

MILJØCENTER NYKØBING FALSTER

MILJØMINISTERIET

Opstilling og kalibrering af model

Oplandsmodel for landovervågningsop- land 1

Delrapport, 15. september 2008

MILJØCENTER NYKØBING FALSTER

MILJØMINISTERIET

Opstilling og kalibrering af model

Oplandsmodel for landovervågningsop- land 1

Delrapport, 15. september 2008

Revision : version 1
Revisionsdato: 15-09-2008
Sagsnr. : W01997
Projektleder : ULA
Udarbejdet af : OLJE
Godkendt af : ULA/THW

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	4
2	Beskrivelse af området	5
2.1	Geologi.....	5
2.1.1	<i>Regional geologi</i>	6
2.2	Hydrogeologi.....	6
2.3	Strømningsmønstre.....	7
3	Konceptuel strømningsmodel	10
4	Fastlæggelse af projektområde	13
5	Observationsdata	15
5.1	Grundvandsobservationer.....	15
5.2	Vandløbsobservationer.....	19
5.3	Drænafstrømning.....	20
5.3.1	<i>Sammenligning af drænstationer</i>	22
6	Evaluering af klimadata	25
6.1	Klimadata for projektområdet.....	26
6.2	Sammenligning af klimadata.....	31
7	Numeriske modelværktøjer	32
7.1	Grundvandsmodel – MIKE SHE.....	32
7.2	Vandløbsmodel – MIKE 11.....	32
7.3	Kobling af grundvands- og vandløbsmodel.....	32
8	Opstilling af strømningsmodel	34
8.1	Modelområde og randbetingelser.....	34
8.2	Beregningslag.....	35
8.3	Topografi.....	37
8.4	Klima og nettonedbør.....	38
8.5	Dræn.....	39
8.6	Indvinding.....	41
8.7	Geologisk model.....	42
8.7.1	<i>Hydrogeologiske parametre</i>	42

8.8	Opstilling af vandløbsmodel	43
9	Kalibrering af strømningssmodel	46
9.1	Opstilling af nøjagtighedskriterier	46
9.1.1	<i>Kvantitative kalibreringskriterier</i>	<i>46</i>
9.1.2	<i>Kvalitative kalibreringskriterier</i>	<i>49</i>
9.2	Modelkalibrering	49
9.2.1	<i>Overordnet fremgangsmåde.....</i>	<i>49</i>
9.2.2	<i>Følsomhedsanalyse.....</i>	<i>50</i>
9.2.3	<i>Kalibrering af vandløbsmodellen</i>	<i>51</i>
9.2.4	<i>Kalibrering af grundvandsmodellen</i>	<i>63</i>
9.2.5	<i>Grundvandsobservationer i S4 og den øverste moræne.....</i>	<i>64</i>
9.2.6	<i>Grundvandsobservationer i S3 og morænen</i>	<i>66</i>
9.2.7	<i>Dybere grundvandsobservationer.....</i>	<i>68</i>
10	Validering af strømningssmodel.....	71
11	Vandbalance	72
12	Opsummering.....	74
13	Referencer.....	77

Bilagliste

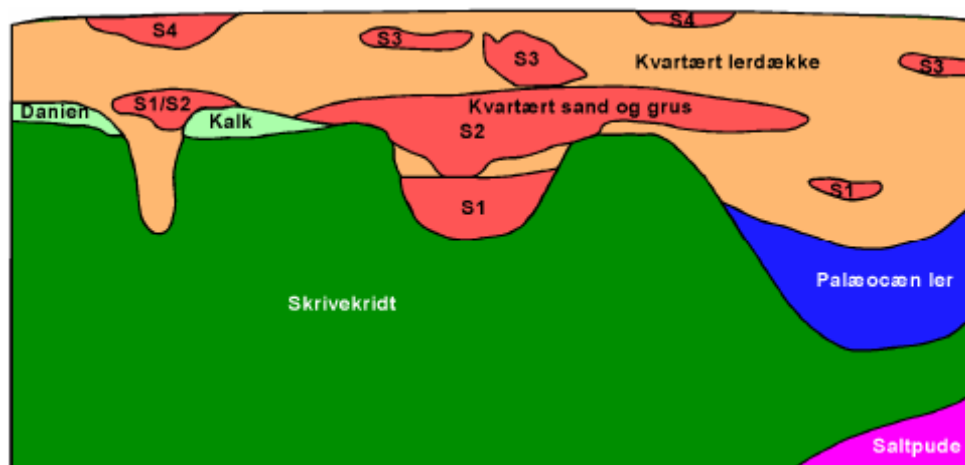
Bilag 1 Kalibrering af grundvandsobservationer

1 Indledning

Denne rapport er en delrapport i opgaven "oplandsmodel for overvågningsopland nr. 1", og beskriver opstilling og kalibrering af den numeriske model til beskrivelse af vandtransporten i oplandet.

Hovedformålet med projektet er at opstille en dynamisk, procesbaseret og arealdistribueret oplandsmodel til beskrivelse af vand- og kvælstoftransport i den mættede zone for LOOP 1 – oplandet til vandløbet Højvads Rende.

Udgangspunktet for en korrekt beregning af transporten af N fra rodzonen til vandløb er en korrekt beskrivelse af vandtransporten i hhv. mættet zone, dræn og på overfladen. Der opstilles en integreret strømningsmodel, indeholdende en fuld grundvandsmodel og en detaljeret overfladevandsmodel. Modellerne er dynamisk koblede, og der beregnes i hvert tidsskridt udveksling mellem grundvandet og vandløbene. Udvekslingen beregnes som strømning mellem grundvandet og vandløbet, tilstrømningen af drænvand til vandløbene, samt overfladisk afstrømning til vandløbene. Den integrerede strømningsmodel opstilles og kalibreres ud fra de tilgængelige data.



Figur 2 Geologisk forståelsesmodel for Lolland, /7/

2.1.1 Regional geologi

Generelt udgøres de prækvartære aflejringer i det nordvestlige Lolland af Skrivekridt overlejret af et tyndt lag af Danien kalk, som flere steder er fjernet af kvartær erosion. Herover finder man fed palæocænt ler, der i det nordvestlige Lolland kun er observeret lokalt i den vestlige del, mens det er mere udbredt syd for området, hvor det hviler direkte på Skrivekridt uden mellemliggende lag af Danien kalk.

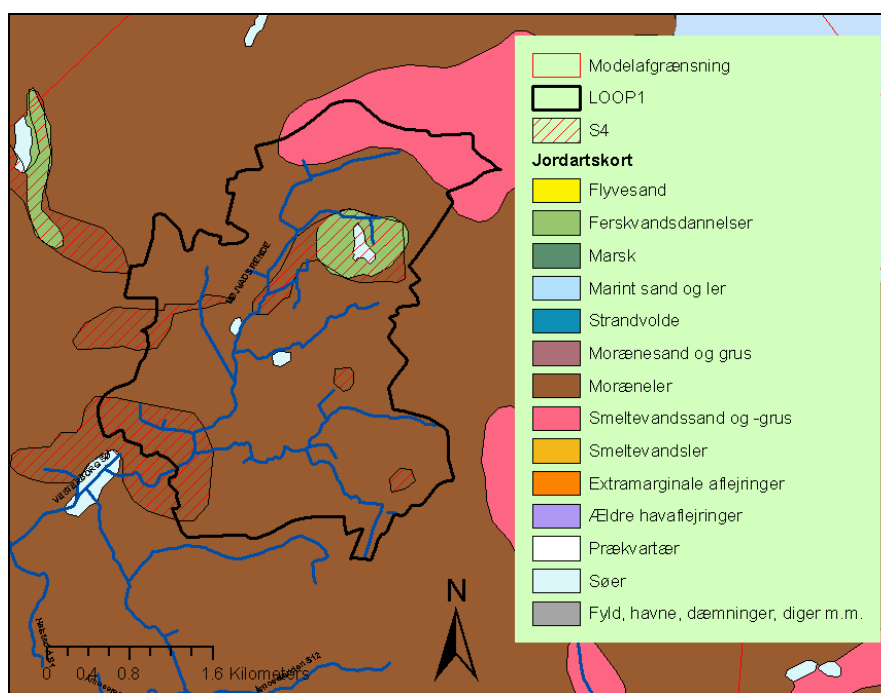
De kvartære dæklag består af moræneler med flere indslag af sand, der benævnes S1-S4. S1 er dog ikke til stede i NV-Lolland.

Flere steder er prækvartæroverfladen udviklet som dybe render, der tolkes som kvartære begravede dale. De begravede dale er nogle steder fyldt med moræneler, andre steder med sand og grus - eller vekslende lag af forskellig sammensætning.

2.2 Hydrogeologi

I forbindelse med udpegningen af de 6 landovervågningsoplande er LOOP 1 oplandet udvalgt idet oplandet har et stort lerindhold. Oplandet er karakteriseret ved en svag bølget moræneflade, der dækker det meste af området. I forbindelse med denne opgave er udbredelsen af de kvartære sandforekomster interessante, idet de er styrende for den overfladenære grundvandstransport og dermed også for den transport af nitrat, der måtte være i den øverste del af grundvandet. Det øverste sandmagasin, benævnt S4, er defineret ved at det er terrænnært, udbredelsen af S4 er vist på Figur 3. Udbredelsen af S4 er i dette projekt justeret i forhold til de

seneste geologiske informationer fra området. I hovedparten af oplandet er tykkelsen af morænen mellem 12 og 40 meter, undtagelsen er områder med udbredelse af S4 (terrænnært) eller S3 (se Figur 8 for udbredelsen af S3). Den geologiske model for oplandet er nærmere beskrevet i /3/.



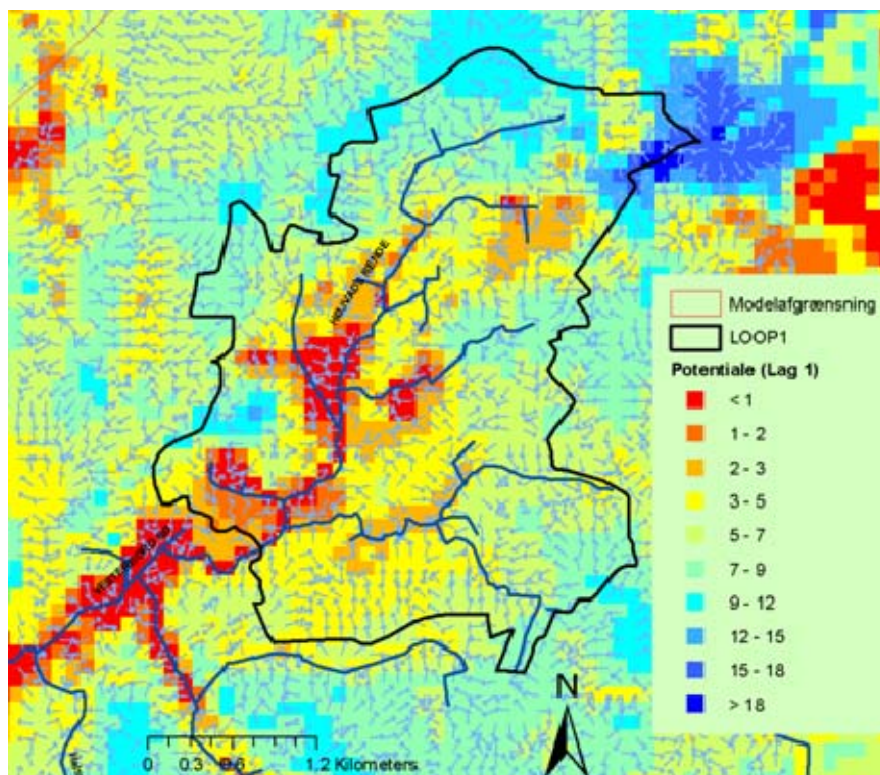
Figur 3 Modelområde med jordartskort. Udbredelsen af S4 fra den opdaterede geologiske model er vist med rød skravering.

I forhold til transporten af nitrat vurderes det, at den største nitratbelastning vil komme fra enten drænafløb eller afstrømning via grøfter. Den relativt store lertykkelse i det meste af oplandet betyder at udbredelsen af S3 og specielt S4 vil være styrende for den transport af grundvand der måtte forekomme over reduktionsfronten

2.3 Strømningsmønstre

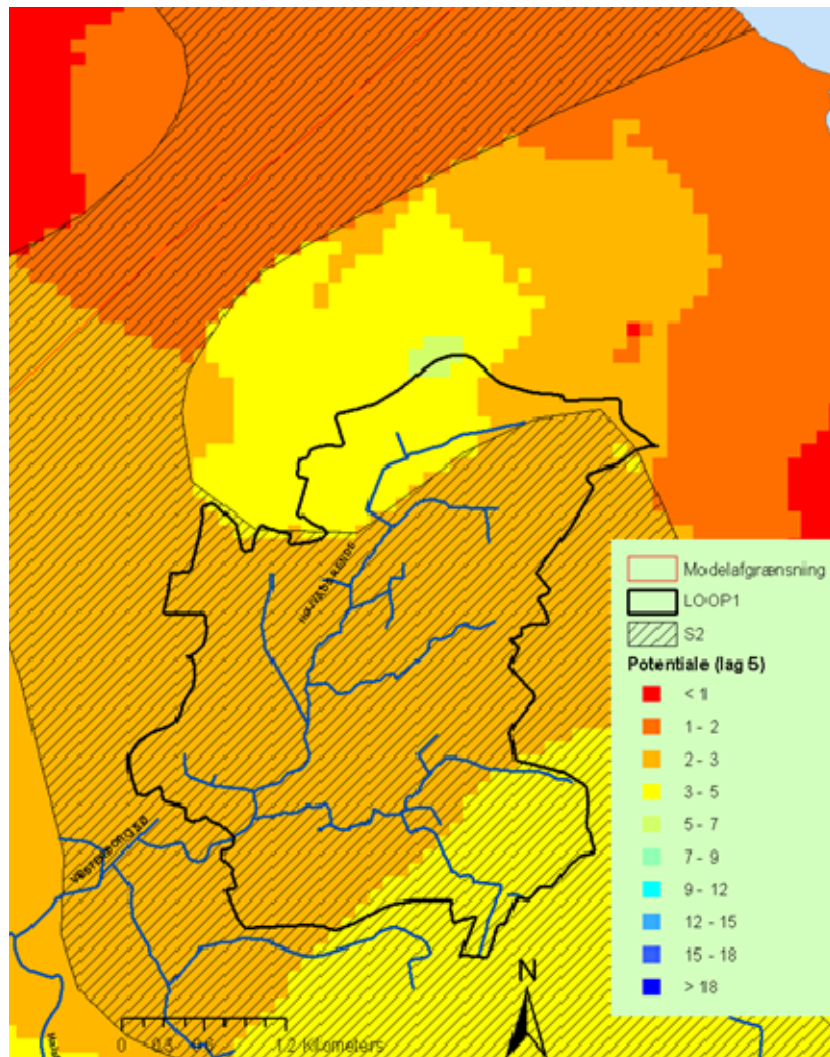
I det overfladenære grundvand er strømningen styret af udbredelsen af det overfladenære sandmagasin (S4) samt terræn og placeringen af vandløb. Figur 4 viser grundvandspotentialet, udtrykt fra beregningslag 1 fra den regionale Lolland model /5/. Det ses at potentialet ikke har nogen regional karakter, men at der indenfor de enkelte oplande sker en strømning mod lavpunkter i terræn, dvs. typisk strømning mod vandløb og vådområder. I LOOP 1 området findes de højeste potentialer ved oplandsgrænsen, og det laveste potentiale i områderne omkring Højvads Rende. Det ses endvidere at området ved Vesterborg sø, syd for LOOP oplandet,

har et lavt potentiale, og det kan forventes at der sker grundvandsstrømning ud af oplandet mod Vesterborg sø.



Figur 4 Potentiale og strømning i det overfladenære grundvand (beregningsslag 1 i /5/)

I de dybere grundvandsmagasiner har grundvandspotentialiet en mere regional karakter, og er primært påvirket af magasinudbredelser og indvindinger. Figur 5 viser grundvandspotentialiet ved S2, potentialiet er udtrykt af beregningsslag 5 fra /5/. Det ses, at den generelle strømningsretning er mod kysten, og at udbredelsen af S2 påvirker potentialiet. Generelt er potentialiet i oplandet nedadrettet. Der er dog områder omkring Højvads Rende, hvor der kan observeres en opadrettet gradient.



Figur 5 Potentiale i S2 (beregningsslag 5 i /5/). Udbredelsen af S2 er vist med skravering

3 Konceptuel strømningsmodel

Formålet med opgaven er at opstille en integreret hydrologisk model til beregning af vand- og kvælstoftransport i den mættede zone for LOOP 1 – oplandet til vandløbet Højvads Rende.

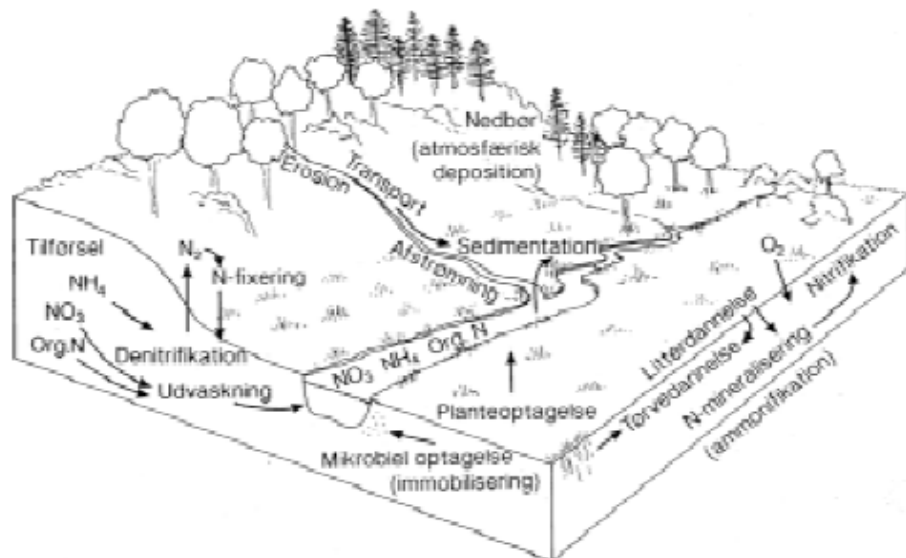
Ved beregning af nitrattransporten og omsætningen af nitrat i oplandet er der fokus på at få en korrekt differentiering af strømningsbeskrivelsen i hhv. drænafstrømning, samt grundvandsafstrømning over og under reduktionsfronten. Den del af nitrattransporten, der forekommer gennem dræn, vil typisk ske under oxiderende forhold, idet grundvandet ikke når at strømme under reduktionsfronten. For den del af vandløbsafstrømningen, der udspringer fra grundvandstilstrømning, er det vigtigt at få kortlagt og beskrevet fordelingen af anaerobe zoner, samt at kunne vurdere, hvor stor en del af nitraten, der passerer disse, og dermed forsvinder. Der sker ofte en denitrifikation i de ånære områder. Det drejer sig typisk om områder med grundvandstilstrømning til lag med højt indhold af organisk materiale nær åen eller direkte i åens bund. Når den endelige vurdering af tilstrømningen til vandløbene skal foretages, er det væsentligt, at disse forskellige tabsled er inddraget. Det gælder ikke mindst, når det skal vurderes, hvor indgreb er nødvendige for at nedsætte den samlede belastning.

Placeringen af reduktionsfronten vil have stor betydning for reduktionen af nitrat i grundvandszonen. Der er derfor nødvendigt at foretage en vurdering mht. hvordan reduktionsfronten skal placeres i områder, hvor der ikke er andre informationer, samt at vurdere den usikkerhed der er på placeringen, samt de konsekvenser dette måtte have på de endelige beregninger af nitratomsætningen i grundvandet.

Ved opsætningen af strømningsmodellen vil der være fokus på en korrekt beskrivelse af følgende processer:

- Fraktionering af strømning til vandløb i hhv. drænafstrømning, grundvandsudveksling samt overfladisk afstrømning.
- For strømningen i grundvandet fokuseres der på den overfladenære strømning, og specielt på at kunne vurdere om grundvandet strømmer under eller over reduktionsfronten. De primære grundvandsmagasiner bliver S4 og S3, hvorimod det vurderes at der ikke sker meget strømning fra hhv. S2 og kalk til vandløbssystemet.

- Ved kalibreringen af modellen bliver vandbalancen fra LOOP 1 oplandet verificeret ved brug af afstrømningshydrografen for station 620014. Denne afstrømningshydrograf er vigtig idet den benyttes til at verificere at modellen har en korrekt beskrivelse af hhv. den hurtige (dræn og overfladisk afstrømning) samt den langsommere tilstrømning (grundvandsudveksling) til vandløbet.
- Det vurderes at modellens beskrivelse af vandløbene kan være vigtig, og der skal derfor foretages en løbende vurdering mht. hvilke vandløb og grøfter der skal medtages i modellen. I det sydlige skovområde, kan det blive nødvendigt at benytte drænmodulet til en mere konceptuel beskrivelse af grøftesystemet.
- Drænastrømningen er afgørende for en korrekt beskrivelse af de store nitratkoncentrationer ("peak" værdier) i vandløbet. Det er derfor vigtigt at drænstationerne inddrages i kalibreringen, og at der foretages en validering / kalibrering af drænoptionsætningen ud fra de observerede værdier. Det vurderes dog at evt. forskelle mellem drænstationerne, ikke kan inddrages i modellen, idet det kan være vanskeligt at opskalere dette til hele oplandet.



Figur 6 Skematisk skitse af Å-dal med N-processer /3/

Ved den senere opsætning af modellen til beregning af kvælstoftransporten og omsætningen i oplandet, vil der være fokus på følgende processer:

- Det antages at den kalibrerede strømningsmodel giver en korrekt beskrivelse af vandtransporten i området, og der skal i transport modellen derfor fokuseres på at få beskrevet de forskellige tabsled i oplandet korrekt.

- Placeringen af reduktionsfronten er vigtig for nitratreduktionen i grundvandszonen. Det antages, at det nitrat der strømmer under reduktionsfronten omsættes helt.
- I de ånære områder er der fokus på den strømning der sker gennem organiske jordlag samt udveksling mellem grundvandet og vandløbets bund. Da den benyttede vandløbsmodel er en 1D model, kan udvekslingen med vandløbets bund evt. beskrives ved den strømning der skel fra dybere modelag end det øverste.
- Ved kalibreringen af transportmodellen er der primært fokus på at få en god overensstemmelse med observationerne ved station 620014, da denne station benyttes til en validering af den totale stofbalance for oplandet. Målingerne fra drænstationer benyttes til verificering af transporten via dræn, og resultaterne fra disse områder benyttes efterfølgende for hele oplandet.

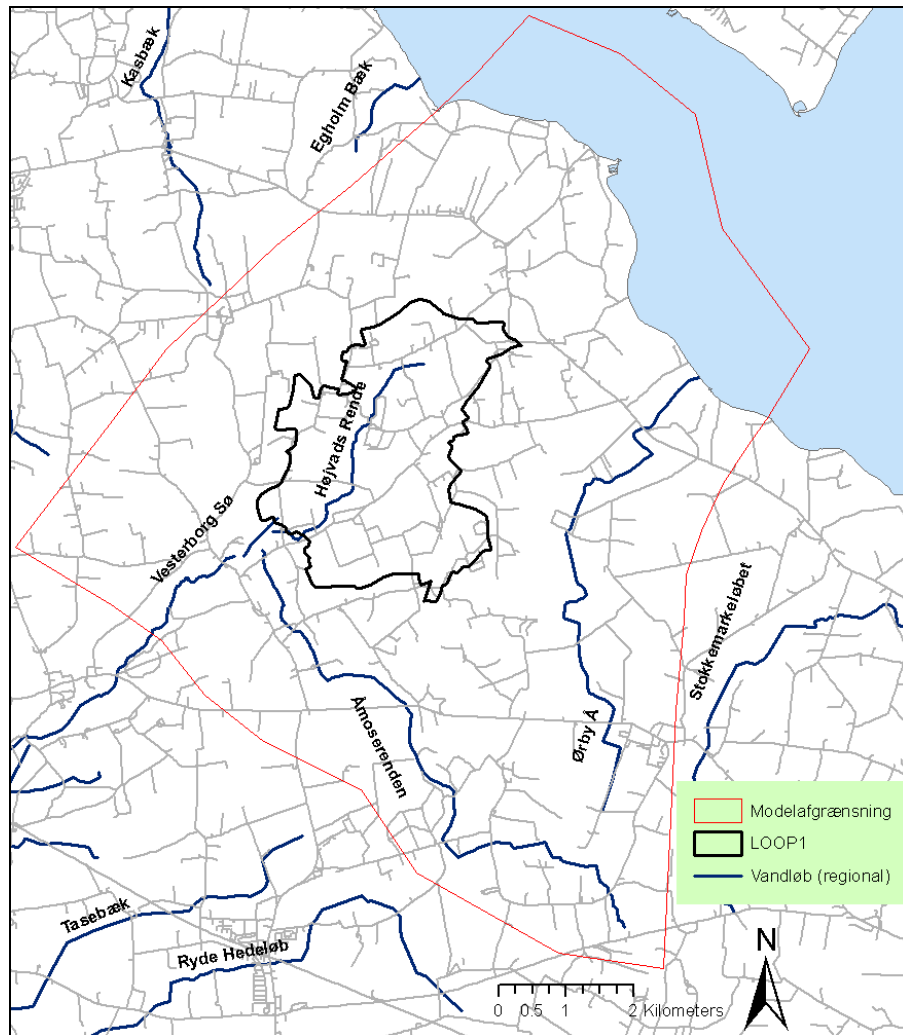
Beregningslagene opsættes som udgangspunkt identisk med den regionale model (/5/), hvor de enkelte beregningslag følger de geologiske formationer. Det vurderes dog, at det kan være nødvendigt med en yderligere inddeling af beregningslagene over reduktionsfronten, idet der ønskes en detaljeret beskrivelse af grundvandsstrømningen over og omkring reduktionsfronten.

4 Fastlæggelse af projektområde

Projektområdet er defineret som oplandet til LOOP1 området, men ved opstillingen af strømningsmodellen er det afgørende at kunne definere validerede randbetingelser langs hele projektområdet. Dette betyder at projektområdet som minimum dækker oplandet til LOOP1, men for at minimere påvirkningen fra de definerede randbetingelser (i den opstillede numeriske model), er det valgt at udvide projektområdet således at modellen kan opstilles med passende randbetingelser.

Generelt er det en fordel at følge naturlige rande i det omfang det er muligt. I denne opgave er fokus på en god beskrivelse af strømningen omkring reduktionsfronten, hvilket betyder at randbetingelserne for den øverste del af jordlagene er vigtige. Det er derfor valgt primært at fastlægge projektområdet ud fra vandløbsoplandene og topografien. Figur 7 viser hhv. det definerede projektområde og oplandet til LOOP1. Projektområdet er defineret på baggrund af følgende:

- Nord: projektområdet er trukket et stykke væk fra kysten, således at der ikke foregår strømning i grundvandszonen. Ved modelopstillingen defineres kystlinien med et fastholdt trykniveau.
- Syd: det er her valgt at trække projektområdet syd for Åmoserenden, og derved medtage oplandet til dette vandløb i projektet. Det betyder at evt. udveksling mellem dette opland og LOOP1 oplandet kan medtages af modellen, og at randbetingelsen placeres så langt fra fokusområdet at en evt. påvirkning dermed minimeres.
- Øst: det er valgt at inkludere Ørby å i projektområdet, og placere afgrænsningen på oplandsgrænsen mellem Ørby å og Stokkemærkeløbet. Dette giver en god afgrænsning i de øverste jordlag, idet det kan antages at der er lille eller ingen strømning på tværs af modelområdet.
- Vest: det er valgt at definere modelområdet således at Kasbæk og Egholmbæk ikke medtages i projektområdet.



Figur 7 projektområde (rød streg) og LOOP 1 opland (sort streg)

5 Observationsdata

Ved opstilling af en integreret strømningsmodel er det afgørende at få kalibreret og valideret modellen mod observationer af både grundvandsniveauet og afstrømningen i vandløbet.

5.1 Grundvandsobservationer

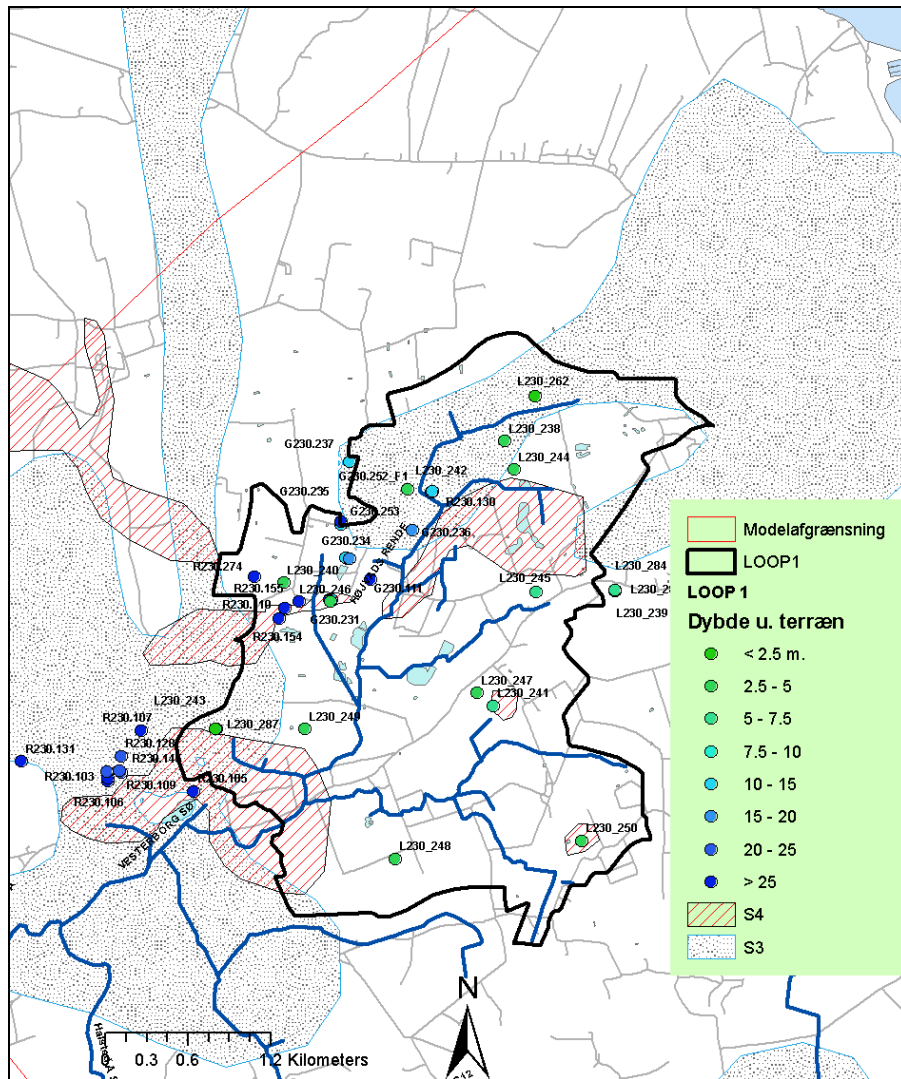
Grundvandsobservationer benyttes til at få valideret grundvandsmodellen. I modelområdet er der 52 grundvandsobservationer, filtersat mellem 2 og 55 meter under terræn. I forhold til opgavens formål, beregning af nitrattransporten i oplandet, er der speciel fokus på at få modellen til at beregne et korrekt strømningsbillede i den øverste del af grundvandszonen.

Tabel 1 viser alle grundvandsobservationer i området, med filterdybde og geologisk formation i filterdybden. Figur 8 viser placeringen af alle grundvandsobservationer, samt udbredelsen af hhv. S3 og S4.

Tabel 1 Grundvandsobservationer i projektområdet

ID	X	Y	Dybde	Lag	Formation
R230.103	645433.0	6082709.0	27.0	4	ML
R230.104S	645432.0	6082726.0	22.5	3	S3
R230.104K	645432.0	6082726.0	46.0	7	SK
R230.105	646057.0	6082631.0	44.1	7	SK
R230.106	645532.0	6082769.0	23.8	3	S3
R230.107	645676.0	6083073.0	25.7	4	ML
R230.109	645517.0	6082783.0	22.8	5	S2
R230.110	646678.0	6083891.0	39.5	5	S2
R230.111	647342.0	6084175.0	38.7	5	S2
R230.112	647044.0	6084030.0	40.5	5	S2
R230.128	645534.0	6082889.0	22.5	3	S3
R230.130	647787.0	6084807.0	26.0	5	S2
R230.131	644807.0	6082849.0	38.5	7	SK
R230.145	645427.0	6082776.0	23.0	3	S3
R230.154	646724.0	6083966.0	36.0	5	S2
R230.155	646824.0	6084014.0	36.0	5	S2
R230.274	646500.0	6084193.0	41.5	5	S2
A236.354	651158.0	6080072.0	32.8	5	S2
G230.111	647342.0	6084175.0	38.7	5	S2
G230.112_F1	647044.0	6084030.0	40.5	5	S2
G230.112_F2	647044.0	6084030.0	27.5	5	S2
G230.130_F1	647787.0	6084807.0	26.0	5	S2
G230.130_F2	647787.0	6084807.0	20.5	3	S3
G230.231	647057.0	6084026.0	12.6	4	ML
G230.233	647181.0	6084326.0	26.5	5	S2
G230.234	647164.0	6084333.0	11.4	3	ML
G230.235	647127.0	6084575.0	11.9	3	S3
G230.236	647645.0	6084533.0	15.5	3	S3
G230.237	647190.0	6085033.0	11.5	1	ML
G230.252_F1	647794.0	6084812.0	45.0	7	SK
G230.252_F2	647794.0	6084812.0	13.5	3	S3
G230.253	647131.0	6084596.0	52.5	7	SK
G230.254_F1	647192.0	6084324.0	44.5	7	SK
G230.254_F2	647192.0	6084324.0	34.5	5	S2
G230.254_F3	647192.0	6084324.0	18.5	5	S2
L230_238	648318.0	6085179.0	4.8	1	ML
L230_239	649121.0	6084088.0	4.7	1	ML
L230_240	646711.0	6084150.0	4.7	1	ML
L230_241	648233.0	6083254.0	5.6	2	ML
L230_242	647613.0	6084828.0	4.7	1	ML
L230_243	646222.0	6083085.0	5.1	1	ML
L230_244	648387.0	6084971.0	3.9	1	ML
L230_245	648550.0	6084085.0	6.6	1	ML
L230_246	647050.0	6084012.0	3.7	1	ML
L230_247	648120.0	6083346.0	4.7	2	ML
L230_248	647526.0	6082141.0	4.7	1	ML
L230_249	646865.0	6083085.0	4.9	1	ML
L230_250	648881.0	6082273.0	4.9	1	S4
L230_262	648541.0	6085508.0	2.1	1	ML
L230_284	649121.0	6084095.0	1.3	1	ML
L230_285	649121.0	6084094.0	5.3	1	ML
L230_287	646217.0	6083084.0	1.4	1	ML

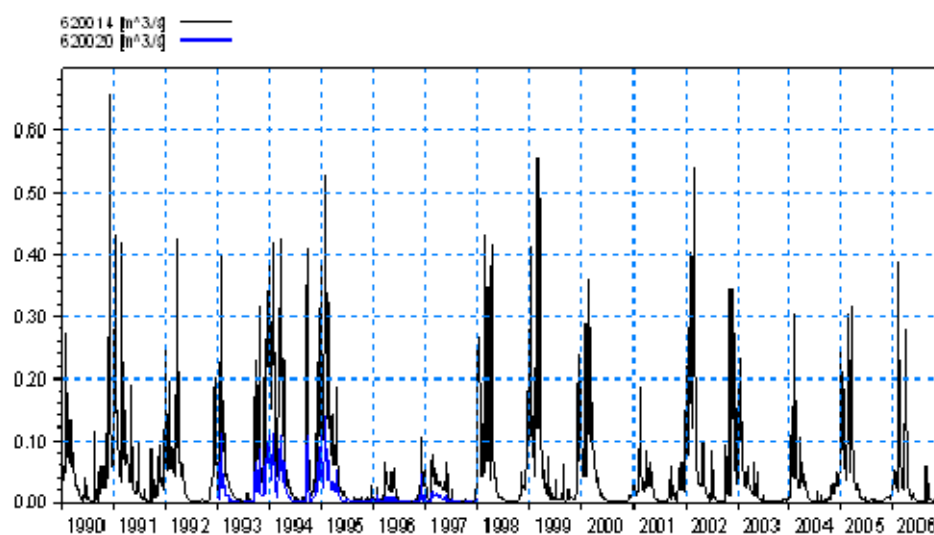
Tabel 1 viser at der kun er en af de overfladenære borer (L230.250) der er filtersat i S4, resten af de overfladenære borer er filtersat i morænen. Under kalibreringen kan det blive vanskeligt at simulere det observerede grundvandspotentiale i disse borer, idet der kan være lokale heterogeniteter i morænen som kan ændre ledningsevnen med flere dekader (sprækker, makroporer, lokale sandindslag m.m.).



Figur 8 Grundvandsobservationer med udbredelse af S3 og S4. Legenden viser filterdybden under terræn.

5.2 Vandløbsobservationer

Der er i modelområdet 3 vandløbsstationer, som alle benyttes ved kalibreringen af vandløbsmodellen (MIKE 11 modellen). Station 620020 er beliggende i den opstrøms del af Højvads Rende, mens station 620014 er lokaliseret, hvor Højvads Rende løber ud af modelområdet, se Figur 9 for afstrømningshydrografer og Figur 10 for placeringen af vandløbsstationerne. Station 620019 er placeret på et tilløb til Højvads Rende. Stationen beskriver afstrømningen fra den sydøstlige del af LOOP oplandet. Station 620014 benyttes til kalibrering af den totale afstrømning fra oplandet, og er meget vigtig i forbindelse med valideringen af den totale vandbalance fra oplandet.

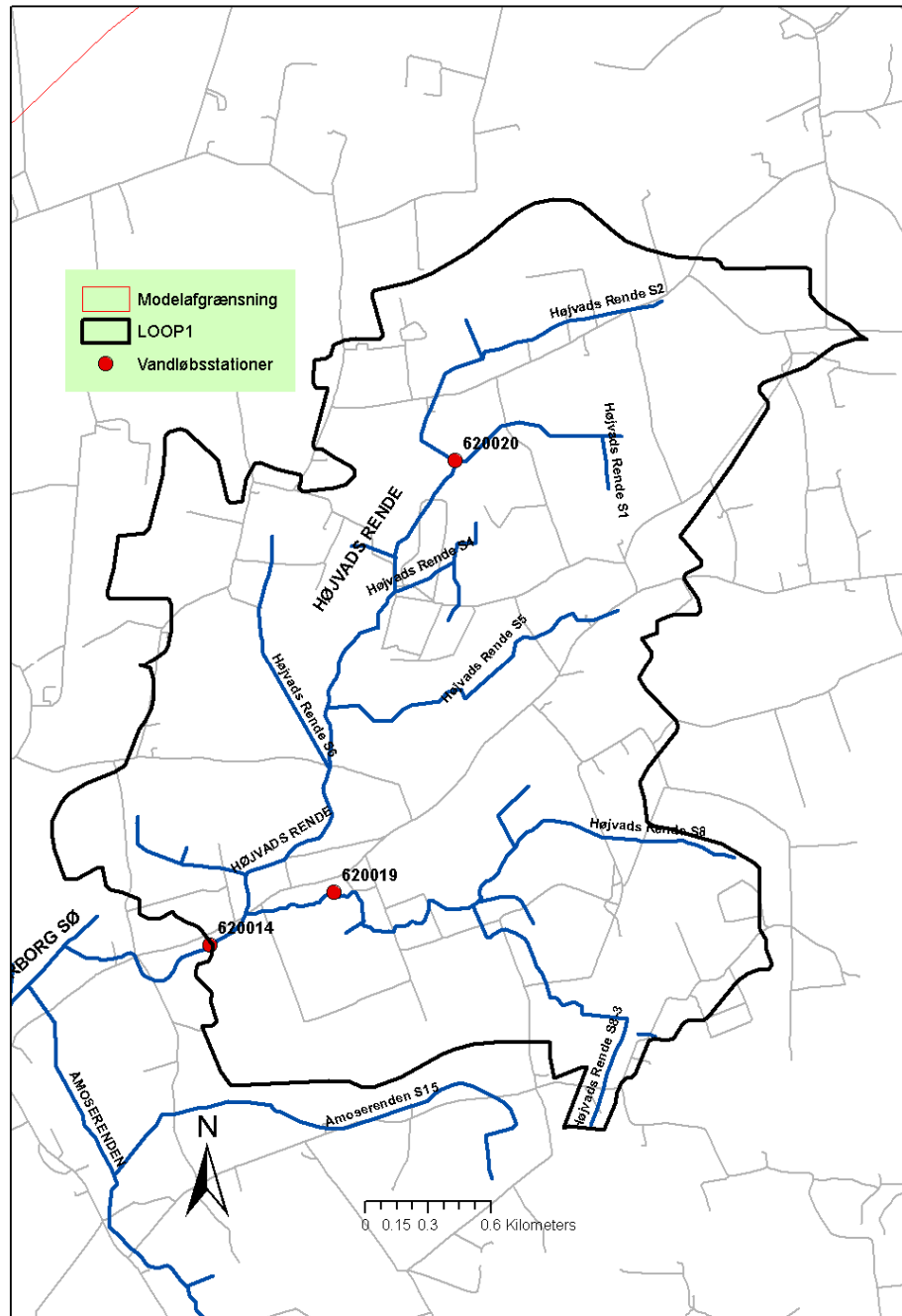


Figur 9 Observerede værdier for vandløbsstationerne

Tabel 2 viser observationsperiode samt statistik for de to vandløbsstationer.

Tabel 2 Statistik for vandløbsobservationer

Station	620020	620014
Periode	1/1-1993 til 31/12-1997	1/1-1989 til 31/12-2006
Obs.	Daglige målinger	Daglige målinger
Max. [l/s]	139	661
Min. [l/s]	0	0.1
Middel [l/s]	13.8	45.1



Figur 10 Vandløbsstationer

5.3 Drænafstrømning

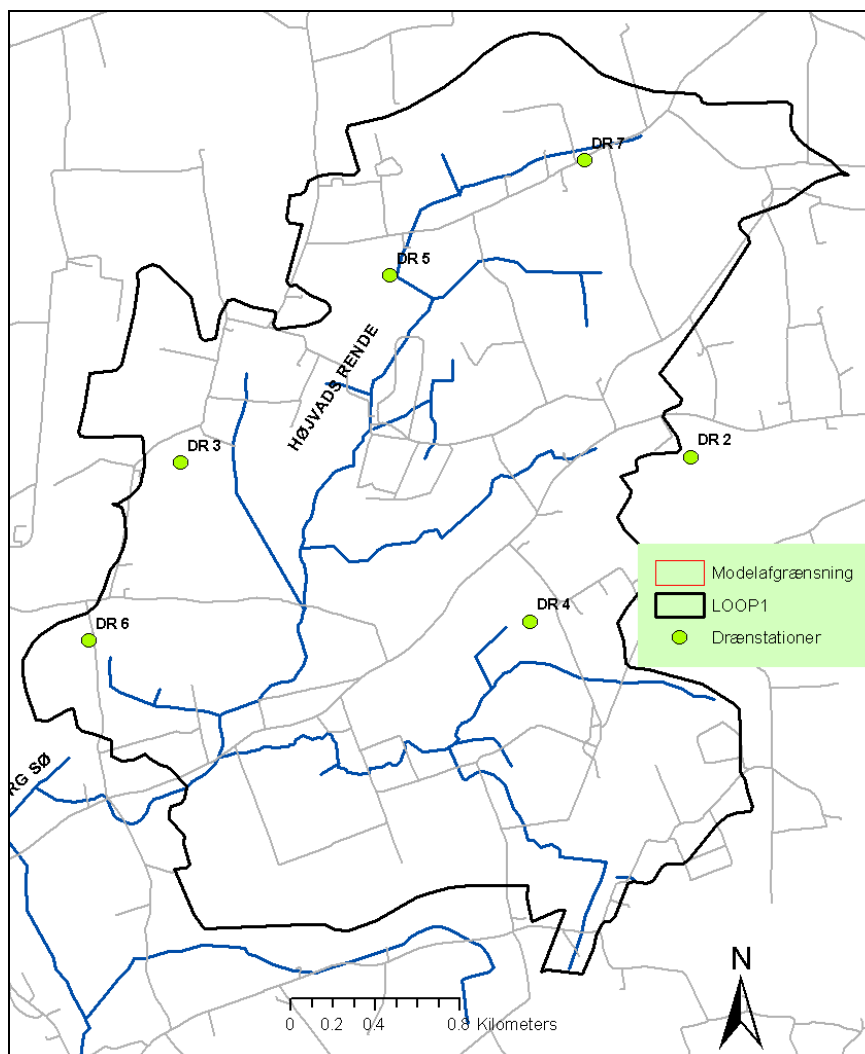
Drænafstrømningen måles ved 6 drænstationer i oplandet, se Figur 11. Der er ved alle stationer målt dagligt siden 1/1-1990. Drænstation 2 og 4 benyttes ikke i kalibreringen, idet station 2 er placeret udenfor oplandet, og der mangler data fra station 4. De øvrige stationer benyttes ved kalibreringen af drænafstrømningen fra

modellen. Observerede værdier for de 4 drænstationer, som benyttes, er vist Tabel 3. Det ses, at den gennemsnitlige afstrømning i drænstationerne er meget lille, men at der under nedbørshændelserne kan forekomme ekstrem hændelser på op til 10 l/s ved stationerne. Det er typisk svært for numeriske modeller at fange så små afstrømningshændelser, og det vurderes at der kan blive brug for detailviden fra de enkelte dræn oplande hvis modellen skal kunne beregne de observerede hændelser korrekt.

Tabel 3 Observerede værdier fra drænstationer

	ST3	ST5	ST6	ST7
Opland [ha.]	5,5	2,5	2,0	4,8
Min. [l/s]	0,0	0,0	0,0	0,0
Max. [l/s]	9,9	3,9	3,2	7,8
Genm. [l/s]	0,23	0,12	0,05	0,08

De observerede værdier fra drænstationerne benyttes til at validere at modellen beregner drænaflowet korrekt. Drænaflowet er vigtigt når nitrattransporten i oplandet skal vurderes, idet drænaflowet typisk vil bidrage med vand der ikke har været igennem nitratreducerende forhold.



Figur 11 Drænstationer

5.3.1 Sammenligning af drænstationer

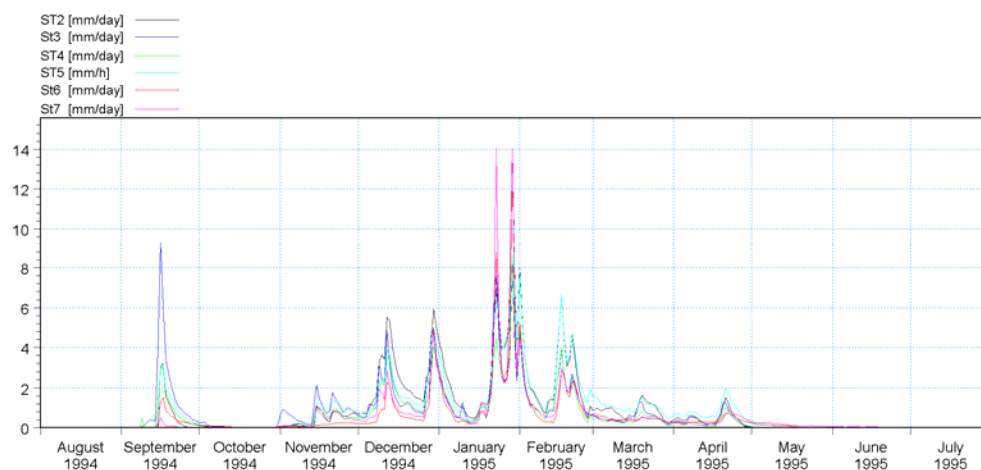
Tabel 4 viser statistiske værdier, i mm/døgn, for de observerede drænaftstrømninger. Det ses at alle stationerne, undtagen station ST4, har en maksimal afstrømning mellem 13,6 og 15,5 mm/d. For station ST4 er den maksimale afstrømning ca. en faktor 2 lavere. Ud fra de tilgængelige oplysninger kan det ikke vurderes hvorfor station 4 har en markant lavere maksimum afstrømning. Det kan skyldes a) fejl i data eller b) at der i drænoilandet sker en større tilbageholdelse fra mindre søer eller depressioner i landskabet. Ud fra den gennemsnitlige afstrømning kan det ses at der er en faktor 2 til forskel mellem station 6 og station 2. Idet den gennemsnitlige afstrømning ikke ser ud til at være korreleret med den maksimale afstrømning, kan fordelingen være et udtryk for områdets drænevne, dvs. hvor effektive dræn-

systemet fungerer, hvilket evt. kan relateres til forskelle i drændybde eller vedligeholdelse af de enkelte drækanaler.

Tabel 4 Observerede værdier fra drænstationer

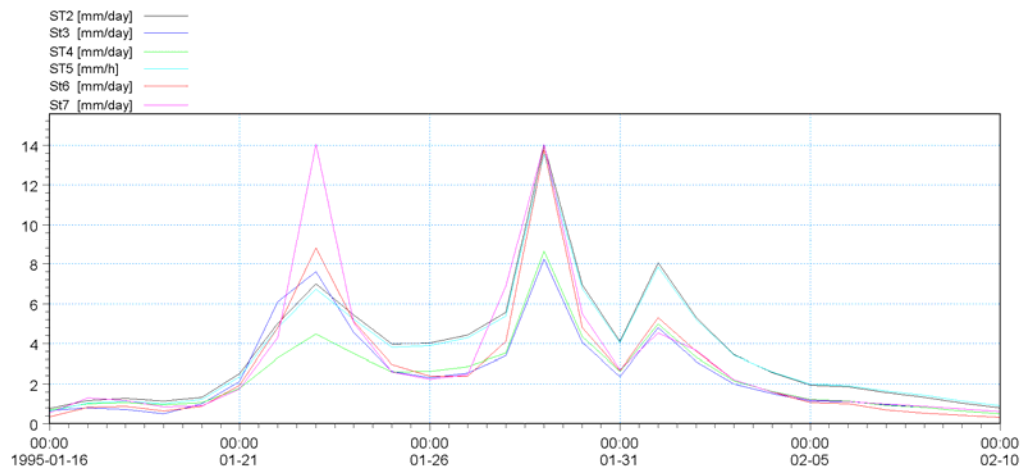
	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7
Min. [mm/d]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max. [mm/d]	14.01	15.53	8.63	13.57	13.79	14.04
Genm. [mm/d]	0.43	0.35	0.29	0.41	0.20	0.21

Figur 12 viser den observerede drænaftømning fra de enkelte stationer for perioden august 1994 til august 1995. Figur 13 viser ligeledes den observerede drænaftømning, men er her kun vist for en kort periode i slutningen af januar 1995.



Figur 12 Observeret drænaftømning i perioden august 1994 til august 1995

Begge figurer viser, at der ikke er nogen observerbar tidsforskydning mellem de enkelte drænstationer. Dette kan skyldes at der kun observeres på daglig niveau, og at mindre tidsforskydninger derfor ikke kommer med på målingerne. Det kan også indikere at afstrømningshændelserne fra de enkelte drænstationer forløber identisk, og at der ikke sker en væsentlig større tilbageholdelse i enkelte drænoplande, sammenlignet med andre.



Figur 13 Observeret drænaflow i perioden 16-01 1995 til 01-02 1995

Ud fra de observerede data for drænaflow, kan der drages følgende kommentarer:

- Station 4 har en noget lavere maksimumafstrømning (i mm/døgn)
- Station 3, 4 og 6 har en markant lavere gennemsnitlig afstrømning.
- Der er ikke korrelation mellem lav maksimal afstrømning og lav gennemsnitlig afstrømning.
- Der kan ikke observeres tidsforskydning på de store afstrømningshændelser ved sammenligning mellem stationerne.

6 Evaluering af klimadata

I forbindelse med dette projekt har DMU beregnet nettonedbør i LOOP 1 området med DAISY /1/. Denne nettonedbør er baseret på aktuelle oplysninger om afgrøder og gødning, målte teksturdata, målte jordfysiske parametre og 10 km² klimagrid (Zone 10472). Beregningerne er anvendt for perioden 1990-2001. I den opstillede regional model for Lolland har DHI /7/ ligeledes benyttet DAISY til beregning af nettonedbøren. Tabel 5 lister nogle af de forskelle, der er i den måde nettonedbøren er beregnet på for hhv. DMU og DHI.

Tabel 5 Sammenligning af Daisy-opstillinger udført af DMU og DHI

Daisy-parameter	DMU	DHI	Kommentar
Horisontal opløsning	50 x 50 meter	500 x 500 meter	
Nedbør	10x10 km grid	Thiesen/isohyeter	Gridnedbør midler nedbør fra flere stationer. Betyder, at ekstremer udviskes og fordampning øges.
Tekstur	Målte værdier ekstrapoleres ud fra jord-arts/klassifikationskort	Jordarts/klassifikationskort og teksturpunkter	Lokale variationer i jordens tekstur medtages ved DMU's beregning. Mulighed for flere horisonter og andre horisontgrænser end i DHI's beregning
Vandretention	Målte værdier. Porositetsbestemmelse ud fra genberegnet volumenvægt, hvor der er taget højde for sammenpresning af jord.	Daisy Ståbi/Hypress	Forskellene i metoderne kan betyde store afvigelser i fordampning/nedsivning ved især mættede forhold.
Hydraulisk ledningsevne	Mættet hydraulisk ledningsevne er genberegnet ud fra ny volumenvægt	Daisy Ståbi/Hypress	Genberegningen ved DMU betyder bedre vandtransport og dermed mindre denitrifikation.
Nedre rand	Drædybde eller trykvand	Fastholdt nedre rand eller drædybde	DMU's grundvandsspejl er kalibreret mod målte værdier i grundvandsrederne.
Logge dybde	I bunden af jordhorisonten over aquitarden	Ved dræn eller lige over grundvandsspejl	Logning ved dræn medfører, at vand, som siver op nedefra, ikke medtages i vandbalancen. Giver vandbalancefejl

Daisy-parameter	DMU	DHI	Kommentar
Sædskifte	Interviewdata (sædskifte, gødning), fra hvert år i hele oplandet på markniveau.	Registerdata på blokniveau.	Anvendelse af gødning varierer lokalt og på markniveau. DMU har indtil 1997 også inddraget eksakte oplysninger om afgræsning.
Afgrødekali-brering	Valideret på målt høst. Afgrødekali-brering er foretaget ens for alle LOOP-områder	Individuelt afgrødekali-brering.	Specielle afgrødeforhold på Lolland kan ikke medtages i DMU's data fordi f.eks. alle vinterhvede i LOOP-regi opstilles ens

6.1 Klimadata for projektområdet

Den af DMU beregnede nettonedbør er kun opstillet for selve LOOP1 oplandet (oplandet vist med sort streg på Figur 11). Det betyder at det har været nødvendigt at benytte begge datakilder ved opstilling af nettonedbør for hele projektområdet, da projektområdet er defineret ud over LOOP1 oplandet. Det er valgt at benytte den af DMU beregnede nettonedbør i Loop1 oplandet, og udenfor området er der suppleret med de af DHI beregnede værdier for nettonedbøren. Det betyder at der i selve LOOP1 oplandet er en nettonedbør med en horisontal opløsning på 50 x 50 meter, mens der i resten af området benyttes DHI data med en opløsning på 500 x 500 meter. Data filen med den samlede nettonedbør er udarbejdet ved at udvikle en lille rutine der kopierer nettonedbøren fra det grove DHI net over i det finere DMU net. Resultatet er at der udenfor LOOP1 området, er den samme nettonedbør i 10 x 10 50 meter celler, svarende til den grovere opløsning på 500 x 500 meter som blev benyttet i DHI beregningerne. I processen med kopieringen af de grovere DHI data over i det finere net, er der ikke foretaget nogen justering af data, dvs. at den af DHI beregnede nettonedbør benyttes direkte i alle områder udenfor LOOP1 oplandet.

I forbindelse med udarbejdelsen af nettonedbørsdata for hele projektområdet er der foretaget en sammenligning af de to datakilder. Tabel 6 viser en sammenligning mellem den af DHI og DMU udregnede nettonedbør for LOOP oplandet. I tabellen er også vist den årlige afstrømning, målt fra station 622014. Det kan være problematisk at sammenligne akkumulerede værdier for afstrømning og nettonedbør, da transporttiden i et opland kan være så stor at vand der infiltrerer i et år, ikke nødvendigvis medvirker til afstrømningen i det samme år. For LOOP1 oplandet vurderes det dog, at den relativt tætte moræne medfører at langt størstedelen af nettonedbøren vil strømme til vandløbet relativt hurtigt, og der bør derfor være en rime-

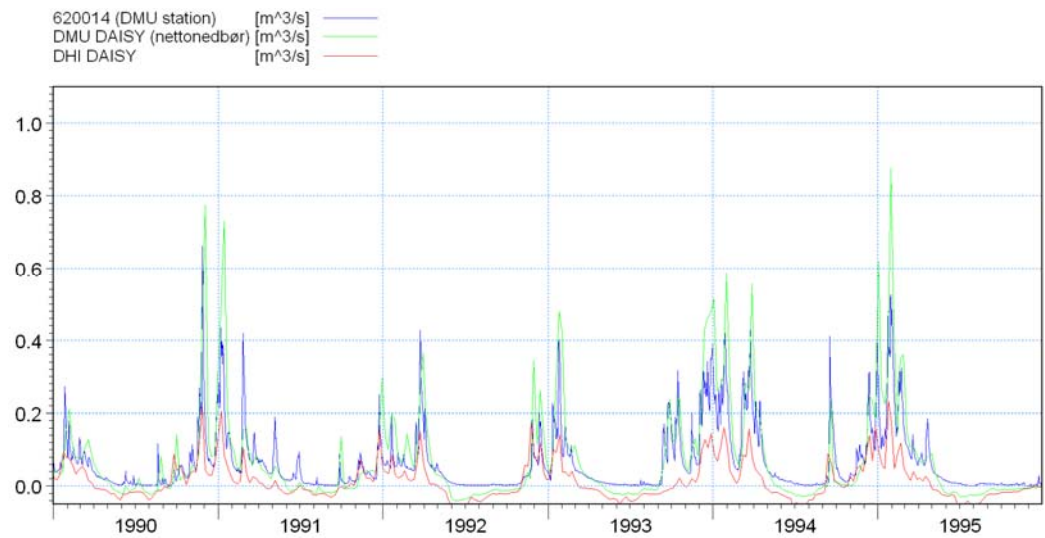
lig overensstemmelse mellem den akkumulerede afstrømning og akkumulerede nettonedbør. Som udgangspunkt bør den akkumulerede nettonedbør også være større end den akkumulerede afstrømning fra oplandet (da der vil ske en vis perkolation til de dybere magasiner (S3, S2 og kalken)).

Tabel 6 Sammenligning mellem de forskellige datakilder

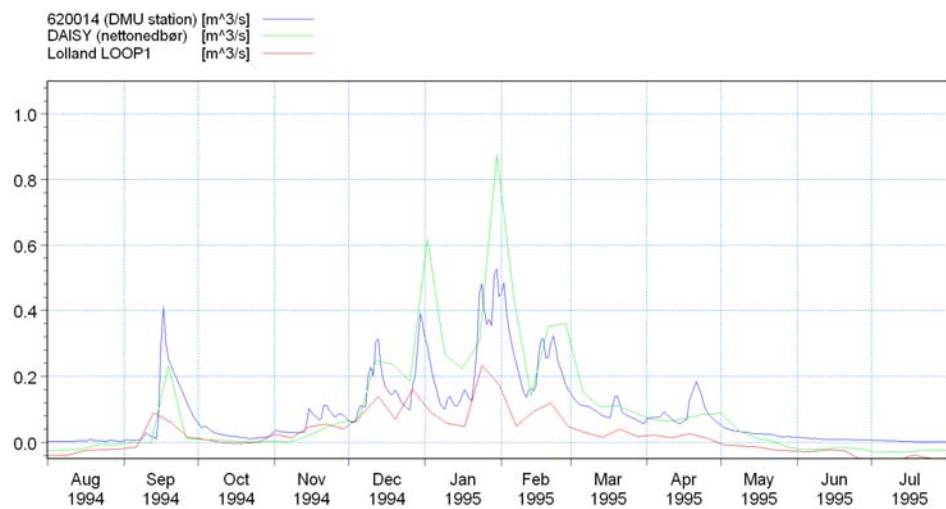
	<i>LOOP model Udenfor DHI</i>	<i>LOOP DHI</i>	<i>LOOP DMU</i>	<i>Vandløb Afstrømning</i>
	<i>mm/år</i>	<i>mm/år</i>	<i>mm/år</i>	<i>mm/år</i>
1990	206	199	212	167
1991	164	165	199	189
1992	119	97	172	141
1993	100	70	312	235
1994	237	268	331	308
1995	118	66	220	196
1996	-6	-60	23	48
1997	-31	-69	50	47
1998	172	215	239	179
1999	238	231	258	186
2000	115	50	153	121
2001	124	74	140	79
2002			349	235

I Tabel 6 er de år, hvor der kan observeres en markant forskel mellem de af DHI og DMU beregnede værdier for nettonedbør, markeret med gråt. Det ses at der i alle fire tilfælde er beregnet markant lavere værdier med DHI's nettonedbør, og at den beregnede nettonedbør er markant lavere end den akkumulerede afstrømning fra oplandet. Generelt er nettonedbøren beregnet af DMU lidt højere end den akkumulerede afstrømning, hvilket den også bør være da forskellen er udtryk for det tab der sker ved hhv. magasin ændringer, perkolation til dybere lag samt evt. strømning over oplandsgrænsen.

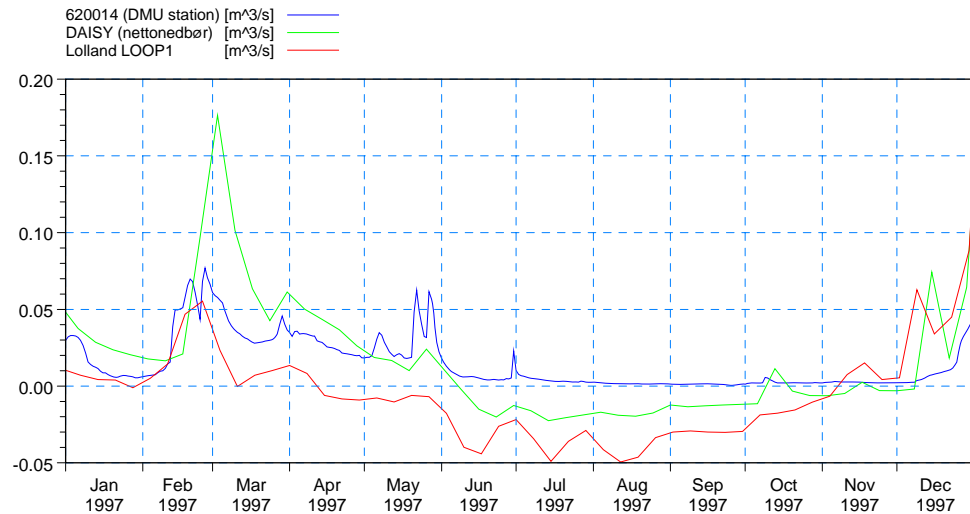
- Figur 14, Figur 15 og Figur 16 viser en sammenligning af nettonedbør (DHI og DMU) med målt afstrømning fra station 622014. Denne sammenligning er interessant idet den viser at der er meget lille tidsforskel mellem nettonedbøren og den målte afstrømning fra oplandet. Dette indikerer at største delen af nettonedbøren strømmer hurtigt til vandløbene.



Figur 14 Sammenligning af nettonedbør (DHI – rød streg og DMU – grøn streg) med målt afstrømning fra LOOP oplandet, blå streg (1990 til 1995)

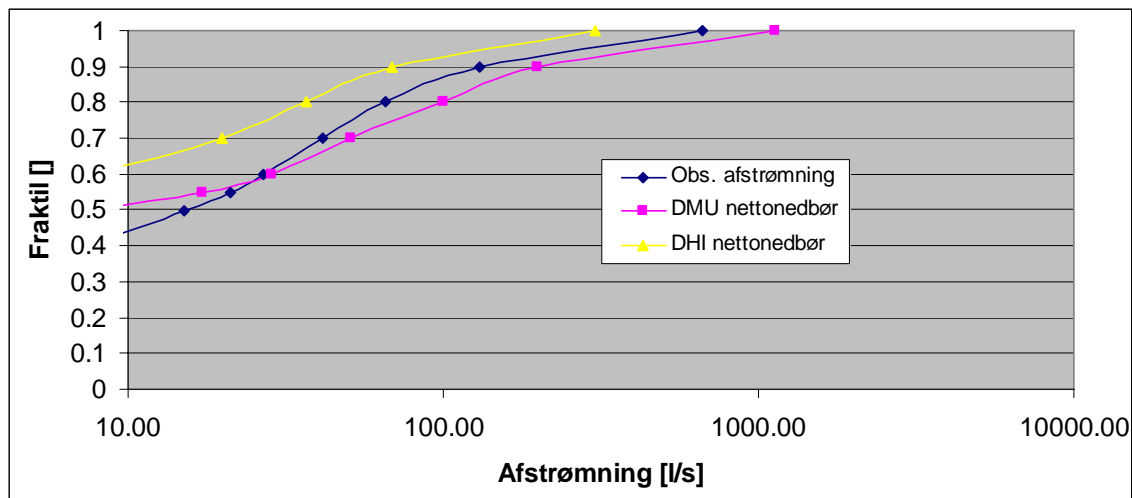


Figur 15 Sammenligning af nettonedbør (DHI og DMU) med målt afstrømning fra LOOP oplandet (august 1994 til august 1995)



Figur 16 Sammenligning af nettonedbør (DHI og DMU) med målt afstrømning fra LOOP oplandet (1997). Bemærk forskelle ved sommervandføringen

Ved sammenligningen af nettonedbøren fra hhv. DMU og DHI skal det noteres, at der er store forskelle i den måde DAISY modellen er opsat på, og det kan derfor være svært at lave en direkte sammenligning af de to datasæt. Ved valideringen af den nettonedbør der benyttes i LOOP 1 modellen kan det konstateres at der er en rimelig god overensstemmelse mellem den observerede afstrømning fra oplandet og den beregnede nettonedbør. Formålet med nærværende projekt er at belyse de processer der sker ved nitrattransporten i oplandet. I denne forbindelse er det vigtigt at den benyttede nettonedbør har en fornuftig fordeling af de store afstrømningshændelser. Ud fra figurerne (Figur 14, Figur 15, og Figur 16) kan det konstateres at der er en god visuel overensstemmelse mellem de store afstrømningshændelser, hvis der foretages en sammenligning af afstrømningshydrografen og den beregnede nettonedbør. De store afstrømningshændelser vil typisk foregå i vinterperioden, og drænastrømningen vil være det dominerende led. Under disse forhold vil størsteparten af det udstrømmende vand komme fra ureducerede forhold, dvs. at den nitrat der strømmer til vandløbet i denne periode, primært vil komme direkte fra rodzonen, og ikke have været igennem reducerede forhold under transporten. Det er derfor vigtigt at modellen har en god repræsentation af disse hændelser.



Figur 17 Varighedskurve (for afstrømningshændelser større end 10 l/s)

Figur 17 viser varighedskurver for hhv. afstrømningshydrografen for station 620014, den af DMU beregnede nettonedbør, samt den af DHI beregnede nettonedbør. Varighedskurven er kun vist for afstrømningshændelser større end 10 l/s, idet de i større grad repræsenterer drænastrømningen fra oplandet. Ved disse hændelser er det relevant at sammenligne nettonedbør og afstrømning, idet der ikke forventes den store tidlige forskydning mellem nettonedbøren og afstrømningen ved disse hændelser. Det ses af figuren, at den af DMU beregnede nettonedbør har en klart bedre repræsentation af de store hændelser. Dog ses det at afstrømningshændelser større end ca. 30 l/s har en større repræsentation i den beregnede nettonedbør (DMU data) end ved den observerede afstrømning. Dette kan være i orden da der, sandsynligvis vil ske en vis tilbageholdelse og tab af vand, selv ved de store afstrømningshændelser. Den af DHI beregnede nettonedbør har en underrepræsentation af de store afstrømningshændelser. Dette kan kun forklares ved de klimadata som er benyttet som input til DAISY beregningerne. Som opsummering kan det konstateres at den af DMU beregnede nettonedbør har en god overensstemmelse med den observerede afstrømning.

Som udgangspunkt er der en god overensstemmelse mellem den beregnede nettonedbør og afstrømningen, men følgende punkter kan bemærkes:

- Der er god tidlig overensstemmelse mellem ekstreme værdier i hhv. nettonedbør og afstrømning (hurtigt respons i systemet)
- De ekstreme værdier i nettonedbøren er generelt lidt højere end afstrømningsværdierne (noget af vandet strømmer til grundvandet)
- Der er i nettonedbøren en god repræsentation af de større afstrømningshændelser (større end 10 l/s)

- I sommerperioden er nedbørshændelserne underestimeret i nettonedbøren, se evt. Figur 16.

Den af DMU beregnede nettonedbør har generelt en bedre overensstemmelse med de observerede afstrømningsmålinger.

6.2 Sammenligning af klimadata

Ved beregningerne af nettonedbør udført af hhv. DHI og DMU er der anvendt forskellig jord, arealanvendelse og klima. En undersøgelse af klima er derfor påvirket af de to andre faktorer. De væsentligste forskelle i anvendelse og beregning af klimadata er, at DHI har anvendt Thiessen-polygoner fra klimadata baseret på målestationer, mens DMU har anvendt gridbaserede data som er midlede for flere stationer. Forskellene vil især kunne ses på vandløbsafstrømning om vinteren, hvor enkelthændelser i forbindelse med nedbør kan medføre større peaks med stationsnedbør end grid-nedbør fordi fordampningen på dette tidspunkt er minimal. Figur 17 viser, at de langt bedre nettonedbørsestimater fra DMU i forhold til vandløbsafstrømning overskygger en eventuel midling af nedbørshændelser. En specifik vurdering af nedbørens betydning kan foretages, hvis DAISY-modellerne opstilles med DHI's nedbørszoner. På den måde vil betydningen af arealanvendelse, jord og andre model-parametre ikke influere på nettonedbøren.

7 Numeriske modelværktøjer

I nærværende opgave er det valgt at benytte den integrerede grundvands- og vandløbsmodel, MIKE SHE – MIKE 11, da den indeholder de komponenter, som er påkrævet for at opfylde den konceptuelle strømningssmodel, dvs. en detaljeret grundvandskomponent, beskrivelse af de overfladenære strømningsskomponenter (dræn og overfladisk afstrømning), vandløbsafstrømning og en fysisk baseret udveksling mellem grundvand og vandløb/vådområder.

7.1 Grundvandsmodel – MIKE SHE

MIKE SHE modellen er karakteriseret som en fysisk baseret, distribueret og integreret grundvandsmodel. MIKE SHE-modellen er opbygget i komponenter, som hver beskriver de enkelte dele i det hydrologiske kredsløb. De enkelte komponenter kan slås fra og til, hvilket gør, at modellen er anvendelig til simulering af et bredt spektrum af opgaver. I nærværende opgave beregner MIKE SHE både overflade- og grundvandsbaserede processer. MIKE SHE-modellen indeholder en beskrivelse af strømning på overfladen (eng og vådområder) samt strømning i den mættede zone. I den mættede zone er randbetingelserne hhv. den beregnede nettonedbør samt tidsvarierende trykkniveaubetingelser ved modelranden.

7.2 Vandløbsmodel – MIKE 11

MIKE 11 er karakteriseret som en fysisk baseret én-dimensional hydraulisk model til beskrivelse af de hydrodynamiske forhold i å og vandløbssystemer. I nærværende opgave beskriver MIKE 11-modellen vandstande og afstrømninger i samtlige større vandløb og søer i området. De mindre kanaler er konceptuelt beskrevet ved brug af dræningsmodulet i MIKE SHE, dette er et simpelt modul, der fjerner vand fra grundvandszonen, når grundvandsniveauet er højere end et specificeret niveau. Mængden af vand der fjernes, beregnes på beregningscelleniveau og beregnes som forskellen mellem grundvands- og drænniveauet multipliceret med en tidskonstant. I nærværende opgave er dræningsmodulet benyttet på de drænedede landbrugsarealer samt i de grøftedrænedede skovarealer.

7.3 Kobling af grundvands- og vandløbsmodel

Den integrerede MIKE SHE – MIKE 11-model er udviklet til at medtage fuld udnyttelse af MIKE 11's muligheder for at beskrive de hydrodynamiske for-

hold i vandløbssystemer. En fuld kobling mellem de to modeller er udviklet, hvor simuleringen foregår simultant i de to modeller. De beregnede vandstande i vandløb bliver i hvert tidsskridt overført til MIKE SHE, og på baggrund af disse samt oversvømmelser og grundvandsstand beregner MIKE SHE vandudvekslingen mellem overfladevand og grundvand. Der udveksles vand mellem de to modeller svarende til i) interaktion mellem overfladevand og grundvand, ii) dræntilstrømning til vandløbene og iii) overfladisk afstrømning til vandløbene eller oversvømmelse fra vandløbene til de omkringliggende områder.

8 Opstilling af strømningssmodel

Der eksisterer allerede en strømningssmodel for et 1200 km² stort område, hvori LOOP 1 udgør et delområde, se /3/. Modellen består af en grundvandsmodel (MIKE SHE) og en vandløbsmodel (MIKE 11). Modellen er en dynamisk model opstillet i et 100 x 100 meter net. Til brug for LOOP 1 opstilles modellen i et 50 x 50 meter net. Der skal i forhold til den eksisterende model foretages en relevant afgrænsning, opdatering og præcisering til brug for området ved LOOP 1.

Ved opsætningen af strømningssmodellen for LOOP 1 området tages der udgangspunkt i den allerede opstillede model, se /3/. Da modellen for LOOP 1 opstilles i et finere beregningsnet, og da opgavens formål desuden er et andet end for den regionale model, vil der i alle modellens moduler blive foretaget ændringer, således at det opstillede værktøj opstilles i forhold til opgavens formål og den opstillede konceptuelle model.

8.1 Modelområde og randbetingelser

Modelområdet er udvalgt således at der kan opstilles validerede randbetingelser, og samtidig har fokus været på at få rykket randbetingelserne så langt væk fra selve fokusområdet (LOOP 1 oplandet) at evt. usikkerheder på randbetingelserne ikke påvirker strømmingen i selve oplandet. Definitionen af modelområdet er beskrevet yderligere i afsnit 4. Det er valgt at benytte den allerede opstillede regionalmodel som randbetingelse. Det betyder at der i hvert tidsskridt overføres et grundvandspotentiale fra den regionale model til LOOP 1 modellen, dette sker kun for celler ved modelranden. Det betyder at grundvandspotentialet langs modelranden til hvert tidsskridt følger det kalibrerede grundvandspotentiale fra regionalmodellen /3/. For at medtage udvekslingen mellem ferskvand og saltvand ved kystzonen, er det valgt at benytte et fastholdt trykniveau (i kote 0) i de øverste 4 beregningslag. I de dybere beregningslag indlægges en "ikke-strømningss" randbetingelse. Disse randbetingelser indlægges som interne randbetingelser, idet modelområdet er trukket et stykke ud fra kysten.



Figur 18 Modelområde (rød streg) og LOOP1 oplandsgrænse (sort streg)

8.2 Beregningslag

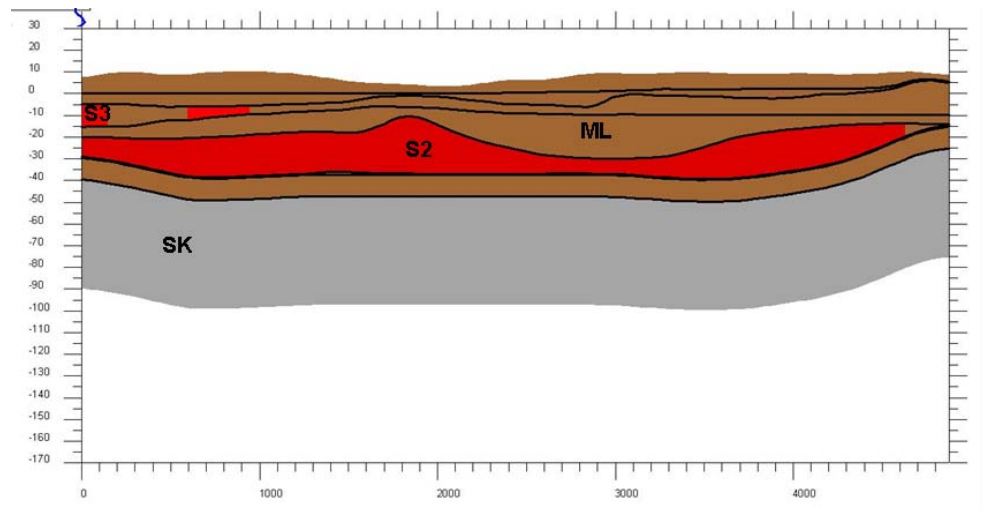
Beregningslagene i modellen er initialt etableret ud fra samme fremgangsmetode, som benyttet ved opstillingen af den regionale model for Lolland, se /3/. I den endelige strømningsmodel bliver de to øverste beregningslag muligvis modificeret således at der etableres to beregningslag over reduktionsfronten. Dette gøres for at få en bedre opløsning af strømmingen over reduktionsfronten.

Der er etableret 8 beregningslag, og alle beregningslagene er konstrueret således, at der kan udtrækkes vandbalancer for de enkelte magasiner. Alle magasinerne er inkluderet i et beregningslag med undtagelse af S3, hvor der er indfald af S3 i lag 4 (S3 ligger primært i lag 3). **Fejl! Henvissningskilde ikke fundet.** viser en oversigt og beskrivelse af beregningslagene.

Tabel 7 Beskrivelse af beregningslag

Lag	Geologisk enhed	Kommentar
1	S4	Indeholder bund af S4 Indeholder drænniveauet (min. 1 meter tykt) Lag 1 top: terræn Lag 1 bund: bund af S4 eller drænniveau
2	ML	Moræne Lag 2 top: defineres af lag 1 bund Lag 2 bund: defineres af lag 3 top (dog skal min. tykkelse på 0,5 meter overholdes)
3	S3	Lag 3 top: <ul style="list-style-type: none"> Følger top af S3 i hele udbredelsen Hvis S3 ikke er til stede justeres laget så minimumstykkelsen overholdes (for både lag 2, 3 og 4). Lag 3 bund: <ul style="list-style-type: none"> Følger bund af S3 i hele udbredelsen Hvis S3 ikke er til stede justeres laget så minimumstykkelsen overholdes (for både lag 2, 3 og 4). Mindre områder hvor bund af S3 går ned i lag 4.
4	ML	Moræne, med indslag af S3 Top og bund af lag 4 justeres i forhold til overholdelse af minimumstykkelsen af lag 5 og lag 3.
5	S2	Lag 5 top: <ul style="list-style-type: none"> Indeholder top af S2. Hvis S2 ikke er til stede justeres laget så minimumstykkelsen overholdes (for lag 4, 5 og 6) Lag 5 bund: <ul style="list-style-type: none"> Indeholder bund af S2. Hvis S2 ikke er til stede justeres laget så minimumstykkelsen overholdes (for lag 4, 5 og 6) Indslag af S3 i laget (da minimumstykkelsen ellers ikke bliver overholdt for alle lag).
6	ML	Moræne, med indslag af S3 og S2. Top og bund af lag 6 justeres i forhold til overholdelse af minimumstykkelsen af lag 5 og lag 6.
7	SK, BK og S1	Lag 7 top: <ul style="list-style-type: none"> Følger oversiden af SK Der, hvor BK ligger ovenpå SK, følger laget top af BK Der, hvor S1 ligger ovenpå SK, følger laget top af S1 Hvis SK er under kote -75 trækkes laget op i kote -75 (dvs. at PL her kan optræde i laget) Lag 7 bund: <ul style="list-style-type: none"> Lag 7 er min. 10 meter tykt Hvis mægtigheden af BK er mindre end 10 meter trækkes bunden af laget ned i kalken så minimumstykkelsen på 10 meter overholdes. Hvis mægtigheden af S1 er mere end 10 meter trækkes bunden af laget ned til bund af S1.
8	SK	Lag 8 har en konstant mægtighed på 50 meter.

Figur 19 viser et eksempel på et geologisk tværsnit gennem LOOP 1 oplandet (fra vest til øst). De sorte streger viser beregningslagene i modellen, og det ses at de er defineret ud fra de forskellige geologiske formationer. Således er S2 og S3 så vidt muligt placeret i det samme beregningslag (hhv. S2 i lag 5 og S3 i lag 3).

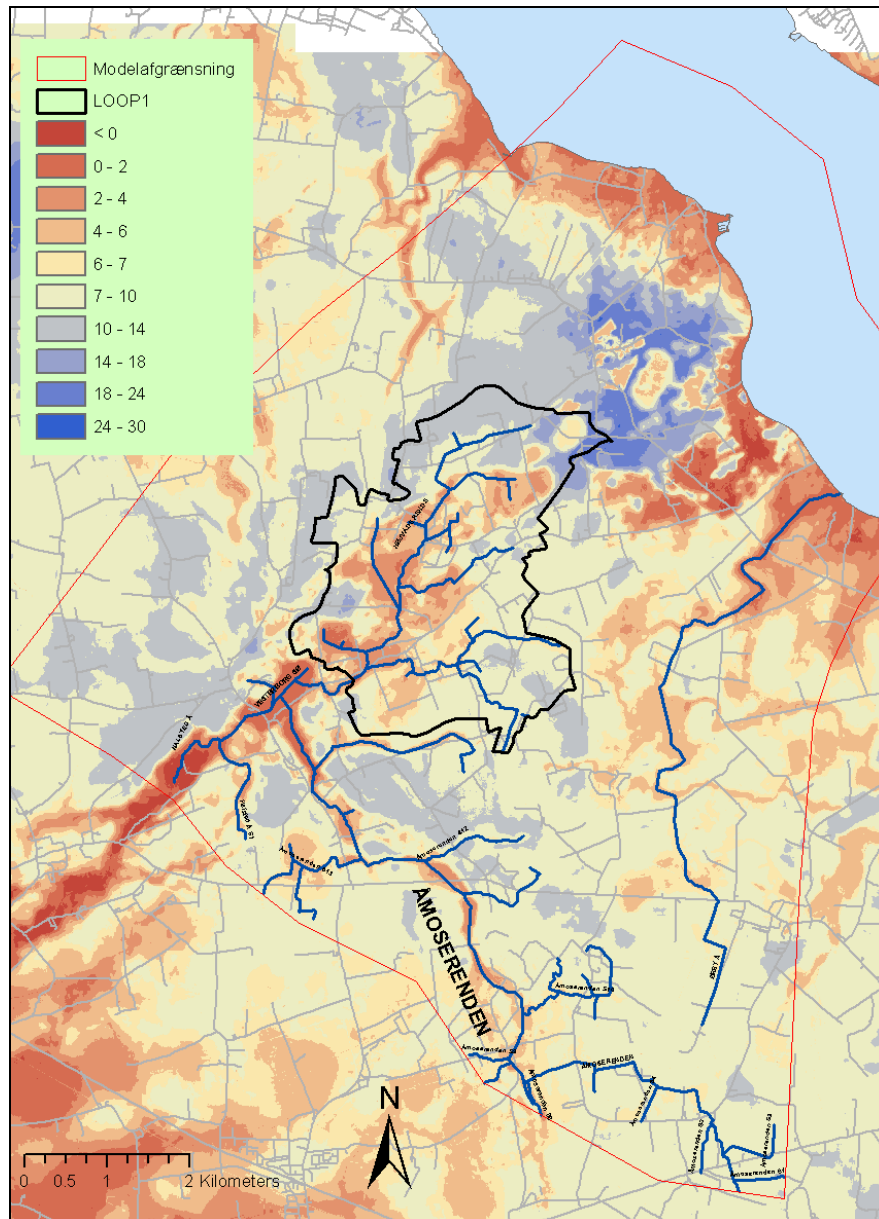


Figur 19 Eksempel på geologisk tværsnit gennem LOOP 1 oplandet. De sorte streger viser beregningslag

8.3 Topografi

Der er i forbindelse med projektet indhentet de nyeste laser opmålte terræn data fra KMS. Disse data indeholder flere målepunkter per m², og er meget brugbare i forbindelse med verificeringen af lavbundsområder samt vandløbs placering. Data er leveret fra KMS som et stort punkttema med ca. 50 millioner punkter. Dette er ikke operationelt i en numerisk model, og det leverede punkttema blev derfor interpoleret ud i en gridflade med en opløsning på 5 meter. Interpoleringen blev foretaget med en simpelt IDW metode (med 5 meters søgeradius). Der er efterfølgende foretaget en kvalitets kontrol af de benyttede data, ved en sammenligning mellem den oprindelige topografi og den laser opmålte fra KMS. Der blev i nogle områder fundet mindre forskelle, men de vurderes at kunne henføres til den større detaljeringsgrad der er i de nyeste data. Det vurderes derfor at de benyttede data giver den bedste beskrivelse af terræn i projektområdet.

Figur 20 viser den benyttede topografi (DEM) med 5 meters opløsning som benyttes for modelområdet. Data har en så god detaljeringsgrad at placeringen af vandløbene kan aflæses fra filen.



Figur 20 DEM for modelområdet med 5 meters opløsning

8.4 Klima og nettonedbør

Den numeriske model opstilles som en grundvands-vandløbsmodel hvor nettonedbøren gives som et separat input. Nettonedbøren fungerer dermed som en øvre randbetingelse til modellen. Beregningerne af nettonedbøren er foretaget med DAISY, og er beskrevet i flere detaljer i afsnit 6 samt i /1/.

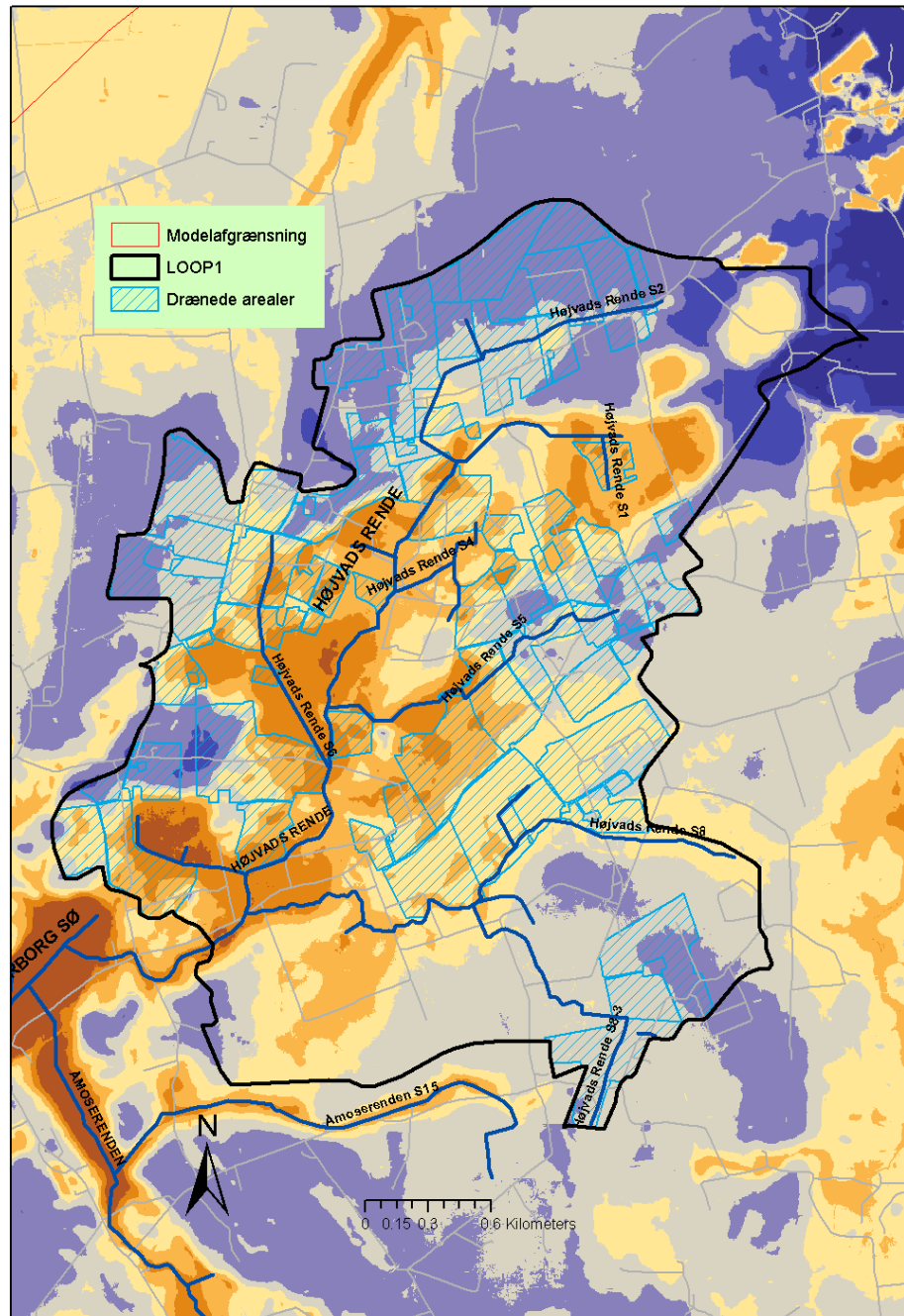
I forbindelse med projektet er der foretaget en detaljeret nettonedbørsberegning for selve LOOP 1 oplandet. Da modelområdet er udvidet ud over selve oplandet, har

det været nødvendigt at benytte nettonedbøren fra den regionale Lolland-model, for alle områder udenfor selve LOOP 1 oplandet. Det er aldrig optimalt at benytte nettonedbør beregnet til forskellige formål, men i dette tilfælde vurderes det at være i orden, da den detaljerede nettonedbør benyttes i selve fokusområdet. I afsnit 6 er der foretaget en sammenligning af hhv. nettonedbøren for LOOP 1 (beregnet af DMU) samt af nettonedbøren beregnet for hele Lolland (beregnet af DHI).

8.5 Dræn

Ved opstillingen af modellen er det vigtigt at få en korrekt beskrivelse af de drænedede arealer. De arealer, der forventes at være drænedede, er vist på Figur 21. Dræningen af landbrugsarealer i oplandet foregår enten via rør eller via mindre grøfter. I det omfang at grøfterne har en størrelse så de kan inkluderes i vandløbsmodellen er dette gjort (se afsnit 8.8 for opstillingen af vandløbsmodellen). I de tilfælde hvor placeringen af dræn ikke kendes, eller hvor de er af en sådan størrelse at de ikke kan håndteres i vandløbsmodellen, er dræningen beskrevet ved brug af dræningsmodulet i MIKE SHE modellen. I modellen er dræn defineret således at vandet ledes til den nærmeste vandløbsgren. I områderne udenfor LOOP 1 oplandet ledes drænafstrømningen til modelranden og ud af modellen. Dette er valgt da vandløbsopsætningen udenfor LOOP 1 oplandet er forsimplet.

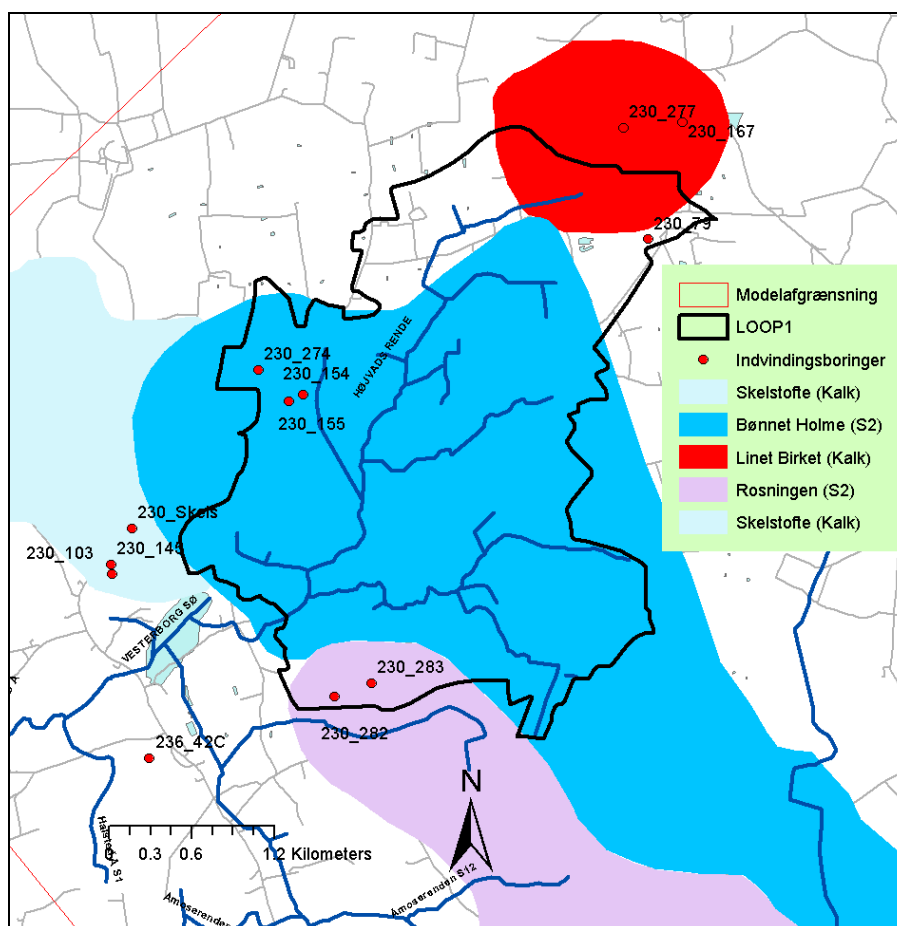
Drænafstrømningen i modellen styres af forskellen mellem den specificerede drændybde og grundvandsniveauet, således at en tidsafhængig dræning af vandet sker, når grundvandspotentiallet overstiger drænniveauet. Drænafstrømningen beregnes som forskellen mellem drænniveau og grundvandspotentialt multipliceret med en dræntidskonstant. Dræntidskonstanten specificerer hvor hurtigt drænene skal bortlede vandet, eller hvor effektivt drænsystemet fungerer. Dræntidskonstanten er en af de vigtige kalibreringsparametre ved kalibrering mod afstrømningshydrograferne, idet den er følsom overfor hvordan ekstremhændelserne i vandføringen er beskrevet. Dvs. hvis ekstrem hændelserne (i afstrømningshydrografen) er meget stejle, tyder dette på en hurtig respons fra vandet infiltrerer til det havner i vandløbet. Dette kan i modellen styres ved at bruge en tilsvarende høj dræntidskonstant (hvor enheden er s^{-1}).



Figur 21 Drænede arealer i LOOP 1 oplandet (topografi samt vandløb er vist i baggrunden)

8.6 Indvinding

Alle større indvindinger i LOOP 1 oplandet er medtaget i modellen. Figur 22 viser indvindingerne i oplandet samt de modelberegnede indvindingsoplande (beregnet med den regionale Lolland model /5/). Det ses at de dybere magasiner er påvirket af indvindingen fra primært Bønnet Holme og Rosningen vandværk. Indvindingerne til disse vandværker er filtersat i S2 formationen. I den nordlige del af oplandet er der nogen påvirkning fra Lindet og Birket vandværk (som begge er filtersat i kalken).



Figur 22 LOOP 1 opland med indvindingsboringer samt indvindingsoplande beregnet med den regionale Lolland model

Tabel 8 viser den årlige indvinding fra de største vandværker i LOOP 1 oplandet.

Tabel 8 Indvindingsmængder i LOOP 1 oplandet

År	Lindet m3/år	Birket m3/år	Bønnet Holme m3/år	Rosn- gen m3/år	Skelstof- te m3/år
1980	13393	38200	302655	0	359918
1981	14000	39400	292318	0	367427
1982	14918	41400	293108	0	447815
1983	17771	48000	299644	0	479759
1984	22305	46400	285109	0	483319
1985	27378	49500	298051	0	488857
1986	27146	48300	276861	0	501693
1987	27916	48000	273223	0	497246
1988	28840	47400	301591	0	474760
1989	28840	49400	215632	0	452896
1990	29650	47000	190368	0	453092
1991	23374	43000	227100	0	419283
1992	31839	48600	237841	0	373636
1993	28933	48000	234520	0	382542
1994	27937	39800	297278	0	430641
1995	18135	37352	286261	0	495407
1996	13109	28470	410738	0	346542
1997	11250	28470	507747	0	257149
1998	0	39320	529969	0	250949
1999	11250	28447	474705	0	319748
2000	11250	22624	488187	0	283100
2001	12933	16026	382008	30940	342736

8.7 Geologisk model

Den overordnede geologiske model er udtrykt direkte fra den regionale model for Lolland, se /5/ for detaljeret beskrivelse.

8.7.1 Hydrogeologiske parametre

Ved opstillingen af grundvandsmodellen er der for de hydrogeologiske parametre benyttet de samme værdier som i den regionale model for Lolland.

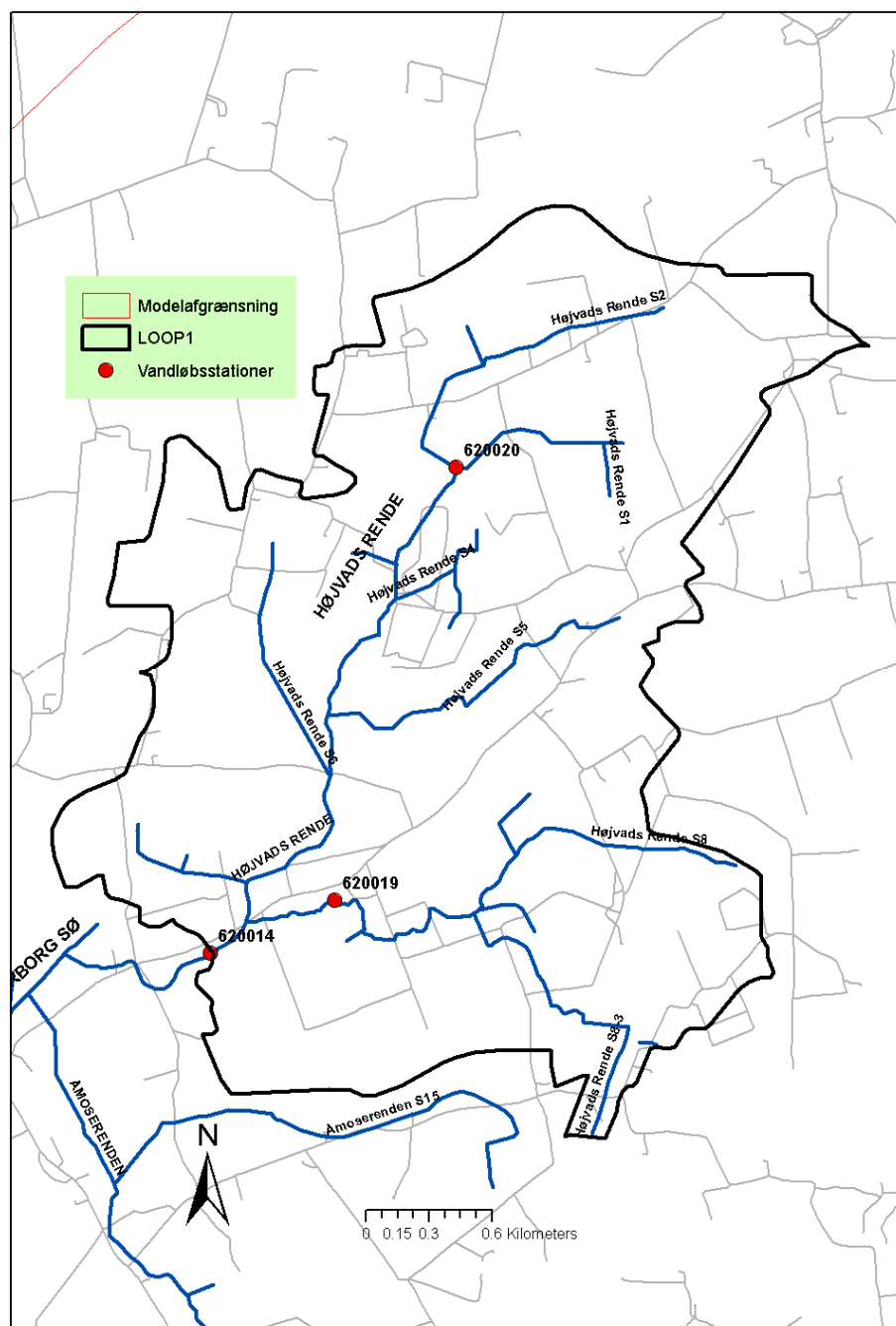
Tabel 9 Parameterværdier i kalibreret regional model

Parameter	Betegnelse	Kh (m/s)	Kv (m/s)
Moræneler – oxideret*	ML-ox	5.06E-08	5.06E-08
Moræneler	ML	5.45E-08	5.45E-09
Skrivekridt – zone 1	SK – 1	7.29E-06	1.46E-06
Skrivekridt – nedre	SK – n	6.56E-06	1.31E-06
Sand*	S4	1.00E-04	1.00E-05
Sand*	S3	9.28E-04	9.28E-05
Sand	S2	6.63E-04	6.63E-05
Sand	S1	8.65E-03	8.65E-04
Palæocen ler*	PL	2.92E-09	5.85E-10
Bryozokalk	BK	2.61E-05	2.61E-06

8.8 Opstilling af vandløbsmodel

Alle betydende vandløb i modelområdet inkluderes i vandløbsmodellen. Der er ved opsætningen af modellen lavet en vurdering af de enkelte vandløb og drængrøfter mht. om de er afgørende for simuleringen af vand og stoftransport i oplandet.

For de vandløb, hvor der eksisterer regulativ tværsnit, er disse brugt. På alle mindre vandløb er der benyttet et simpelt tværsnit med en dybde på en meter og en brinkbredde på 1 meter. Brinkkoten på tværsnittene er defineret ud fra den benyttede topografi. Tværsnittene på de enkelte vandløb vil løbende blive ændret hvis der fremkommer nye oplysninger i løbet af projektet.



Figur 23 Vandløb i LOOP 1 oplandet der er inkluderet i vandløbsmodellen

Når der opstilles en integreret vandløbs- og grundvandsmodel er det vigtigt, at der foretages en kvalitetssikring mellem den benyttede terræninformation i grundvandsmodellen og tværsnitsinformationen i vandløbsmodellen. For LOOP 1 er dette sikret ved at tværsnitsinformationen er eksporteret til GIS og der er foretaget en sammenligning af terræn informationen og brink-koter og bund-koter i vandløbstværsnittene. Da grundvandsmodellen er en grid baseret model, og vandløbsmodel-

len er baseret på et net af beregningspunkter, vil der ikke være en perfekt overensstemmelse mellem de to modeller. I vandløbsmodellen vil de enkelte tværsnit repræsentere den faktiske kote ved den givne placering, hvorimod de enkelte celler i grundvandsmodellen repræsenterer en gennemsnitlig værdi for den enkelte celle. Ved koblingen af grundvands- (MIKE SHE) og vandløbsmodellen (MIKE 11), vil der udveksles vand mellem modellerne baseret på den hydrauliske gradient mellem grundvandet og vandløbene. En fejl i opsætningen af vandløbsmodellen, f.eks. så enkelte vandløb lå over terræn, ville resultere i en fejlagtig udveksling mellem de to modeller. Ved kalibreringen af vandløbsmodellen vil der ske en justering af lækagekoefficienten, som benyttes ved beregningen af udvekslingen af vand mellem grundvand og vandløb. Denne justering tager også højde for den skalaforskel der måtte være mellem de to modeller.

9 Kalibrering af strømningssmodel

Kalibreringen af den hydrologiske model indebærer en justering af de benyttede parametre, så der er en acceptabel overensstemmelse mellem de observerede og simulerede værdier. Der foretages kalibrering i forhold til både grundvandspotentialer og vandføringsobservationer. Kalibreringen er udført i forhold til et antal nøjagtighedskriterier der dækker både kvantitative og kvalitative krav. Der er opstillet nøjagtighedskriterier for både grundvands- og vandløbsmodellen. Der er efterfølgende foretaget en analyse på de områder hvor modellen ikke opfylder de opsatte kriterier.

9.1 Opstilling af nøjagtighedskriterier

Nøjagtighedskriterierne specificeres i forhold til kapitel 12 i /6/. Der er opstillet både kvantitative og kvalitative nøjagtighedskriterier (eller kalibreringskriterier).

9.1.1 Kvantitative kalibreringskriterier

Boks 1 Statistiske størrelser af pejledata ved modelkalibrering fra /7/

ME (mean error eller middelfejl) udtrykker den gennemsnitlige afvigelse mellem observeret ψ_{obs} og simuleret ψ_{sim} tilstandsvariabel

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i}) \quad (12.3)$$

hvor n er antallet af observationer. *ME* kan give et indtryk af, om der introduceres nogen overordnet fejl i modelresultaterne, dvs. om f.eks. trykniveauet simuleres generelt for lavt eller højt. Hvis $ME \rightarrow 0$, vil der globalt set ikke optræde systematiske fejl i modellen.

MAE (mean absolute error eller gennemsnitlig absolut fejl) beregner et gennemsnit af de absolute residualer

Boks 2 Statistiske størrelser af pejledata ved modelkalibrering fra /6/.

RMS (root mean squared error eller middelværdien af kvadratafgivelsessummen) er det kriterium, der oftest anvendes til at måle den opnåede overensstemmelse mellem data og model

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})^2} \quad (12.5)$$

Denne norm er et mål for spredningen på residualeme (lig standardafvigelsen, hvis $ME = 0$), og kan sammenlignes med den estimerede standardafvigelse på observationsdata.

SE (standard error, goodness of fit eller standardafvigelsen) er et direkte mål for modellens evne til at reproducere de observerede data

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n-P} \sum_{i=1}^n w_i (\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i})^2} \quad (12.6)$$

hvor w_i er vægtingen af observationsdata nr. i , og P er antallet af kalibreringsparametre. I en regressionsmæssig sammenhæng angiver $n - P$ antallet af frihedsgrader. Hvis vægterne w_i specificeres til den reciprokke værdi af variansen på observationerne ($w_i = 1/s_{obs,i}^2$) fås

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n-P} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\psi_{obs,i} - \psi_{sim,i}}{s_{obs,i}} \right)^2} \quad (12.7)$$

og normen vil dermed tage hensyn til, at der kan være forskellig usikkerhed knyttet til observationsværdierne. Når samtlige modelfejl er elimineret og kun observationsfejl resterer, vil $SE \rightarrow 1$. *SE* giver dermed et direkte mål for, hvor godt de observerede værdier simuleres i forhold til usikkerheden på observationerne.

Som udgangspunkt benyttes nøjagtighedskriterierne for en såkaldt "High fidelity" model, se /6/. Dette betyder at kravene kan opstilles som:

1. $ME \leq \Delta h_{\max} * \beta_1 = 10,5 * 0,01 = 0,11$.

Dette kriterium udtrykker, at den globale under- eller overprediktion i forhold til den globale trykniveauforskell i området skal være mindre end β_1 .

2. $SE \leq \beta_2 = 1.65$

Dette kriterium giver en vurdering af spredningen på residualerne i forhold til standardafvigelsen på observationsværdierne.

3. $RMS \leq \Delta h_{\max} * \beta_3 = 10,5 * 0,05 = 0,53$

Det vurderes umiddelbart at det bliver svært at overholde kriterium 1, da usikkerheden på mange af observationsdata kan være betydeligt større end det opstillede krav. Der er i forbindelse med projektet ikke foretaget en vurdering af usikkerheden på de benyttede observationsdata, så det er ikke muligt at kvantificere hvor

stor forskel der kan forventes at være mellem de observerede og simulerede værdier (selv ved en "perfekt" model). Det vurderes at en overholdelse på $ME \leq 0,75$ meter er mere realistisk i forhold til kvaliteten af observationsdata.

Til afstrømningsdata benyttes kriterier til middelvandføringen (F_{bal}), Ligning 1, samt modellens evne til at beskrive variationen af hydrograferne – model effektiviteten (Nash-Sutcliffe, E), Ligning 2.

$$F_{bal} = 100 \cdot \frac{\overline{Q_{obs}} - \overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}} \quad F_{bal} \in [0; 100 \text{ \%}] \quad (1)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_1^m (Q_{obs,m} - Q_{sim,m})^2}{\sum_1^m (Q_{obs,m} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad E \in]-\infty; 1] \quad (2)$$

Omkring vandløbsafstrømningerne er det valgt at benytte de samme kvantitative nøjagtighedskrav, som der tidligere er benyttet for modeller på Lolland, se /7/. Der er her valgt at stille krav til den enkelte vandføring. Da usikkerheden på de målte vandføringer generelt er større for de små værdier, og da modellen generelt har meget svært ved at ramme de helt små afstrømningsværdier, er det valgt at stramme kravet ved højere vandføringer. Det skal dog her bemærkes at vandføringerne i LOOP 1 oplandet er så små, at de opstillede krav bliver ret så uambitiøse. De opnåede vandbalancefejl vil derfor ved kalibreringen blive kommenteret, og der vil blive foretaget en kort vurdering af fejllens betydning ved beregning af nitratkredsløbet.

Kriterierne for fejlen på middelvandføringen, F_{bal} , samt Nash-Sutcliffe (E) gradueres i forhold til middelvandføringen, og de endelige kriterier kan ses af nedenstående tabel, værdierne er taget fra /7/.

Tabel 10 Krav for simulerede vandføringer i strømningsperioden

Målt middelvandføring m^3/s	Fbal %	E
> 0.5	< 10	> 0.75
$0.5 > Q_{obs} > 0.2$	< 15	> 0.65
$0.2 > Q_{obs} > 0.1$	< 25	> 0.50
$0.1 > Q_{obs} > 0.05$	< 50	> 0.20
$0.05 > Q_{obs}$	< 100	> 0.00

9.1.2 Kvalitative kalibreringskriterier

Foruden de kvantitative krav opstilles kvalitative kriterier. Af kvalitative kalibreringskriterier, der skal opfyldes kan nævnes:

- Realistiske parameterverdier
- Residualer (ME) fordelt jævnt i tid og sted (således at der ikke over- eller underestimeres i dele af modellen)
- Korrekt strømningsretning / vertikale gradient / placering af grundvands-skel. Disse faktorer skal vurderes i forhold til den tilgængelige information og den generelle hydrogeologiske forståelse af området.
- Ved vurdering af de simulerede og observerede afstrømningshydrografer benyttes varighedskurver til analyse af hvilke afstrømningshændelser der evt. afviger fra de observerede hændelser. Varighedskurver er en god metode til at analysere afstrømningshydrografer, idet de giver et billede af fordelingen af de forskellige hændelser, hvilket kan sammenlignes med de observerede værdier.

9.2 Modelkalibrering

9.2.1 Overordnet fremgangsmåde

Udgangspunktet for kalibreringen af LOOP modellen er den allerede opstillede og kalibrerede model for Lolland /5/. I forhold til den oprindelige model er der en øget detaljeringsgrad i vandløbsmodellen, og den geologiske model er ændret i forhold til de nyeste geologiske informationer. Den overordnede fremgangsmetode ved kalibreringen af LOOP modellen er:

- Udførsel af følsomhedsanalyse på baggrund af den initiale model. Denne aktivitet har til formål at få afdækket de mest følsomme parametre mht, kalibreringen af vandløbs- og grundvandsmodellen.
- Manuel justering af modellen. Den indledende manuelle justering af modellen har til formål at få vurderet evt. åbenlyse fejl eller usikkerheder i modellen. Dette kan være observationsboringer der er filtersat forkert, vandløbsstationer der er placeret forkert, udbredelse af drænedede arealer samt justering af rand betingelser.
- Automatisk kalibrering. Den automatiske kalibrering benyttes til at finde de mest optimale parameterverdier ud fra den opstillede model.
- Manuel kalibrering. På baggrund af resultatet fra den automatiske kalibrering foretages der en vurdering af de områder hvor kalibreringen ikke er

acceptabel. Dette kan indebære en justering af de geometriske forhold (vandløb, geologisk model m.m.).

Ved afslutningen af kalibreringen foretages en vurdering af det overordnede niveau, og der kommenteres på områder der ikke opfylder de opsatte nøjagtighedskriterier.

9.2.2 Følsomhedsanalyse

Der er i forbindelse med kalibreringen foretaget en følsomhedsanalyse. Dette har til formål at få afdækket følsomheden af de mest betydende parametre i modellen. Følsomhedsanalysen er foretaget med AutoCal, og er foretaget som en central følsomhedsanalyse med en perturbation på 5 %. Det betyder at de benyttede parametre er varieret med 5 %, ud fra de initiale værdier. Variationen er foretaget centralt, og der er derfor for hver parameter foretaget en kørsel hvor parameteren er forøget, og en kørsel hvor parameteren er formindsket (i forhold til den initiale værdi). I følsomhedsanalysen er der justeret på den horisontale ledningsevne, og bibeholdt et fast anisotropiforhold for alle parametrene.

Tabel 11 Skaleret parameterfølsomhed for hhv. vandløbs og grundvandsobservationer

Parameter	Vandløb	Grundvand
<i>Moræne top</i>	45	4
<i>Moræne</i>	17	100
<i>Skrive kridt</i>	19	17
<i>S4</i>	10	10
<i>S3</i>	12	77
<i>S2</i>	16	82
<i>Lækage (vandløb)</i>	100	23
<i>Dræn konstant</i>	65	5

Tabel 11 viser den skalerede parameterfølsomhed i forhold til vandløbs- og grundvandsobservationer. Parameterfølsomheden er skaleret i forhold til den mest følsomme parameter, som har fået værdien 100. Det ses at den mest følsomme parameter, i forhold til grundvandsobservationerne, er morænen, som er styrende for grundvandsstrømningen i området og dermed både for grundvandsdannelsen og den horisontale strømning mod vandløbssystemet. For vandløbsobservationerne er vandløbslækagen og drænkonstanten følsomme i forhold til kalibreringen mod vandløbshydrograferne. For grundvandsobservationerne er S2 meget følsom, hvilket skyldes at en stor del af observationerne er filtersat i dette magasin.

9.2.3 Kalibrering af vandløbsmodellen

Ved kalibreringen af vandløbsmodellen er der primært fokuseret på en god bestemmelse af den totale afstrømning fra oplandet (station 620014). Efterfølgende er der foretaget mindre justeringer af drænkonstanten i forhold til drænstationerne 3, 5, 6 og 7. Der er valgt en konstant værdi for drænkonstanten i alle drænedede områder (værdien $6e^{-7} s^{-1}$). Der er altså ikke foretaget specifikke justeringer af drænkonstanten i de enkelte drænoplande.

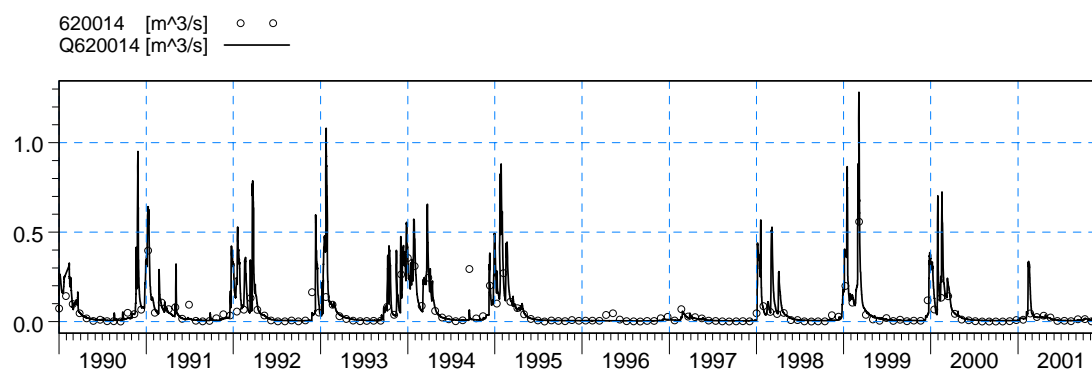
Tabel 12 Kalibreringsværdier for vandløbsstationer

Station	Qsim, gen.	Qobs, gen.	Fbal	Fbal, krav	E	Ekrav
620014	0,061	0,0492	24	< 100	0,20	> 0
620020	0,0121	0,0138	12	< 100	0,75	> 0
620019	0,0212	0,0133	59	< 100	0,68	> 0

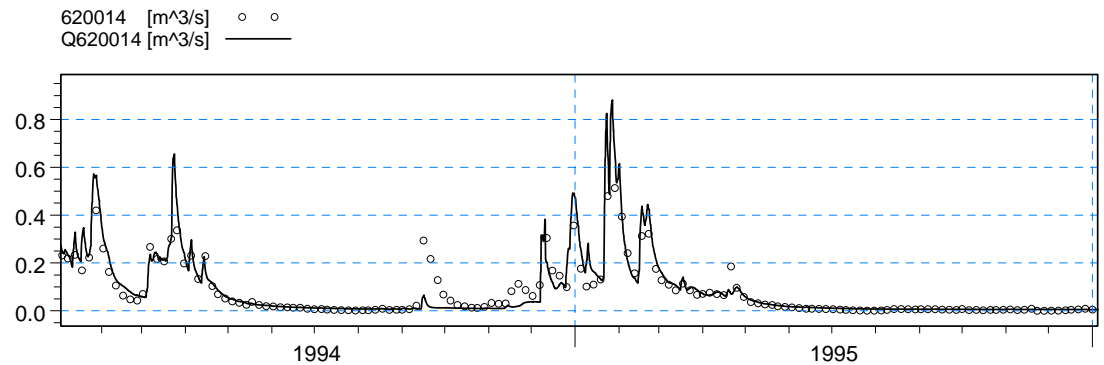
Tabel 2 viser den opnåede kalibreringsstatistik for de tre vandløbsstationer. Det ses at de opstillede nøjagtighedsmål er overholdt for alle stationerne. Som sådan er de opstillede nøjagtighedskriterier derfor opfyldt for alle stationerne. I de efterfølgende afsnit bliver kalibreringen af de enkelte stationer kommenteret.

Station 620014

Station 620014 er den vigtigste afstrømningsstation i oplandet i det den repræsenterer den totale afstrømning fra oplandet. Ved kalibreringen er der fokus på at få en god overensstemmelse med denne station idet den indikerer om den totale vandbalance fra oplandet er beregnet korrekt.

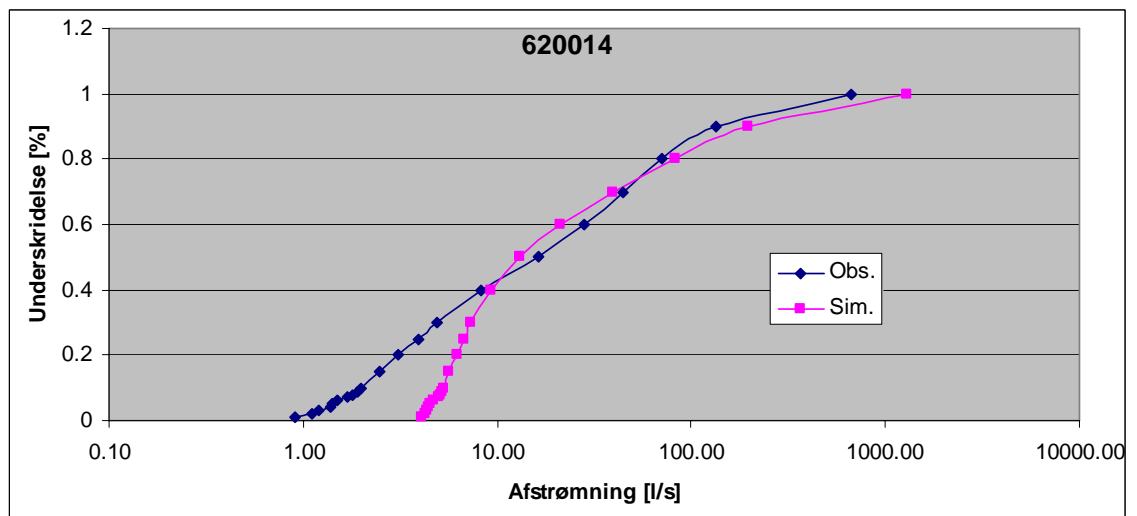


Figur 24 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620014



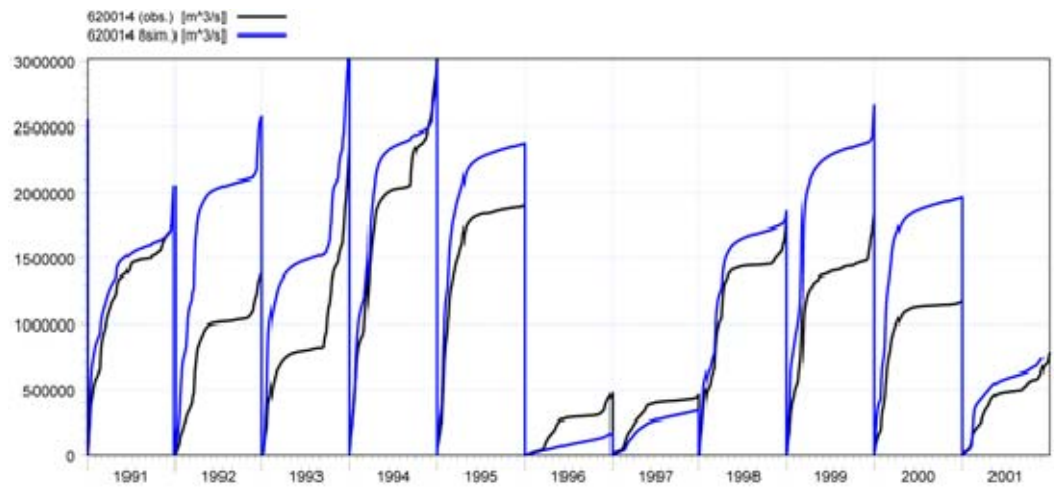
Figur 25 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620014

Figur 24 viser simuleret og observeret afstrømning fra station 620014. Det ses at der generelt er en god overensstemmelse, dog er der en tendens til at de store afstrømningshændelser bliver oversimuleret. I sommerperioden er den simulerede afstrømning lidt for høj. Dette ses tydeligt i Figur 26, hvor det ses at modellen har en god repræsentation af de store afstrømningshændelser, men rammer slet ikke de hændelser der er under ca. 8 l/s.



Figur 26 Varighedskurve for hhv. simuleret og observeret afstrømning ved station 620014

Mht. den akkumulerede afstrømning fra oplandet oversimulerer modellen generelt afstrømningen. Dette indikerer at der enten er et generelt vandbalanceproblem i modellen (evt. at nettonedbøren i perioder er for høj), eller at modellen simulerer en for lav grundvandsdannelse til de dybere magasiner.

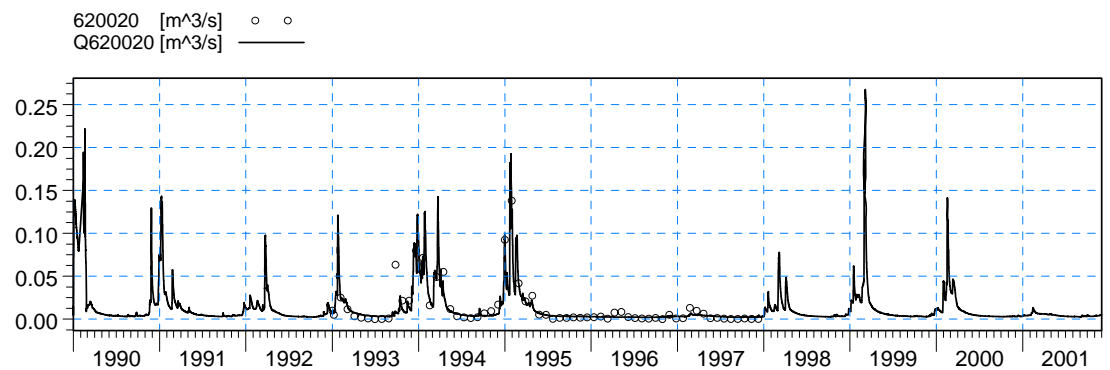


Figur 27 Akkumuleret afstrømning fra station 620014

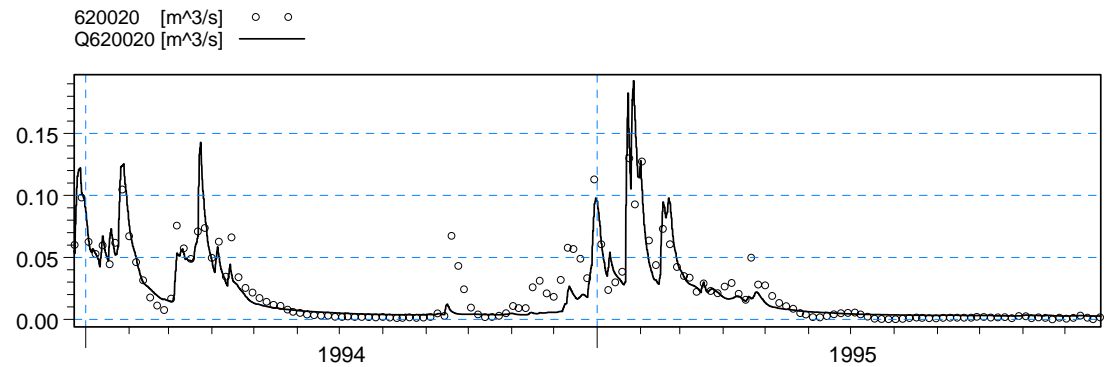
Modellen oversimulerer middelfafstrømningen med 24 %, hvilket viser sig tydeligt på den akkumulerede afstrømning.

Station 620020

Station 620020 er placeret i den opstrøms del af Højvads Rende, og repræsenterer dermed afstrømningen fra den øvre del af oplandet.

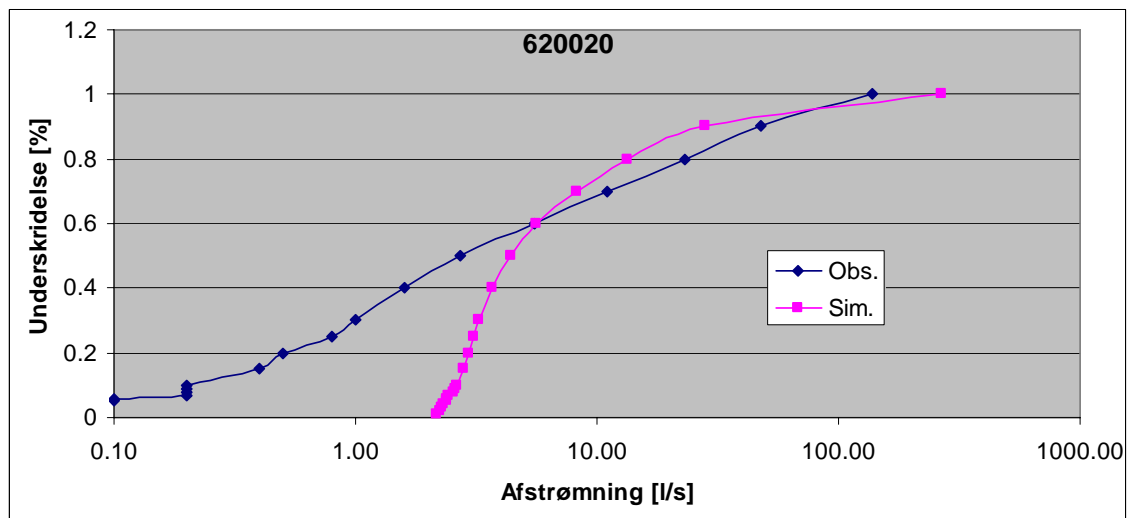


Figur 28 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620020

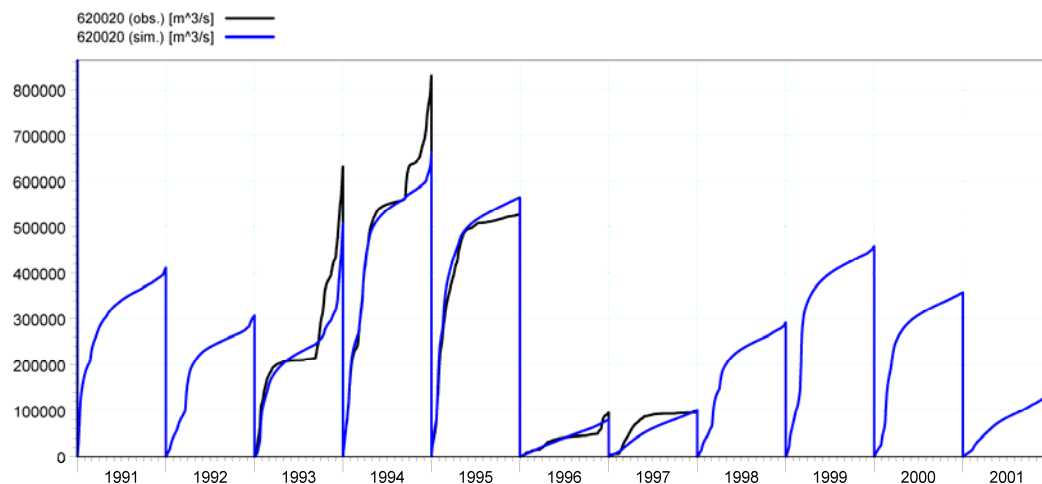


Figur 29 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620020

Modellen oversimulerer middelfafstrømningen med 12 %, og det er specielt i sommerperioden at modellen har lidt for høje værdier (se Figur 28 og Figur 29). Dette kunne indikere at fordampningen i sommerperioden er lidt for lav i modellen, eller at perkolationen til de dybere magasiner er for lav. Varighedskurven, Figur 30, viser at modellen har en god repræsentation af de store hændelser, mens den mangler de helt små afstrømningshændelser. Den årligt akkumulerede afstrømning er meget god for denne station (se Figur 31).



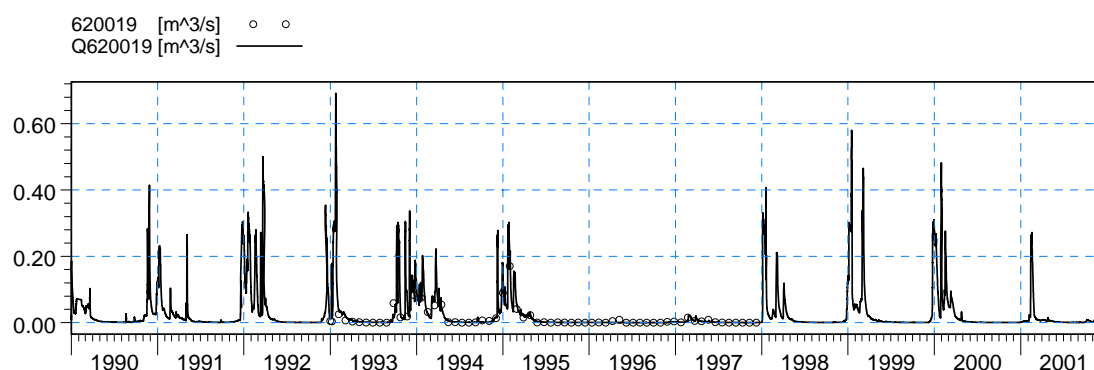
Figur 30 Varighedskurve for hhv. simuleret og observeret afstrømning ved station 620020



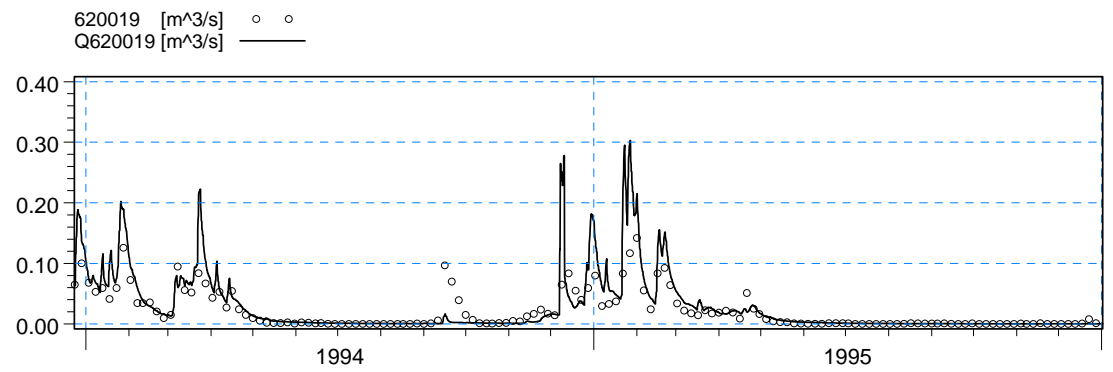
Figur 31 Akkumuleret afstrømning fra station 620020

Station 620019

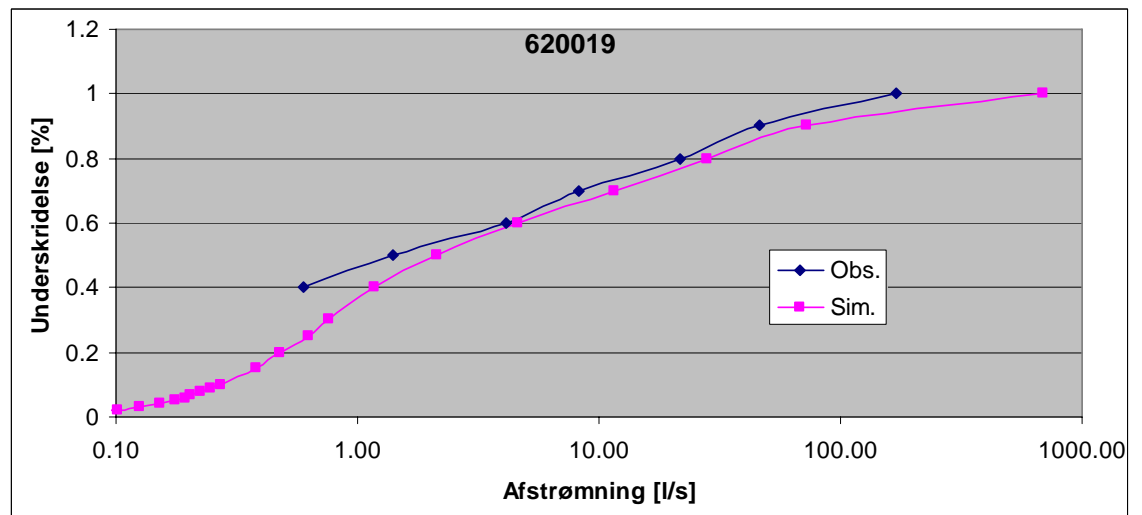
Station 620019 er placeret på et tilløb til Højvads Rende, og repræsenterer afstrømningen fra den sydlige del af oplandet. Modellen oversimulerer afstrømningen ved denne station med 59 %, og det er dermed den afstrømningsstation hvor der er den største forskel på middelaflstrømningen. Ud fra varighedskurven, Figur 34, ses det dog at der er en rimelig god repræsentation af alle afstrømningshændelserne. Dog er der en tendens til at modellen har en lidt større repræsentation af alle hændelserne. Ud fra Figur 32 og Figur 33 ses det at modellen oversimulerer de store afstrømningshændelser, og at sommervandføringen er lidt større end den observerede.



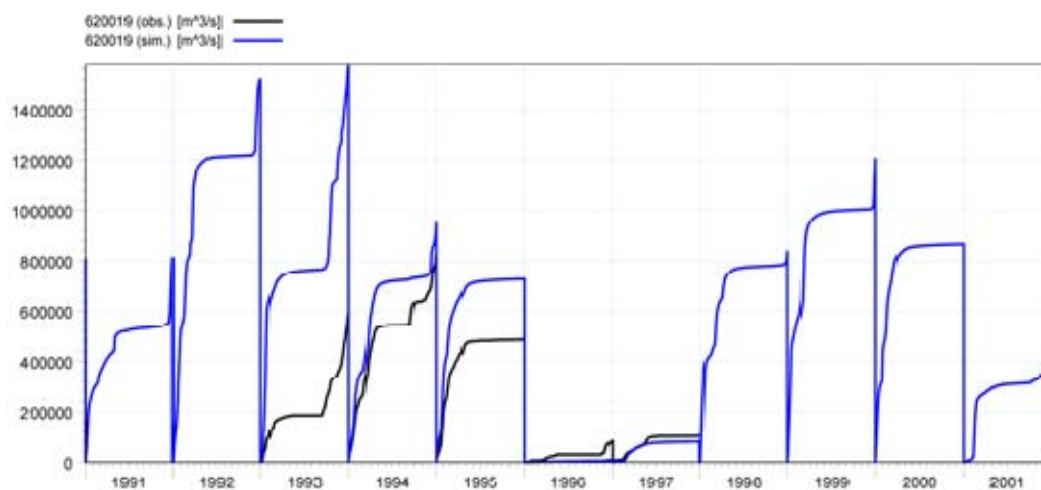
Figur 32 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620019



Figur 33 Observerede og simulerede (streg) værdier for station 620019



Figur 34 Varighedskurve for hhv. simuleret og observeret afstrømning ved station 620019



Figur 35 Akkumuleret afstrømning fra station 620019

Drænstationer

Der er kalibreret mod den observerede afstrømning fra fire drænstationer. Oplandet til de enkelte drænstationer er vist i Tabel 13, og er nærmere beskrevet i afsnit 5.3.

Tabel 13 Oplandsareal og afstrømning i drænstationerne

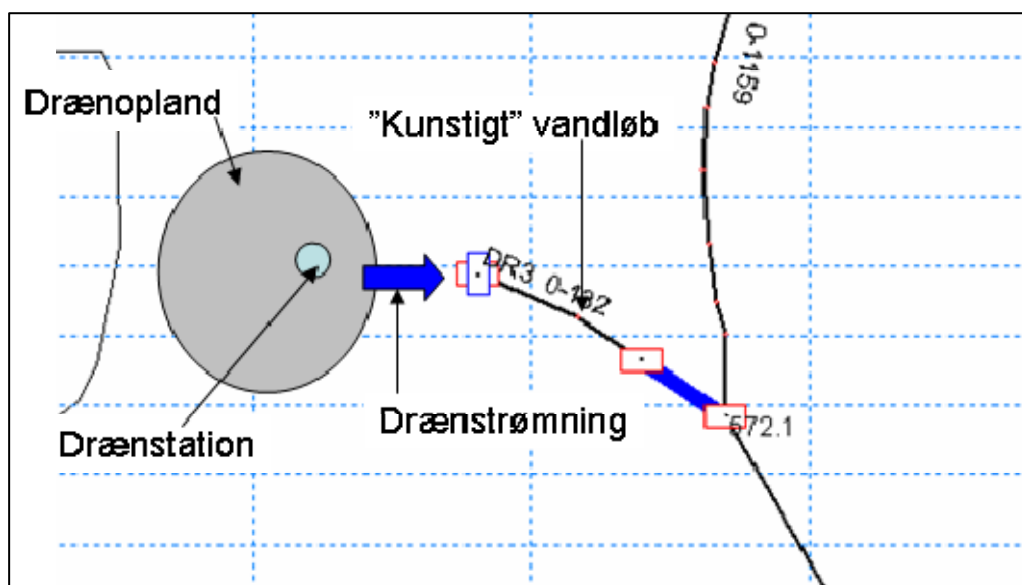
	ST3	ST5	ST6	ST7
Opland [ha.]	5.5	2.5	2	4.8
Min. [l/s]	0.00	0.00	0.00	0.00
Max. [l/s]	9.89	3.93	3.19	7.80
Genm. [l/s]	0.23	0.12	0.05	0.08

Under kalibreringen er det valgt at benytte drænstationerne til at validere og justere drænkonstanten. Da det er valgt at benytte en konstant værdi for drænkonstanten i hele området, har kalibreringen mod station 620014 dog haft højere prioritet.

Ved kalibreringen mod afstrømningen fra drænstationerne, har det været nødvendigt at benytte et specielt koncept, hvilket er vist på Figur 36. Det indeholder følgende:

- I opsætningen af drænmodulet har oplandet til de enkelte drænstationer fået deres egen drænkode.
- På det vandløb som den enkelte drænstation dræner til, er der tilføjet et 50 meter langt kunstigt vandløb. Dette vandløb har til formål at "indsamle"

drænaflowningen fra den enkelte drænstation. Dette muliggør at der i modellen kan kalibreres mod den observerede drænaflowning.



Figur 36 Koncept for kalibrering mod simuleret drænaflowning

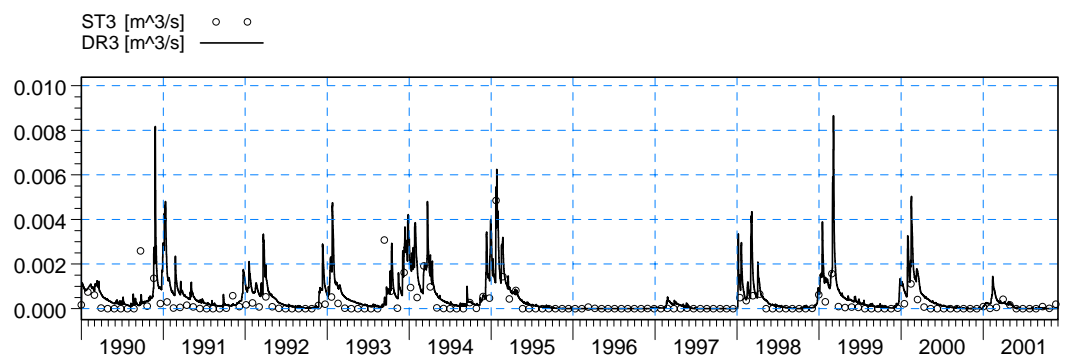
Tabel 14 viser afvigelsen mellem den gennemsnitlige observerede og simulerede drænaflowning. Det ses at der for station 3 og 5 er en acceptabel forskel, mens der for station 6 og 7 er tale om afvigelser på mere end 100 %. For station 6 og 7 skal det dog noteres at der er tale om meget små afstrømningshændelser, og selv om modellen simulerer en betydeligt afvigelse, så er den kvantitative afvigelse relativt lille.

Tabel 14 Afvigelse mellem observeret og simuleret drænaflowning

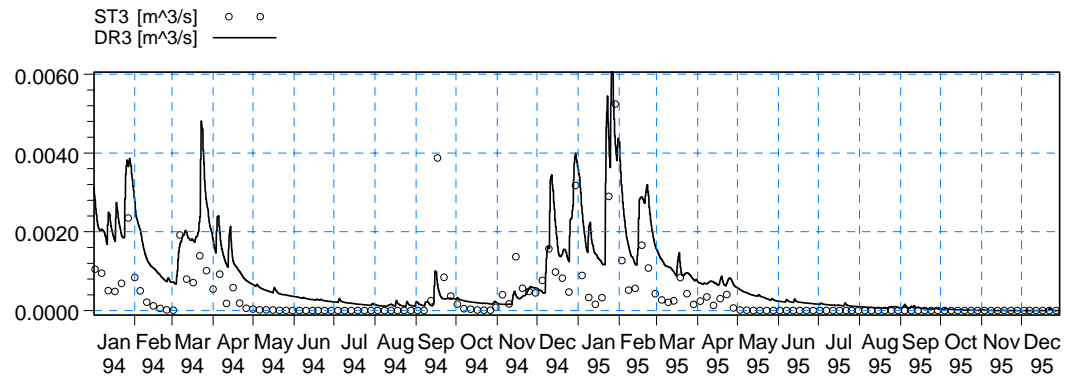
	ST3	ST5	ST6	ST7
Qobs, genm. [l/s]	0,225	0,1175	0,0458	0,0771
Qsim, genm. [l/s]	0,490	0,1694	0,102	0,372
Fbal [%]	78	44	122	382

For alle drænstationerne gælder det, at der er en lille kvantitativ forskel mellem de simulerede og observerede værdier. Det skal dog bemærkes at der specielt for drænstation 6 og 7 er tale om meget store vandbalanceafvigelser, hhv. 122 % og 382 %. Modellen har dermed ikke nogen god repræsentation af drænaflowningen i disse oplande. Dette kan henføres til en række faktorer, hvor der bl.a. kan nævnes:

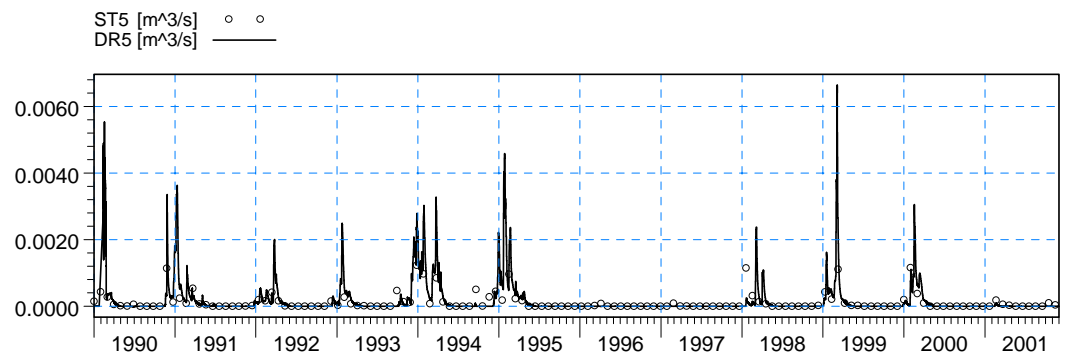
- Afstrømningen for de enkelte drænoplande varierer med en faktor 2, fra 0,2 mm/d til 0,4 mm/d i gennemsnit, se Tabel 4. Modellen er opsat med de samme modelparametre i alle drænoplande, og er ikke i stand til at beskrive forskellene mellem drænoplandene på en acceptabel måde. Der er ikke information eller data der retfærdiggør at der foretages en "sub-skala" kalibrering i forhold til de observerede afstrømninger fra de enkelte drænoplande. Det er derfor valgt at bibeholde de samme parametre for alle drænoplande, og ikke foretage en individuel kalibrering for hvert opland.
- Ved kalibreringen er det antaget, at usikkerheden på observationerne fra de enkelte drænoplande er identiske. Dette er muligvis ikke tilfældet, og kan dermed påvirke kalibreringen af de enkelte oplande. Dette punkt kan ikke kvantificeres nærmere ud fra de givne oplysninger.
- Oplandene til de enkelte drænstationer er relativt små, og dækker mellem 8 og 22 modelceller. Dette gør sammen med den lille afstrømning at det er vanskeligt for modellen at få en god repræsentation af processerne i oplandene, idet de foregår i en mindre skala end den modellen repræsenterer.
- Det kan overordnet konkluderes at modellen har en stor vandbalancefejl for station 6 og 7, mens vandbalancefejlen for station 3 og 5 er store, men dog under kravet. Overordnet set er modellen i stand til at beregne drænhændelserne korrekt i tiden, dvs. at der er tidlig overensstemmelse mellem de observerede og beregnede hændelser, men der laves for de fleste af oplandene en stor vandbalancefejl.



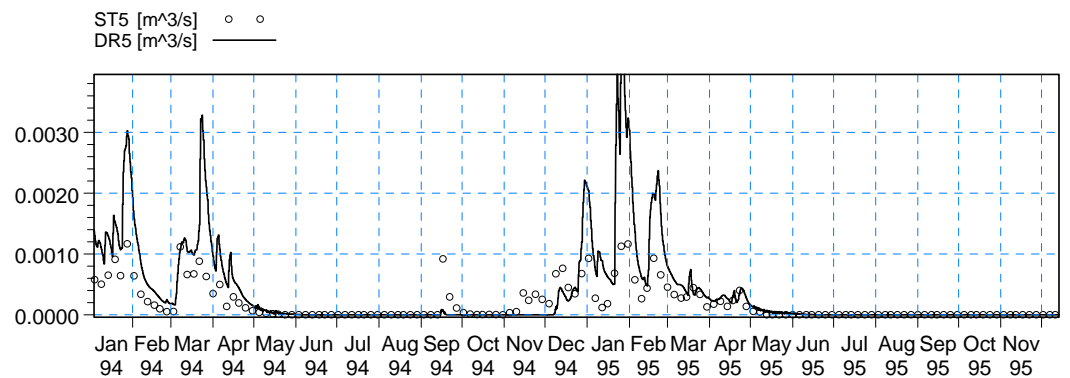
Figur 37 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 3



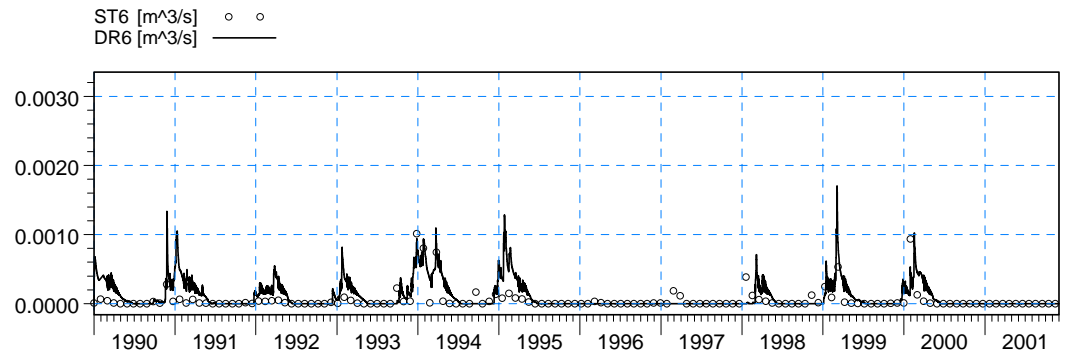
Figur 38 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 3



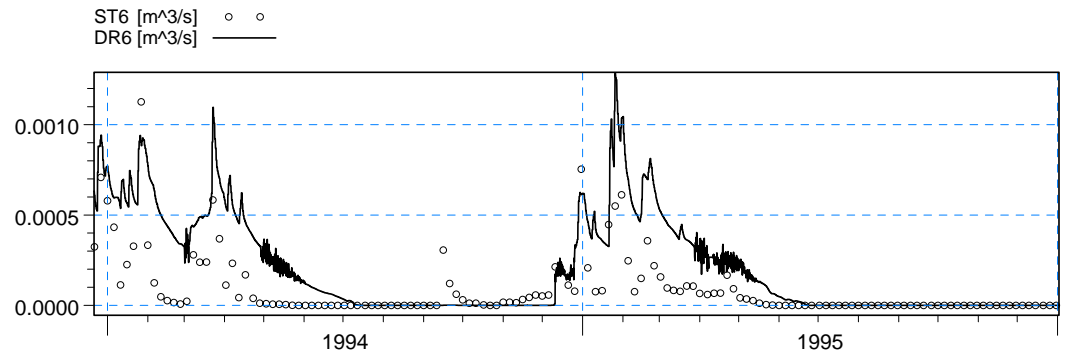
Figur 39 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 5



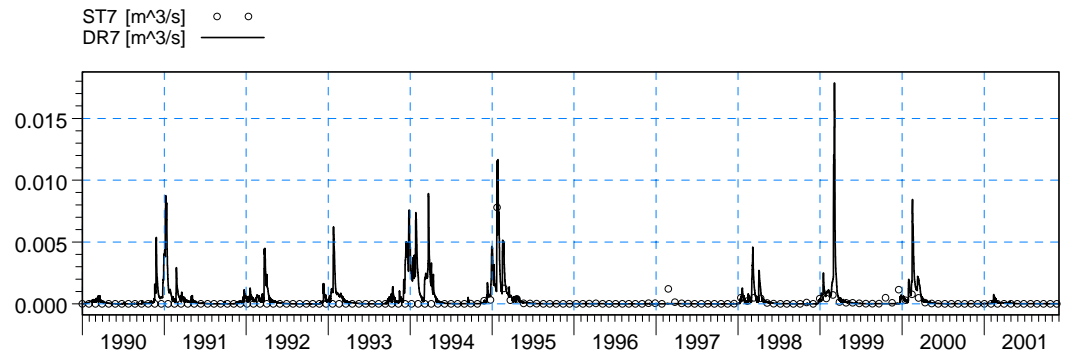
Figur 40 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 5



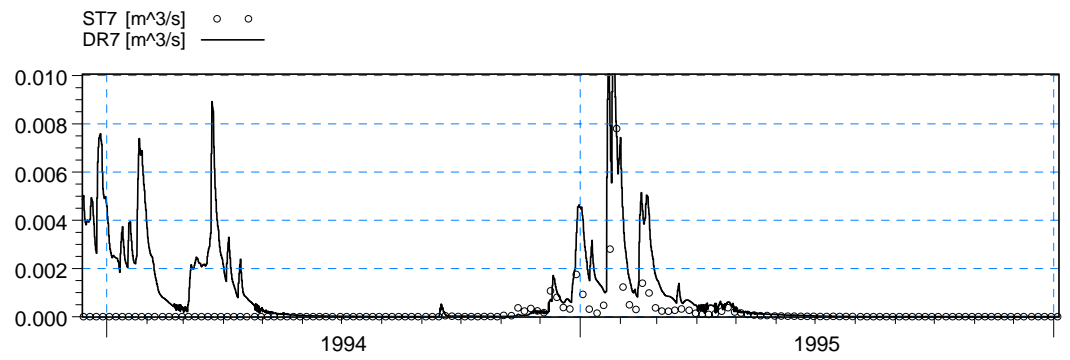
Figur 41 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 6



Figur 42 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 6



Figur 43 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 7



Figur 44 Simuleret og observeret afstrømning fra drænstation 7

9.2.4 Kalibrering af grundvandsmodellen

Kalibreringen af den opstillede grundvandsmodel, er baseret på det opnåede parametersæt ved kalibreringen af den regionale model for Lolland /5/. Der er efterfølgende udført en autokalibrering ved brug af Autocal, og der er derved opnået et justeret parametersæt der beskriver det bedste parametersæt, ud fra de definerede randbetingelser i modellen.

Der er efterfølgende foretaget en manuel justering i forhold til de observationer, som ikke opfylder de opstillede nøjagtighedskrav. I den efterfølgende manuelle justering har der været fokus på en bedre beskrivelse af dynamikken i de overfladenære borer. Dette har primært indeholdt en justering af magasintallet for de øverste moræne lag, samt en mindre justering af den vertikale hydrauliske ledningsevne for morænen. Under kalibreringen er der benyttet konstante hydrogeologiske parametre i alle geologiske formationer. Der er ud fra det tilgængelige datamateriale ikke grundlag for en distribuering eller zonerings af de benyttede parametre. Da der ikke er benyttet zonerings i området, er der borer eller områder der bliver dårligere repræsenteret af modellen. Dette er dog valgt idet der ud fra de tilgængelige data ikke har været information, der har retfærdiggjort en yderligere zonerings.

Tabel 15 Hydrogeologiske parametre

Formation	Hydraulisk ledningsevne		Magasin-koefficient []
	Horisontal [m/s]	Vertikal [m/s]	
<i>Moræne top</i>	6.20E-08	6.20E-08	0.03
<i>Moræne</i>	7.00E-08	7.00E-09	0.03
<i>S4</i>	5.91E-04	5.91E-05	0.20
<i>S3</i>	3.64E-04	3.64E-05	0.20
<i>S2</i>	2.79E-04	2.79E-05	0.20
<i>S1</i>	1.04E-03	1.04E-04	0.20
<i>Skrivekridt</i>	6.34E-05	1.00E-05	0.15
<i>Dræn konstant</i>	3.85E-07 s ⁻¹		
<i>Vandløbs lækage</i>	1.00E-07		

Tabel 16 Gennemsnitlige statistiske værdier for de enkelte beregningslag i modellen (som henfører til specifikke geologiske formationer)

Formation	Lag	ME	MAE	RMSE
S4 / ML	1	0.33	1.41	1.67
ML	2	0.27	0.63	0.75
S3 / ML	3	1.29	2.08	2.22
ML	4	0.41	0.44	0.51
S2 / ML	5	0.56	0.65	0.78
SK	7	0.46	1.05	1.19

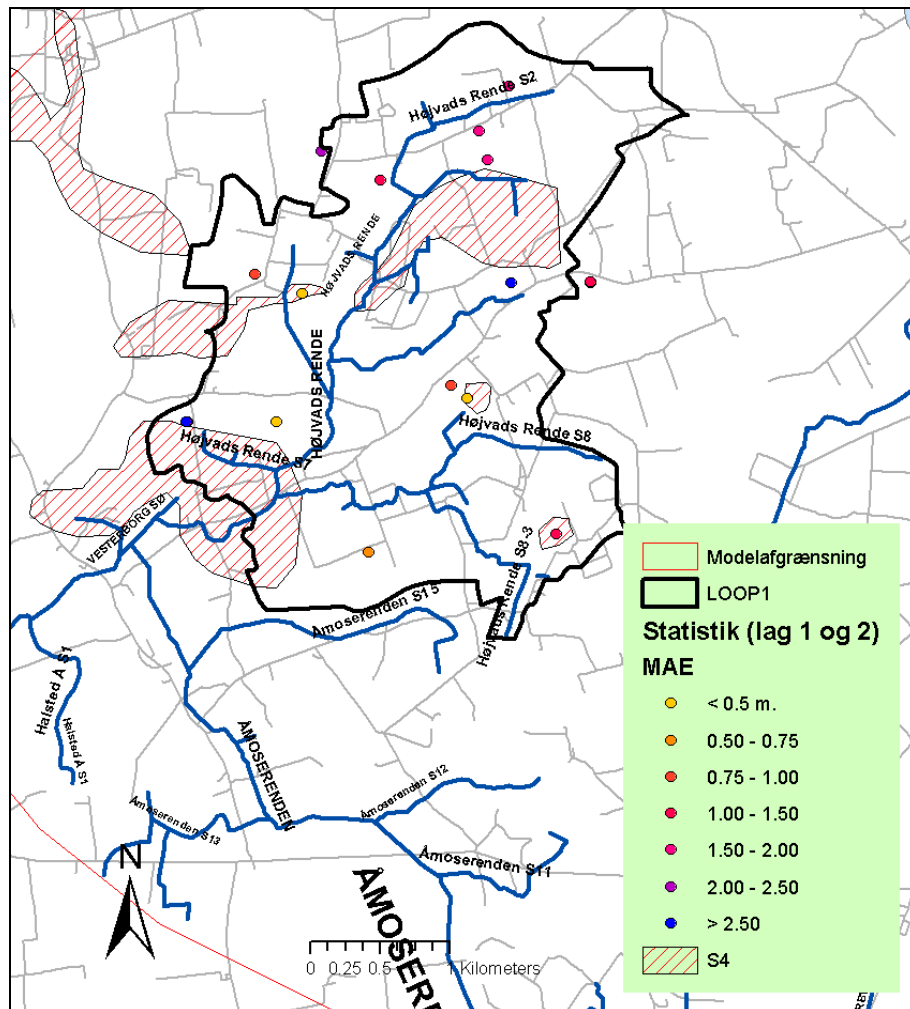
Tabel 15 viser modelstatistikken for de enkelte beregningslag i modellen. Ud fra tabellen ses det at statistikken er noget ringere for boringer filtersat i S3 og den omkringliggende moræne, sammenlignet med de andre geologiske formationer. I de efterfølgende afsnit gennemgås kalibreringen for boringer filtersat i hhv. S4, S3 og i de dybere formationer med flere detaljer.

9.2.5 Grundvandsobservationer i S4 og den øverste moræne

De to øverste beregningslag i modellen består af S4 (sand formation) samt moræne, og der er 18 observationsboringer, som er filtersat i denne del. Tabel 17 viser kalibreringsstatistikken for disse boringer, og Figur 45 viser fordelingen af den absolute middelfejl i området. Som udgangspunkt har det været vanskeligt at kalibrere alle boringerne ind til et tilfredsstillende niveau. En af de faktorer der bl.a. har spillet ind er at morænen i modellen er antaget at være homogen over projektområdet, dvs. konstante hydrogeologiske værdier. I virkeligheden vil morænen være præget af sprækker, makroporer og indslag af sand og grus.

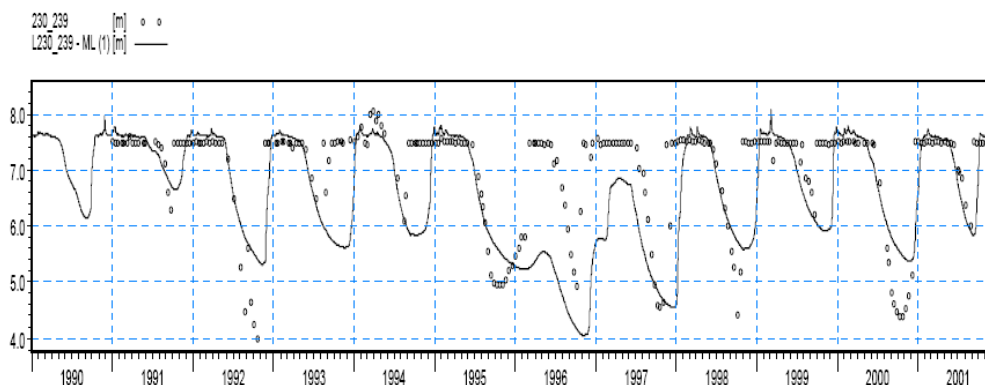
Tabel 17 Kalibreringsstatistik for boringer i S4 og den øvre moræne

Boring	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	R []
G230.237 - ML (1)	-1.2	2.3	2.8	0.6
L230_238 - ML (1)	-2.0	2.0	2.0	0.5
L230_239 - ML (1)	0.4	0.7	1.0	0.6
L230_240 - ML (1)	0.6	0.8	1.0	0.9
L230_242 - ML (1)	1.0	1.0	1.5	0.5
L230_243 - ML (1)	2.1	2.2	2.5	0.7
L230_244 - ML (1)	-1.6	1.6	1.9	0.4
L230_245 - ML (1)	-2.6	2.6	2.7	0.9
L230_246 - ML (1)	0.4	0.5	0.5	0.9
L230_248 - ML (1)	0.3	0.6	0.7	0.6
L230_249 - ML (1)	-0.1	0.5	0.6	0.9
L230_250 - S4 (1)	1.2	1.2	1.2	0.8
L230_262 - ML (1)	1.6	1.6	2.0	0.7
L230_284 - ML (1)	1.3	1.3	1.7	0.1
L230_285 - ML (1)	1.1	1.2	1.5	0.5
L230_287 - ML (1)	2.6	2.6	3.0	0.4
L230_241 - ML (2)	-0.2	0.4	0.6	0.8
L230_247 - ML (2)	0.8	0.8	0.9	0.8



Figur 45 Absolut middelfejl for observationer i S4 og øvre moræne

Figur 46 viser et typisk eksempel på observationer af grundvandsniveauet i den øverste moræne. Der ses en tydelig årstidsvariation i observationerne. Observationerne er her typisk præget af fordamningen, idet indvindingspåvirkningen er begrænset, specielt i morænen. Der kan dog forekomme påvirkning fra markvanding i S4. Der har under kalibreringen været fokus på at få en god repræsentation af årstidsvariationen i modellen. De styrende parametre er primært magasintallet for morænen samt den vertikale ledningsevne. Med konstante værdier for hele området har det ikke været muligt at få en god repræsentation i alle borerne.



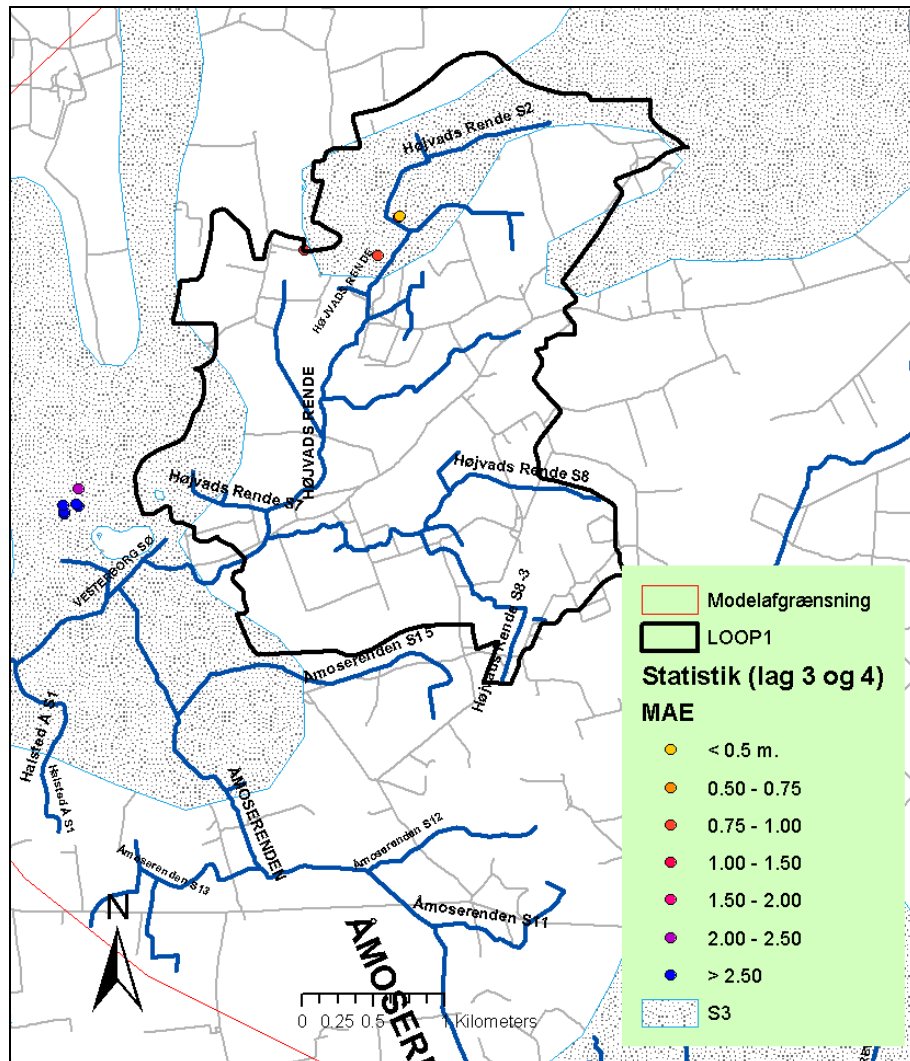
Figur 46 Eksempel på observeret grundvandniveau i den øverste moræne (sort streg simulerede værdier, og prikker observerede værdier)

9.2.6 Grundvandsobservationer i S3 og morænen

Der er i modellen 12 observationer der er filtersat i S3, eller morænen i beregningslagene 3 og 4. Det skal dog noteres at 6 af borerne er lokaliseret i modelområdet, men udenfor LOOP oplandet (boringer der starter med R). For alle disse borer gælder det at de er placeret i eller meget tæt ved indvindingsboringer fra Regionalværket. Dette kan tydeligt ses på kalibreringsstatistikken idet alle disse borer har markant dårligere statistiske værdier end observationsboringerne i LOOP oplandet (boringer der starter med G). Tabel 18 viser kalibreringsstatistik for borerne, og Figur 47 viser fordelingen af den absolutte middelfejl.

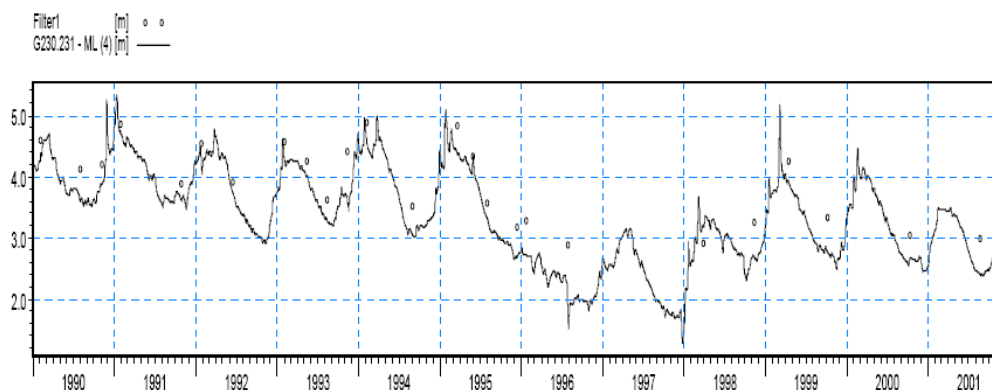
Tabel 18 Kalibreringsstatistik for borer i S3 og morænen (beregningsslag 3 og 4)

Boring	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	R []
R230.103 - ML (4)	2.8	2.8	1.0	0.9
R230.104S - S3 (3)	2.8	2.8	0.9	0.9
R230.106 - S3 (3)	2.9	2.9	0.9	0.9
R230.109 - S2 (5)	3.0	3.0	0.9	0.8
R230.128 - S3 (3)	2.3	2.3	1.0	0.7
R230.145 - S3 (3)	2.7	2.7	0.9	0.9
G230.130_F2 - S3 (3)	-2.0	2.0	0.0	-1.0
G230.234 - ML (3)	-0.3	0.4	0.4	0.9
G230.235 - S3 (3)	-1.0	1.0	0.5	0.9
G230.236 - S3 (3)	-0.5	0.8	0.9	0.5
G230.252_F2 - S3 (3)	0.0	0.5	0.5	0.9
G230.231 - ML (4)	0.4	0.4	0.3	0.9



Figur 47 Absolut middelfejl for observationer i S3 og morænen i lag 3 og 4

Figur 48 viser et eksempel på det observerede grundvandsniveau, i dette tilfælde i den dybere moræne (beregningsslag 4). For denne boring ses det at der er en god overensstemmelse mellem de observerede og beregnede værdier. Dette er generelt tilfældet for observationsboringerne i LOOP oplandet, mens der er en noget dårligere overensstemmelse for boringerne ved Regionalværket.



Figur 48 Eksempel på observeret grundvandniveau i den dybere moræne (sort streg simulerede værdier, og prikker observerede værdier)

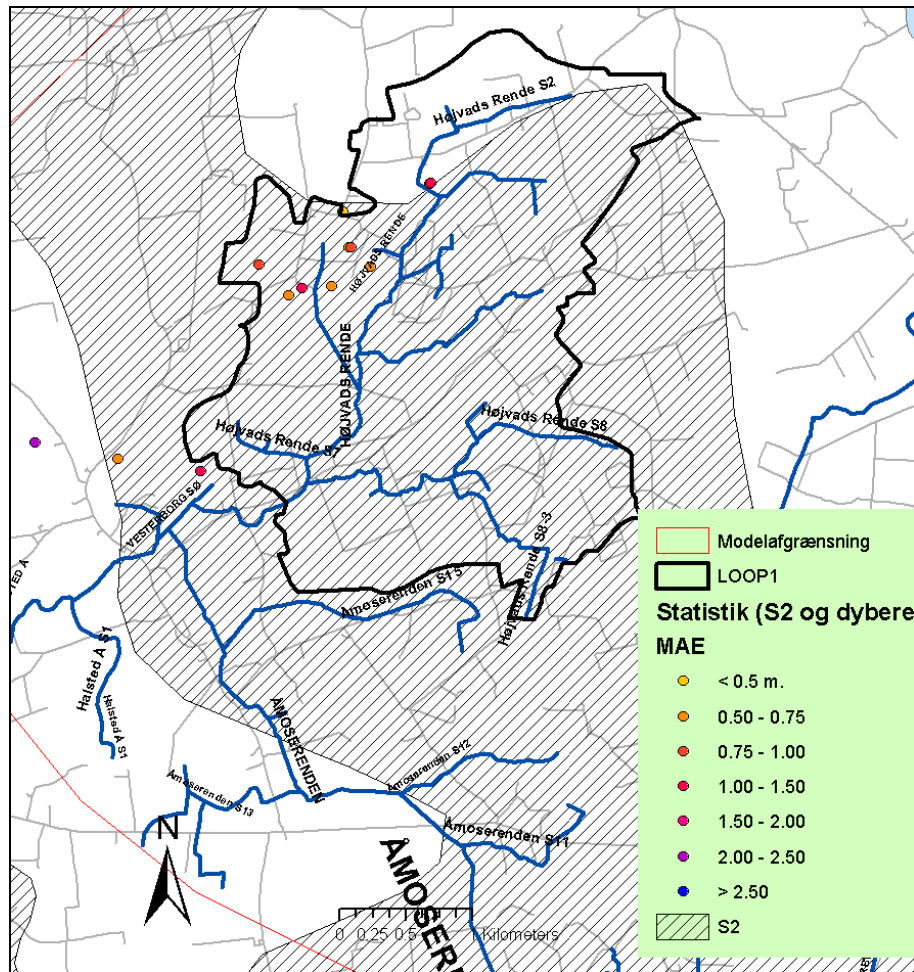
9.2.7 Dybere grundvandsobservationer

I modelområdet er der 15 observationsboringer, der er filtersat i S2 formationen og yderligere 6 boringer i det dybere liggende skivekridt. Der er i kalibreringen af modellen lagt mindre vægt på disse dybe boringer, da det primære formål med opgaven har været at få en god beskrivelse af de overfladenære boringer. De hydrauliske parametre for disse formationer er derfor kun ændret marginalt i forhold til den tidligere opstillede model for Lolland.

Generelt er der en rimelig god overensstemmelse mellem de observerede og simulerede grundvandsniveauer for disse boringer. Det skal dog noteres at de fleste af boringerne er indvindingspåvirkede, og modelresultaterne er derfor til stor del påvirket af den indvindingsbeskrivelse, der er benyttet i modellen.

**Tabel 19 Kalibreringsstatistik for boringer i S2, kalk og morænen (bereg-
ningslag 5 til 7)**

Boring	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	R []
R230.107 - ML (4)	0.1	0.4	0.5	0.8
R230.110 - S2 (5)	0.0	0.4	0.4	0.9
R230.111 - S2 (5)	0.5	0.6	0.7	0.9
R230.112 - S2 (5)	0.4	0.6	0.7	0.8
R230.130 - S2 (5)	0.9	0.9	0.9	0.9
R230.154 - S2 (5)	0.5	0.6	0.8	0.9
R230.155 - S2 (5)	1.1	1.1	1.2	0.9
R230.274 - S2 (5)	0.8	0.9	1.0	0.6
A236.354 - S2 (5)	-0.1	0.3	0.6	0.6
G230.111 - S2 (5)	0.5	0.5	0.6	1.0
G230.112_F1 - S2 (5)	0.5	0.5	0.7	0.8
G230.112_F2 - S2 (5)	0.5	0.6	0.7	0.9
G230.130_F1 - S2 (5)	0.9	0.9	1.0	0.9
G230.233 - S2 (5)	0.4	0.5	0.6	0.9
G230.254_F2 - S2 (5)	0.8	0.8	0.9	1.0
G230.254_F3 - S2 (5)	0.9	0.9	0.9	1.0
G230.252_F1 - SK (7)	1.0	1.0	1.0	1.0
R230.104K - SK (7)	-0.2	0.5	0.6	0.7
R230.105 - SK (7)	-1.0	1.3	1.6	-0.9
R230.131 - SK (7))	2.2	2.2	2.3	0.7
G230.253 - SK (7)	0.5	0.5	0.6	1.0
G230.254_F1 - SK (7)	0.8	0.8	0.9	1.0



Figur 49 Absolut middelfejl for observationer i S2, kalk og moræne (beregningsslag 5 og dybere)

10 Validering af strømningssmodel

Ved kalibreringen af modellen er de sidste to år benyttet som valideringsperiode. Da den opstillede model bygger på en kalibreret, regional model af Lolland, er der som udgangspunkt i den regionale model foretaget en kalibrering for hele perioden fra 1990 til 2001. Det er derfor ikke muligt at foretage en korrekt validering af modellen, idet der ikke findes en periode, som ikke har været medtaget i kalibreringen. Det er dog valgt at benytte de sidste to år (2000 – 2001) til validering. Dette er i praksis gjort ved at der under den automatiske kalibrering ikke er medtaget statistik for de sidste to år til optimeringen. Der er først foretaget en visuel sammenligning af de observerede og kalibrerede grundvandsniveauer for hhv. perioden 1990 til 1999 og perioden 2000 til 2001, og der kan her ikke observeres nogen afgørende forskel mellem de to perioder. Der er efterfølgende foretaget en sammenligning af kalibreringsstatistikken for perioden 1990 til 1999 med perioden 2000 – 2001. Ud fra statistikken er modellen gennemsnitligt lidt dårligere i de sidste 2 år end i de foregående 10 år. Ud fra en overordnet vurdering af kalibreringen af grundvandsobservationerne er modellen ikke dårligere repræsenteret i den sidste periode i forhold til perioden 1990 til 1999.

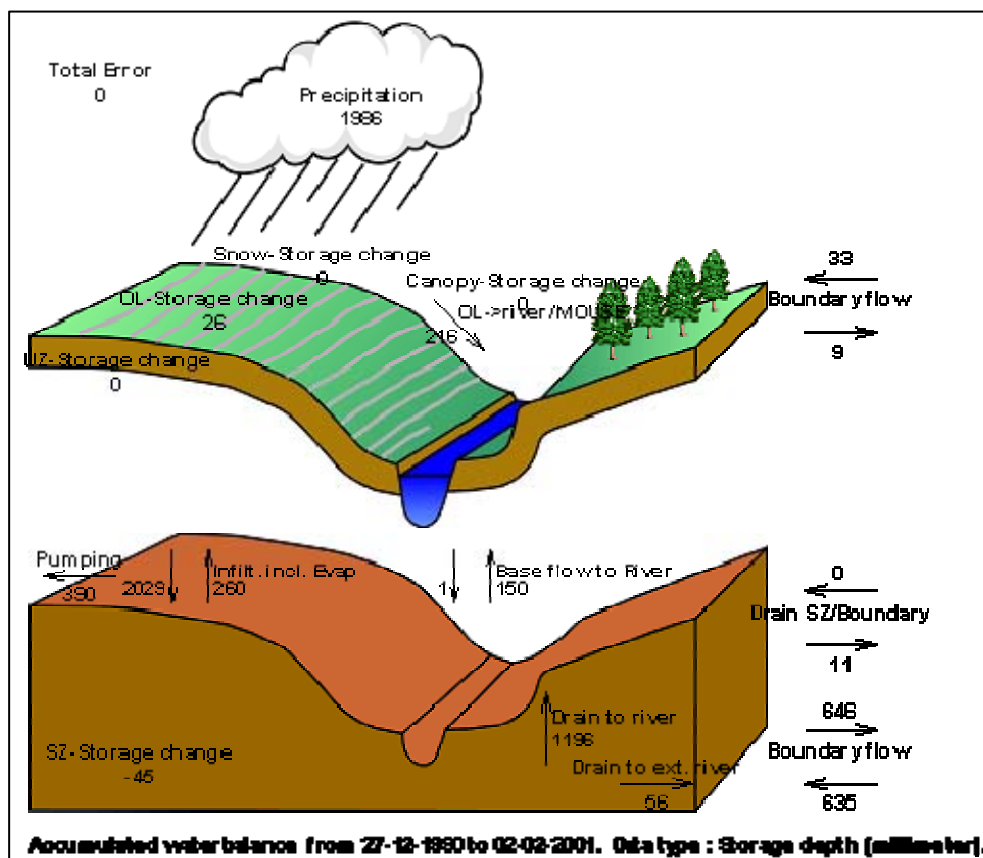
Mht. vandløbsstationerne er der kun station 620014 der indeholder observationer i den sidste del af perioden. Her er der foretaget en vurdering ud fra den beregnede og den simulerede afstrømningshydrograf, og det kan her observeres, at der ingen nævneværdig forskel er på modellens evne til at repræsentere de observerede værdier i hhv. perioden 1990 til 1999 og perioden 2000 til 2001.

Tabel 20 Sammenligning af kalibreringsstatistik for hhv. kalibrerings og valideringsperioden

Formation	Lag	ME		RMSE	
		1990-1999	2000-2001	1990-1991	2000-2001
<i>S4 / ML</i>	1	0.33	1.05	1.72	1.35
<i>ML</i>	2	0.23	0.32	0.75	0.69
<i>S3 / ML</i>	3	1.16	1.69	2.02	2.00
<i>ML</i>	4	0.37	0.67	0.46	0.73
<i>S2 / ML</i>	5	0.42	0.74	0.78	0.86
<i>SK</i>	7	0.42	0.71	1.13	1.39

11 Vandbalance

Der er for oplandet udtrukket vandbalancer der viser den overordnede vandbalance for oplandet (Figur 50), samt en vandbalance der viser udvekslingen mellem de enkelte beregningslag i modellen (Figur 51).



Figur 50 Akkumuleret vandbalance for perioden 1991 til 2000. Alle værdier er i mm (for hele perioden), dvs. at værdien mm/år opnås ved at dividere tallene med 10.

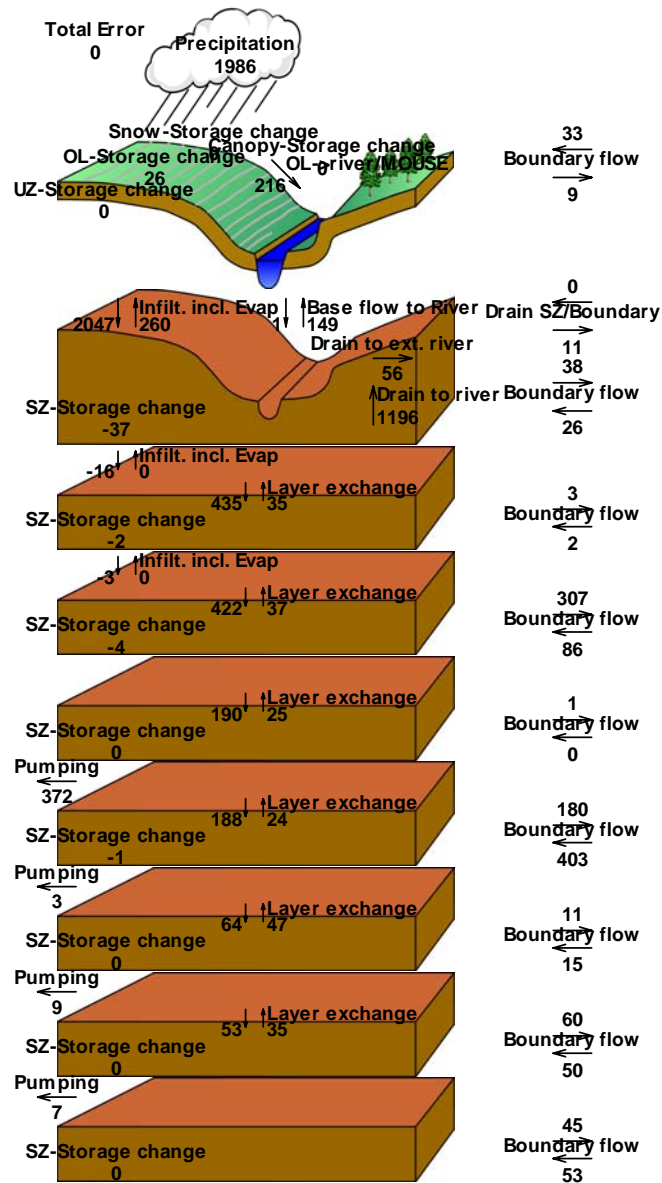
Vandbalancen er udtrukket for LOOP 1 oplandet, og det skal noteres, at der med "Precipitation" menes nettonedbør, og at termen "Infiltration incl. Evap." dækker over infiltration til den mættede zone, og fordampningstermen beskriver negativ nettonedbør som udtrækkes som fordampning fra den mættede zone.

Ud fra den overordnede vandbalance kan følgende noteres:

- Ud af en total nettonedbør på 1986 mm sker der en grundvandstilstrømning til vandløbene på 150 mm, og en dræntilstrømning på 1196 mm. Dvs. at

hovedparten af tilstrømning i modellen sker via drænmodulet. Det skal dog her noteres at noget af dræntilstrømningen sker via å-nære dræn.

- Der sker en tilstrømning af overfladisk afstrømning til vandløbene på 216 mm i perioden.
- Der sker en marginal nettoudstrømning af grundvand fra LOOP oplandet.



Accumulated waterbalance from 27-12-1990 to 02-02-2001. Data type : Storage depth [millimeter].

Figur 51 Akkumuleret vandbalance for perioden 1991 til 2001. Alle værdier er i mm (for hele perioden), dvs. at enheden mm/år opnås ved at dividere tallene med 10.

12 Opsummering

Formålet med denne rapport er at beskrive opstillingen og kalibreringen af en numerisk model til beskrivelse af vandtransporten i LOOP 1 oplandet. Modellen skal efterfølgende benyttes til beskrivelse af kvælstoftransporten i oplandet, og modellen er opsat med dette formål for øje.

Hovedformålet med opgaven er at opstille en dynamisk oplandsmodel til beskrivelse af vand- og kvælstoftransporten i den mættede zone for LOOP 1 oplandet. Dette kræver som udgangspunkt en god beskrivelse af hhv. drænafstrømning, grundvandsstrømningen omkring reduktionsfronten samt af udvekslingen mellem grundvand og overfladevand. Ud fra den opstillede model vurderes der at være skabt et grundlagt, hvormed den kan benyttes som værktøj til mere detaljerede analyser af nitratomsætningen i LOOP1 oplandet. Ved beregningen af den samlede nitrattransport og omsætning i oplandet, skal usikkerheden og de beskrevne fejl på vandstrømningen tages med i betragtning.

Den numeriske model er opsat som en MIKE SHE – MIKE 11 model, hvor MIKE SHE beskriver de landbaserede hydrologiske processer, og MIKE 11 beskriver de hydrauliske forhold i vandløbene. Modellen er opbygget med udgangspunkt i den regionale model for Lolland, se /5/. Den oprindelige model er justeret i forhold til følgende forhold:

- Der er udført nye nettonedbørsberegninger. Det kan konstateres at der i nogle perioder er endog meget store forskelle mellem de nye beregnede værdier og de tidligere benyttede. Det vurderes dog at de nyeste værdier er baseret på et bedre og mere detaljeret datagrundlag, og der er desuden en bedre overensstemmelse med den totale afstrømning fra oplandet.
- Der er foretaget yderligere geologiske undersøgelser i området, hvilket har medført ændringer i forhold til udbredelsen af S4.
- Vandløbsmodellen er opdateret således at alle betydelige vandløb i LOOP 1 oplandet er medtaget.
- Drænede arealer er beskrevet mere detaljeret i nærværende model, i forhold til den regionale model for Lolland.
- Der er benyttet en opdateret topografi (laser skannet topografi).

Den opstillede model er defineret i et 50 meter beregningsnet, hvor den regionale model for Lolland blev defineret i et 100 meter beregningsnet.

Ud fra de opstillede nøjagtighedskriterier er der foretaget en kalibrering mod hhv. observeret drænafstrømning, vandløbsafstrømning og grundvandsniveau. Modellen er kalibreret ved at der først er foretaget en automatisk optimering af modellen, og efterfølgende er der foretaget en manuel justering hvor fokus har været på en bedre beskrivelse af dynamikken i de overfladenære borer. For alle de hydrogeologiske parametre er der benyttet konstante værdier i hele modelområdet. Grunden er at der ud fra det tilgængelige datagrundlag ikke er vurderet at være grundlag for yderligere zonerings af parametrene.

Ved kalibreringen af vandløbsmodellen har der primært været fokus på en god bestemmelse af afstrømningen ved station 620014, idet denne station beskriver den totale afstrømning fra oplandet. Det kan dog konstateres at modellen opfylder alle de opstillede krav for de tre vandløbsstationerne. For station 620019, der repræsenterer afstrømningen fra den sydlige del af oplandet, er der den dårligste beskrivelse af de tre stationer, idet der her er opnået en vandbalancefejl på 59 %. Modellen har en langt bedre repræsentation af stationerne 620014 og 620020. Vandbalancefejlen er her 24 % hhv. 12 %. Generelt kan det siges at modellen har en acceptabel repræsentation af vandbalancen i de 2 stationer 620014 og 620020, men der for station 620019 sker en relativ stor fejl. Mht. beregningen af den samlede nitrattransport fra oplandet er det vigtigt at der for den nedstrøms station (620014), sker en acceptabel simulering af vandbalancen. Dette indikerer at der for oplandet som helhed sker en fornuftig beskrivelse af vandløbsafstrømningen. Den relativt store vandbalancefejl ved station 620019 indikerer at modellen ikke er særlig godt repræsenteret i denne del af modellen, hvilket nødvendigvis må påvirke de efterfølgende nitratberegninger. Det er vigtigt at bemærke at modellen har en relativ god tidlig repræsentation af de store afstrømningshændelser, og det forventes derfor at den ureducerede nitrat der strømmer gennem dræn og overfladiskafstrømning, ankommer til vandløber på de rigtige tidspunkter. Vandbalancefejlen afspejler dog at der sker en kvantitativ fejl i vandmængderne, specielt ved station 620019.

Der er under kalibreringen foretaget en sammenligning af den observerede og beregnede drænafstrømning ved 4 stationer. Fælles for alle drænstationerne er at oplandene er små, og den gennemsnitlige afstrømning er relativt lille. Dette gør at det som udgangspunkt er svært for modellen at opnå en tilstrækkelig repræsentation af processerne i de enkelte drænoplande, hvilket også ses på de relativt store vandbalancefejl, som modellen har for drænoplandene. Specielt for oplandene 6 og 7 er der tale om fejl på langt over 100 %. Der er for alle drænoplandene benyttet de samme parametre, og dermed ikke foretaget en dedikeret kalibrering af de en-

kelte oplande. Dette skyldes primært at der ikke er tilgængelige data, der understøtter en zonerings af specielt drænkønsstant og ledningsevnen i den øverste moræne. Hvis resultaterne fra drænoplandene antages at være repræsentative for hele oplandet, har modellen en dårlig repræsentation af drænafstrømningen. Dette modsiges dog til en hvis grad af vandløbshydrograferne, hvor der er en acceptabel overensstemmelse ved de større hændelser. Ud fra de tilgængelige data kan det konkluderes, at modellen overordnet har en acceptabel repræsentation af drænafstrømningen set ud fra vandløbshydrograferne, men at modellen har endog meget store vandbalancefejl på flere af de benyttede drænoplande. For den overordnede nitrattransport vurderes modellen at have en acceptabel repræsentation, mens der i delområder kan ske store fejl på den beregnede transport af ureduceret nitrat gennem drænafstrømningen.

Ved kalibreringen af grundvandsobservationerne er der fokuseret på de overfladenære observationer, dvs. borerings filtersat i S4 eller S3 samt den omkringliggende moræne. Generelt er der mange af de overfladenære observationer, der er filtersat i morænen. Det har her været vanskeligt at opnå en tilfredsstillende repræsentation af observationsdata i alle boreringsne, da den øverste del af morænen sandsynligvis ikke er homogen over hele området (sprækker, makroporer m.m.). Overordnet set er modellen dog kalibreret til et niveau, hvor den repræsenterer grundvandsobservationerne på et tilfredsstillende niveau. I de områder, hvor modellen har en dårligere repræsentation af dynamikken i det øverste lag, vil der ske en fejl ved beskrivelsen af strømningen hhv. under og over reduktionsfronten. Denne usikkerhed bliver til dels beskrevet i den senere aktivitet hvor følsomheden på nitratomsætningen ud fra placeringen af reduktionsfronten undersøges.

13 Referencer

- /1/ Oplandsmodellering af vand og kvælstof i umættet zone for oplandet til Højvads Rende, Ruth Grant, Peter Mejlhede Andersen og Gitte Blicher-Mathiesen, DMU 2006
- /2/ Vandmiljøplanens overvågningsprogram Landovervågningsoplande LOOP 1, Hydrogeologisk kortlægning af Højvads Rende, december 1989, intern rapport nr. 43
- /3/ Geologisk model, Delrapport, Loop1, Miljøcenter Nykøbing Falster. ALECTIA. In prep.
- /4/ Vandmiljøplan II, Genopretning af vådområder, 2. Hydrologi, stofomsætning og opmåling. Skov og Naturstyrelsen (ISBN 87-7279-228-0).
- /5/ Strømningsmodel for Lolland, Modelopstilling, Modelkalibrering og validering, Miljøcenter Nykøbing Falster, juni 2008, udført af ALECTIA.
- /6/ Håndbog i grundvandsmodellering, Sonnenborg & Henriksen (eds) © 2005/80 GEUS
- /7/ Storstrøms Amt (2004). Regional strømningsmodel af Lolland. Hydrogeologisk model. Udarbejdet af DHI, juli 2003.