dybde til det terrænnære grundvandsspejl omkring Søborg Sø i både statusmodellen og projektmodellen, og resultaterne præsenteres for følgende situationer:

- Statusmodel, sommermiddel (Model A – bedst tilpasning til grundvandsforhold), bilag 1
- Statusmodel, vintermiddel (Model A), bilag 2
- Projektmodel, sommermiddel (Model A), bilag 3
- Projektmodel, vintermiddel (Model A), bilag 4

Afvandingskortene viser modellens bud på afstanden fra terræn til det terrænnære grundvandsspejl ned til 2 meters dybde.

Derudover præsenteres et grundvandsrisikokort, Figur 2.8 og bilag 5, hvor områder, som er i risiko for at blive påvirket af stigninger i grundvandsspejl, udpeges. Her vises model A's resultat som det mest sandsynlige bud på udbredelsen af påvirkninger, som ikke kan negligeres, med en rød farve. Dertil kommer en udpegning af områder, hvor der grundet usikkerheder på undergrundens egenskaber, kan være en lille teoretisk risiko for, at projektet kan påvirke grundvandsforhold, indtegnet med gul farve. Det er ikke vurderingen, at påvirkningen beregnet fra model C er målbar i praksis. Se evt. afsnit 2.3.2 for beskrivelse af model A, B, C.

Modellens resultater kan ikke tolkes således, at der med sikkerhed vil opstå udfordringer med stigende grundvandsspejl indenfor det "røde" markerede område på Figur 2.8. Der kan sagtens være lokale afvandingsforhold, som uden problemer kan bortlede en stigende grundvandstilførsel og dermed holde grundvandsspejlet i dets nuværende niveau. Indenfor det røde udpegede område vil lokale forhold omkring ejendomme blive undersøgt, og der vil blive foretaget en konkret vurdering af behovet for at iværksætte kompenserende tiltag. Indenfor de gule områder vil der blive screenet mere overordnet for hvert område.



Figur 2.8 Risikovurdering i forhold til stigninger i grundvandsspejl. Det røde område afgrænser den zone, hvor der i grundvandsmodellen beregnes stigninger i grundvandsspejlet på mere end 20 cm i området, hvor der i forvejen er mindre end 2 meter ned til grundvandsspejlet. Det gule område angiver områder, hvor resultater fra den mest konservative model viser en risiko for stigninger af vandspejlet.

2.6.2 KILDER TIL USIKKERHED PÅ TERRÆNNÆRE GRUNDVANDSFORHOLD

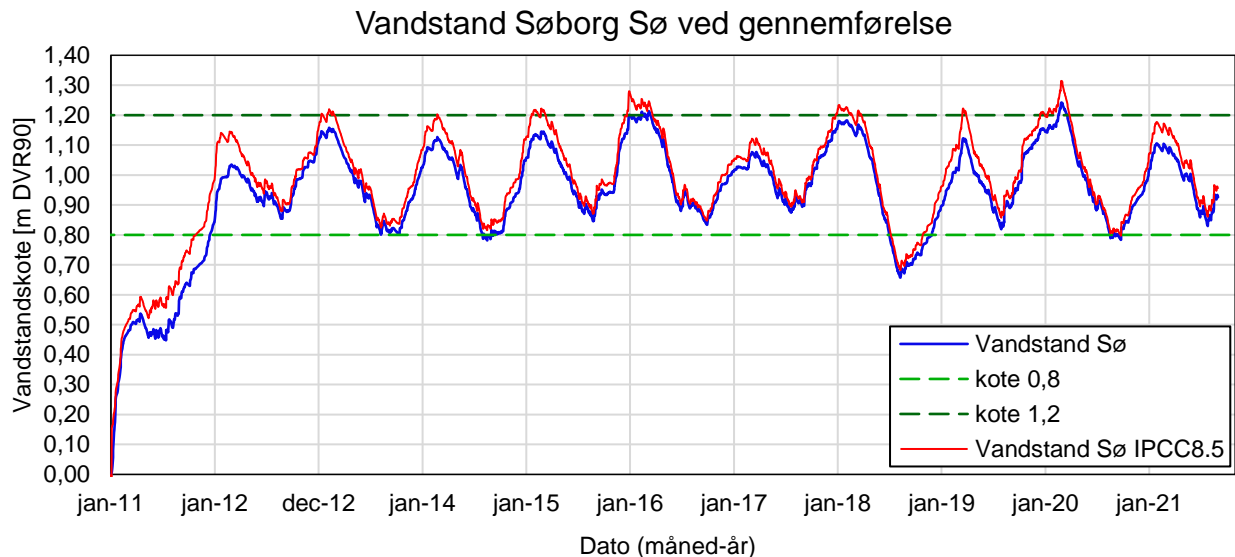
Der er flere forhold, som gør det vanskeligt at simulere niveauet på det terrænnære grundvandsspejl. I de områder og perioder, hvor grundvandsspejlet ligger mindre end 1,0 meter under terræn, vil de lokale afvandringsforhold være meget afgørende. Den præcise placering af markdræn eller afvanding i byområder bliver her væsentlig for, hvorvidt grundvandet står 1 meter under terræn eller helt i niveau med terræn i våde perioder. Hvis vandspejlet står dybere under overfladen, er det i særdeleshed modellens bagvedliggende geologi og parametriseringen af de geologiske lag, der er styrende for, hvor højt vandspejlet står. I forhold til sidstnævnte er grundvandsmodeller altid en betydelig forsimpning af virkeligheden. Der vil være variationer i de hydrauliske egenskaber lokalt, som slet ikke er beskrevet i modellen. En måde at kompensere for de manglende detaljer i modellens beskrivelse kan være at gå til ekstremer i parametriseringen, og derved teste hvor robust modellen er. Model C er netop et forsøg på at tage fat i et yderpunkt i modellens forudsigtelse. De områder som bliver påvirket ifølge model A, er med stor sandsynlighed områder, som kræver opmærksomhed og hvor påvirkningen kan være reel. De yderligere områder

som er påvirket jf. model C, er områder, som ikke med sikkerhed kan afvises, men hvor påvirkningen er mindre sandsynlig. Det vurderes ikke at være muligt at afdække modellens usikkerhed mere konkret end den valgte tilgang.

2.6.3 OPFYLDNING AF SØBORG SØ OG VANDSPEJLSNIVEAU

Resultatet på Figur 2.9 viser den tid det forventes at tage, før Søborg Sø er fyldt op, og hvordan vandspejlet herefter varierer mellem sommer og vinter. Her er det klimaperioden fra 1. januar 2011 til 31. december 2021, der er gennemregnet, og det er model B, som er anvendt til beregningen, fordi sommervandbalancen og tilstrømningen til søen i model A underestimeres. Opfyldningstid og vandspejlsvariationer er styret af overskudsnedbøren. Våde vintre og tørre somre bestemmer maks. og min. vandspejlet. Udløbet fra søen er designet sådan, at vandspejlet kun kan komme få cm over kote 1,2 m DVR90. Hertil skal lægges effekter af vindstuvning og bølger i relation til design af diger m.m.

Opfyldningstiden til kote 1,0 m DVR90 er beregnet til ca. 1 år i nedenstående modelkørsel, men den afhænger af nedbørmængden i den konkrete periode. Allerede få måneder efter slukning af pumpe er langt størstedelen af søfladen vanddækket (til kote 0,5 m DVR90) i beregningen. Men hvis pumpen tages ud af drift om sommeren, og ikke som her 1. januar, kan det gå meget langsomt i starten.



Figur 2.9 Simuleret vandstand i Søborg Sø i projektmodel.

2.6.4 AFSTRØMNINGSFORHOLD OG VANDBALANCE

Der er beregnet afstrømningsforhold i hele modellen og vandbalance for Søborg Sø. Alle udtræk af afstrømningsforhold er kørt med model B, som giver bedste kalibrering for både grundvandsforhold og vandbalance. Afstrømning og vandbalance er beregnet for både statusmodel og projektmodel under nuværende klimaforhold og fremskrevet i henhold til RCP8.5 klimascenariet (se afsnit 2.5). Der er dog ikke beregnet en klimafremskrevet sø-vandbalance for statusmodellen.

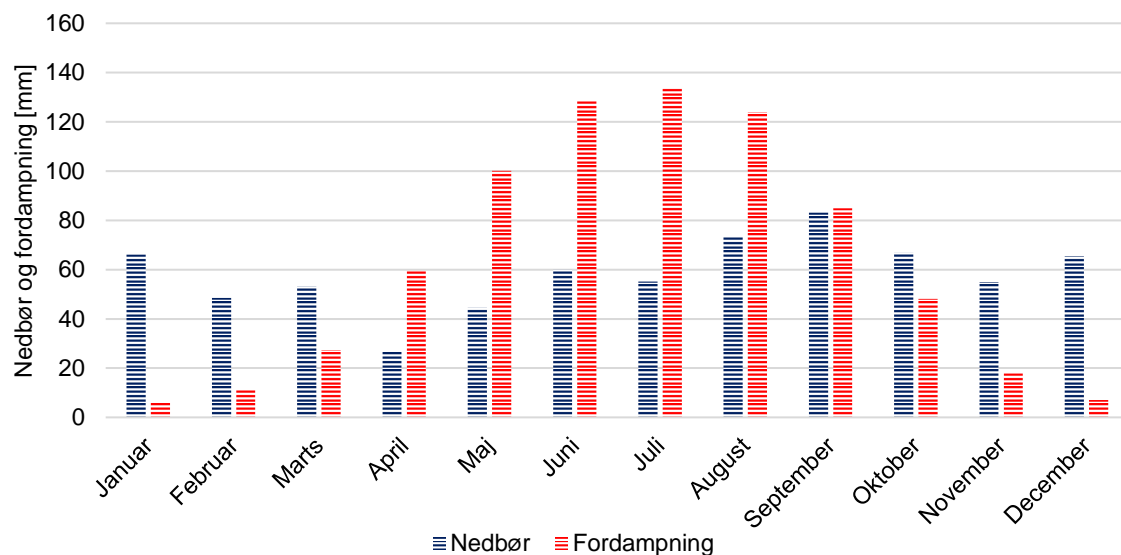
Tabel 2.5 viser nøgletal for den gennemsnitlige vandbalance for perioden 2012 til 2021 for selve Søborg Sø. Vandbalancen viser, at fordampningen fra Søborg Sø vil stige med 25 % og grundvandstilstrømningen til søen vil falde med 30 % i forbindelse med etablering af søen. Vandbalancen er opgjort indenfor området, som svarer til søens udbredelse ved kote 1,0 m DVR90. Tilførslen af vand til søen fra tilstødende arealer udenfor selve det vanddækkede areal stiger. Samlet set er afstrømningen fra søen til Søborg Kanal beregnet 20 % mindre ved gennemførelse af projektet. De 20% mindre afstrømning bliver opvejet af klimaforandringerne frem mod år 2100 ved IPCC8.5 scenariet.

Tabel 2.5 Årlig vandbalance midlet over perioden 2012 - 2021 indenfor for søfladens areal ved vandspejl i kote 1,0 m DVR90 (3,82 km²).

	Statusmodel	Projektmodel	Projektmodel IPCC8.5
Nedbør	694 mm/år (84 l/s)	694 mm/år (84 l/s)	776 mm/år (94 l/s)
Evapotranspiration	-606 mm/år (-73 l/s)	-761 mm/år (-92 l/s)	-795 mm/år (96 l/s)
Grundvandstilstrømning	268 mm/år (32 l/s)	189 mm/år (23 l/s)	184 mm/år (22 l/s)
Afstrømning fra søen	-504 mm/år (-61 l/s)	-404 mm/år (-49 l/s)	-585 mm/år (-71 l/s)
Tilførsel fra tilstødende arealer højere end kote 1 (dræn/grundvand)	148 mm/år (18 l/s)	282 mm/år (34 l/s)	420 mm/år (51 l/s)

Figur 2.10 viser månedsværdier for nedbør og fordampning i projektmodellen baseret på perioden 2012-2021. Den årlige fordampning overstiger nedbøren, men grundet tilstrømning af grundvand og drænvand fra oplandet kan der holdes vand i søen. I de tørreste år (eksempelvis 2018) vil vandstanden dog kunne falde lavere end kote 0,8 m DVR90, hvorved afløbet fra søen kan tørre ud, som det er illustreret på Figur 2.9 i forrige afsnit.

Søborg Sø nedbør og fordampning - projektscenarie



Figur 2.10 Gennemsnitlige månedsværdier for nedbør og fordampning under projektscenariet baseret på klimadata og modelkørsel for perioden 2012-2021.

Afstrømningen fra Søborg Sø til Søborg Kanal er analyseret og statistiske værdier er listet i

Tabel 2.6. Middelfstrømningen fra søen falder en smule grundet øget fordampning, men som nævnt opvejes dette fald af de forventede klimaforandringer. Søen vil virke som en buffer på store afstrømningshændelser og den maksimale afstrømning vil ved realisering blive ganske beskeden i forhold til søens opland.

I projektmodellen beregnes en negativ udstrømning såfremt vandet i Søborg Kanal er højere end i Søborg Sø således at vandet løber baglæns gennem udløbet. I MIKE SHE modellen er ikke medtaget havvandsstigninger og dermed er ekstremhændelser ift. tilbagestuvning ikke medtaget. De -78 l/s er således ikke retvisende i tilfælde af høj havvandstand. Havvandsstigninger belyses i særskilte MIKE11-modeller, se afsnit 4.

Tabel 2.6 Statistik for beregnet udstrømning fra Søborg Sø for perioden 2012 – 2021.

Q statistisk	Statusmodel [l/s]	Projektmodel [l/s]	Statusmodel IPCC8.5 [l/s]	Projektmodel IPCC8.5 [l/s]
min	7,2	-78	8,4	-142
mean	61	49	71	67
max	530	207	660	325
q_10	12	9	14	9,5
q_25	19	10	21	17
q_50	40	33	43	51
q_75	69	82	84	109
q_90	154	117	186	141

Der er udtrukket tidsserier for vandføringen i alle modellens beregningspunkter og der er ligeledes opgjort statistisk svarende til for alle beregningspunkter. Der er vedlagt regneark med afstrømningsdata fra modellen i alle vandløbsknudepunkter (ca. 300 m imellem).

Tabel 2.7 Liste med bilag der indeholder afstrømningsdata fra alle modellens vandløb for hver 300 m delstrækning.

Regneark filnavn	Forklaring	Scenarie (model parametre)
<i>Status_scen_Q_all.xlsx</i>	Vandføringstidsserier for alle knudepunkter	Statusmodel (B)
<i>Status_scen_Q_stat.xlsx</i>	Statistik for alle knudepunkter	Statusmodel (B)
<i>Status_scen_klima_Q_all.xlsx</i>	Vandføringstidsserier for alle knudepunkter	Statusmodel klimafremskrevet (B)
<i>Status_scen_klima_Q_stat.xlsx</i>	Statistik for alle knudepunkter	Statusmodel klimafremskrevet (B)
<i>Projekt_scen_Q_all.xlsx</i>	Vandføringstidsserier for alle knudepunkter	Projektmodel (B)
<i>Projekt_scen_Q_stat.xlsx</i>	Statistik for alle knudepunkter	Projektmodel (B)
<i>Projekt_scen_klima_Q_all.xlsx</i>	Vandføringstidsserier for alle knudepunkter	Projektmodel klimafremskrevet (B)
<i>Projekt_scen_klima_Q_stat.xlsx</i>	Statistik for alle knudepunkter	Projektmodel klimafremskrevet (B)

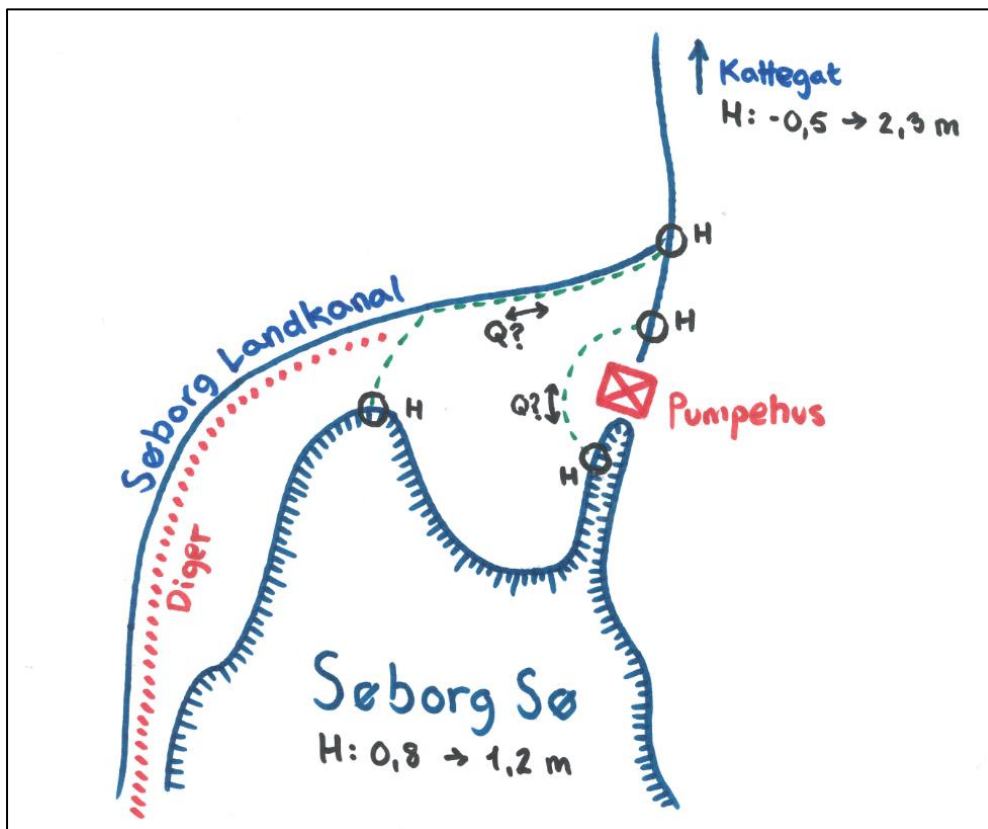
3 MIKE 11 MODEL TIL BESKRIVELSE AF AFLØBET FRA SØBORG SØ

3.1 FORMÅL

Under dimensioneringen og valg af placering for det fremtidige afløb fra Søborg Sø, er det en væsentlig forudsætning, at afløbet har en udformning, som tilgodeser både en hensigtsmæssig afstrømning under normale afstrømningsforhold, men samtidig kan håndtere ekstreme hændelser. Under normale afstrømningsforhold og vandstandsforhold i Kattegat, skal afløbet udformes således at der opnås en hensigtsmæssig vandstand i søen omkring kote 1,0 m DVR90. Vandstanden skal kunne variere i løbet af året med omkring ± 20 cm. Afløbet skal af denne grund stoppe med at aflede vand, i tilfælde af, at vandstanden falder til under kote 0,8 m DVR90. Hvis vandstanden i søen derimod overstiger kote 1,2 m DVR90, skal afløbet kunne aflede store mængder vand og holde vandstanden i et stabilt niveau.

Under ekstreme stormflodshændelser i Kattegat, som kan forplante sig op igennem Søborg Kanal og lede salint vand til Søborg Sø og sideliggende Landkanal, skal afløbet kunne indeholde en stor tilstrømning til Søborg Sø, for derigennem at minimere påvirkningen i Søborg Sø Landkanal.

Formålet med modellen er at udarbejde en såkaldt "flow-udvekslings-matrice", som beskriver, hvor meget vand det fremtidige afløb vil føre ved forskellige trykniveauforskelle opstrøms og nedstrøms afløbet. På Figur 3.1 ses en principskitse over mulige placeringer af det fremtidige afløb fra Søborg Sø til Søborg Kanal. Modellen skal på baggrund af vandstandsforholdene nedstrøms og opstrøms afløbet beskrive vandudvekslingen til og fra Søborg Sø igennem afløbet. Nedstrøms afløbet (Søborg Kanal) styres vandstanden primært af stuvningsforholdene ud mod Kattegat, hvor vandstanden i teorien kan variere mellem ca. -0,5 til 2,3 m DVR90. Opstrøms afløbet findes Søborg Sø, som er projekteret til at variere med en vandstand mellem 0,8 og 1,2 m DVR90.

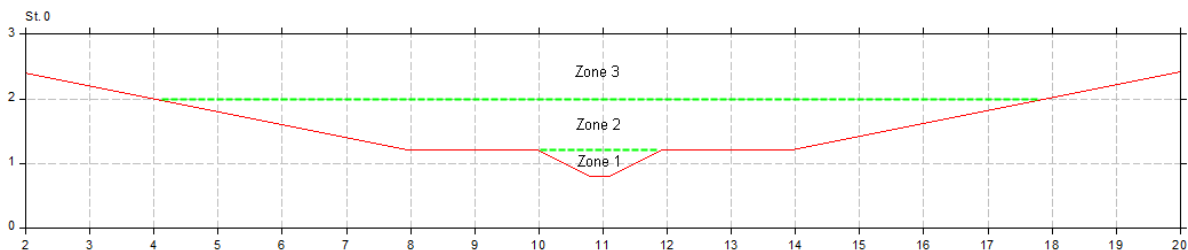


Figur 3.1 Principskitse over udløbet fra Søborg Sø. Grønne markeringer beskriver de to mulige alternative udløb fra Søborg Sø.

3.2 MODELOPSÆTNING

Modellen opstilles i beregningsværktøjet MIKE11, som er en éndimensionel hydrodynamisk model til beskrivelse af vandløb, stryg, kanaler, bassiner m.v. Modellen opstilles som en simpel kanal med dimensioner på afløbet (geometri og faldforhold), samt randbetingelser opstrøms og nedstrøms tilsvarende de forskellige kombinationer af vandstande, som kan opstå omkring afløbet.

Afløbet foreslås udformet som en dobbeltprofil, hvor basisprofilet udformes til håndtering af normale afstrømningsforhold fra Søborg Sø, mens det sekundære profil udformes til håndtering af mere ekstreme afstrømninger fra søen og tilbagestuvning fra Kattegat. Profilet kan ses på Figur 3.2.



Figur 3.2 Foreslået udformning af afløbet fra Søborg Sø.

Tabel 3.1 Geometri af afløbet fra Søborg Sø.

Bundkote v. udløb fra Søborg Sø	0,80 m DVR90
Bundkote v. tilløb til Søborg Kanal	0,50 m DVR90
Fald bundprofil	5,5 ‰
Bundbredde primærprofil	0,3 meter
Anlæg primærprofil	1:2
Afsatshøjde over bundkote	40 cm
Banketbredde	2,0 meter
Afsatsbredde	5,9 meter
Afsatsanlæg (til kote 2,0 m)	1:5
Afsatsanlæg (over kote 2,0 m)	1:3

Profilet er opdelt i 3 zoner:

- **Zone 1** beskriver det primære profil, hvor vandet vil strømme under normale forhold. Denne del af profilet er aktivt når vandstanden i søen står imellem kote 0,8 – 1,2 m DVR90, og der ikke forekommer stuvning fra Kattegat.
- **Zone 2** beskriver det sekundære profil, hvor vandet vil strømme under ekstreme afstrømninger fra Søborg Sø og når vand stuver fra Kattegat under stormflodshændelser. Zone 2 er aktiv når vandstanden i Søborg Sø overstiger 1,2 m DVR90.
- **Zone 3** beskriver en andelen af profilet over kote 2,0 m DVR90, som forventeligt ikke vil blive vandførende på nær under de allermost ekstreme stormflodshændelser fra Kattegat.

3.3 RESULTATER

Resultatet af beregningerne er en flow-udvekslings-matrice, hvor vandføringen i afløbet beskrives ved forskellige vandstands niveauer op- og nedstrøms afløbet. Resultatet kan ses i Tabel 3.2.

Matricen beskriver en afstrømning i primærprofilet, når der forekommer gennemsnitlige afstrømninger fra Søborg Sø på mellem 10 – 142 l/s. Når vandstanden i Søborg Sø falder under kote 0,8 m DVR90, stopper afstrømningen igennem afløbet. Hvis vandstanden i Søborg Sø stiger over kote 1,2 m DVR90, så igangsættes sekundærprofilet, og der ses en væsentlig forøgelse i afstrømningskapaciteten.

Under stormflodshændelser fra Kattegat, hvor vand stuver tilbage igennem Søborg Kanal til afløbet fra Søborg Sø, vil der være en negativ vandføring, hvor vand føres fra afløbet og ind i Søborg Sø. Under normale vandstande i Søborg Sø på mellem 0,8 – 1,2 m DVR90, vil vandføringen fra Kattegat under stormflodshændelser give op til ca. 7.000 l/s ind i Søborg Sø.

Tabel 3.2 Flow-udvekslings-matrice ved udløbet af Søborg Sø, med udformningen beskrevet i Figur 3.2.

		VST. KOTE OPSTRØMS [m DVR90]								
		[L/S]	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
VST. KOTE NEDSTRØMS [m DVR90]	0.20	0	10	41	99	142	302	591	998	1529
	0.30	0	10	41	99	142	302	591	998	1529
	0.40	0	10	41	99	142	302	591	998	1528
	0.50	0	10	41	99	142	302	591	998	1528
	0.60	0	10	41	98	142	302	591	998	1528
	0.70	0	10	41	98	142	302	591	998	1528
	0.80	0	9	41	97	142	302	591	998	1527
	0.90	-24	0	39	94	142	302	590	997	1526
	1.00	-72	-59	0	81	140	302	589	995	1523
	1.10	-156	-133	-81	0	132	298	584	988	1515
	1.20	-282	-264	-241	-164	0	266	561	967	1494
	1.30	-521	-502	-475	-433	-285	0	476	904	1437
	1.40	-850	-827	-797	-755	-656	-470	0	737	1308
	1.50	-1262	-1235	-1203	-1160	-1094	-884	-702	0	1028
	1.60	-1882	-1701	-1660	-1619	-1561	-1435	-1201	-967	0
	1.70	-2430	-2324	-2248	-2123	-2061	-1980	-1722	-1538	-1234
	1.80	-3210	-3150	-3080	-3014	-2820	-2618	-2437	-2173	-1916
1.90	-3521	-3462	-3402	-3362	-3284	-3164	-3025	-2761	-2589	
2.00	-4045	-4016	-3990	-3959	-3922	-3876	-3815	-3616	-3419	
2.10	-4983	-4954	-4901	-4852	-4786	-4761	-4558	-4300	-3887	
2.20	-6110	-6085	-6050	-6011	-5980	-5959	-5650	-5300	-4895	
2.30	-7267	-7222	-7110	-6950	-6780	-6650	-6527	-6369	-6098	

4 MIKE 11 MODEL TIL KONSEKVENSVURDERING I SØBORG SØ LANDKANAL

4.1 FORMÅL

Ved etableringen af den fremtidige Søborg Sø, vil vandspejlsforhold og hydraulikken omkring udløbet af søen ændres, hvilket kan forårsage en påvirkning af Søborg Sø Landkanal, som omkranser Søborg Sø.

Etableringen af Søborg Sø vil ændre i afstrømningsforholdene fra nuværende pumpelag. I dag drives arealet ved en pumpestation, som ved et driftsinterval og en pumpeydelse kunstigt dræner pumpelaget. Ved etablering af søen udformes der et afløb, som vil afvande søen ved naturlig gravitation. Både Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal udleder vand til Søborg Kanal, og effekten ved en ændret udledning fra Søborg Sø vil kun i meget begrænset omfang påvirke landkanalen, men afhængigt af afløbets placering og udformning, hvor det også overvejes at inddrage den nederste del af landkanalens nuværende forløb i afløbet fra Søborg Sø, skal det sikres at det ændrede udløb ikke har nogen væsentlig hydrologisk påvirkning af Søborg Sø Landkanal under hverken normale eller ekstreme afstrømningshændelser, eller i de tilfælde hvor stormflodshændelser stuver igennem Søborg Kanal.

Udover en ændret vandafledning og ændret udløbsdesign, vil en hævnning af vandstanden kunne have betydning for Søborg Sø Landkanals diger, som for nuværende afgrænser landkanalen fra at afgive vand til pumpelaget. I projekteringen skal digerne sikres, og et stisystem skal etableres på delstrækninger af digerne. Det er af denne årsag vigtigt at fastlægge de fremtidige hydrauliske påvirkninger, som diget vil blive udsat for og skal være stabilt nok til at håndtere – både under normale vandstandsforhold og under ekstremhændelser.

4.2 MODELGRUNDLAG

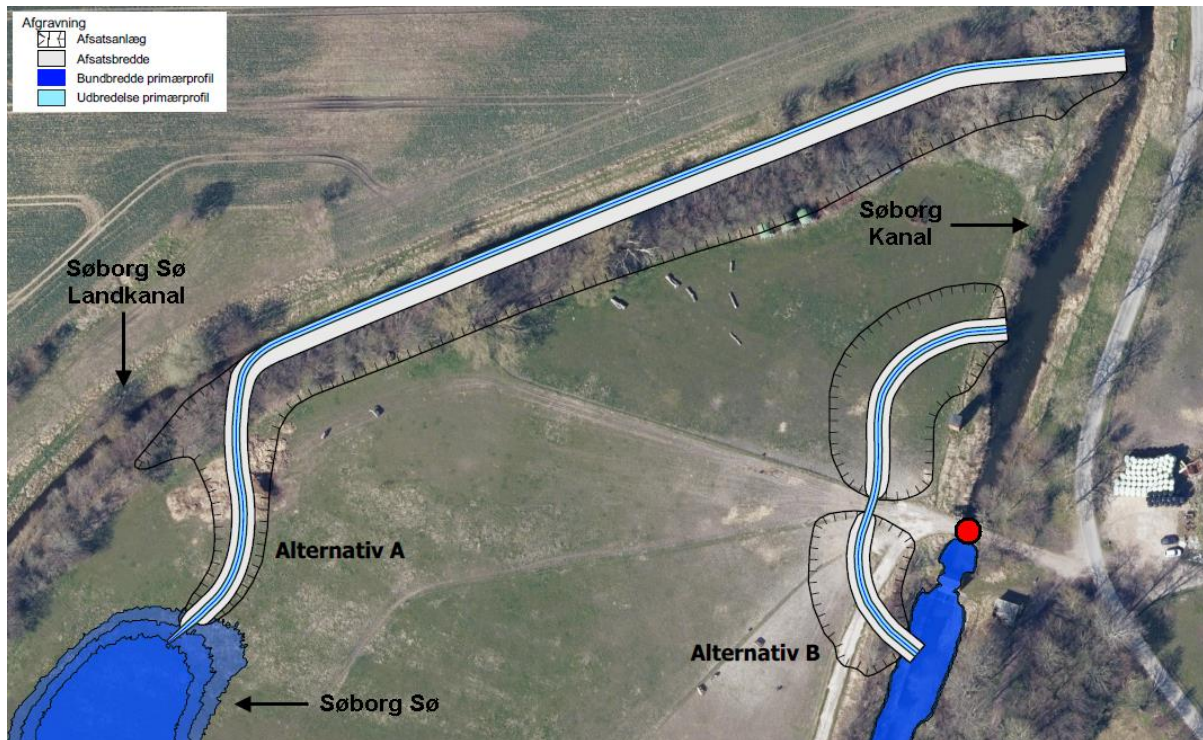
4.2.1 VANDLØBSGEOMETRI

Der opstilles en samlet model, som dækker Søborg Kanal fra dens udløb i Kattegat til nuværende pumpestation ved udløbet af Søborg Sø. Søborg Kanal beskrives på baggrund af en kontrolopmåling foretaget i 2016. Opmålingen dækker i alt en 4,1 km strækning. Søborg Landkanal beskrives på baggrund af en kontrolopmåling fra 2018, som dækker en strækning på 6,5 km fra udløbet til Søborg Kanal og op til tilløbet af Slettemosen.

Det fremtidige afløb fra Søborg Sø beskrives på baggrund af dimensionerne beskrevet i

Tabel 3.1 på side 23 og et forløb svarende til **alternativ A** på Figur 4.1. Alternativ A er valgt, fordi de giver en række hydrauliske fordele, som beskrives nærmere i kommende afsnit (se særligt afsnit 4.3.2), biologiske fordele ift. fisk m.v, samt fordele med henblik på lodsejerinteresser.

Alternativ B er undersøgt, da det var løsningsforslaget fra forundersøgelsen.



Figur 4.1 Grovskitser af afløbet fra Søborg Sø. To alternativer er skitseret. I modellen benyttes "Alternativ A".

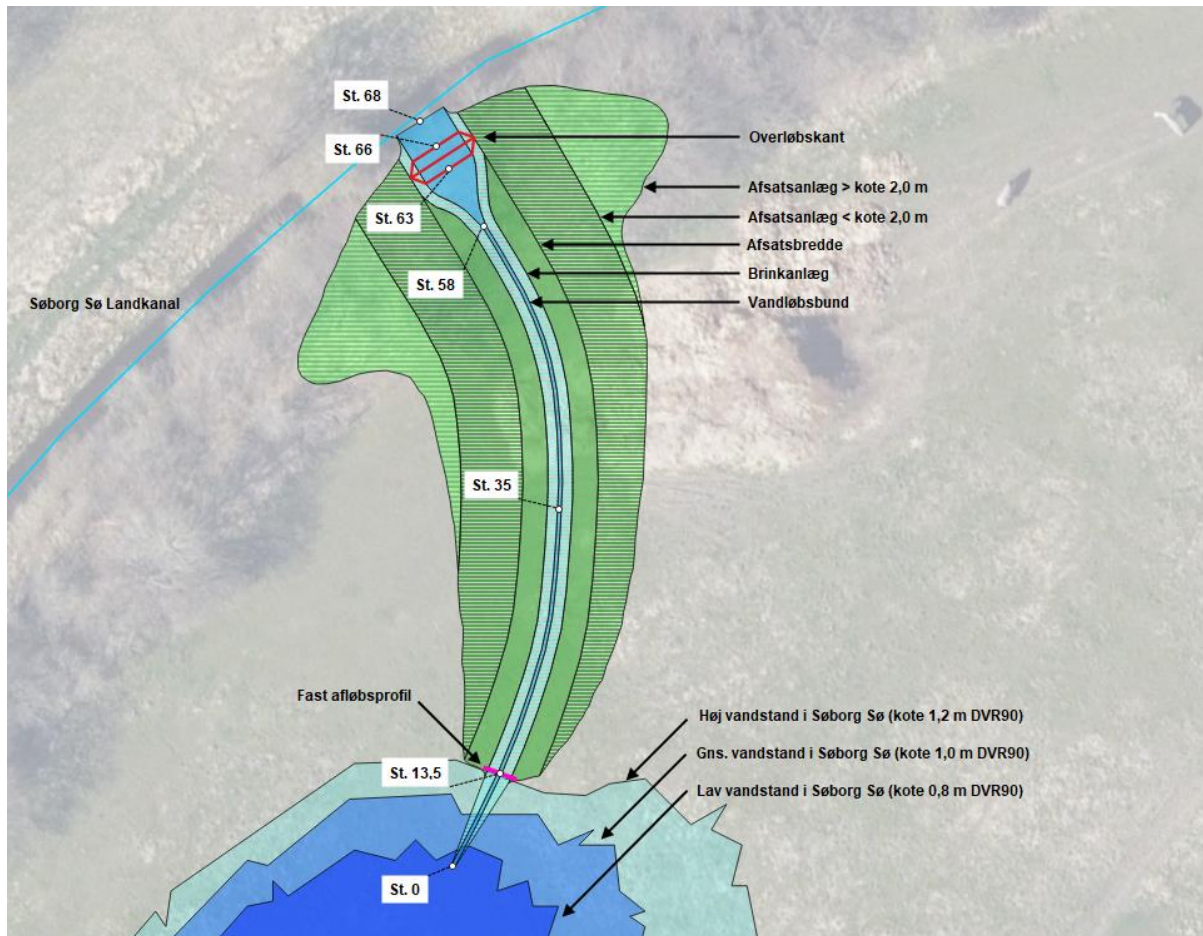
Alternativ A har igennem projektets forløb ændret skikkelse løbende for at imødekomme forskellige hensyn til hhv. fiskeoptræk i Søborg Sø Landkanal, lodsejerinteresser, forhold omkring diget m.m. Dets endelige udformning ses på Figur 4.2, men bibeholder mange af de samme principper, som oprindeligt blev skitseret.

Ved afløbet fra Søborg Sø og indløbet til den nye kanal etableres et fast indløbsprofil svarende til geometrien beskrevet i Figur 3.2 og Tabel 3.1. Indløbsprofilet kan sikres på forskellig vis, men det foreslås at etablere en udskåret jernplade, der som minimum sikrer primærprofilets udformning. Umiddelbart opstrøms afløbets sammenløb med Søborg Sø Landkanal etableres en overløbskant i kote 0,75 m DVR90 med hhv. en jernplade og opbyggede sten omkring. Hertil udvides primærprofilet af afløbskanalen umiddelbart opstrøms overløbet, således dobbeltprofilet overgår til et bredt enkeltprofil. Udvidelsen af afløbskanalen og etableringen af overløbskanten har til formål at skabe en fysisk barriere for fiskeoptræk og samtidig skabe en diffusiv strømning fra afløbet af Søborg Sø til Søborg Sø Landkanal, så der ikke etableres en potentiel ledestrøm mod Søborg Sø.

I Tabel 4.1 og på Figur 4.2 ses skikkelsen og udformningen af det projekterede afløb fra Søborg Sø.

Tabel 4.1 Skikkelsestabel af afløbet fra Søborg Sø.

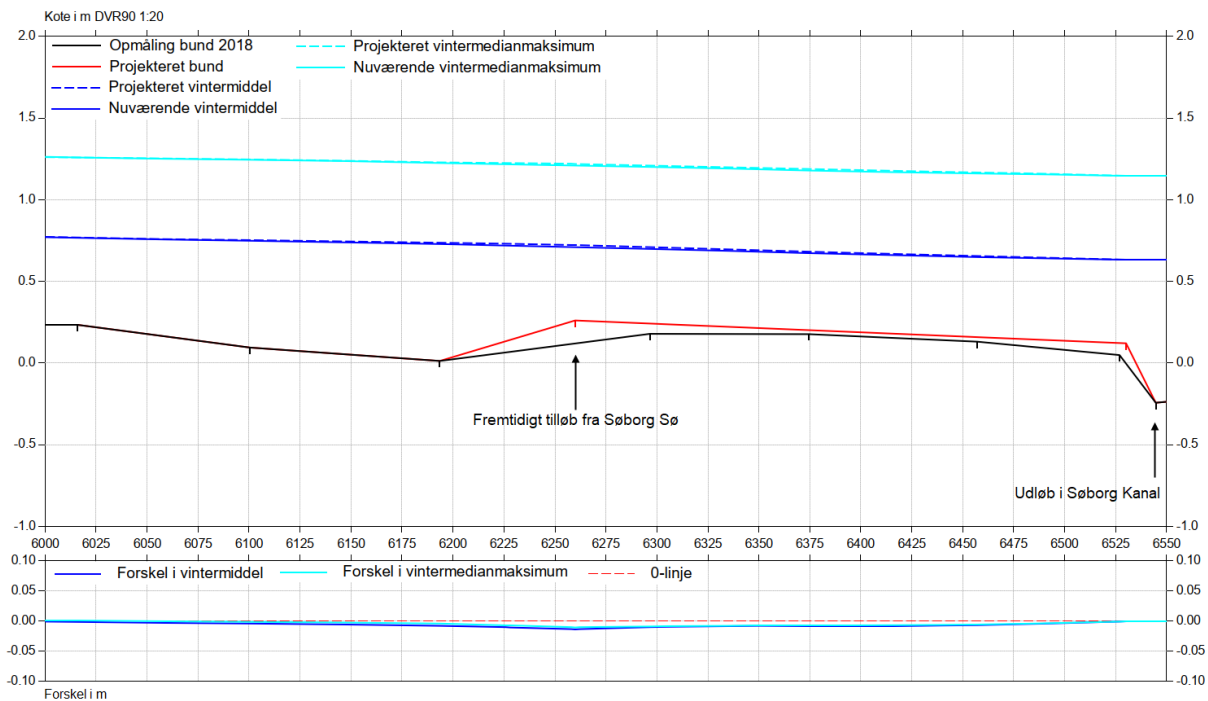
Station [m]	Bundkote [m DVR90]	Afsatskote [m DVR90]	Bundbredde [cm]	Banketbredde [cm]	Afsatsbredde [cm]	Anlæg primærprofil	Bemærkning	
0,0	0,60	<i>Søflade, sikring af strømrende mod afløbskanal i kote 0,8 m DVR90</i>						
13,5	0,80	1,20	30	200	590	1:2	Fast afløbsprofil (Figur 3.2)	
35,0	0,68	1,08	30	200	590	1:2	Mellempunkt	
58,0	0,55	0,95	30	200	590	1:2	Overgang fra dobbeltprofil til enkeltprofil	
63,0	0,53		430			1:2	Start overløbskant	
64,0	0,75		Overløbskant			1:2	Overløbskant	
65,0	0,75		Overløbskant			1:2		
66,0	0,51		430			1:2	Slut overløbskant	
68,0	0,50		430			1:2	Udløb i Søborg Sø Landkanal	



Figur 4.2 Detaljeret tegning af afløbet fra Søborg Sø til Søborg Sø Landkanal (alternativ A).

Ud over etableringen af et nyt afløb fra Søborg Sø foretages der også mindre ændringer i Søborg Sø Landkanal på strækningen fra det fremtidige tilløb af Søborg Sø til landkanalens udløb i Søborg Kanal (reg. st. 6.260 – 6.530).

Ændringen består i mindre justeringer af bunden, således der skabes et ensartet og jævnt fald fra udløbet af Søborg Sø til udløbet i Søborg Kanal. Vandløbets skikkelse på strækningen med en bundbredde på 2,5 meter og anlæg 1:1,5 forbliver uændret. Udjævningen af bunden på strækningen består i mindre udlægning af bundsikring og derudover etablering af et sandfang i st. 6.420 – 6.435. På Figur 4.3 ses et længdeprofil af nuværende og projekterede bundkote af Søborg Sø Landkanal fra st. 6.000 – 6.550. Længdeprofilet indeholder vandspejlsberegninger for hhv. en vintermiddel og vintermedianmaksimum afstrømning samt et differens-plot som beskriver ændringen i vandspejlet fra nuværende forhold til projekterede forhold. Det ses, at der kun sker en minimal ændring af vandspejlsniveauet ved ændringerne på < 2 cm. Sandfanget etableres som afværge mod at løst substrat kan sedimentere nedstrøms i Søborg Kanal, når der foretages gravearbejde ved etableringen af det nye udløb fra Søborg Sø og de mindre justeringer i Søborg Sø Landkanal samt under justering af diger langs Søborg Sø Landkanal.

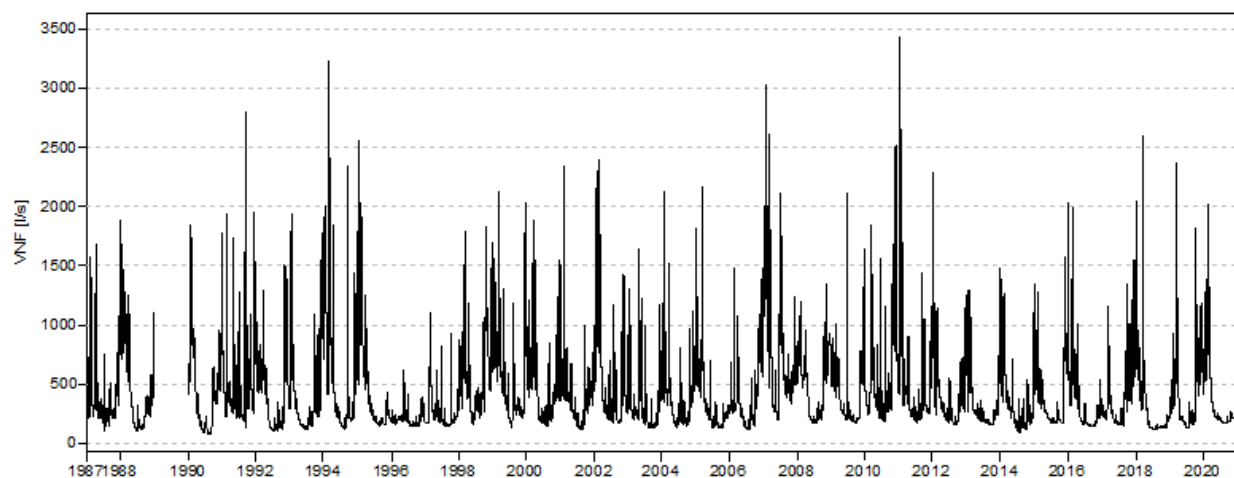


Figur 4.3 Længdeprofil af Søborg Sø Landkanal fra st. 6.000 – 6.550 for nuværende forhold og projekteret bund efter tilløbet af Søborg Sø. Længdeprofilet er inklusiv forskellen i vandstanden under en vintermiddel og vintermedianmaksimum afstrømning.

4.2.2 OPLANDE OG RANDBETINGELSER

Input til vandstande og vandføringer i modellen beskrives ved randbetingelser i de punkter, som danner de overordnede hydrometriske og hydrodynamiske betingelser i modellen. Dette gælder vandstandsforholdene i Kattegat ved udløbet af Søborg Kanal og de hydrologiske oplande som afgiver vand til modellen.

Vandføringer beskrives på baggrund af hydrometriske målinger i for oplandet til Søborg Kanal. Der forefindes en hydrometrisk målestation DDH stednr. 480046 i Søborg Kanal umiddelbart nedstrøms Parkvej. Målestationen indeholder daglige målinger af vandstand og vandføring i perioden 1987 – 2021, se Figur 4.4.



Figur 4.4 Hydrometriske målinger af vandføring i målestation DDH stednr. 480046, Søborg Kanal v. Parkvej.

Målingerne benyttes til at tilskrive en dynamisk afstrømning i Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal på baggrund af en oplandsvægtning. Afstrømningsbidraget fra Søborg Sø beskrives på baggrund af den hydrodynamiske

MIKESHE/11 model B, som er beskrevet i afsnit 2. På Tabel 4.2 ses en over oplandsforholdene i hhv. Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal under nuværende forhold.

Ved etablering af afløbet fra Søborg Sø (alternativ A) ændres oplandsforholdene for mindre strækninger af Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal. Disse ændringer kan ses i Tabel 4.3, markeret med rød skrift.

Tabel 4.2 Nuværende oplandsforhold for Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal.

Søborg Sø Landkanal			Søborg Kanal		
Station [m]	Opland [km ²]	Bemærkning	Station [m]	Opland [km ²]	Bemærkning
0	1,70	Indløb Slettemosen	0	9,79	Udløb Søborg Sø Pumpestation
314	1,80	Opstrøms tilløb Saltrup Rende	150	9,80	Opstrøms tilløb Søborg Landkanal
315	8,09	Nedstrøms tilløb Saltrup Rende	151	36,63	Nedstrøms tilløb Søborg Landkanal
1.811	8,77	Opstrøms tilløb Lopholmrenden	1.693	37,11	Opstrøms tilløb Vandmose Å
1.812	11,80	Nedstrøms tilløb Lopholmrenden	1.694	43,59	Nedstrøms tilløb Vandmose Å
5.052	14,27	Opstrøms tilløb Maglemose Å	2.053	44,82	Opstrøms tilløb Bedsmose Å
5.053	26,50	Nedstrøms tilløb Maglemose Å	2.054	58,73	Nedstrøms tilløb Bedsmose Å
6.526	26,83	Udløb i Søborg Kanal	4.108	60,98	Udløb i Gilleleje Flak

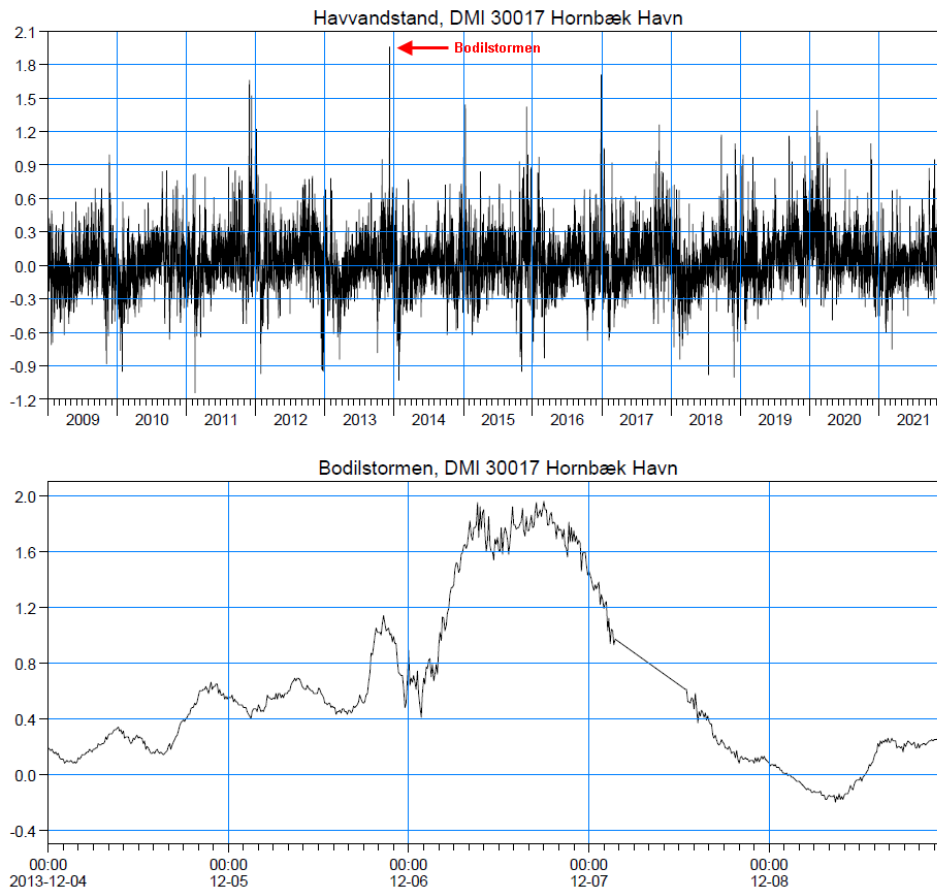
Tabel 4.3 Projekterede oplandsforhold for Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal. Ændringer er markeret med rød skrift.

Søborg Sø Landkanal			Søborg Kanal		
Station [m]	Opland [km ²]	Bemærkning	Station [m]	Opland [km ²]	Bemærkning
0	0,01	Tidl. indløb Slettemosen	0	0,00	Tidl. udløb Søborg Sø Pumpestation
314	0,10	Opstrøms tilløb Saltrup Rende	150	0,01	Opstrøms tilløb Søborg Landkanal
315	6,39	Nedstrøms tilløb Saltrup Rende	151	36,63	Nedstrøms tilløb Søborg Landkanal
1.811	7,07	Opstrøms tilløb Lopholmrenden	1.693	37,11	Opstrøms tilløb Vandmose Å
1.812	10,10	Nedstrøms tilløb Lopholmrenden	1.694	43,59	Nedstrøms tilløb Vandmose Å
5.052	12,57	Opstrøms tilløb Maglemose Å	2.053	44,82	Opstrøms tilløb Bedsmose Å
5.053	24,80	Nedstrøms tilløb Maglemose Å	2.054	58,73	Nedstrøms tilløb Bedsmose Å
6.320	24,98	Opstrøms afløbet fra Søborg Sø	4.108	60,98	Udløb i Gilleleje Flak
6.321	36,48	Nedstrøms afløbet fra Søborg Sø			
6.526	36,62	Udløb i Søborg Kanal			

Som det ses af de to tabeller, ændres to særlige forhold i oplandene fra det nuværende til projekterede. Slettemosens tilløb til Søborg Sø Landkanal ændres, så det ikke længere udgør starten af randkanalen, men i stedet ledes til Søborg Sø. Dette fjerner er opland på ca. 1,69 km² i udspringet af Søborg Sø Landkanal. Hertil ændres udløbet af Søborg Sø (ca. 9,80 km²) fra pumpestationen, som tidligere udgjorde starten af Søborg Kanal, til udløb i Søborg Sø Landkanal st. 6.310 og giver her et tilløb på ca. 11,5 km² (opland for nuværende Søborg Sø og Slettemosen).

I MIKE11 modellen indføres punkttilløb fra større vandløb som "point sources" mens tilvæksten i opland imellem større vandløb beskrives som "distributed sources".

Randbetingelsen for Kattegat ved udløbet af Søborg Kanal beskrives på baggrund af historiske målinger af vandstandsforholdene. Nærmeste vandstandslogger fra DMI findes ved Hornbæk Havn ca. 10 km øst for udløbet af Søborg Kanal ved Gilleleje. På Figur 4.5 ses et plot af de historiske data. Modellen køres over en 10-årig periode fra 2011 – 2021, hvor også ekstremhændelsen "Bodilstormen" som forekom i december 2013, er indeholdt.



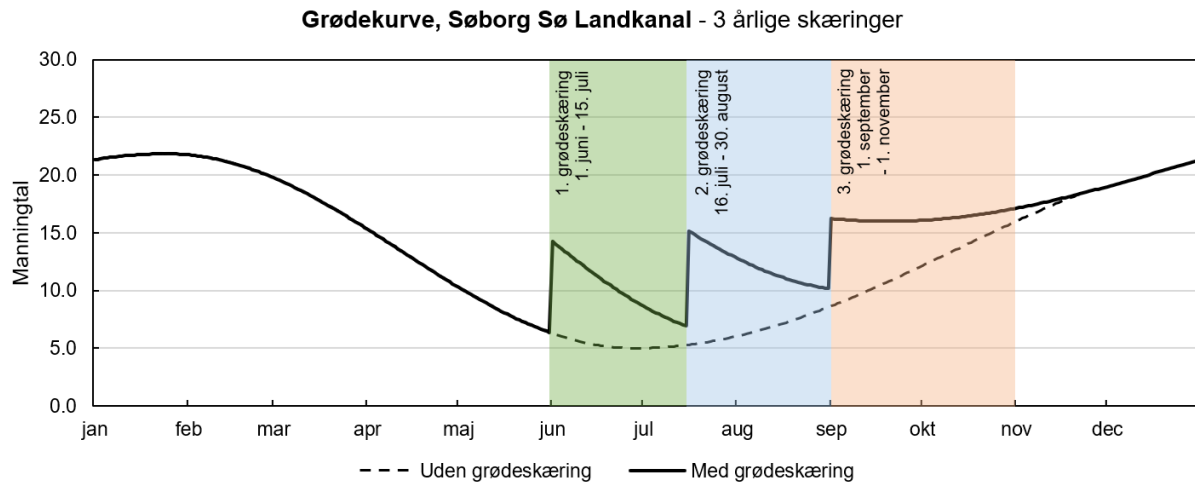
Figur 4.5 Historiske vandstandsdata fra Hornbæk Havn i perioden 2009 – 2021. Målingerne indeholder Bodilstormen, hvor der over en ca. 20 timers periode forekom en stormflodshændelse, med vandstande på op til 1,96 m DVR90.

4.2.3 MODSTANDSFORHOLD

Der findes ingen målestationer i Søborg Sø Landkanal, som kan benyttes til beskrivelse af manningtallet i vandløbet, og modstandsf forholdene må af denne grund estimeres på baggrund af erfaringstal og iht. vandløbets regulativbestemte vedligeholdelse.

På baggrund af vandløbets størrelse, opland og faldforhold estimeres det, at vandløbet uden vedligehold (grødeskæring) vil have et varierende manningtal på op til 20 – 25 om vinteren når grøden er henfaldet og på ned mod 5 – 7 om sommeren når grødetætheden er på sit højeste. Søborg Sø Landkanal vedligeholdes op til 3 gange årligt indenfor perioderne 1. juni – 15. juli, 16. juli – 30. august og 1. september – 1. november.

En grødemodel er opstillet med udgangspunkt i vurderingerne for modstandsf forholdene uden vedligeholdelse og med inddragelse af vedligeholdelsespraksis, se Figur 4.6. Grødemodellen er indført i MIKE11 modellen for hele Søborg Landkanal. Søborg Sø Landkanal ændrer karakter langs dets forløb, hvor et større vandopland gradvist løber til vandløbet. Særligt efter tilløbet af Maglemose Å stiger vandføringen og vandløbets dimensioner. Usikkerheden ved estimeringen af manningtallet er dog så væsentligt, at det ikke vurderes at give praktisk mening at lave en detaljeret inddeling af vandløbet. Manningtallet er estimeret konservativt for derigennem af give sikkerhed i modellen, og med særligt hensyn til de strækninger af Søborg Sø Landkanal, hvor en præcis beskrivelse af modstandsf forholdene er vigtigst.



Figur 4.6 Grødemodel for Søborg Sø Landkanal. Stiplet linje beskriver den typiske grønnekurve et vandløb af Søborg Sø Landkanals størrelse, fald og afstrømning vil have uden grødeskæring. Fuldt optrukne linje beskriver grønnekurven for vandløbet inklusiv dets regulativbestemte vedligeholdelse.

Erfaringsmæssigt kan det ikke betale sig at foretage grødeskæringer, der ikke giver en vis afvandingsmæssig gevinst. Der regnes normalt med, at en grødeskæring som minimum skal forbedre afvandingsforholdene med en afvandingsklasse, svarende til en gennemsnitlig sænkning af vandstanden på 25 cm. Med baggrund i denne empiriske forudsætning er effekten af grødeskæringerne på manningtallet indført, så de cirka svarer til en 25 cm sænkning i vandstanden i Søborg Sø Landkanal.

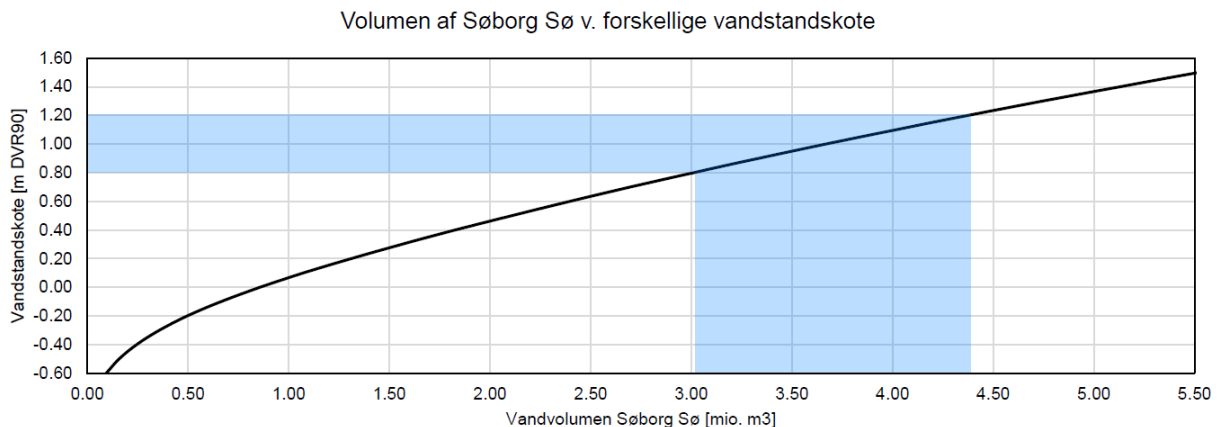
4.2.4 BESKRIVELSE AF SØBORG SØ

Søborg Sø beskrives med et fiktivt vandløb tilknyttet et stort reservoir (sø) i modellen. Det fiktive vandløb er koblet til afløbet fra Søborg Sø. Beskrivelsen af kapaciteten af søfladen for Søborg Sø beskrives ved et kote-areal forhold i MIKE11 som en "Sidestructure + Reservoir". Kote-areal forholdet beskriver det vandvolumen som søen kan indeholde ved en given vandstandskote i søen. På Tabel 4.4 ses sammenhængen mellem vandstandskote og søareal/-volumen.

Tabel 4.4 Søens areal og vandvolumen ved forskellige vandstandsniveauer. Tilvæksten i vandvolumenet for hver 10. cm interval er ligeledes angivet.

Vandstandskote [m DVR90]	Areal af søflade [ha]	Vandvolumen i sø [mio. m ³]
0,80	318,7	3,01
0,90	330,4	3,33 (+0,32)
1,00	341,8	3,67 (+0,34)
1,10	353,7	4,02 (+0,35)
1,20	365,6	4,38 (+0,36)
1,30	377,2	4,75 (+0,37)

På Figur 4.7 ses en plot af søens vandvolumen (stuvningskapacitet) indenfor et stort spænd, som dækker hele pumpelaugget. Søborg Sø vil i fremtiden have en vandstandsvariation på mellem 0,8 – 1,2 m DVR90 (se Figur 2.9). Indenfor denne vandstandsvariation vil vandvolumenet variere mellem 3,0 – 4,4 mio. m³.



Figur 4.7 Volumenkurve for Søborg Sø. Grafen beskriver vandvolumenet i søen ved forskellige vandstands-niveauer. Den blå zone beskriver søens projekterede vandstandsvariation og resulterende variation i søvo-lumen.

4.3 BEREGNINGSSCENARIER

I modellen arbejdes der med forskellige beregningsscenarier for at sikre, at den projekterede etablering af Søborg Sø og fremtidige udformning af afløbet ikke skaber nogen væsentlig afvandingsmæssig ændring i Søborg Sø Landkanal. Dette gælder både under normale afstrømningshændelser i landkanalen og under stormflodshændelser fra Kattegat.

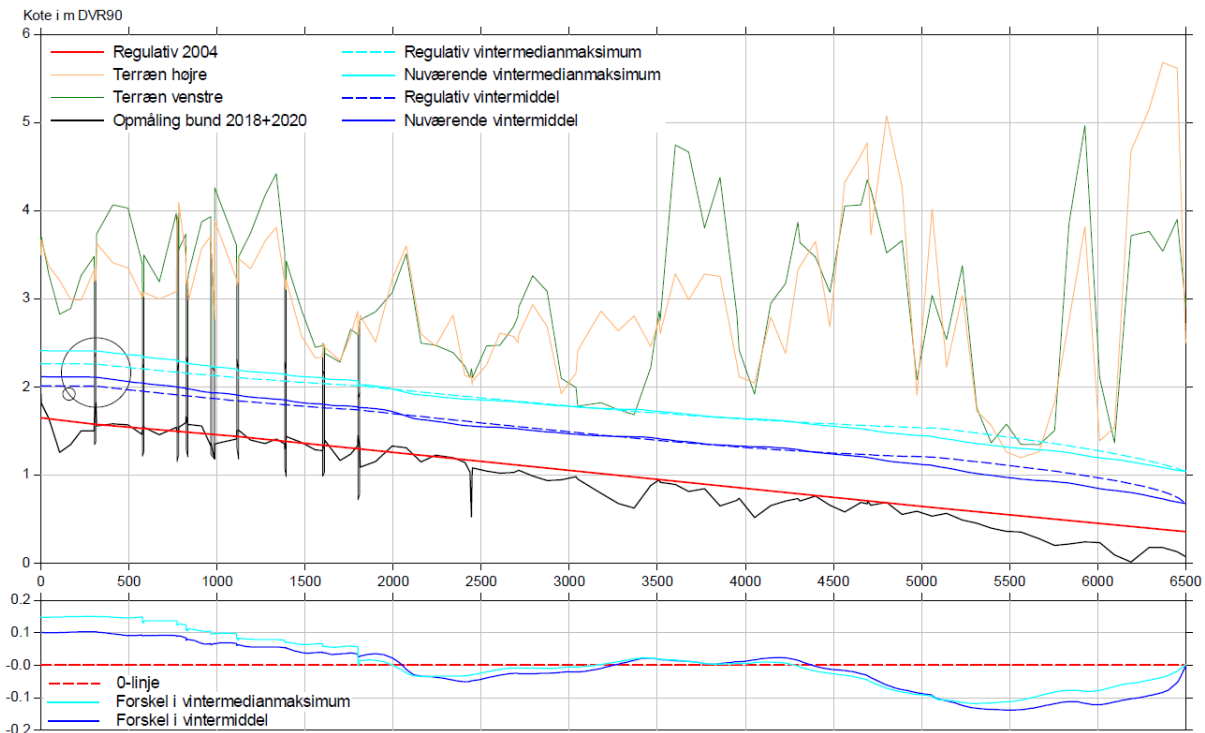
4.3.1 NORMALE AFSTRØMNINGSHÆNDELSE I SØBORG SØ LANDKANAL

Under normale afstrømningshændelser løber Søborg Sø Landkanal med et naturligt fald i randen af tidligere Søborg Sø, og er adskilt fra pumpelaget med et dige. Vandløbets nuværende vandstandsforhold skal i fremtiden være uændrede ved etableringen af Søborg Sø, og herigennem skal det sikres, at Søborg Sø ikke afgiver vand til Landkanalen utilsigtet eller at søens afløb skaber ændrede vandstandsforhold i Landkanalen. Det er altså en forudsætning i projekteringen, at Landkanalens evne til at afvande omkringliggende areal skal være uforandret efter etableringen af Søborg Sø.

Ved en fremtidig vandstand i søen på mellem 0,8 – 1,2 m DVR90 vil det eksisterende dige holde vandet fra Søborg Sø separeret fra Søborg Sø Landkanal. Hertil foretages der ved etablering af søen en udbygning og hævnning af diget, hvilket vil sikre adskillelsen af de to systemer yderligere.

Ved etableringen af afløbet fra Søborg Sø (alternativ A, se Figur 4.1), inddrages de 200 meter af Søborg Sø Landkanal i afløbet fra søen. Det primære formål med denne placering, ud over økologiske hensyn og ønsker fra lodsejer, er at sikre Søborg Sø Landkanal mod stuvning fra Kattegat (læs afsnit 4.3.2). Udformningen og placeringen af dette alternativ skal dog samtidig sikre, at der også under normale afstrømningsforhold i Landkanalen skabes en vandstand, som genskaber de samme afvandingsmæssige betingelser som Søborg Sø Landkanal i dag er regulativmæssigt underlagt.

På Figur 4.8 ses et længdeprofil over den regulativmæssige bund og seneste opmåling af Søborg Sø Landkanal. Hertil ses vandspejlsberegninger for hhv. en vintermiddel og vintermedianmaksimum afstrømning. Under længdeprofilet ses et differens-plot med forskellen i vandspejlet mellem regulativ og seneste opmåling.



Figur 4.8 Længdeprofil med regulativskikkelse og seneste opmåling af Søborg Sø Landkanal. Vandspejlsberegninger for hhv. regulativ og opmåling ses for en vintermiddel og vintermedianmaksimum afstrømning. Under længdeprofilet ses et differensplot for vandstandsforskellen mellem regulativ og opmåling.

Det ses, at eksisterende forhold på de indledende 2.000 meter af Søborg Sø Landkanal skaber en 10 cm højere vandstand end regulativet under en vintermiddel afstrømning og ca. 15 cm under en vintermedianmaksimum afstrømning. Fra st. 2.000 – 4.500 er afvandingsforholdene ensartede, mens de eksisterende forhold på de sidste 2.000 meter skaber en vandstand ca. 10 cm under regulativmæssig skikkelse.

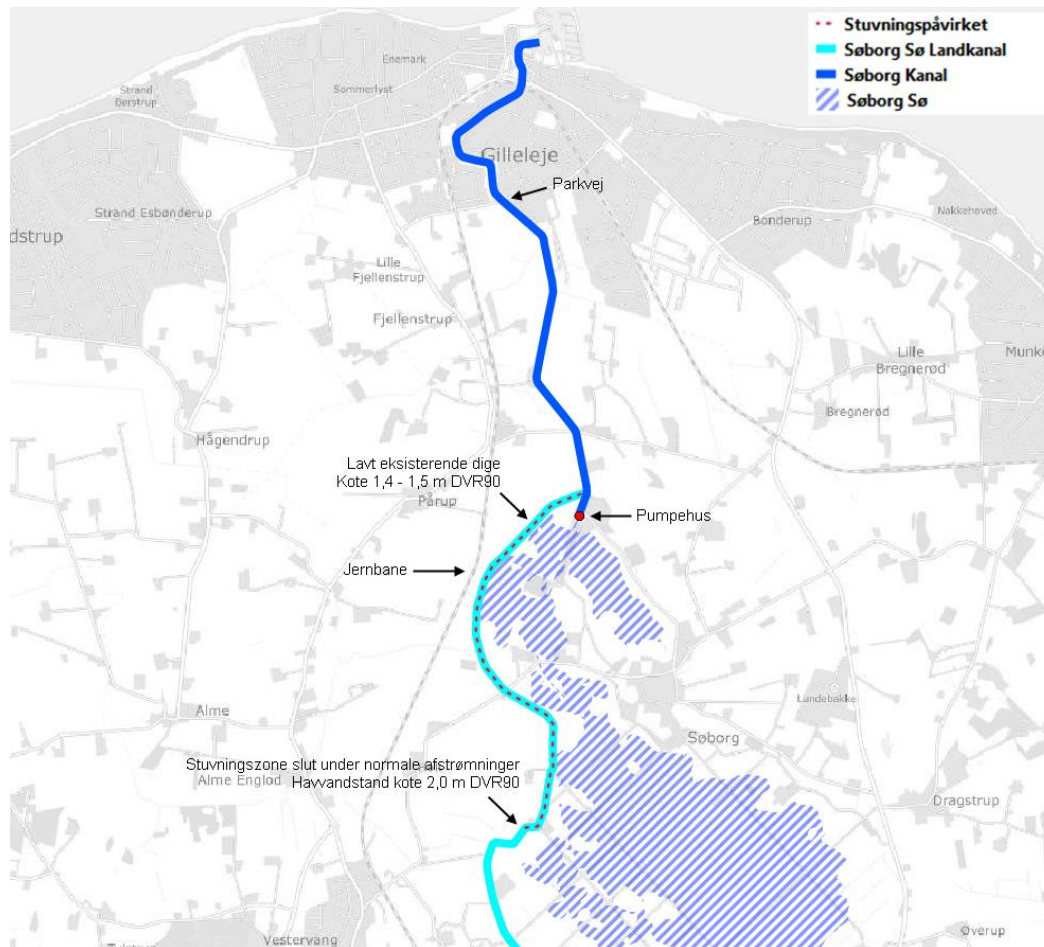
4.3.2 EKSTREME STORMFLODSHÆNDELSER FRA KATTEGAT

De højeste vandstande som vil opstå i Søborg Kanal og den stuvningspåvirkede del af Søborg Sø Landkanal forekommer pga. stormflodshændelser fra Kattegat. Der findes ikke nogen stormflodssikring i form af sluse eller pumpe i Søborg Kanals udløb til Kattegat, og havvand kan af denne årsag strømme frit tilbage i vandløbet, når havvandstanden står højt.

Under nuværende forhold kan den historiske stormflodshændelse ”Bodilstormen” betragtes. Som beskrevet i Figur 4.5, opstod der i denne hændelse over ca. 20 timer en stormflod som medførte vandstande på op til 1,96 m DVR90. Denne hændelse stuede bagud i Søborg Kanal og opstrøms i Søborg Sø Landkanal i tilsvarende højde som vandstanden i Kattegat. Vandet kunne ikke direkte stuve ind i Søborg Sø Pumpelag pga. afskæring med pumpehus og diger, men havde frit løb op i Søborg Sø Landkanal. Digerne omkring landkanalen var dog ikke høje nok til at indeholde stuvningen til kote 1,96 m, og stuvningen igennem Søborg Sø Landkanal blev herved ”punkteret” ved et overløb hen over diget og ind i Søborg Sø Pumpelag. Disse forhold er bekræftet af beretninger fra hændelsen, hvor pumpelaget slukkede for pumperne da det blev opdaget at vand indtrængte fra Landkanalen og for derved ikke at forværre forholdene ved at danne et ”cirkulært system”, hvor vand som oversvømmede pumpelaget fra landkanalen blev pumpet tilbage i landkanalen for derved at oversvømme pumpelaget på ny.

Det første sted, hvor overløbet hen over digerne kunne opstå, var ved Søborg Sø Landkanalens st. ca. 5.500. Her ligger topkoten af digerne mod pumpelaget i omkring kote 1,4 – 1,5 m DVR90. Dette overløb reducerede stuvningen til den øvrige del af Søborg Sø Landkanal, da stuvningshøjden fra Kattegat i kote 1,96 m DVR90 blev ”punkteret” og i stedet blev ledt til pumpelaget. På Figur 4.10 ses et oversigtskort over systemet. Punkteringen af stuvningseffekten ved overløb på det eksisterende dige kan argumenteres at have haft en positiv effekt, da det reducerede graden af oversvømmelse opstrøms i Søborg Sø Landkanal. Cirka 500 meter opstrøms overløbet findes

f.eks. en strækning af jernbanenetværket Gribbskovbanen, som kunne blive hydraulisk påvirket, hvis den fulde stuvning fra Kattegat ikke var blevet punkteret af overløbet i diget.

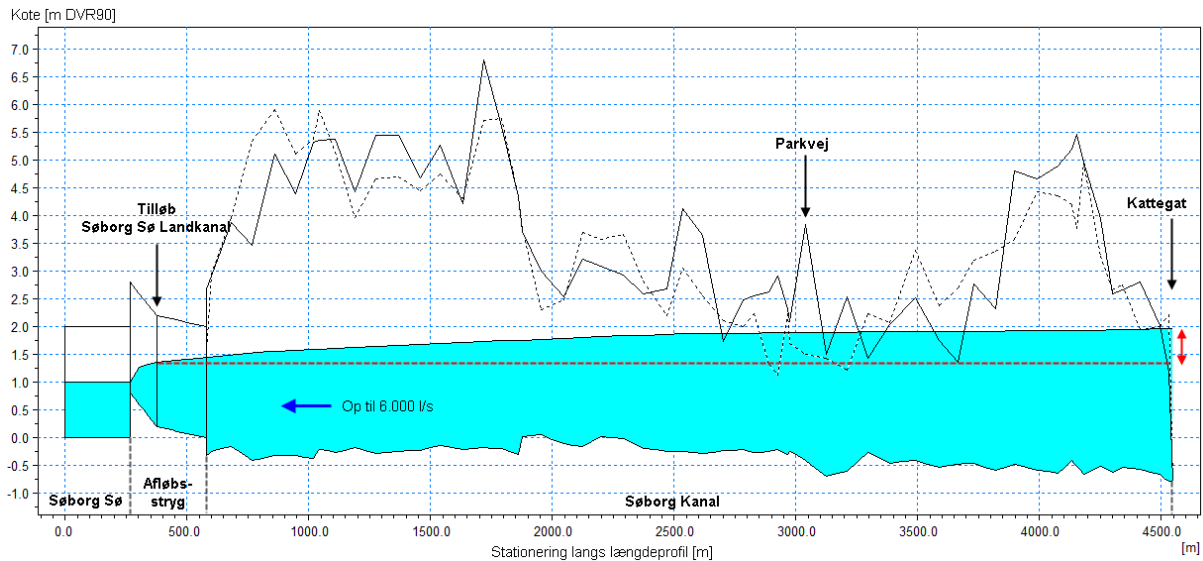


Figur 4.9 Oversigtskort over afløbet fra Søborg Sø Landkanal og stuvningszonen som den "punkterede" vandstand efter overløb af digerne skabte.

I projektet for etablering af Søborg Sø er det dog intentionen at hæve diget mellem Søborg Sø Landkanal og Søborg Sø for derigennem at sikre diget og samtidig etablere et stisystem på dele af diget. Ved en hævnings af diget vil "punkterings-effekten" som diget nuværende skaber under ekstreme stormflodshændelser dog være tabt, hvilket kan give anledning til en større påvirkning af opstrøms liggende arealer til Søborg Sø Landkanal under ekstremhændelser.

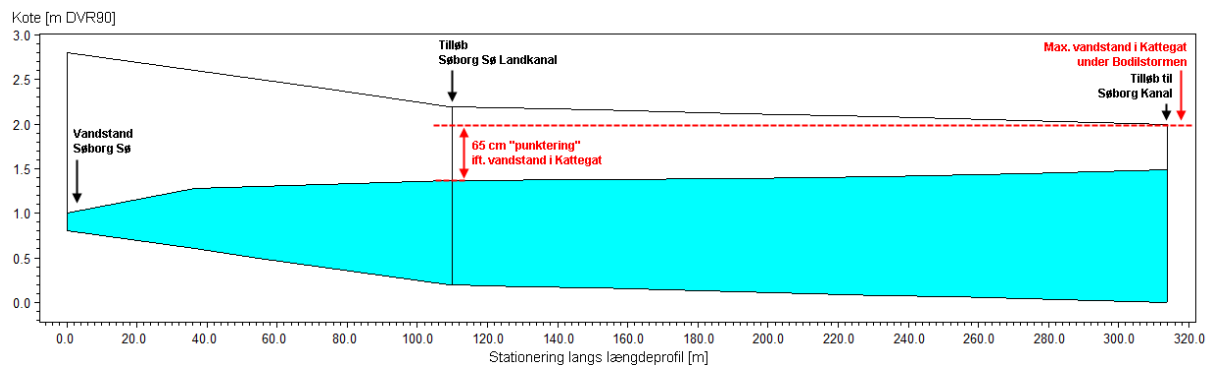
Etableringen af Søborg Sø og derigennem hævnings af digerne mod Søborg Sø Landkanal, har dog også en positiv effekt. Hvor ekstremhændelser tidligere utilsigtet aflastede vand ind i pumpelaget, etableres der nu en fuld og intentionel forbindelse mellem Søborg Sø Landkanal og Søborg Sø. Søborg Sø kan således fortsat "punktere" stuvningseffekten fra stormflodshændelser i Kattegat. Det skal dog sikres, at udformningen og placeringen af afløbet fra Søborg Sø etableres på en måde, hvor en tilstrækkelig reduktion/punktering opnås, så forholdene under ekstremhændelser ikke forringes.

På Figur 4.10 ses et længdeprofil af de fremtidige forhold, hvor søen er etableret med et afløb tilsvarende Alternativ A (se Figur 4.1). Længdeprofilet viser vandstanden i forløbet fra Kattegat igennem Søborg Kanal, videre til afløbet og til sidst indløbet i Søborg Sø. Vandstanden er et øjebliksbillede af den maksimale vandstand, som ville opstå, hvis Bodilstormen med en havvandstand på 1,96 m DVR90 indtraf efter etableringen af søen.



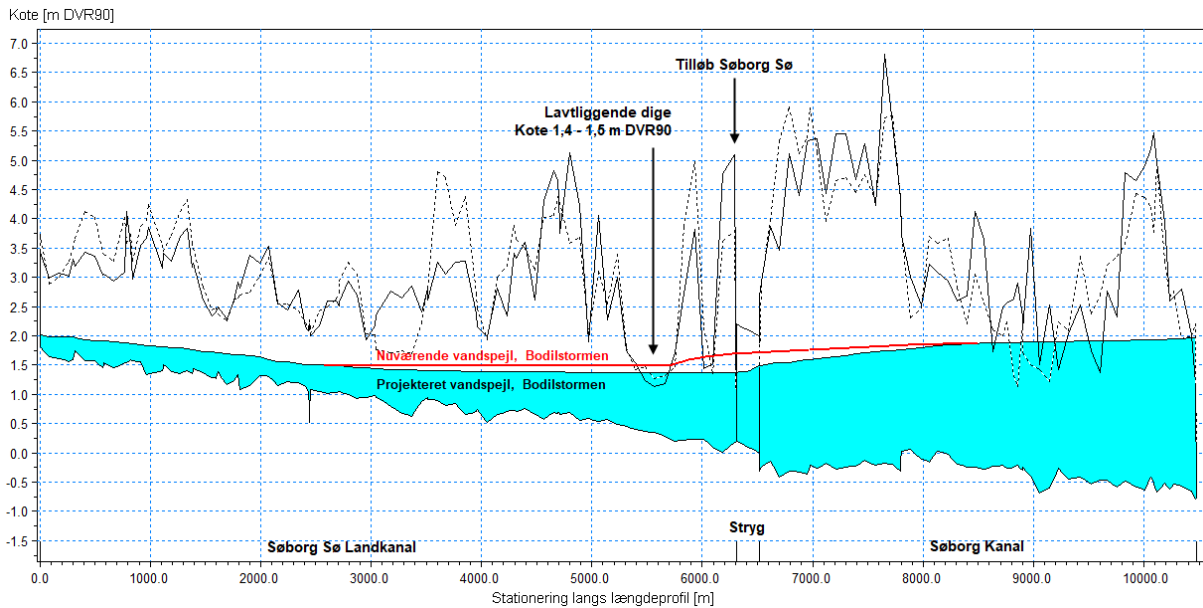
Figur 4.10 Længdeprofil over vandstands niveauet fra Søborg Sø til Kattegat, hvis Bodilstormen opstod efter søens etablering.

Det ses, hvordan der opstår en negativ trykgradient igennem Søborg Kanal, hvor den relativt konstante vandstand i Søborg Sø "punkterer" tilbagestuvningen og tillader en vandføring på op til 6.000 l/s til at afstrømme til søen. Punkteringen af stuvningen skaber en reduktion i vandstanden ved tilløbet af Søborg Sø Landkanal (markeret med en rød stiplede linje) på ca. 65 cm ift. vandstanden i Kattegat. Dette medfører en randbetingelse ved Søborg Sø Landkanals tilløb til afløbet i kote 1,35 m DVR90. På Figur 4.11 ses et længdeprofil af samme hændelse, hvor der er zoomet ind på vandstandsforholdene i afløbet.



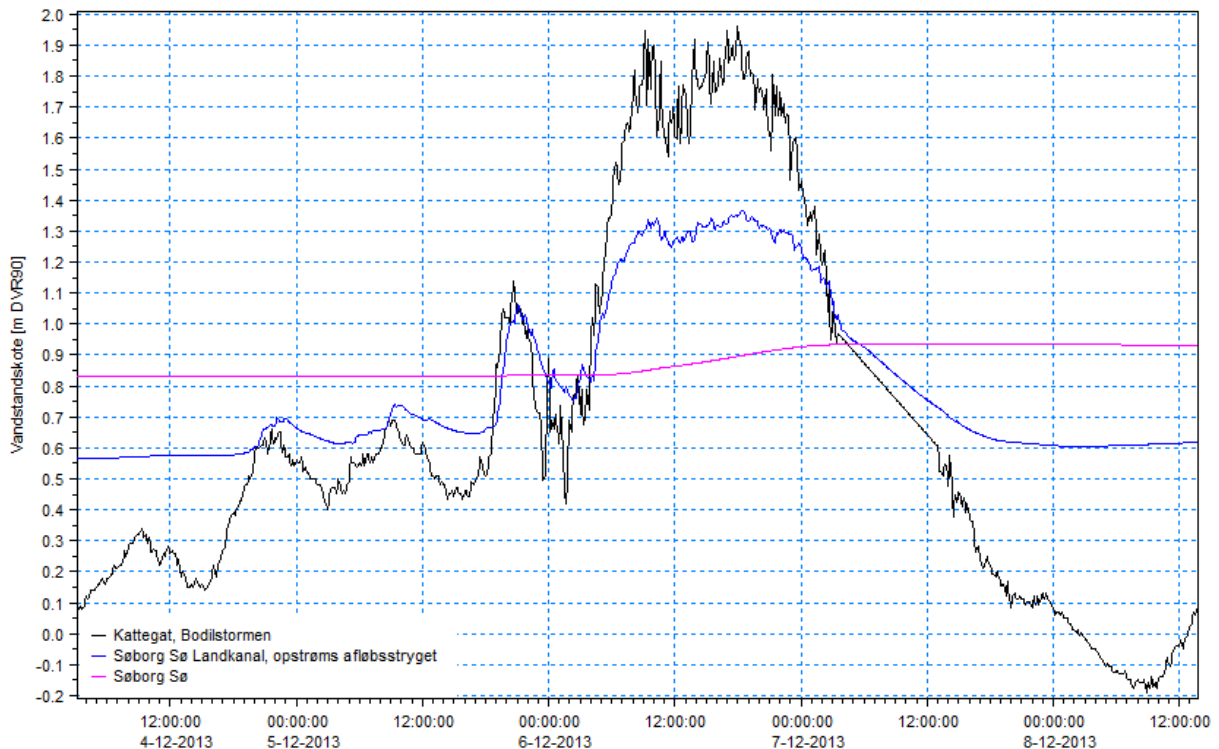
Figur 4.11 Længdeprofil for vandstands niveauer, hvis Bodilstormen opstod efter søens etablering. Længdeprofilet svarer til Figur 4.10, men er zoomet ind til kun at indeholde afløbet fra Søborg Sø.

På Figur 4.12 ses en sammenligning mellem nuværende og projekterede maksimale vandstand igennem Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal under stormflodshændelsen Bodilstormen. Det ses, hvordan punkteringen efter etableringen af Søborg Sø vil være mere effektiv i at reducere stuvningseffekten opstrøms i Søborg Sø Landkanal end det eksisterende utilsigtede overløb af den lavtliggende strækning af diget.



Figur 4.12 Længdeprofil over den maksimale vandstand mellem eksisterende forhold og projekterede forhold under Bodilstormen.

Hvis effekten af hændelsen plottes som vandstande over stormflodens tidslige forløb, ses det hvordan vandstanden i Søborg Sø Landkanal opstrøms afløbet fra Søborg Sø reduceres ift. den potentielle stuvningseffekt fra Kattegat. Dette er vist på Figur 4.13. Under en hændelse tilsvarende Bodilstormen vil reduktionen være op til ca. 60 – 65 cm. Samtidig ses det, hvordan vand strømmer til Søborg Sø og gradvist hæver vandspejlet. Under en hændelse som Bodilstormen vil Søborg Søs vandspejl stige med ca. 10 cm.



Figur 4.13 Vandstande som vil opstå, hvis Bodilstormen indtræffer efter etableringen af Søborg Sø.

4.3.3 EKSTREME STORMFLODSHÆNDELSE I FREMTIDENS KLIMA

Fremtidens klima i Danmark forventes at resultere i højere temperaturer, øgede mængder nedbør og stigende havvandsstand. Den globale opvarmning og dets afledte effekter på klimaet vil have stor betydning for det danske landskab. Analyser af disse forandringer kan være værdifuld når projekter som Søborg Sø skal realiseres.

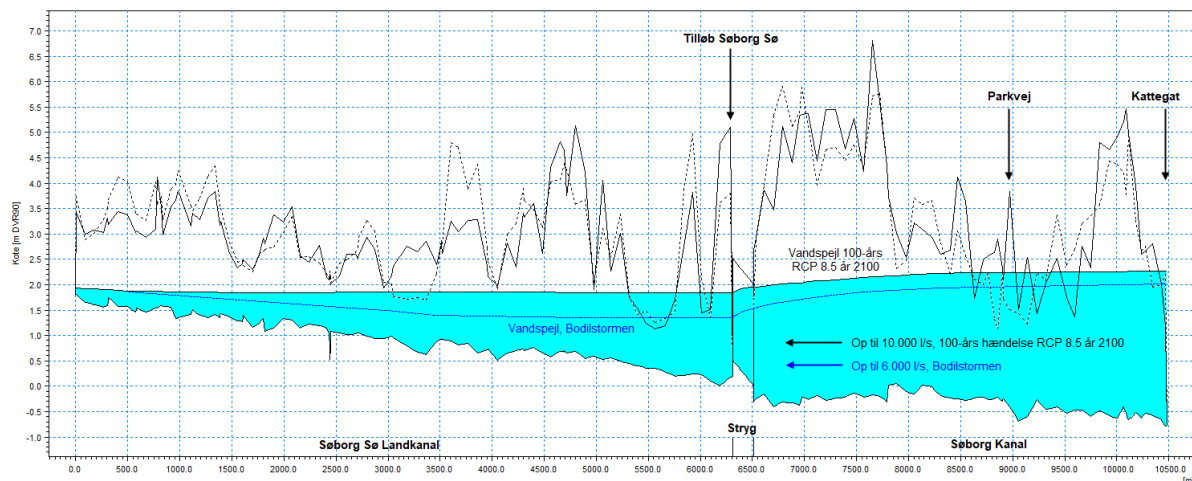
De hydrologiske forhold i Søborg Sø vandoplandet, herunder Søborg Kanal og Søborg Sø Landkanal, meget udsat for stigende havvandstand. Der findes ikke noget regulerende bygværk i Søborg Kanals udløb i Kattegat, og klimatiske ændringer af havvandsstanden vil af denne årsag have en direkte påvirkning af stuvningsgraden i vandløbene og under højvande også Søborg Sø.

Søborg Sø pumpelag afvandes i dag via Søborg Sø Pumpestation til Søborg Kanal. Ydeevnen af disse pumper er i vid udstrækning defineret af den højde, som pumperne skal løfte vandet ved udløbet til Søborg Kanal. Når de generelle vandstande i Kattegat stiger i fremtiden, vil vandstanden i Søborg Kanal tilsvarende stige, hvilket medfører en øget løftehøjde for pumpestationen med resulterende mindre kapacitet til at pumpe vandet væk fra pumpelaget. I fremtidens Søborg Sø hæves vandstanden til kote 0,8 – 1,2 m DVR90 med en middelvandstand omkring kote 1,0 m DVR90. Vandstandskoten i søen gør det muligt at aflede vand fra søen via gravitation fremfor kunstig dræning, og selv under de høje klimascenarier, hvor den generelle havvandstand vil stå omkring 50 cm højere end i dag, ligger søens vandstand ikke i stuvningszonen fra havet.

Under ekstreme stormflodshændelser i fremtiden bliver søen dog direkte påvirket af stuvning fra Kattegat, hvilket også er tilfældet i dag (se afsnit 4.3.2). Iht. DMI's beskrivelse af fremtidsklimascenariet RCP8.5, som definerer det mest konservative bud på fremtidens klima, vil den gennemsnitlige vandstand i Kattegat omkring Gilleleje stige med 48 cm i år 2100 (DMI, 2022). Under ekstreme stormflodshændelser forventes en lignende stigning.

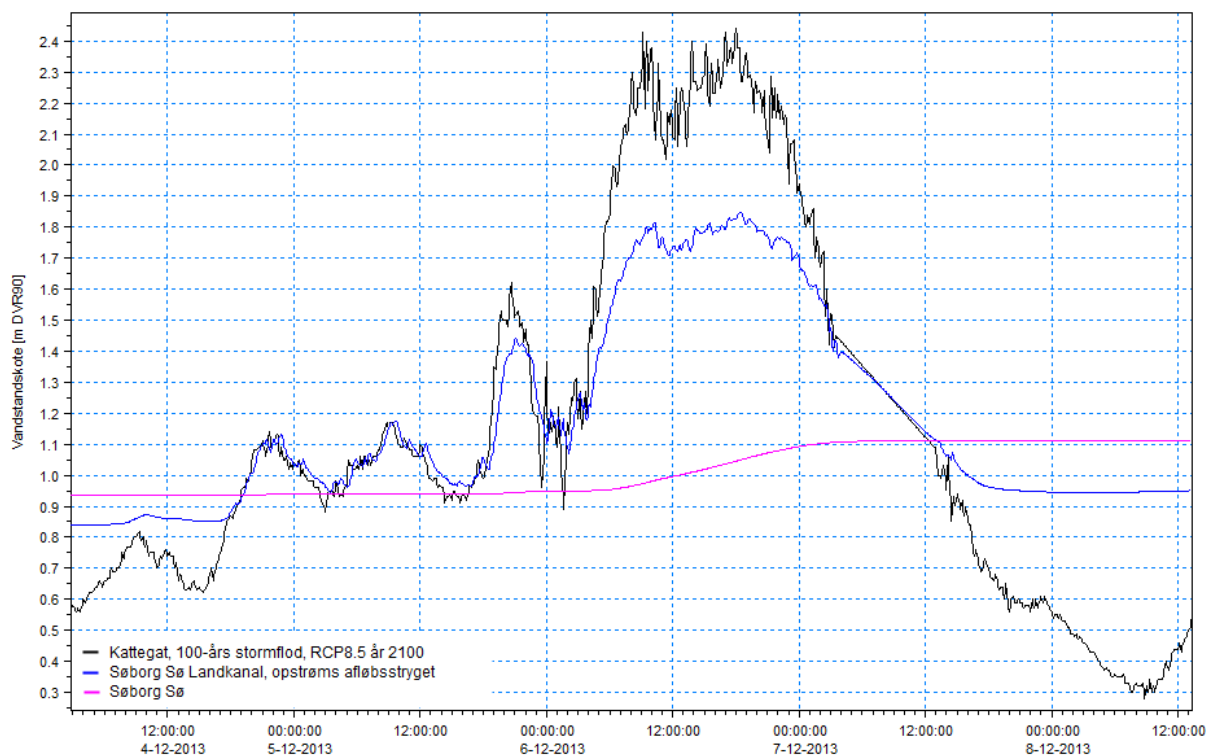
Bodilstormen, der indtræf december 2013, er under nutidens klima beskrevet som en 250-års hændelse med en havvandstand, der toppede omkring kote 1,95 m DVR90. Iht. klimascenarie RCP8.5 vil Bodilstormen i år 2100 indtræffe langs de danske kyster ca. hvert 10. år. En 100-års hændelse vil derimod stå omkring kote 2,30 m DVR90, altså ca. 35 cm højere end Bodilstormen.

Til at beskrive de hydrologiske konsekvenser under stormflodshændelser i klimascenarie RCP8.5 er der opsat en klimafremskrevet MIKE11-model, hvor havvandstandsforholdene i Kattegat er fremskrevet og et ekstrem stormflodsscenario tilsvarende Bodilstormen er indeholdt. Bodilstormen er fremskrevet, således hændelsen svarer til en 100-års hændelse i år 2100. På Figur 4.14 ses et længdeprofil med vandstanden igennem Søborg Sø Landkanal og Søborg Kanal af en fremtidig 100-års hændelse ift. Bodilstormen.



Figur 4.14 Længdeprofil over den maksimale vandstand i Søborg Kanal og Søborg Sø Landkanal ved etablering af Søborg Sø, hvis en hændelse tilsvarende Bodilstormen indtræf ift. hvis en 100-års hændelse i klimascenarie RCP8.5 i år 2100 indtræf.

Det ses, hvordan en fremtidig stormflodshændelse vil give en generelt større belastning af hele systemet. Det ses fortsat, som beskrevet i afsnit 4.3.2, at etableringen af en åben forbindelse til Søborg Sø ”punkterer” stuvningen fra havet, men at vandføringen fra havet og ind i Søborg Sø stiger kraftigt til op mod 10.000 liter pr. sekund. Den største forandring imellem de to hændelser ses opstrøms tilløbet af Søborg Sø. På trods af, at havvandstanden kun er steget med 35 cm mellem de to scenarier, så er vandstandsforskellen opstrøms Søborg Søs udløb i Landkanalen på op mod 50 cm. Det skyldes, at afstrømningen ind i Søborg Sø er så væsentlig, at forbindelsen mellem Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal bliver begrænsende og at punkteringen af vandspejlet ikke er lige så effektivt som under lavere hændelser, konsekvensen er mere stuvning i Søborg Sø Landkanal. Etableringen af Søborg Sø har dog fortsat en positiv effekt for Søborg Sø Landkanal under stormflodshændelser, hvor stuvningen reduceres væsentligt. På Figur 4.15 ses det, at der er en vandstandsforinkel på ca. 60 cm mellem vandstanden i havet og i Søborg Sø Landkanal opstrøms forbindelsen til Søborg Sø.



Figur 4.15 Vandstande som vil opstå, under en 100-års stormflodshændelse i klimascenarie RCP8.5 i år 2100, efter etableringen af Søborg Sø.

Selve Søborg Sø er fortsat robust overfor stormflodshændelser grundet søens høje kapacitet til at opmagasinere vand. Under den beregnede ekstreme stormflodshændelse i klimascenarie RCP8.5 i år 2100, løb der over en periode på 1 døgn i gennemsnit 5.000 liter pr. sekund ind i søen, hvilket svarer til næsten 500.000 m³. Hændelsen resulterer i en vandspejlsstigning i søen på ca. 15 cm, som vil afstrømme jævnt fra søen indtil en normal vandstand på ny er indfundet.

4.4 RESULTATER, TRYKFORHOLD OMKRING NUVÆRENDE OG FREMTIDIGE DIGER

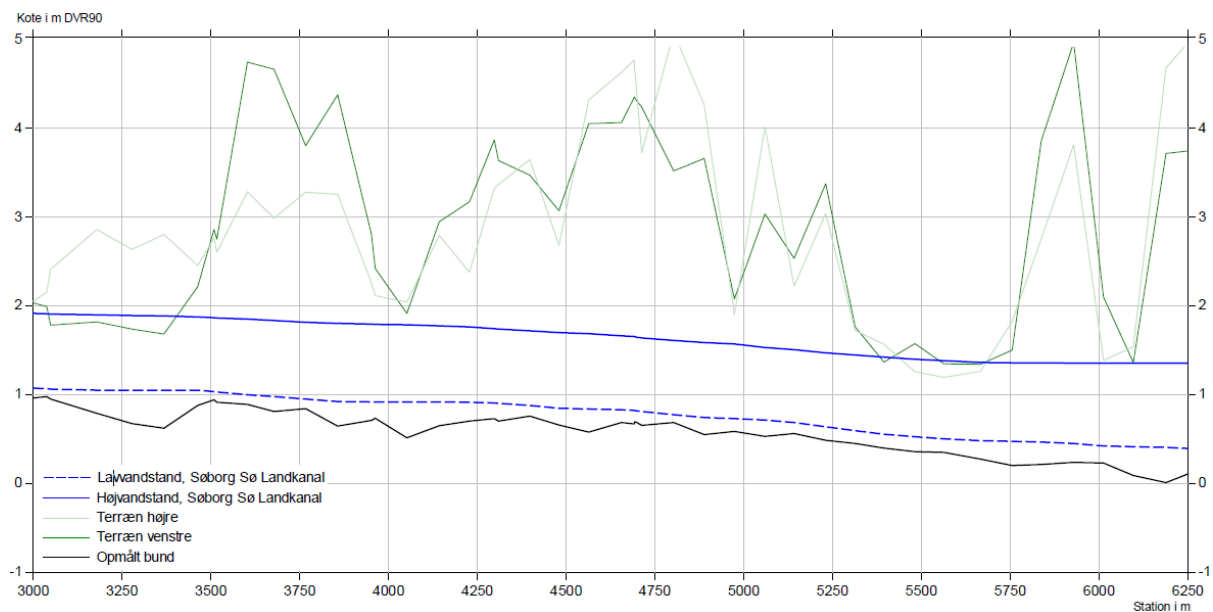
Det nuværende pumpelag i Søborg Sø er mod sydvest omkranset af vandløbet Søborg Sø Landkanal. Landkanalen og pumpelaget adskilles på dele af strækningen af et kunstigt dige, som begrænser den hydrauliske kontakt imellem de to vandsystemer. Ved etableringen af Søborg Sø skal dette dige udbygges. Udbyggelsen består i at hæve diget, sikre diget mod gennemsivning og etablere et stisystem ovenpå delstrækninger af diget.

Projekteringen af diget forudsætter kendskab til de hydrauliske trykniveauer, som diget skal håndtere ift. stabilitet, gennemsvivning, erosion og oversvømmelse.

Projekteringen af diget foretages på baggrund af dimensionsgivende hydrauliske påvirkninger fra hhv. Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal. For Søborg Sø Landkanal skal det sikres, at vandstanden i vandløbet aldrig giver anledning til oversvømmelse af diget, mens det for Søborg Sø skal sikres at vandstanden og de eventuelle bølgepåvirkninger skabt af vindforholdene ikke giver anledning til erosion af diget. Det mest afgørende dimensioneringskriterie af diget er stabilitetsforholdene, når trykdifferensen på hver side af diget er højest. Det er heraf væsentligt at betragte scenarier for hændelser, hvor vandstanden i Søborg Sø Landkanal er høj mens vandstanden i Søborg Sø er lav og vice versa. Der arbejdes heraf med to scenarier under stabilitets- og gennemsvivningsberegningerne under projekteringen af diget:

- **Scenarie 1:** Høj vandstand i Søborg Sø Landkanal og lav vandstand i Søborg Sø.
- **Scenarie 2:** Lav vandstand i Søborg Sø Landkanal og høj vandstand i Søborg Sø.

For Søborg Sø Landkanal gives de dimensionsgivende kriterier på baggrund af de høje vandstandsforhold, som kan opstå i vandløbet v. ekstrem stuvning fra Kattegat eller ekstreme afstrømningsforhold samt de lav vandstandsforhold der kan opstå ved sommerhændelser, hvor der forekommer længerevarende tørke og normale vandstandsforhold i Kattegat. De dimensionsgivende vandstandsniveauer beregnes ved statistik på baggrund af MIKE11 modellen af Søborg Sø Landkanal. Værdier for maksimum- og minimumvandstanden i vandløbet udtrækkes for hele simuleringsperioden. Resultaterne kan ses på Figur 4.16.



Figur 4.16 Længdeprofil af Søborg Landkanal med ekstreme høj- og lavvandsforhold indenfor digestrækningen.

Det ses på længdeprofilet, at Søborg Sø Landkanal indenfor digestrækningen fra Ørbakkevej (st. ~3.000) til afløbet fra Søborg Sø (st. ~6.300) vil have en vandstand på mellem 1,35 – 1,91 m DVR90 v. højvande og mellem 0,38 – 1,06 m DVR90 v. lavvande. Punkteringen af vandspejlet under stormflodshændelser, som beskrevet i afsnit 4.3.2 forhindrer vandstanden i Søborg Sø Landkanal at nå ekstreme niveauer (>2,0 m DVR90) og har en gavnlig effekt ift. dimensionskravene af diget.

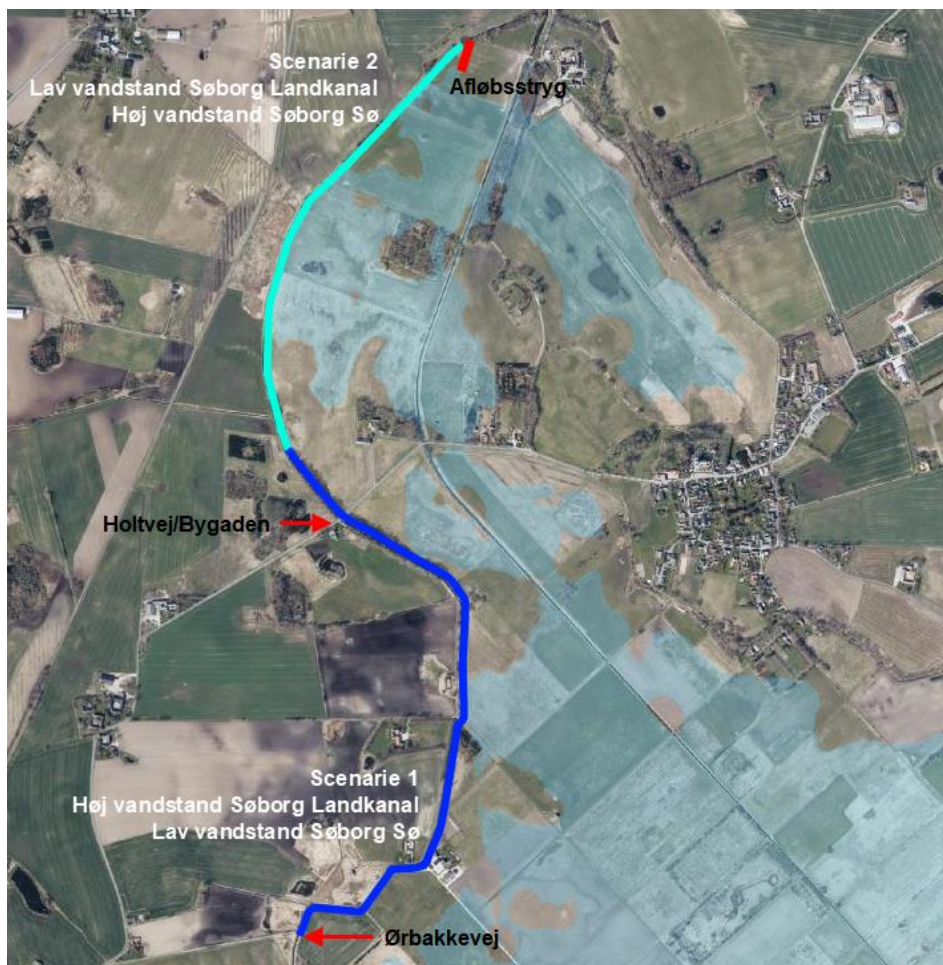
For Søborg Sø gives de dimensionsgivende kriterier på baggrund af søens maksimale generelle vandspejlsniveau kombineret effekten af vindstuvning mod diget fra øst, samt søens minimumsvandspejl under de tørre sommerperioder.

Afløbet fra Søborg Sø er dimensioneret således, at den generelle vandstand i Søborg Sø ikke (eller kun i meget korte perioder) overstiger kote 1,20 m DVR90. NIRAS har i forundersøgelsen beregnet effekten af vindstuvning mod digerne, og denne er sat til maksimal 10 cm. Det vurderes at denne beregning af vindstuvning er konservativ, da vindstuvning, som er forårsaget af forskydningspænding af vind på det frie vandspejl, kræver en vandflade af

en vis støjelse før en synlig effekt opstår. For mange strækninger af Søborg Sø mod diget er vandfladen relativt begrænset. Det medregnes dog fortsat, da det giver en større sikkerhed i projekteringen. Det hydrauliske dimensioneringskriterie for højvandstand i Søborg Sø sættes heraf til 1,30 m DVR90.

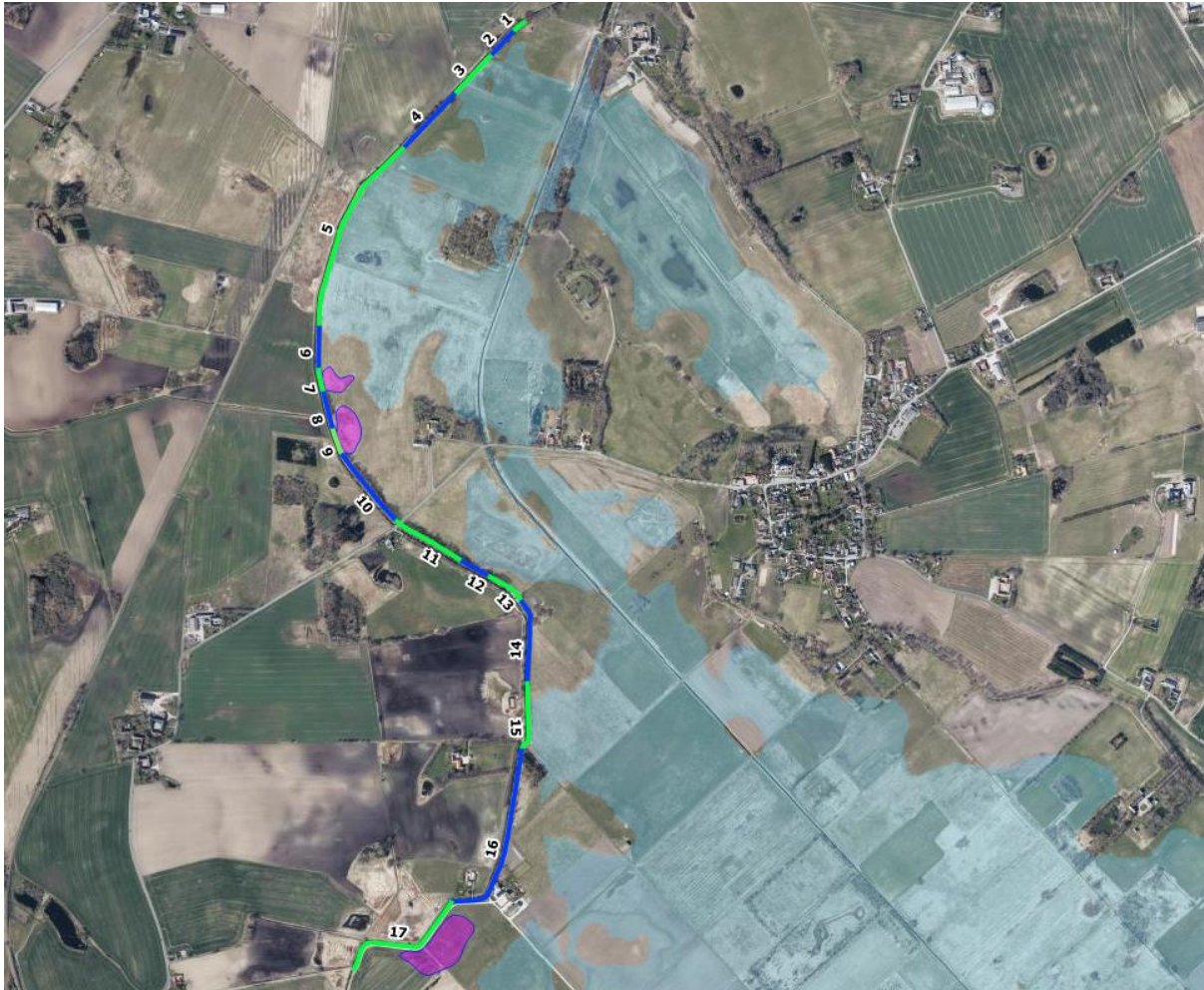
Lavvande i Søborg Sø er bestemt af afløbets udformning, som stopper vandføringen i kote 0,80 m DVR90 og tørkehændelser om sommeren. Dimensioneringskriteriet for digerne ved lavvande i Søborg Sø er sat til 0,80 m DVR90.

Trykniveauforskellen på digestrækningen mellem afløbet fra Søborg Sø og Ørbakkevej er beregnet for de 2 scenarier. Resultaterne viser, at digestrækningen kan opdeles i 2 strækninger ift. hvilket scenarie der er dimensionsgivende ift. den største trykforskel. På den nordlige strækning fra afløbet fra Søborg Sø til ca. 220 m nordvest for Holtvej, er scenarie 2 dimensionsgivende (høj vandstand i Søborg Sø og lav vandstand i Søborg Sø Landkanal). På den sydlige strækning er Scenarie 1 dimensionsgivende (lav vandstand i Søborg Sø og høj vandstand i Søborg Sø Landkanal), se Figur 4.17.



Figur 4.17 Oversigts over digestrækningen mellem Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal. Digets maksimale hydrauliske trykforskel opleves ved 2 forskellige scenarier på strækningen.

Strækningen er inddelt i 17 underområder ift. den hydrauliske påvirkning, se Figur 4.17. Inddelingen er foretaget iht. ændringer i trykforskellen, hvorvidt diget står i direkte kontakt med søens vandspejl eller andet frit vandspejl samt hvilket scenarie der er dimensionsgivende.



Figur 4.18 Strækningsinddeling af digeforløbet. Lilla markeringer indikerer sumpede områder som ikke er i direkte forbindelse med søen, men som kan forventes at have enten frit vandspejl på terræn eller nært terræn. Strækningsinddelingen er angivet skiftevis med blå og grøn farve, for at synliggøre inddelingen.

Følgende beskrivelse er et uddrag af notatet "Søborg Sø Dignedesign".

På hele strækningen har digerne direkte kontakt til vandspejlet i Søborg Sø Landkanal på digernes yderside. Som det fremgår af Figur 4.18 er der visse delstrækninger, hvor diget ligeledes har direkte kontakt til vandspejlet i Søborg Sø eller sumpede områder uden direkte kontakt med søfladen. På baggrund af den hydrauliske model er der taget udgangspunkt i to beregningsscenarier ved dimensionering af digerne ved Søborg Sø:

- Scenarie 1: Højvande i Landkanalen samt lavvande i Søborg Sø.
- Scenarie 2: Lavvande i Landkanalen samt højvande i Søborg Sø.

De hydrauliske betingelser for delstrækningerne jf. Figur 4.18 for de to beregningsscenarier fremgår af Tabel 4.5 og

Tabel 4.6. For hver delstrækning, er der angivet trykniveauet på hver side af diget i de to beregningsscenarier. For visse delstrækninger er vandstanden inddelt i et realistisk interval. Dette er valgt på nogle strækninger, hvor diget ikke er i kontakt med søens vandflade. Vandspejlet i jordmatricen mod søen er derfor forventeligt ikke identisk med vandspejlet i søen, og kan i stedet ligge indenfor et realistisk spænd. I disse tilfælde er der konservativt regnet med den kote, som giver den højeste trykdifferens i diget. Det er valgt at gruppere visse delstrækninger, da det her er vurderet, at der kan anvendes de samme hydrauliske forudsætninger til dimensionering af digerne. Hvor delstrækninger er grupperet, er der anvendt de mest konservative værdier.

Tabel 4.5 Hydrauliske forhold v. scenarie 1: Højvande i Søborg Sø Landkanal samt lavvande i Søborg Sø.

Strækning	VSP Landkanal	VSP Søborg Sø	Trykniveau	Bemærkning
1+2	1,35 m	0,80 -1,35 m	55 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
3	1,36 m	0,80 m	56 cm	Direkte kontakt til søens VSP
4	1,36 m	0,80 -1,00 m	56 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
5	1,45 m	0,80 m	65 cm	Direkte kontakt til søens VSP
6+7+8+ 9+10	1,50- 1,63 m	0,80 -1,30 m	83 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP (Sumpet areal ved strækning 7 og 9)
11	1,69 m	0,80 -1,30 m	69 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
12	1,71 m	0,80 m	91 cm	Mulig direkte kontakt til søens VSP
13+14	1,73- 1,78 m	0,80 -1,30 m	98 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
15	1,79 m	0,80 m	99 cm	Direkte kontakt til søens VSP
16	1,85 m	0,80 -1,30 m	105 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
17	1,90 m	0,80 -1,00	110 cm	Direkte kontakt til søens VSP (adskilt søområde med lav dynamik i vandspejlet)

Tabel 4.6 Hydrauliske forhold v. scenarie 2: Lavvande i Søborg Sø Landkanal samt højvande i Søborg Sø.

Strækning	VSP Landkanal	VSP Søborg Sø	Trykniveau	Bemærkning
1+2	0,40 -0,41 m	0,40- 1,30 m	90 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
3	0,42 m	1,30 m	88 cm	Direkte kontakt til søens VSP
4	0,47 m	1,10- 1,30 m	83 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
5	0,50 m	1,30 m	80 cm	Direkte kontakt til søens VSP
6+7+8+ 9+10	0,65 -0,78 m	1,10- 1,30 m	65 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP (Sumpet areal ved strækning 7 og 9)
11	0,83 m	1,10- 1,30 m	47 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
12	0,85 m	1,30 m	45 cm	Mulig direkte kontakt til søens VSP
13+14	0,88 -0,91 m	1,10- 1,30 m	42 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
15	0,92 m	1,30 m	38 cm	Direkte kontakt til søens VSP
16	0,95 m	1,10- 1,30 m	35 cm	Ingen direkte kontakt til søens VSP
17	1,05 m	1,20- 1,30 m	25 cm	Direkte kontakt til søens VSP (adskilt søområde med lav dynamik i vandspejlet)

På baggrund af de geotekniske- samt hydrauliske forudsætninger er der udført en analyse af gennem- og understrømningen i programmet Optum G2. Analysen danner grundlag for en vurdering af, hvorvidt der skal etableres foranstaltninger, som reducerer gennem- og understrømningen. Det er forudsat, at de enkelte borer er repræsentative for de dertilhørende delstrækninger. Det er ligeledes forudsat, at den angivne permeabilitet jf. den geotekniske rapport er repræsentativ for alle jordlag i dybden og for hele strækningen som boringen repræsenterer. En variation i den angivne permeabilitet kan have væsentlig indvirkning på gennem- og understrømningen, hvorfor der er en vis usikkerhed forbundet med analysen.

Jo højere permeabilitet jordlagene har, des større mængde vand vil der trænge igennem i forbindelse med gennem- og understrømningen. Der er udført en analyse af gennem- og understrømningen for de eksisterende forhold. Det vil sige uden etablering af foranstaltning der reducerer henholdsvis gennem- og understrømningen.

Alt afhængigt af boringernes placering i forhold til strækningernes placering, kan borerne være mere eller mindre repræsentative for den enkelte strækning. Den valgte geotekniske boring har stor indvirkning på analysen af gennem- og understrømning i diget. Det er derfor, i Tabel 4.7, opgjort hvilke borer, der er relevante for de enkelte delstrækninger samt hvor stor en del af strækningen, den enkelte boring er repræsentativ. Hvor strækningen ligger mellem to borer, anvendes der konservativt den boring, som giver den største gennem- og understrømning.

Tabel 4.7 Digestrækninger med relevante geotekniske boringer.

<p>Tværsnit 2</p> <p>Strækningen ligger mellem boringerne B4 og B5. Det er derfor muligt, at enten boring B4 eller boring B5 kan være gældende for hele strækningen. Der regnes med den boring, som giver den største gennem- og understrømning.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boring B5: maks. 137 m & min. 0 m • Boring B4: maks. 137 m & min. 0 m 	
<p>Tværsnit 4:</p> <p>Strækningen ligger mellem boring B4 mod nord og B2 mod syd. På selve strækningen ligger boringerne B6, B3 og B7.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boring B4: maks. 97 m & min. 0 m • Boring B6: maks. 250 m & min. 20 m • Boring B3: maks. 284 m & min. 20 m • Boring B7: maks. 258 m & min. 20 m • Boring B2: maks. 118 m & min. 0 m 	
<p>Tværsnit 7: Strækningen ligger mellem boring B8 ca. 50 meter mod nord og B1 ca. 440 meter mod syd. Det er derfor muligt, at enten boring B1 eller boring B8 kan være gældende for hele strækningen. Boringen B8 ligger dog markant tættere på strækningen end B1. Der regnes med den boring, som giver største gennem- og understrømning</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boring B8: maks. 81 m & min. 0 m • Boring B1: maks. 81 m & min. 0 m 	
<p>Tværsnit 9: Strækningen ligger ca. 455 meter syd for boring B8. På selve strækningen ligger boring B1.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boring B8: maks. 115 m & min. 0 m • Boring B1: maks. 181 m & min. 66 m 	

Det er i analysen for de eksisterende forhold forudsat, at der ikke er ”åbninger” på strækningerne, hvor terrænet er lavere end sikringskoten. Gennem- og understrømningen for hver strækning fremgår af Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Gennem- og understrømning ved scenarie 1 og 2 langs diget mellem Søborg Sø og landkanalen.

Tværsnit	Boring	Længde af strækning	Scenarie 1 Samlet gennem- og understrømning pr. strækning	Scenarie 2 Samlet gennem- og understrømning pr. strækning
2	B4	0		
	B5	137	ca. 304.3 m ³ /dag (3.5 L/s)	ca. 298.5 m ³ /dag (ca. 3.5 L/s)
4	B2	108	ca. 106.4 m ³ /dag (1.2 L/s)	ca. 77.9 m ³ /dag (ca. 0.9 L/s)
	B3	284	ca. 54.1 m ³ /dag (0.6 L/s)	ca. 34.5 m ³ /dag (ca. 0.4 L/s)
	B4	97	ca. 10.8 m ³ /dag (0.1 L/s)	ca. 6.8 m ³ /dag (ca. 0.08 L/s)
	B6	20	ca. 0.7 m ³ /dag (ca. 0.01 L/s)	ca. 0.4 m ³ /dag (ca. 0.005 L/s)
	B7	20	ca. 2.3 m ³ /dag (ca. 0.03 L/s)	ca. 1.2 m ³ /dag (ca. 0.01 L/s)
7	B1	81	ca. 4.8 m ³ /dag (ca. 0.06 L/s)	ca. 2.3 m ³ /dag (ca. 0.03 L/s)
	B8	0		
9	B1	181	ca. 26.2 m ³ /dag (ca. 0.3 L/s)	ca. 7.4 m ³ /dag (ca. 0.09 L/s)
	B8	0		

Scenarie 1 beskriver en hændelse, hvor der forekommer en ekstrem høj vandstand i Landkanalen samtidig med, at der er lavvandet i Søborg Sø. Dette scenarie skaber en trykgradient igennem diget, hvor vand fra landkanalen vil gennemsive mod Søborg Sø. Trykforskellen giver ikke anledning til instabilitet i diget, men der kan på nogle strækninger opleves en høj gennemsivning. Dette gælder særligt for strækning 3 og 5, hvor kombinationen af en lille afstand mellem de frie vandspejle og en høj vandstandsforinkel danner en stejl gradient. Der er foretaget flere registreringer af jordbundsforholdene på strækningen, men ved et konservativt estimat af gennemsivningspotential, hvor boringen med den højeste hydrauliske konduktivitet benyttes, vurderes det, at der kan gennemsive **ca. 3,5 L/s langs strækning 3** og **ca. 6,0 L/s langs strækning 5**.

Hændelsen under scenarie 1 er kortvarig og vil optræde meget sjældent. Hændelsen kan enten forekomme når der forekommer en ekstrem afstrømningshændelse i Landkanalen eller når vand stuver ved en ekstrem stormflodshændelse fra Kattegat. I begge hændelser har gennemsivningsforholdene i diget minimal betydning ift. de overordnede hydrologiske forhold i landkanalen og i søen.

Scenarie 2 beskriver en hændelse, hvor der optræder lav vandføring i Landkanalen samtidig med, at vandet står højt i Søborg Sø. Her vil vand gennemsive diget fra søen til landkanalen. Scenariet giver ikke anledning til instabilitet i diget på nogle af strækningerne. Også under denne hændelse er det særligt strækning 3 og 5, hvor gennemsivningen er størst. Ved samme konservative betragtning som for Scenarie 1 kan det betragtes, at der kan gennemsive **ca. 3,4 L/s langs strækning 3** og **ca. 4,4 L/s langs strækning 5**.

Scenarie 2 beskriver også en kortvarig og sjælden hændelse. Gennemsivning af vand fra søen til landkanalen vil hæve vandføringen relativt meget under det lave afstrømningsscenarie. Dette kan anskues generelt som ønskværdigt, da det forbedrer hydrologien i vandløbet og forhindrer det i at løbe tørt. Samtidig har Søborg Sø en høj vandstand og rigelig kapacitet til at afgive vandet. Her skal det samtidig betragtes, at strækning 3 og 5 er tæt beliggende på søens afløbsstryg, hvor den primære vandtransport til landkanalen forekommer. Det vurderes at udgøre en uvæsentlig forskel for landkanalens udtryk, hvorvidt de kombinerede 7,8 L/s som gennemsiver de to strækning, afstrømmer igennem direkte fra stryget eller diffusivt igennem digerne.

Da både scenarie 1 og scenarie 2 er ekstremtilfælde, er der undersøgt et supplerende scenarie for strækning 3 og strækning 5. Scenarie 3 beskriver en hændelse, hvor der både er lavvande i landkanalen og i søen. Dette scenarie vurderes det mest kritiske scenarie i forhold til gennemsivning af digerne, da der fortsat langs strækning 3 og 5 vil være en udsivning af vand fra søen til landkanalen på trods af, at vandstanden i søen er under kote +0,8 m og søen gerne skal bibeholde denne vandstand i så høj grad som muligt hen over sommeren. Samtidig vurderes dette

scenarie ikke at være meget sjældent, da der er god korrelation mellem hændelserne. Søen kan forventes årligt at have en vandstand ned til kote 0,8 m hen over sommerens tørre periode, og dette korrelere med det tidspunkt, hvor landkanalen vil have dens laveste vandføring.

Ved en konservativ vurdering af den hydrauliske konduktivitet igennem digerne vurderes det, at der kan gennemsnitligt **samlet 2,5 L/s igennem digestrækning 3 og 5** under hændelsen.

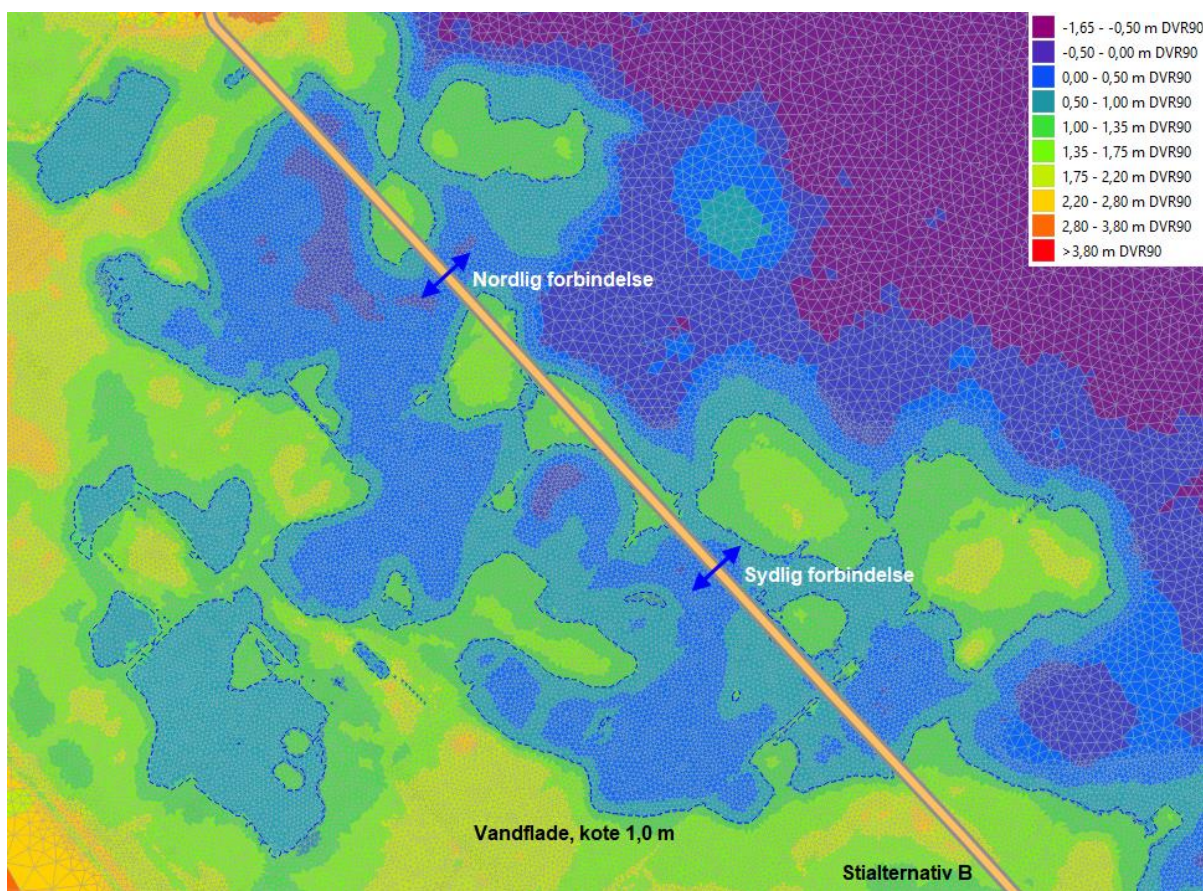
Dette kan lyde af meget, men det vurderes uvæsentligt ift. søens overordnede hydrologi. For at sænke vandspejlet i søen fra kote +0,80 til +0,75 m skal søen afgive 150.000 m³ vand. Ved en udsivning alene på 2,5 L/s vil det tage 2 år. Forholdsmæssigt er udsivningen også meget lille. Som beskrevet i afsnit 2.6.4, vil fordampningen på årsbasis være 761 mm/år fra søen, svarende til gennemsnitligt 92 L/s. I juli måned vil fordampningen være gennemsnitligt 133 mm svarende til 161 L/s. Udsivningen vil således kun udgøre ca. 1% af søens vandafgivelse i en tør sommermåned.

Samlet set vurderes det, at gennem- og understrømningen er uvæsentlig i forhold til søens og landkanalens overordnede hydrologi. Det vurderes derfor at mængden af gennem- og understrømning er acceptabel uden etablering af hydrologiske foranstaltninger.

5 VANDUDSKIFTNING SYD-VEST FOR STIALTERNATIV B

I forbindelse med realiseringen af Søborg Sø er det planlagt at etablere rekreative stisystemer omkring søen. En af stierne er navngivet stialternativ b, og er en strækning af stisystemet med et planlagt tracé igennem søens sydvestlige søflade. Stien er placeret i tracéet af en eksisterende markvej men skal i forbindelse med søens realisering hæves.

Grundet stiens gennemskæring af søfladen, skal der etableres vandveje under stien, som forbinder søen. De hydrologiske forbindelser skal sikre, at vandstanden af søen på den sydvestlige side af stien ligger i niveau med den øvrige søflade, og samtidig have en placering og en dimension, som skaber en tilfredsstillende vandudskiftning i den afskårne del af søen. En oversigt over stialternativ b fremgår af Figur 5.1.



Figur 5.1 Oversigtstegning over stialternativ b og vandspejlet for Søborg Sø som stien gennemskærer. De to primære forbindelsesveje igennem stien er markeret.

Oplandet til søarealet syd-vest for stialternativ b er meget begrænset, og består kun af det interne opland mod arronderingen af Søborg Sø Landkanal. Samlet set dækker vandoplandet et område på 85 ha, som ved en middelflstrømning giver et bidrag på ca. 6 liter pr. sekund. Søens vandflade syd-vest for stialternativ er ca. 35 ha og har et volumen på 135.000 m³. Søens høje vandvolumen og dens lave interne tilstrømning bevirker at der ikke på foranledning af søens eget opland kan opstå situationer, hvor vandspejlet i søen vil afvige væsentligt ift. den øvrige søflade af Søborg Sø pga. eventuelle indsnævrede forbindelser under stialternativ b.

Vandudskiftningen i søfladen syd-vest for stialternativ b, styres i højere grad af vandstandsfluktuationerne i Søborg Sø, som ved højvande i vinterhalvåret vil afgive vand ind i området og ved lavvande i sommerhalvåret, vil aftage vand fra området. Vandstandsvariation fra hhv. vandstandskote 0,8 – 1,2 m DVR90, som Søborg Sø vil variere imellem på årsbasis, giver en volumenændring i søfladen syd-vest for stialternativ b på ca. 110.000 m³. Sammenholdt med den interne belastning, som på årsbasis tilsvare ca. 190.000 m³, vil opholdstiden af vand i

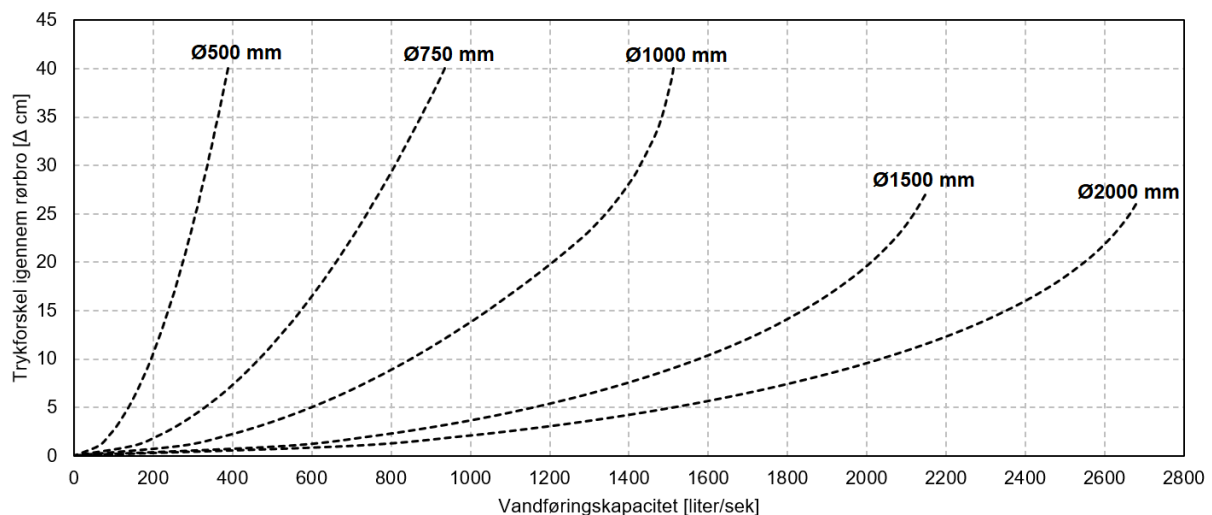
området være på minimum 4 - 6 måneder. Det er tilsvarende med opholdstiden af vandet for den øvrige del af Søborg Sø.

De hydrologiske forbindelser under stialternativ b er ikke fastlagt, da der er konstateret jordbundstyper langs stien som har et højt sætningspotentiale. De tidlige faser af projektet forudsatte et gennemgående dige inkl. sti, hvorunder betonrør eller ståltunnelrør skulle skabe hydrologiske forbindelser mellem de to søflader. På grund af sætningsproblematikken er det seneste forslag dog ændret til en boardwalk over de sætningstruede jorde, som etableres på skrue- eller betonpæle med fundering til mineralsk jord. Etableringen af en boardwalk medfører åbne forbindelser mellem de to søflader.

Hvis stialternativ b etableres som et dige, og forbindelsen mellem de to søflader skabes ved etablering af rørforbindelser, har Naturstyrelsen ønsket en vurdering af, hvorvidt de hydrologiske forbindelser kunne skabe en eventuel begrænsning ift. vandudskiftningen mod søfladen syd-vest for stialternativet.

Der er lavet teoretiske beregninger af vandføringsevnen for en række rørdimensioner, som er sammenholdt med den nødvendige kapacitet for at undgå stuvning i den syd-vestlige søflade og samtidig opretholde en tilpas vandudskiftning.

Resultaterne af beregningerne, som kan ses på Figur 5.2, viser at selv små rør igennem stialternativet ved de to udpegede placeringer kan skabe en tilstrækkelige vandføringsevne under stialternativet. Søens høje vandvolumen og lave tilstrømning medfører, at røret ikke behøver en større kapacitet end maks. 50 l/s for at undgå stuvning i søfladen mod syd-vest. Det kriterie overholdes af alle beregnede rørstørrelser.



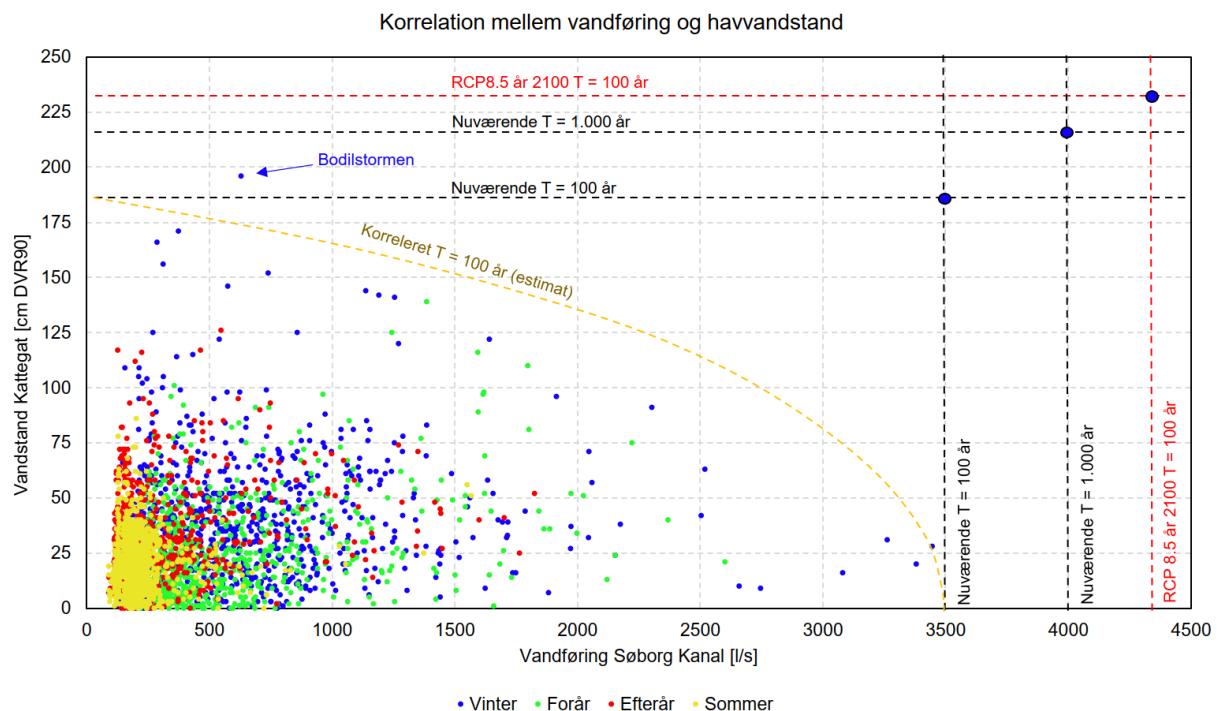
Figur 5.2 Vandføringskapacitet igennem forskellige rørdimensioner ved forskellige trykforskelle i vandstanden igennem røret.

Overordnet kan selv små rørdimensioner give en tilstrækkelig hydrologisk forbindelse igennem stialternativ b. Det anbefales af denne årsag, at beslutningen af rørdimension, i tilfælde af at stien anlægges som et dige, foretages på foranledning af andre hensyn ifm. etableringen af stialternativ b.

6 KORRELATION AF EKSTREME HÆNDELSE

Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal er beliggende i stuvningszonen for ekstreme stormflodshændelser i Kattegat. Risikoen for ekstreme vandstande er af denne årsag ikke udelukkende betinget af afstrømningsforholdene til søen eller i vandløbet men også vandstanden i havet, som under stormflodshændelser vil skabe en stuvning i Søborg Kanal og derved også mod Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal. I foregående afsnit 4.3.2 er konsekvenserne ved en ekstremhændelse tilsvarende Bodilstormen, som indtræf i vinteren 2013, beskrevet ift. etableringen af fremtidige Søborg Sø. I indeværende afsnit afdækkes sandsynligheden for at en ekstrem stormflodshændelse forekommer samtidigt med en ekstrem afstrømningshændelse.

På baggrund af daglige målinger af hhv. vandstande ved Hornbæk Havn og vandføringer i Søborg Kanal ved Parkvej (DDH stednr. 480046) er der foretaget en korrelationsanalyse og ekstremstatistik. Korrelationsanalysen foretages ved at sammenholde målte vandstande og vandføringer, som er forekommet på samme tid over en længere årrække. Analysen kan herigennem beskrive, hvorvidt der er en sammenfaldende tendens mellem ekstreme hændelser af stormflod og afstrømning. På Figur 6.1 ses et plot af resultatet af korrelationsanalysen for Søborg Kanal. Sammenfaldene hændelser beskrives ved et punkt for hhv. vandstand og vandføring den pågældende dag, med vandstande i havet af y-aksen og vandføring i vandløbet af x-aksen. Hændelserne er farveinddelte på årstidsniveau og der er indsat stiplede linjer for ekstreme gentagelsesperioder $T = 100$ og 1.000 år for både vandstand og vandføring. Bodilstormen er særskilt markeret.



Figur 6.1 Korrelation mellem vandstands- og vandføringshændelser i Søborg Kanal v. Parkvej.

Det ses på figuren, at sammenhængen mellem vandstandsforholdene fra Kattegat og vandføringen i Søborg Kanal er meget spredte. Det skyldes, at der ikke er nogen væsentlig korrelation mellem stormflodshændelser og ekstreme afstrømningshændelser. Forekomsten af ekstreme vandstande ved hav og høje afstrømninger i vandløb er betinget af forskellige naturlige fænomener indenfor oceanografi og metrologi. Heraf kan det heller ikke beskrives, at der under en stormflodshændelse nødvendigvis vil forekomme en høj afstrømning i vandløbet. Det kan dog konstateres på Figur 6.1, at både stormflodshændelser og høje afstrømningshændelser generelt har tendens til at forekomme om vinteren og foråret (december – april), hvilket øger sandsynligheden for et sammentræf af hændelser.

Ved en simpel betragtning af, at den eneste tydelige sammenhæng mellem de to hændelser er, at begge sandsynligvis indtræffer de samme 150 dage om året fra december – april, kan sandsynligheden for, at to ekstremhændelser indtræffer samme dag beregnes. Det kan her betragtes, hvordan sandsynligheden indskrænkes

eksponentielt, når det vurderes hvorvidt to relativt uafhængige og usandsynlige hændelser indtræffer på samme tidspunkt.

Tabel 6.1 Sandsynlighed/gentagelsesperiode for sammenfald af to uafhængige hændelser, hvis de begge indtræf den samme dag ud af 150 dage om året.

		Gentagelsesperiode, havvandstand				
		T = 5 år	T = 10 år	T = 50 år	T = 100 år	T = 1.000 år
Gentagelsesperiode, afstrømning	T = 5 år	T = ~1.500 år	T = ~3.000 år	T = ~15.000 år	T = ~30.000 år	T = ~300.000 år
	T = 10 år	T = ~3.000 år	T = ~6.000 år	T = ~30.000 år	T = ~60.000 år	T = ~600.000 år
	T = 50 år	T = ~15.000 år	T = ~30.000 år	T = ~150.000 år	T = ~300.000 år	T = ~3 mill. år
	T = 100 år	T = ~30.000 år	T = ~60.000 år	T = ~300.000 år	T = ~600.000 år	T = ~6 mill. år
	T = 1.000 år	T = ~300.000 år	T = ~600.000 år	T = ~3 mill. år	T = ~6 mill. år	T = ~60 mill. år

Selv korrelation af lave gentagelsesperioder er meget usandsynlige, hvis de skal forekomme på samme dag. Det ses af Tabel 6.1, hvor en 5-års hændelse i havvandstand og vandføring statistisk set kun vil ramme samme dag én gang hvert halvandede årtusinde.

Risikoen for at ekstreme stormflodshændelser og afstrømninger i vandløb forekommer på samme tid forøges dog med klimaforandringerne. Ved at nutidige ekstreme hændelser bliver mere hyppige i takt med stigende havvandstand, vil risikoen for korrelation også forøges. Det ses f.eks. i Figur 6.1, hvor gentagelsesperioden $T = 100$ år er indtegnet på baggrund af klimamodellen RCP8.5 for år 2100. Ændringer i stormflodshændelser beskrives på baggrund af data fra Klimaatlas mens ændringer i vandløb beskrives iht. HIP (Hydrologisk Informations- og Prognose-system). Det ses her, hvordan en 100-års hændelse er væsentlig større for både havvandstand og vandføring end en nutidig 1.000-års hændelse. I afsnit 4.3.3 beskrives hvordan Søborg Sø og Søborg Sø Landkanal responderer på en ekstrem hændelse i klimascenariet RCP8.5 for år 2100. Overordnet vurderes det dog fortsat, at sammenfald mellem ekstreme hændelser i hav og vandløb fortsat er meget usandsynlige. Søborg Sø er pga. dets store vandkapacitet og relativt lille opland meget robust overfor ekstreme hændelser, og vil nærmere fungere som et afværgende middel mod oversvømmelse for nærliggende infrastruktur end en risiko i sig selv.

7 REFERENCER

DHI A/S. (2017). *AutoCal, Automatic Calibration Tool User Guide*.

DMI. (2022). *DMI Frit Data*. Hentet fra <https://www.dmi.dk/frie-data/>

DMI. (2022). *Klimaatlas*. Hentet fra <https://www.dmi.dk/klima-atlas/>

Niras A/S. (2019). *Naturgenopretningsprojekt Søborg Sø*. Naturstyrelsen.

Orbicon A/S. (2014). *Hydrologisk Model Gribskov*. Naturstyrelsen.