

MILJØCENTER RIBE

MILJØMINISTERIET

Fase 2 - Opstilling og kalibrering af model

Oplandsmodel for landovervågningsop- land 6

Delrapport, 14. juli 2010

MILJØCENTER RIBE

MILJØMINISTERIET

Fase 2 - Opstilling og kalibrering af model

Oplandsmodel for landovervågningsopland 6

Delrapport, 14. juli 2010

Revision : version 1
Revisionsdato : 14-07-2010
Sagsnr. : W01997
Projektleder : ULA
Udarbejdet af : THW/OLJE
Godkendt af : ULA

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	4
2	Beskrivelse af området	5
2.1	Geologi	6
2.2	Hydrogeologi.....	7
3	Konceptuel strømningmodel	8
4	Fastlæggelse af projektområde	11
5	Observationsdata	13
5.1	Grundvandsobservationer.....	13
5.2	Vandløbsobservationer	14
6	Numeriske modelværktøjer	15
6.1	Grundvandsmodel – MIKE SHE	15
6.2	Vandløbsmodel – MIKE 11	15
6.3	Kobling af grundvands- og vandløbsmodel	15
7	Opstilling af strømningmodel	17
7.1	Modelområde og randbetingelser	17
7.2	Beregningslag	18
7.3	Topografi.....	22
7.4	Klima og nettonedbør.....	23
7.5	Dræn	24
7.6	Indvinding	25
7.7	Opstilling af vandløbsmodel	26
8	Kalibrering af strømningmodel	29
8.1	Opstilling af nøjagtighedskriterier	29
8.1.1	<i>Kvantitative kalibreringskriterier</i>	29
8.1.2	<i>Kvalitative kalibreringskriterier</i>	32
8.2	Modelkalibrering	32
8.2.1	<i>Overordnet fremgangsmåde</i>	32
8.2.2	<i>Følsomhedsanalyse</i>	32
8.2.3	<i>Automatisk kalibrering</i>	33

8.2.4	<i>Kalibrering af vandløbsmodellen</i>	<i>34</i>
8.2.5	<i>Kalibrering af grundvandsmodellen</i>	<i>40</i>
8.2.6	<i>Grundvandsobservationer i det øverste sandmagasin (Sand 1)41</i>	
9	Vandbalance og modelresultater.....	43
9.1	Vandbalance	43
9.2	Resultater fra strømningssmodellen.....	44
10	Opsummering	49
11	Referencer.....	51

Bilagsliste

- Bilag 1 Tidsserier for grundvandsobservationer
- Bilag 2 Tidsserier for vandføring
- Bilag 3 Hydrostratigrafiske flader

1 Indledning

Denne rapport er en delrapport i opgaven "oplandsmodel for overvågningsopland nr. 6", og beskriver opstilling og kalibrering af den numeriske model til beskrivelse af vandtransporten i oplandet.

Hovedformålet med opgaven er at forbedre den nuværende viden og beskrivelse af vandkredsløbet samt transport og omsætning af nitrat i et landbrugsdomineret opland. Resultaterne skal efterfølgende danne grundlag for et værktøj, der kan belyse effekterne af en ændret landbrugspraksis og arealanvendelse på udvaskningen af kvælstof fra rodzonen og kvælstofafstrømningen til vandløbet.

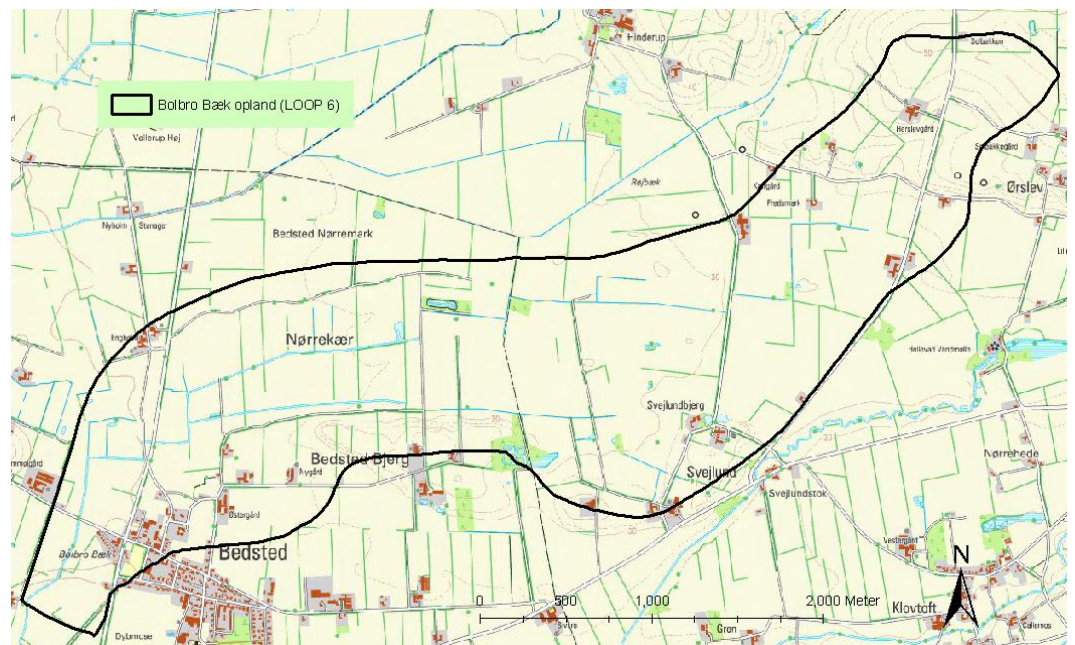
Beskrivelsen af vandkredsløbet samt transport og omsætning af nitrat skal foretages ved opsætning og brug af en dynamisk, procesbaseret og arealdistribueret oplandsmodel til beskrivelse af vand- og kvælstoftransport i den mættede zone for Landovervågningsopland nr. 6 (LOOP 6) – oplandet til vandløbet Bolbro Bæk. Den opstillede model for LOOP 6 skal bl.a. kunne:

- beregne transporten af vand i mættet zone, dræn, på overfladen, i vandløb og udvekslingen mellem grundvand og vandløb
- beregne transport og omsætning af nitrat fra det vaskes ud fra rodzonen til det løber ud i vandløbene
- beskrive de strømnings-, transport- og nedbrydningsmæssige ændringer af forskellige tiltag i oplandet, f.eks. braklægning, omlægning af arealanvendelsen, ændret landbrugspraksis, afskæring af dræn og udvikling af vådområder
- modellering af forsinkelsen (eller transporttiden) skal belyse, hvornår en effekt af ændret kvælstofudvaskning slår i gennem i kvælstoftransporten i vandløb i forskellige landskabstyper.

Datagrundlaget som ligger til grund for opstillingen af strømningsmodellen er beskrevet i fase 0 rapporten, se /5/. Der vil ikke blive gentaget tekst fra Fase 0 rapporten, men refereret til afsnit i rapporten.

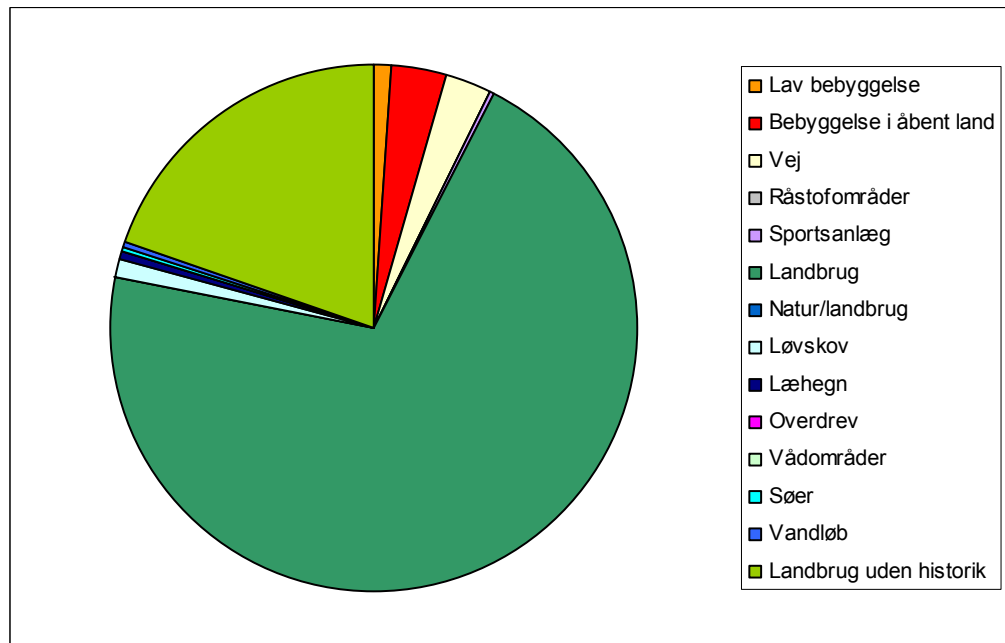
2 Beskrivelse af området

Oplandet til vandløbet Bolbro Bæk er en del af Vandmiljøplanens Landovervågningsprogram, der har til formål at undersøge landbrugets gødnings- og pesticid anvendelse samt tab af disse stoffer til vandmiljøet. Oplandet er et af 5 oplande, hvor der foretages målinger af vand- og næringstransport i samtlige dele af vandkredsløbet. De enkelte oplande er udvalgt således at de repræsenterer landsgennemsnittet bedst muligt med hensyn til jordbund, klima og landbrugspraksis. Oplandet til Bolbro Bæk, kaldet LOOP 6, se Figur 2.1, udgør 820 ha. hvor den dominerende jordtype er grovsandet jord (67 % af arealet).



Figur 2.1 LOOP 6 området. ©KMS.

Arealanvendelsen i LOOP 6 er domineret af landbrug, som udgør 94 % af oplandet, hvor de resterende arealer udnyttes til åbent land, skov, vej og vådområder. I Figur 2 ses fordelingen af arealanvendelsen i LOOP6 oplandet. For hver type af arealanvendelse og jordtype er der beregnet vandbalance og kvælstofudvaskning med Daisy-modellen. I beregningerne indgår oplysninger fra landmændene om gødningsforbrug, afgrøder og jordbearbejdning. Landbrug uden historik i Figur 2 er landbrug, hvor der er ikke foreligger oplysninger.



Figur 2. Fordeling af arealanvendelse i LOOP6 svarende til DMU's opsætning af Daisy-søjler.

Det gennemsnitlige forbrug af handelsgødning og husdyrgødning for landbrugsarealet i oplandet er henholdsvis 98,5 og 120,5 kg N/ha. Kvælstofudvaskningen fra landbrugsarealer varierer mellem 12 og 78 kg N/ha alt efter jordtype og brug. Kvælstofudvaskningen fra bebyggede arealer er 23 kg N/ha og fra øvrige arealer 4-5 kg N/ha.

2.1 Geologi

Der er opstillet en geologisk model for projektområdet i GeoScene3D. For en detaljeret gennemgang af de geologiske forhold i området henvises der derfor til den udarbejdede rapport, se /6/.

Overordnet set er størstedelen af kortlægningsområdet er beliggende på en flad hedeslette, der falder mod syd og vest. På hedesletten ses enkelte bakkedrag. I det nordøstlige hjørne af kortlægningsområdet ses et bakkeparti, der er gennemskåret af enkelte erosionsdale. Området udgøres primært af en smeltevandsslette (Tinglev Hedeslette) som er aflejret af NØ-isen fra Hovedfremstødet i sidste istid, Weichsel. Bakkerne i det nordøstlige hjørne af kortlægningsområdet repræsenterer en større bakkeø fra forrige istid Saale og omtalt som Toftlund Bakkeø af Per Smed.

De mindre bakker, der rager op på hedesletten er bakkeøer og er af Saale alder. Bakkerne står tilbage som erosionsrester fra det oprindelige morænelandskab fra Saale istiden.

2.2 Hydrogeologi

Den geologiske model består af tolkningspunkter for 6 flader, Bilag 3:

- Sand 1 top
- Sand 1 bund
- Sand 2 top
- Sand 2 bund
- Sand 3 top
- Sand 3 bund

Tolkningen inkluderer desuden er lag for prækvarteret, der ikke er medtaget, idet det antages at de øverste tre sandlag er tilstrækkelige til at beskrive modellen for nitratomsætning og at disse lag udgør langt størstedelen af vandbalancen for oplandet.

I afsnit 7.2 er lagene og fremgangsmåden beskrevet indgående.

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 6 – oplandet til vandløbet Bolbro bæk.

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.

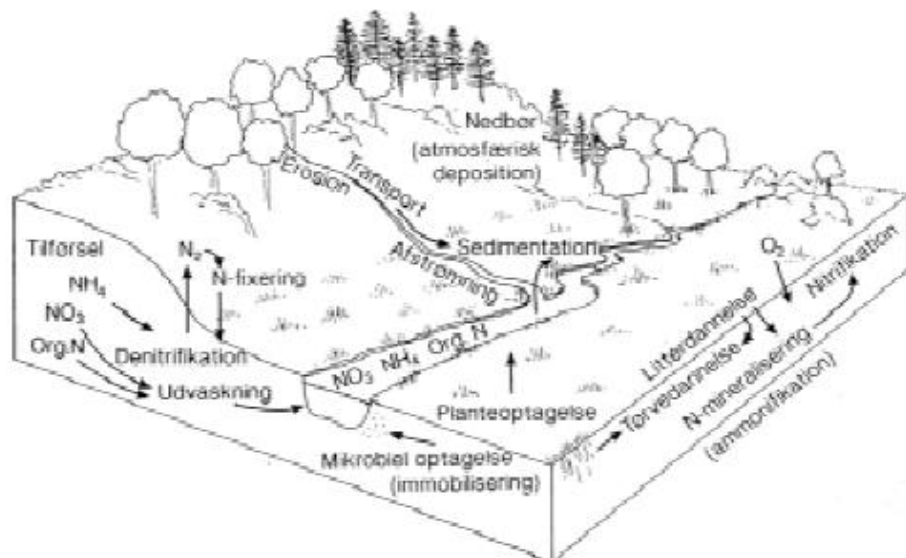
Placeringen af reduktionsfronten vil have stor betydning for reduktionen af nitrat i grundvandszonen. Der er derfor nødvendigt at foretage en vurdering mht. hvordan reduktionsfronten skal placeres i områder, hvor der ikke er andre informationer, samt at vurdere den usikkerhed der er på placeringen, samt 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.
- Ved kalibreringen af modellen bliver vandbalancen fra LOOP 6 oplandet verificeret ved brug af afstrømningshydrografen for station 42.42. 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. Stationen beskriver ligeledes afstrømningen fra hele oplandet.

- Det vurderes at modellens beskrivelse af vandløbene er vigtig, og der skal derfor foretages en løbende vurdering mht. hvilke vandløb og grøfter der skal medtages i modellen. Specielt i det nordlige område kan der være brug for at vurdere hvilke grøfter der skal medtages i modellen.
- Drænastrømningen er afgørende for en korrekt beskrivelse af de store nitratkoncentrationer i vandløbet. I LOOP 6 eksisterer der dog ingen information fra drænstationer, og drænastrømningen bliver derfor verificeret ved de 2 afstrømningsstationer. Dette foregår primært ved kalibrering mod de større hændelser i afstrømningshydrografen.



Figur 3 Schematisk 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 transportmodellen derfor fokuseres på at få beskrevet de nitratomsætningen 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 modellag end det øverste.

- Ved kalibreringen af transportmodellen er der fokus på at få en god overensstemmelse med observationerne ved begge vandløbsstationerne. Station 42.42 vil dog have en højere prioritet idet den repræsenterer den totale afstrømning fra oplandet.

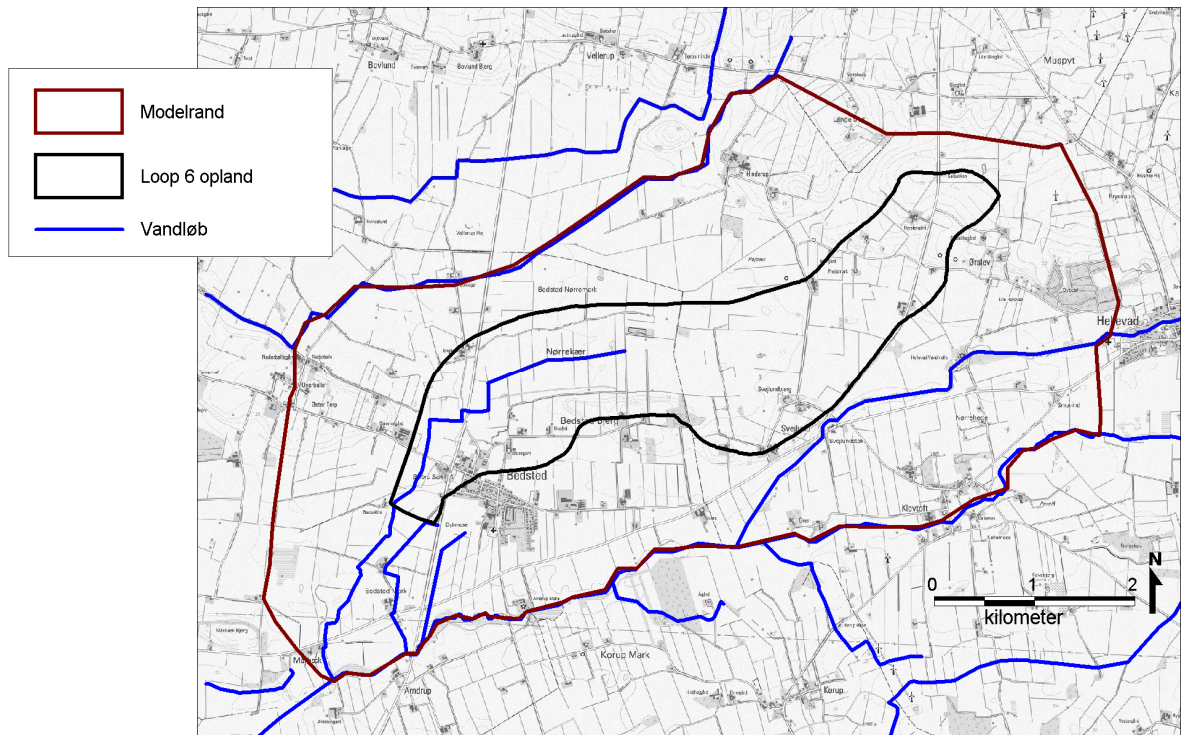
Beregningslagene opsættes som udgangspunkt identisk med de geologiske formationer. Det vurderes dog, at det kan være nødvendigt med en yderligere inddeling af beregningslagene over reduktionsfronten, idet der ønskes en detaljeret beskrivelse af grundvandsstrømningen over og omkring reduktionsfronten. Dette vil dog først ske i forbindelse med opstillingen af transportmodellen.

4 Fastlæggelse af projektområde

Projektområdet er defineret som oplandet til LOOP6 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 LOOP6, 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 4 viser hhv. det definerede projektområde og oplandet til LOOP6. Projektområdet er defineret på baggrund af følgende:

- Nord: projektområdet er sat ved Landeby Bæk, hvor dræningen til dette vandløb kan fungere som en fasthold trykrand eller trykbetinget fluksrand (type 3)
- Syd: det er her valgt at trække randen til Vidå som fungerer som regional dræning. Det øvre magasin antages at have god kontakt til vandløbet, og randbetingelsen her kan her være fastholdt til koten af vandspåejlet i vandløbet.
- Øst: I dette område afsnøres magasinerne og der forekommer mere ler. Randen er optegnet efter på tværs af potentialelinjer. Dette giver en god afgrænsning i de øverste jordlag, idet det kan antages at der er lille eller ingen strømning på tværs af afgrænsningen.
- Vest: Her følges en afgrænsning vinkelret på det regionale grundvandsstrømningsretning og randen her antages at være en no-flow rand.



Figur 4: projektområde (rød streg) og LOOP 6 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.

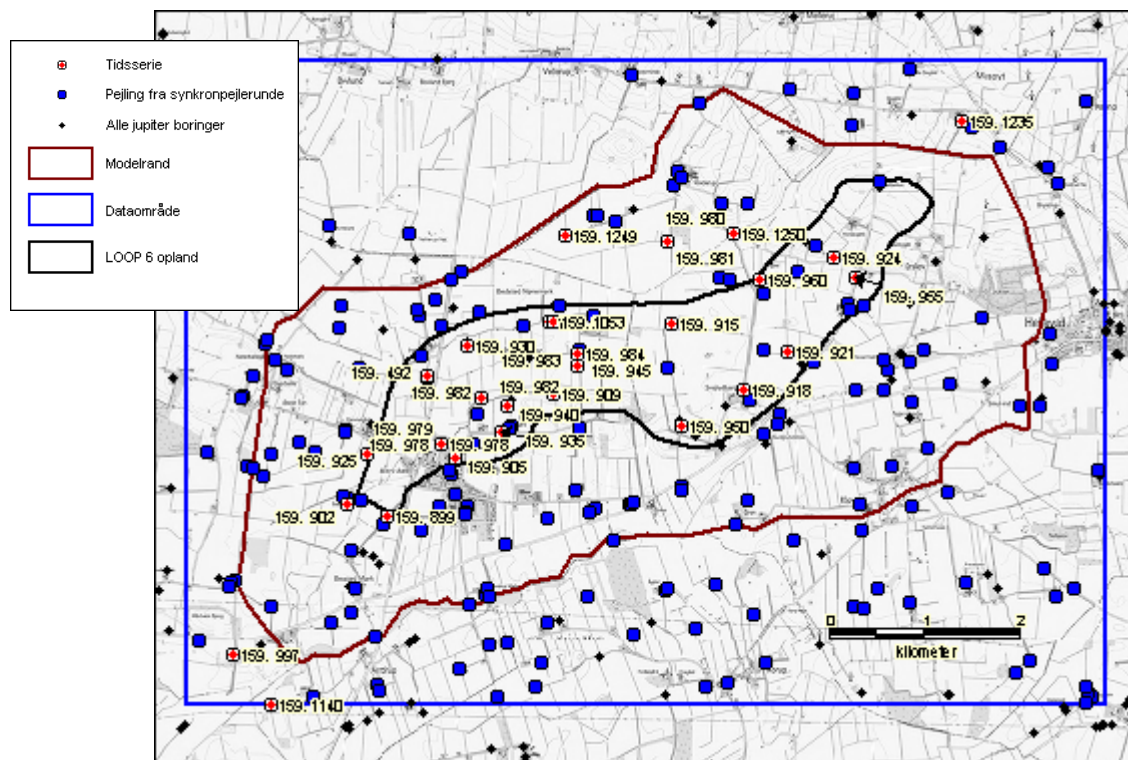
5.1 Grundvandsobservationer

Grundvandsobservationer benyttes til model kalibrering og validering. I modelområdet er der 94 grundvandsobservationer. I forhold til opgavens formål, beregning af nitrattransporten i oplandet, er der special fokus på at få modellen til at beregne et korrekt strømningsbillede i den øverste del af grundvandszonen.

Datagennemgang og -behandling af observationsdata er beskrevet i Fase 0 rapporten.

Kapitel 2.1 i Fase 0 rapporten beskriver potentialemålinger i grundvandet.

Kapitel 2.2 i Fase 0 rapporten beskriver håndteringen af vandindvinding

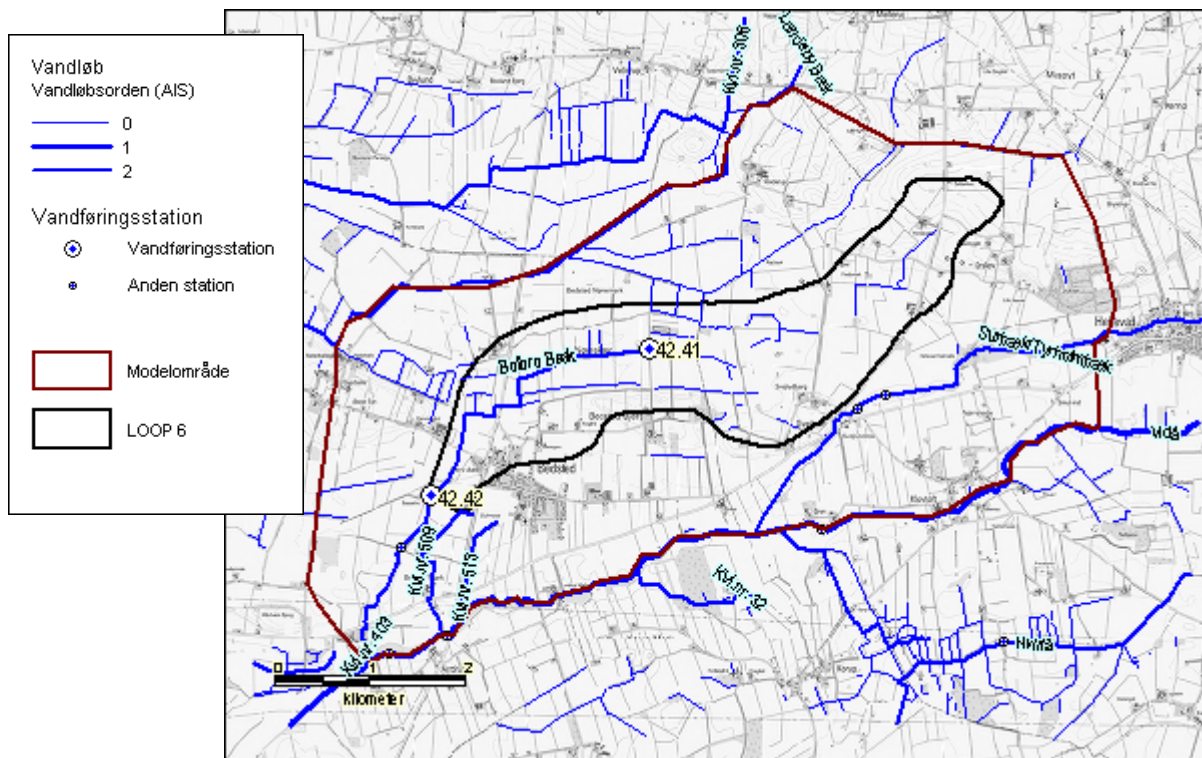


Figur 5: Grundvandsobservationer i modellen.

5.2 Vandløbsobservationer

Der er i modelområdet 2 vandløbsstationer, som alle benyttes ved kalibreringen af vandløbsmodellen (MIKE 11 modellen). Station HU 42.42 er beliggende i den nedstrømsdel af Bolbro Bæk ved LOOP 6 oplandets afgrænsning, mens station HU 42.41 er lokaliseret, centralt i LOOP 6 oplandet, se Figur 6.

Kapitel 2.3 i Fase 0 rapporten beskriver vandføringsmålingerne og analyse af vandføringen ved de to stationer.



Figur 6: Vandløbsstationer

6 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 strømningsmodel, dvs. en detaljeret grundvandskomponent, beskrivelse af de overfladenære strømningskomponenter (dræn og overfladisk afstrømning), vandløbsafstrømning og en fysisk baseret udveksling mellem grundvand og vandløb/vådområder.

6.1 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 trykniveaubetingelser ved modelranden.

6.2 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 arealer.

6.3 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.

7 Opstilling af strømningsmodel

Modellen består af en grundvandsmodel (MIKE SHE) og en vandløbsmodel (MIKE 11). Modellen er en dynamisk model opstillet i et 50 x 50 meter net. Modelnettet er orienteret således at centrum af modelcellerne er sammenfaldende med centrum af DMU's Daisy kolonner for Loop 6.

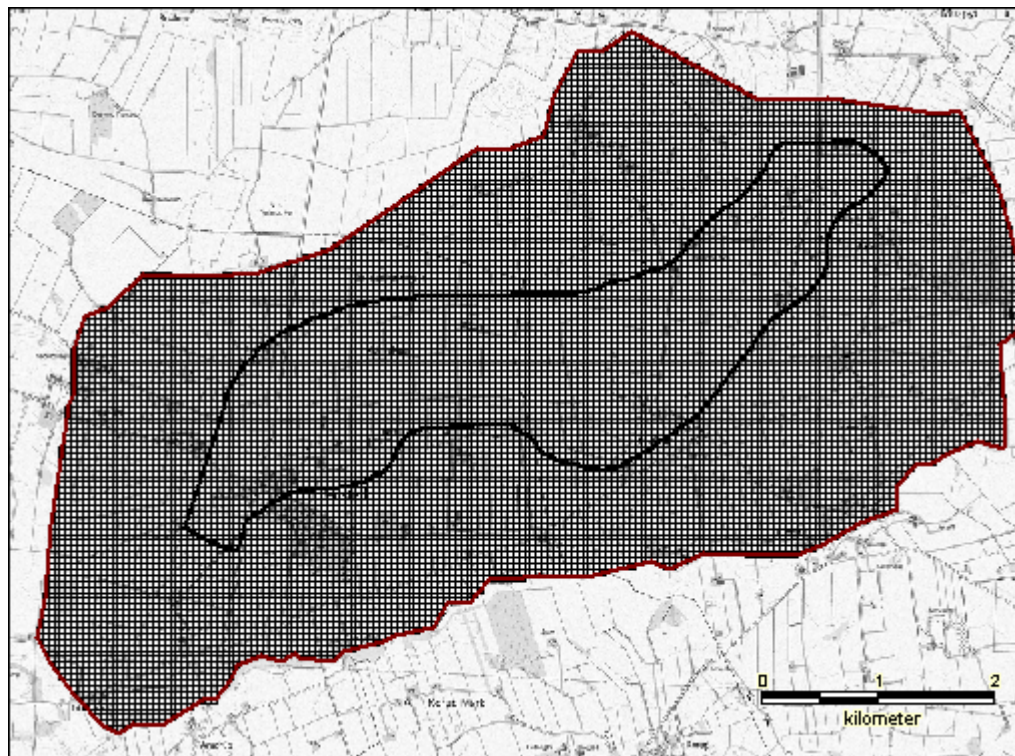
Det opstillede værktøj opstilles i forhold til opgavens formål og den opstillede konceptuelle model.

7.1 Modelområde og randbetingelser

Model området 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 6 oplandet) at evt. usikkerheder på randbetingelserne ikke påvirker strømningen i selve oplandet.

Der er som udgangspunkt valgt at benytte en fastholdt trykniveau på alle modelrandene, undtagen langs den vestlige rand, hvor det antages at der ingen strømning sker over modelranden. Langs den sydlige og nordlige modelrand, er modelområdet defineret således at vandløbene Ladeby bæk (mod nord), og Vidå (mod syd), er indenfor modelområdet. Vandløbene vil dermed i praksis være styrende for grundvandspotentialen for de overfladenære lag. I vandløbsmodellen er der indlagt randbetingelser således at der beregnes en relativt troværdig vandspejlsvariation i vandløbene.

Definitionen af modelområdet er beskrevet yderligere i fase 0 rapporten, se /5/ .



Figur 7 Modelområde (rød streg) og LOOP1 oplandsgrænse (sort streg) samt modelnet.

7.2 Beregningslag

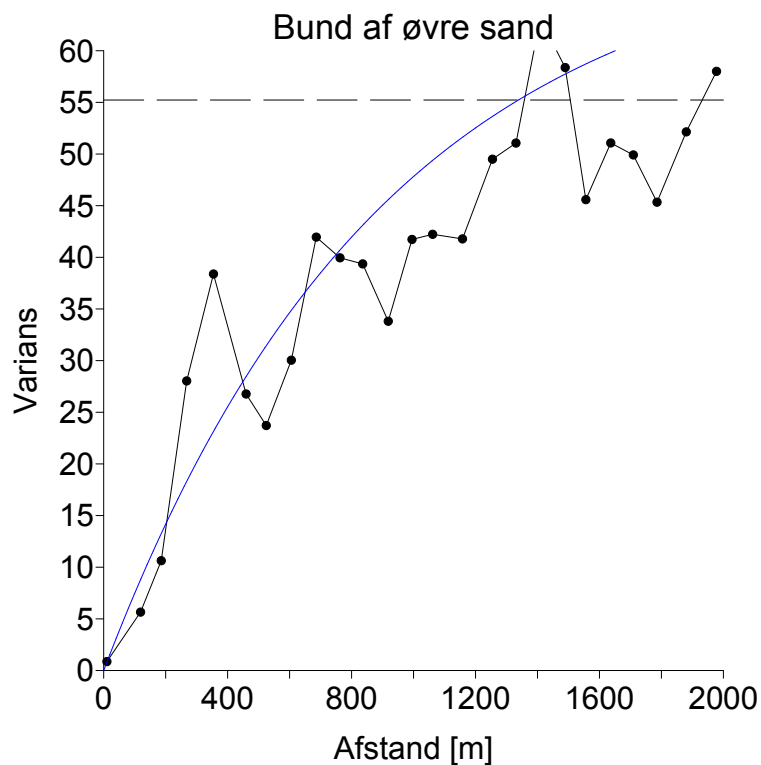
Beregningslagene i strømningsmodellen følger de geologiske lag.

Tabel 1 Beskrivelse af beregningslag

Lag	Geologisk enhed	Hydrostratigrafisk flade
1	Sand 1	Sand 1 top
2	Ler 1	Sand 1 bund
3	Sand 2	Sand 2 top
4	Ler 2	Sand 2 bund
5	Sand 3	Sand 3 top

Den geologiske model er overført til en hydrostratigrafiske model, som er indlagt i MIKE SHE. Udarbejdelsen af den hydrostratigrafiske model har følgende arbejds-gang

For hver lagflade er der foretaget en variogramanalyse for at vurdere data og se om der er strukturer i data man skal tage hensyn til under interpolationen samt om data en nær identisk mht. korrelationslængde, anisotopi og lineære trends. Figur 8 viser variogram med tilpasset model for bund af øvre sand. Herefter er der for hver flade foretaget en interpolation med kriging, hvor variogrammet er benyttet. Der er interpoleret til samme grid-net som MIKE SHE model samt Daisy grid, således at fladerne kan indlægges direkte i modellen uden at foretage en reinterpolation.

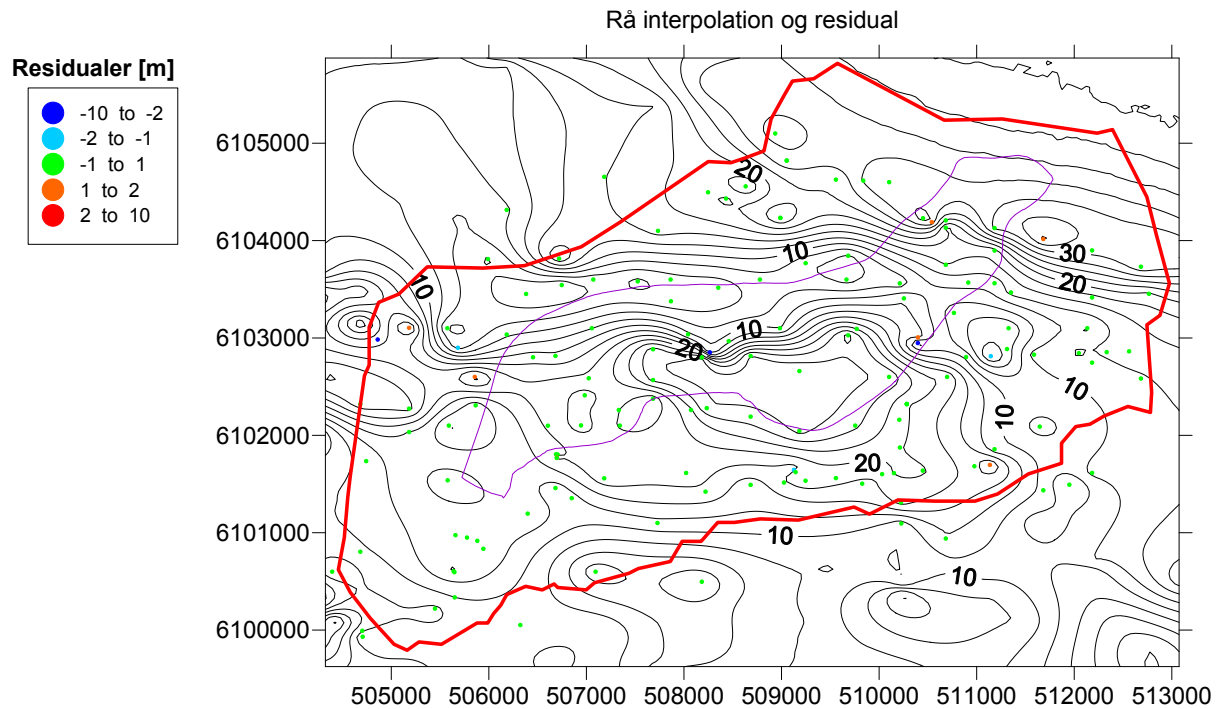


Figur 8: Variogram over bund af øverste sand

De enkelte flader er herefter gennemgået for at eliminere krydsende og tynde lag. MIKE SHE kan have numeriske problemer med tynde lag, og der er derfor benyttet en minimumstykkelser på 0,5 m. Korrektionen af fladerne er foretaget ved at starte ved terræn og bevæge sig ned gennem lagseriens flader. Hvis et underliggende flade for et lag er over en overliggende flade, så korrigeres den nederste flade med en minimumstykkelser på 0,5 m.

Herefter er de interpolerede flader kontrolleret ved at beregne residualer til den oprindelige tolkning. Denne kvalitetssikring af interpolationen betyder at datapunk-

terne kan genfindes i den interpolerede flade samt vurdere om der kan være tolkningspunkter der er placeret uhensigtsmæssigt.



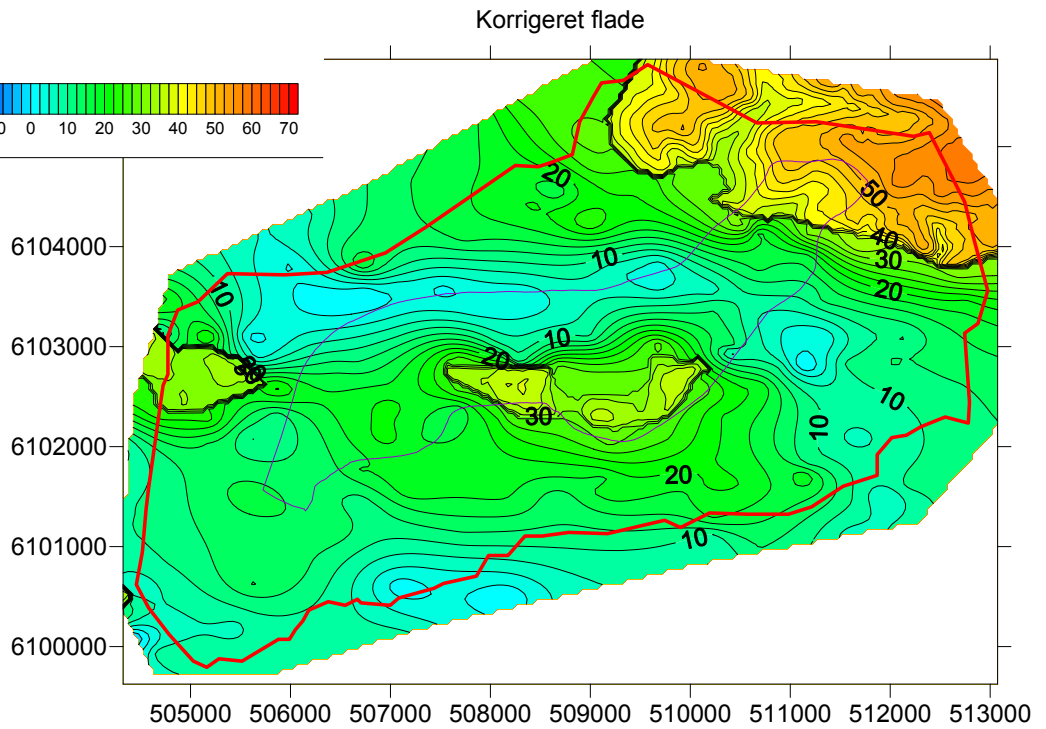
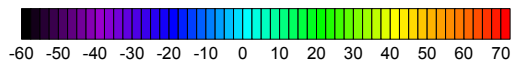
Figur 9: Kontrol med residualer for interpolation

Efter interpolation og kontrol er flader desuden indlagt i GeoScene3D for visuel bedømmelse af som ekstra kvalitetssikring.

Figur 10 viser bunden af øvre sand og Figur 11 mægtigheden af øvre sand. I Bilag 3 ses interpolation og databehandling af de enkelte flader.

Interpolation

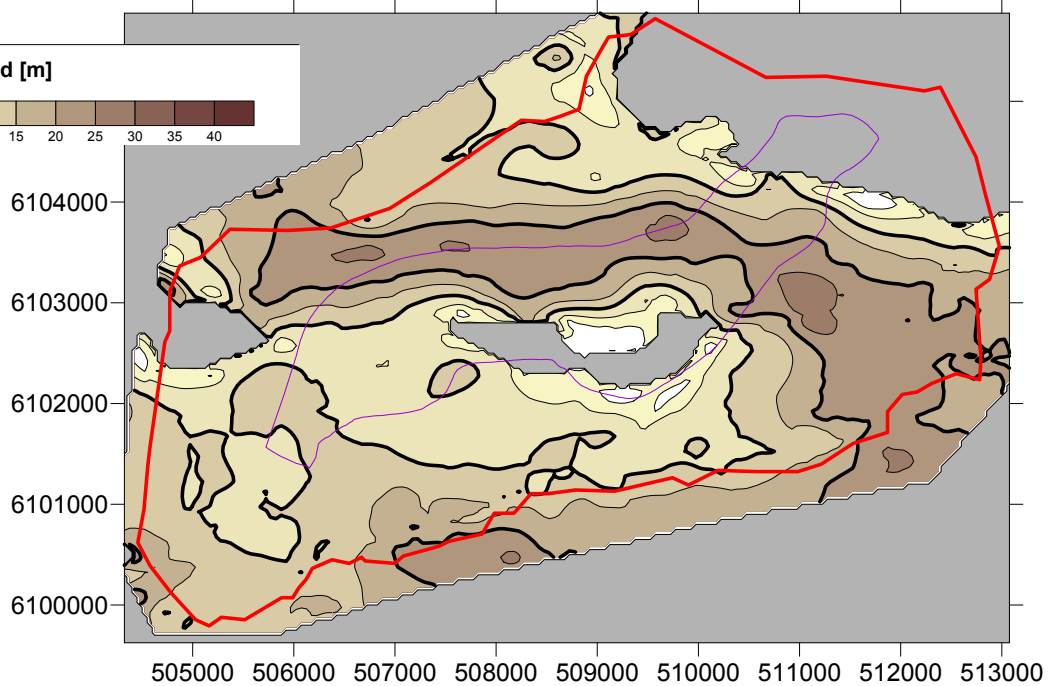
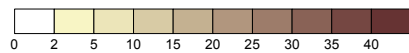
Kote (m)



Figur 10: Kote til bund af øvre sand

Lag mægtighed (over)

Lag mægtighed [m]



Figur 11: Mægtighed af øvre sand

I forbindelse med specificeringen af de initiale hydrauliske parametre til de enkelte hydrostratigrafiske enheder, er der sket en vurdering af parametrene fra den af Carl Bro opstillede model for Bedsted, se /7/, samt en vurdering i forhold til den generelle viden om området. Da det er valgt at benytte automatisk kalibrering af den opstillede model, er det valgt at benytte nogle generelle værdier for de hydrauliske parametre. Værdierne fra den tidligere opstillede Bedsted Model, er dog benyttet ved specificeringen af variationen på de enkelte parametre. Dette er forklaret nærmere i kalibreringsafsnittet, se afsnit 8.2. Tabel 2 viser de benyttede initiale hydrauliske parametre for de enkelte hydrostratigrafiske formationer.

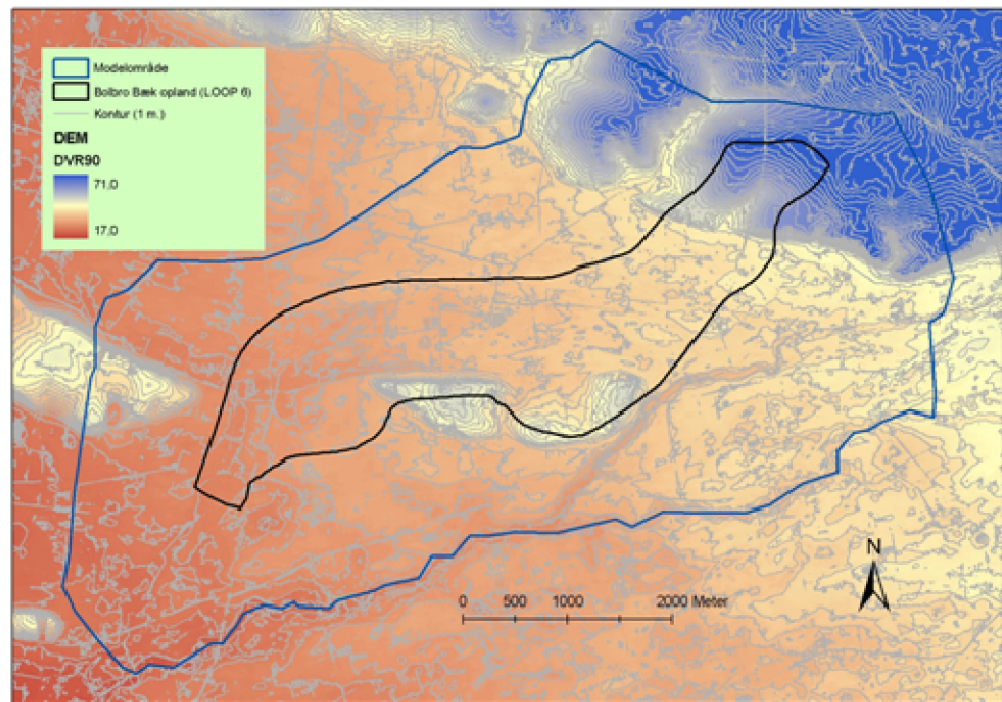
Tabel 2 Initiale hydrauliske parametre

Parameter	Betegnelse	Kh (m/s)	Kv (m/s)
Sand 1	S1	1,00E-05	1,00E-06
Ler 1	ML	1,00E-08	1,00E-09
Sand 2	SK - 1	1,00E-06	1,00E-07
Ler 2	SK - n	1,00E-08	1,00E-09
Sand 3	S4	1,00E-05	1,00E-06

7.3 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 en opløsning på ca. 5 m.

Figur 12 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 12 DEM for modelområdet med 5 meters opløsning

7.4 Klima og nettonedbør

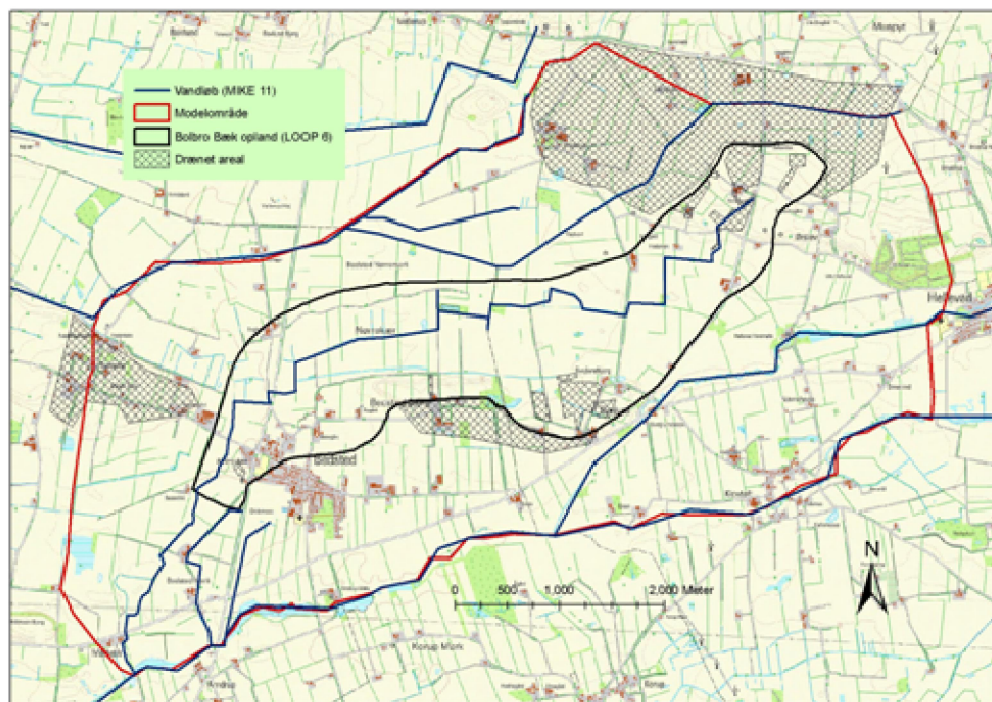
Den numeriske model opstilles som en grundvands-vandløbsmodel, hvor nettonedbøren gives som et separat input. Nettonedbøren fungerer dermed som en øvre randbetingelse til modellen. Beregningerne af nettonedbøren er foretaget med DAISY, og er beskrevet i flere detaljer i afsnit 2.5 i Fase 0 rapporten, se /5/.

I forbindelse med projektet er der foretaget en detaljeret nettonedbørsberegning for selve LOOP 6 oplandet. Da modelområdet er udvidet ud over selve Loop oplandet, har det været nødvendigt at ekstrapolere nettonedbør fra LOOP oplandet til hele modelområdet. Ekstrapolationen tager højde for dybde til grundvandsspejl, arealanvendelse samt jordbundstype. Beskrivelsen findes i kapitel 2.5.1 i Fase 0 rapporten, se /5/. Det er aldrig optimalt at ekstrapolere nettonedbør beregnet, men i dette tilfælde vurderes det at være i orden, da den detaljerede nettonedbør benyttes i selve fokusområdet. Fro de efterfølgende kvælstofberegninger betyder ekstrapolationen ikke noget for selve LOOP 6 oplandet, idet oplandet i sig selv burde være et lukket system uden udveksling af nitrat over oplandsgrænsen.

7.5 Dræn

Ved opstillingen af modellen er det vigtigt at få en god beskrivelse af de drænedede arealer. De arealer, der forventes at være drænedede, er vist på Figur 13. 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 7.7 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 dræningsmodulen i MIKE SHE modellen. I modellen er dræn defineret således at vandet ledes til den nærmeste vandløbsgren. I områderne udenfor LOOP 6 oplandet ledes drænastrømningen til modelranden og ud af modellen. Dette er valgt da vandløbsopsætningen udenfor LOOP 6 oplandet er forsimplet.

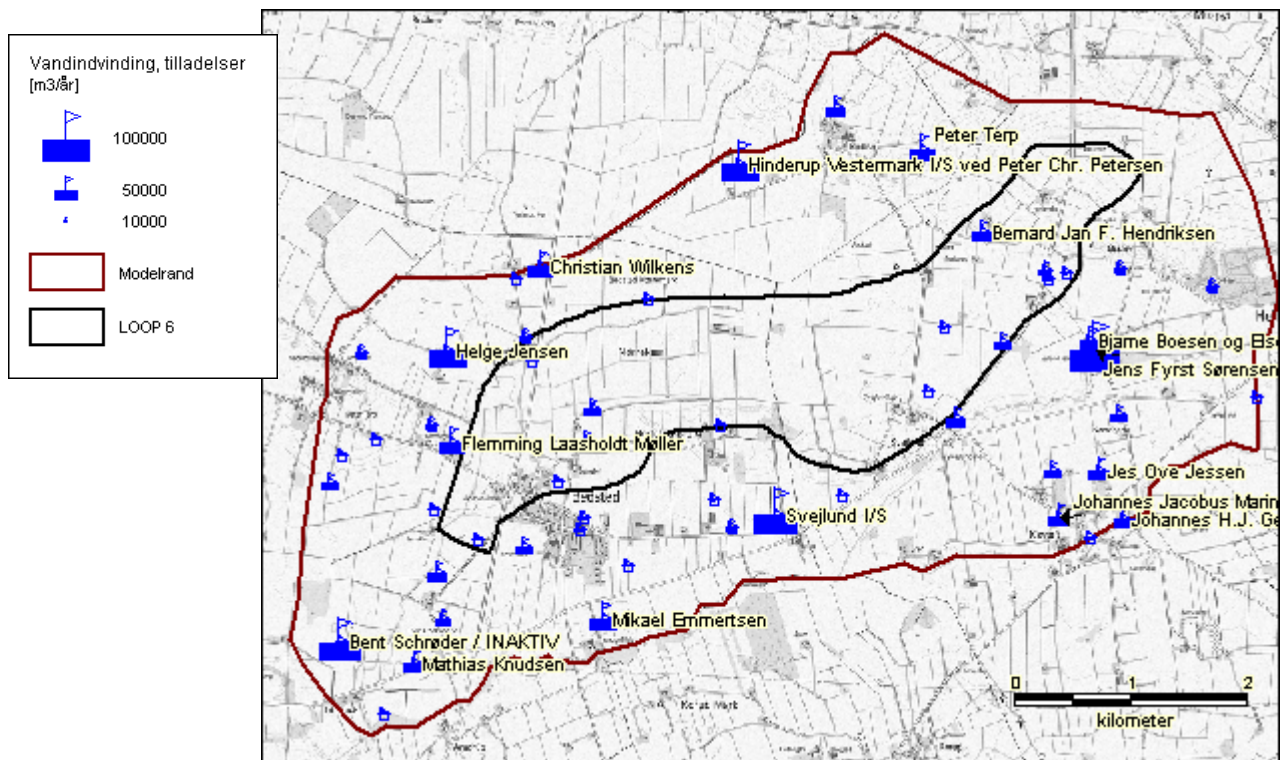
Drænastrømningen i modellen styres af forskellen mellem den specificerede drændybde og grundvandsniveauet, således at en tidsafhængig dræning af vandet sker, når grundvandspotentialet overstiger drænniveauet. Drænastrømningen beregnes som forskellen mellem drænniveau og grundvandspotentiale multipliceret 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 13 Dræned arealer i LOOP 6 oplandet (vandløb er vist med blå linjer, modelområde med rød streg, og LOOP 6 oplandet med sort streg)

7.6 Indvinding

Alle større indvindinger i LOOP 6 oplandet, samt i det omkringliggende modelområde er medtaget i modellen. Figur 14 viser indvindingerne i oplandet. Informationerne om de enkelte indvindinger er indsamlet fra PC Jupiter, og er beskrevet nærmere i fase 0 rapporten, se /5/.



Figur 14 LOOP 6 opland med indvindingsboringer

Den årlige indvinding er opgjort for de enkelte anlæg, og er vist i Fase 0 rapporten i Bilag 3, se /5/

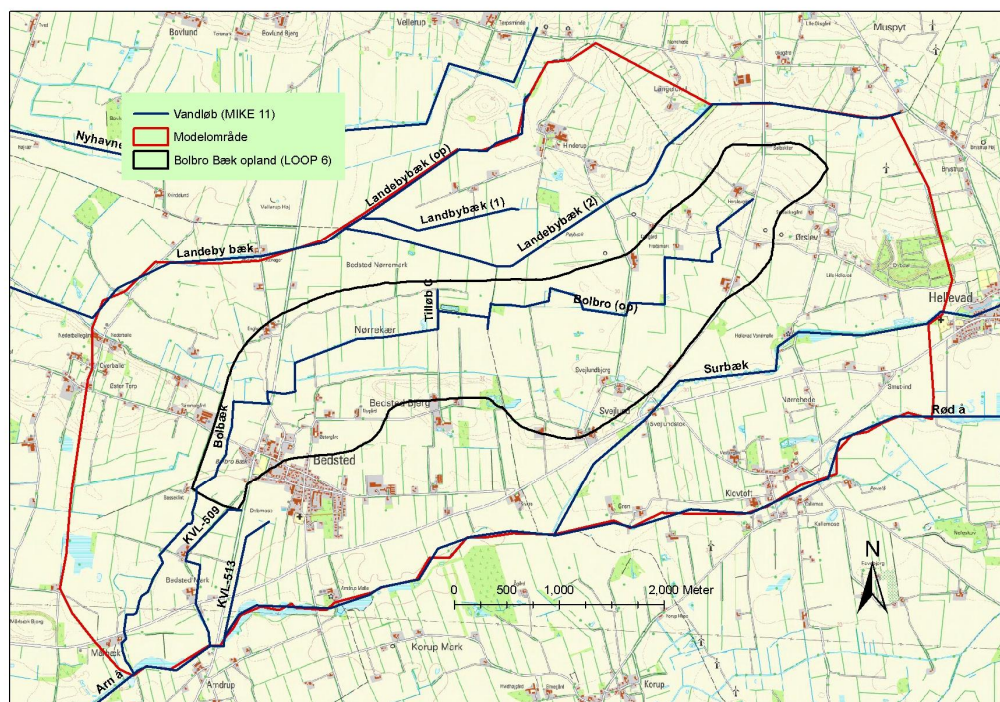
7.7 Opstilling af vandløbsmodel

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.

Ved opstillingen af vandløbsmodellen er der taget udgangspunkt i den regionale DK-Model. Denne model er opstillet i MIKE SHE – MIKE 11, og indeholder en beskrivelse af samtlige større vandløb i Danmark. Modellen er dog opstillet ved brug af en meget stabil, men simpel løsningsmetode (routing). Denne løsningsmetode har den fordel at den regner hurtigt, men da den udelukkende flytter vandet ned gennem vandløbssystemet, og beskrivelsen af specielt vandstandene meget usikker. I den vandløbsmodel der opstilles for LOOP 6 området, er det nødvendigt at have en bedre beskrivelse af de hydrauliske forhold, idet udvekslingen af vand mellem grundvand og vandløb er afgørende for beskrivelse af de hydrologiske processer i oplandet. Det er derfor nødvendigt at benytte en mere detaljeret løsningsmetode i vandløbsmodellen. Dette gør at det som udgangspunkt kun er vandløbstværsnitte-

ne fra den regionale DK-model der benyttes. Disse data er gennemgået og kvalitetssikret således at der ikke er geometriske fejl i data (bl.a. spring i vandløbsbund), samt at der er sammenhæng mellem vandløb og topografi.

De vandløb som ikke er inkluderet i DK-modellen er beskrevet ud fra vandløbsregulativet, som er indhentet fra Tønder kommune. På alle mindre vandløb er der benyttet et simpelt tværsnit md en dybde på en meter og en brinkbredde på 1 meter. Brinkkoten på de enkelte tværsnit er defineret ud fra den benyttede topografi.



Figur 15 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 6 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 vandløbsmodellen 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.

8 Kalibrering af strømningsmodel

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.

8.1 Opstilling af nøjagtighedskriterier

Nøjagtighedskriterierne specificeres i forhold til kapitel 12 i /4/. Der er opstillet både kvantitative og kvalitative nøjagtighedskriterier (eller kalibreringskriterier).

8.1.1 Kvantitative kalibreringskriterier

Boks 1 Statistiske størrelser af pejledata ved modelkalibrering fra /4/.

ME (mean error eller middel fejl) 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 /4/.

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 /4/. Dette betyder at kravene kan opstilles som:

$$1. \quad ME \leq \Delta h_{\max} \cdot \beta_1 = 37 \cdot 0,01 = 0,4.$$

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

$$2. \quad SE \leq \beta_2 = 1.65$$

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

$$3. \quad RMS \leq \Delta h_{\max} \cdot \beta_3 = 37 \cdot 0,05 = 1,85$$

Δh_{\max} er den maksimale forskel i grundvandspotentialet. I modelområdet er dette ca. 20 m i områdets sydøstlige del og ca. 57 m i den nordøstlige del. Derved er $\Delta h_{\max} = 37$ m. Man kunne dog overveje om det høje potentiale i den nordøstlige

del er afgørende for grundvandsforholdene i selve oplandet. Hvis dette er tilfældet kunne Δh_{\max} skærpes til 11 meter.

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 stille krav til den enkelte vandføringens måling. Da den relative usikkerhed på de målte vandføringer generelt er større for de små værdier end store, samt at modellen kan meget svært ved at ramme de helt små afstrømningsværdier, er det valgt at stramme kravet ved højere vandføringer.

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.

Tabel 3 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

Bolbro bæk har en middelvandføring på 115 l/s ved station HU 42.42, og Tabel 3 ses at $F_{bal} < 25 \text{ \%}$ og $E > 0.5$ for denne vandføring. For station HU 42.41 er middelvandføringen 53 l/s og her er kravene mindre restriktive med $F_{bal} < 50 \text{ \%}$ og $E > 0.2$.

8.1.2 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.

8.2 Modelkalibrering

8.2.1 Overordnet fremgangsmåde

Den overordnede fremgangsmetode ved kalibreringen af LOOP modellen er:

- Udførelse 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.
- 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.

8.2.2 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 føl-

somhedsanalyse 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 4 Skaleret parameterfølsomhed for hhv. vandløbs- og grundvandsobservationer

	Vandløb	Grundvand	Samlet
Sand 1 K_h	100	100	100
Sand 1 S_y	2	1	1
Ler 1 K_h	3	0	1
Sand 2 K_h	8	17	17
Dræn	7	4	3
Vandløbslækage	3	0	0

Tabel 4 viser den skalerede parameterfølsomhed i forhold til vandløbs- og grundvandsobservationer, samt i forhold til det samlede objektiv. 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 Sand 1. Dette skyldes primært at hovedparten af observationsboringerne er filteret i Sand 1. For vandløbsobservationerne er Sand 1 ligeledes den mest følsomme parameter, dog er vandløbslækagen og drænkonstanten følsomme i forhold til kalibreringen mod vandløbshydrograferne.

8.2.3 Automatisk kalibrering

Ud fra følsomhedsanalysen er den opstillede strømningsmodel optimeret ved brug af AutoCal. Den automatiske kalibrering er foretaget på 6 parametre. Derudover er den vertikale ledningsevne i Sand 1, Ler 1 og Sand 3 fastholdt ved en anisotropifaktor på 10. Dvs. at der er optimeret ved justering af den horisontale ledningsevne i disse lag, hvorefter den vertikale ledningsevne er justeret ved brug af anisotropifaktoren. Den automatiske kalibrering er kørt til ende, ved at der i alt er foretaget 242 simuleringer. De endelige parameterværdier er vist i Tabel 5.

Tabel 5 Parameterværdier fra den automatiske kalibrering

Parameter	Min. værdi	Maks. værdi	Initial værdi	Endelig værdi
Sand 1 K_h	1,0e-7	1,0e-3	1,0e-5	9,9e-4
Sand 1 K_v	K_h Sand 1 / 10	K_h Sand 1 / 10	K_h Sand 1 / 10	9,9e-5
Sand 1 S_y	0,1	0,3	0,2	0,12
Ler 1 K_h	1,0e-8	1,0e-5	1,0e-6	8,3e-6
Ler 1 K_v	K_h Ler 1 / 10	K_h Ler 1 / 10	K_h Ler 1 / 10	8,3e-7
Sand 2 K_h	1,0e-7	1,0e-3	1,0e-5	3,0e-4
Sand 2 K_v	K_h Sand 2 / 10	K_h Sand 2 / 10	K_h Sand 2 / 10	3,0e-5
Drænkons- stant	6,0e-7	1,0e-5	1,1e-6	1,2e-6
Vandløbs- lækage	1,0e-7	1,0e-4	1,0e-5	9,2e-5

8.2.4 Kalibrering af vandløbsmodellen

Ved kalibreringen af vandløbsmodellen er der primært fokuseret på en god bestemmelse af den totale afstrømning fra oplandet (station HU nr. 42.42). Stationen 42.41 er dog også benyttet i kalibreringen, og det er valgt at vægte de to stationer ens i den automatiske kalibrering.

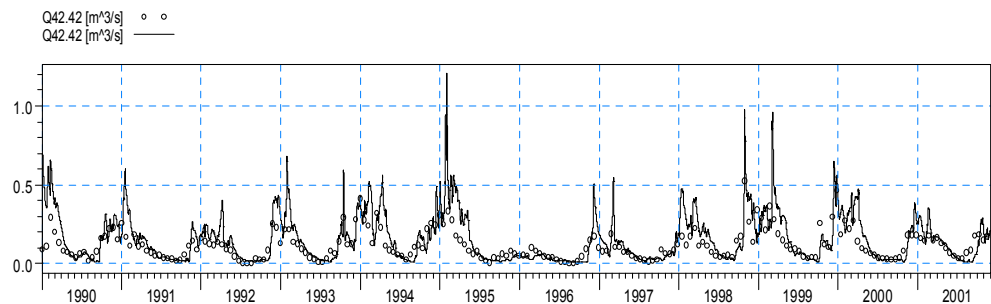
Tabel 6 Kalibreringsværdier for vandløbsstationer

Station	Qsim, gen.	Qobs, gen.	Fbal	Fbal, krav	E	Ekrav
42.41	0,059	0,054	-9	< 50	0,30	> 0,2
42.42	0,097	0,115	16	< 25	0,41	> 0,5

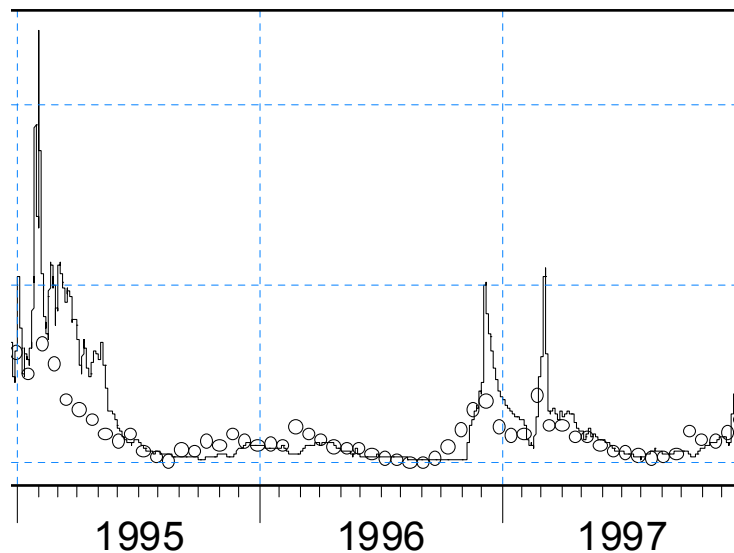
Tabel 6 viser den opnåede kalibreringsstatistik for de to vandløbsstationer. Det ses at de opstillede nøjagtighedsmål er overholdt for station 42.41 til målene. Station HU 42.42 har ikke helt nået målet, selvom E er betydeligt bedre. Dette skyldes de strammere kriterier. I de efterfølgende afsnit bliver kalibreringen af de enkelte stationer kommenteret.

Station HU 42.42

Station HU 42.42 er den vigtigste afstrømningsstation i oplandet i det den repræsenterer den totale afstrømning fra LOOP 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.

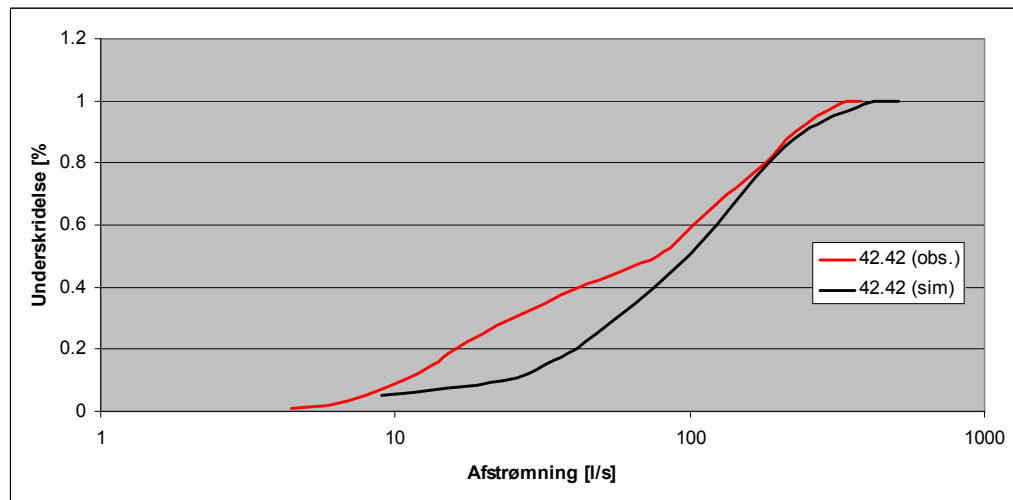


Figur 16 Observerede og simulerede (streg) værdier for station HU 42.42

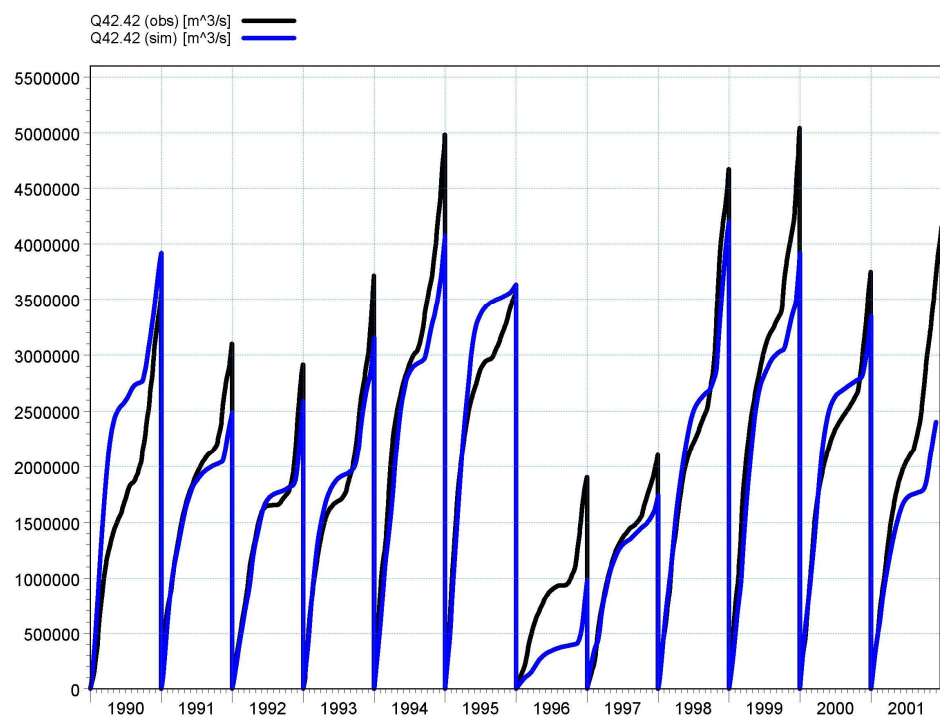


Figur 17 Observerede og simulerede (streg) værdier for station HU 42.42

Figur 16 viser simuleret og observeret afstrømning fra station HU 42.42. Figur 17 viser en i detalje perioden 1995-1997. Der er god overensstemmelse på beregnet og observeret vinterafstrømning. Retensionskurven i foråret er generelt godt bestemt, men der er også en lille tendens til at modellen holder lidt for lang tid på vandet og retensionskurven i modellen bliver hermed lidt for stejl. Sommerafstrømningen er generelt godt bestemt med godt sammenfald af sommer minimumsafstrømning. Modellen har på denne station dog ikke helt kunne beregne afstrømningen i den tørre periode 1995-1996 (Figur 17) - her ses det at den observerede afstrømning er større.



Figur 18 Varighedskurve for hhv. simuleret og observeret afstrømning ved station HU 42.42

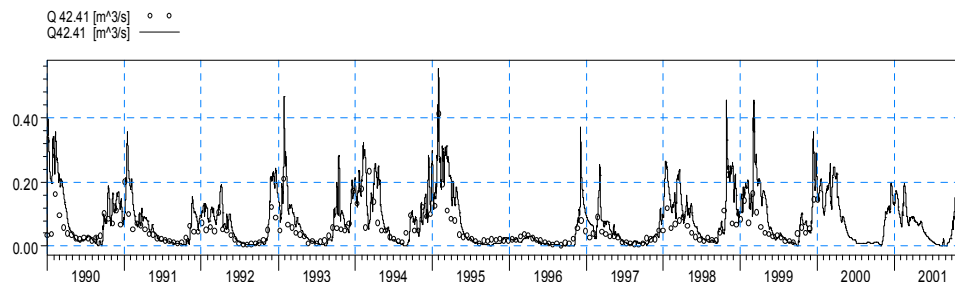


Figur 19 Akkumuleret afstrømning fra station HU 42.42

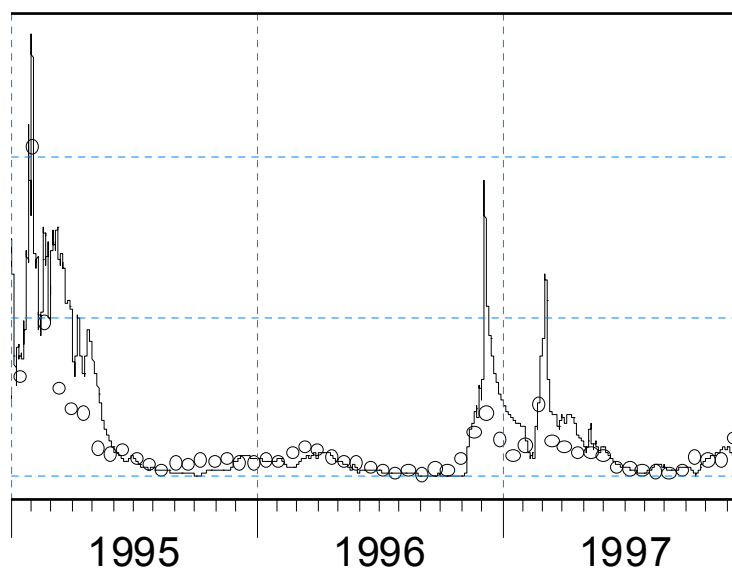
Modellen undersimulerer middelaflstrømningen med 16 %, hvilket viser sig tydeligt på den akkumulerede afstrømning. Overordnet set er der dog en god overensstemmelse mellem den observerede og beregnede akkumulerede afstrømning.

Station HU 42.41

Station HU 42.41 er placeret i den opstrøms del af LOOP 6, og repræsenterer dermed afstrømningen fra den øvre del af oplandet.



Figur 20 Observerede og simulerede (streg) værdier for station HU 42.41

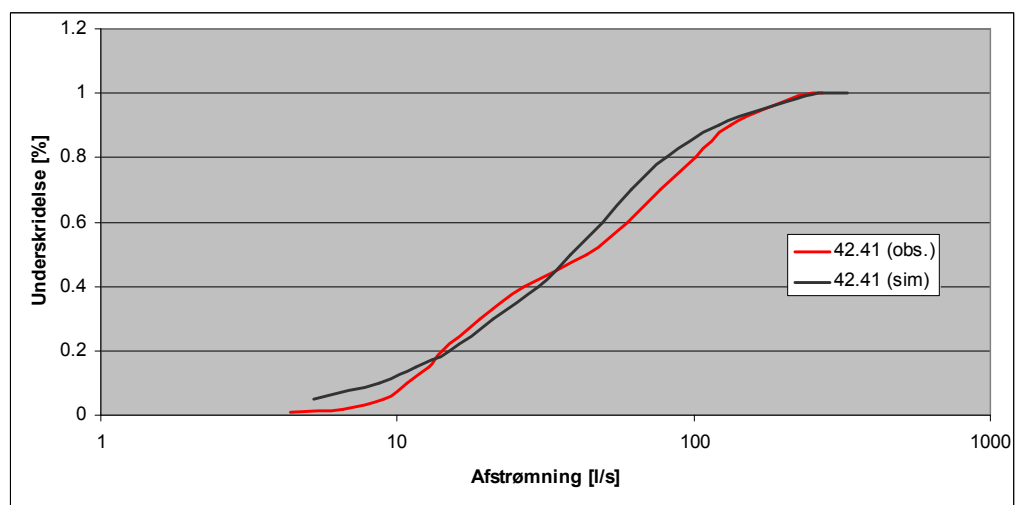


Figur 21 Observerede og simulerede (streg) værdier for station HU 42.41

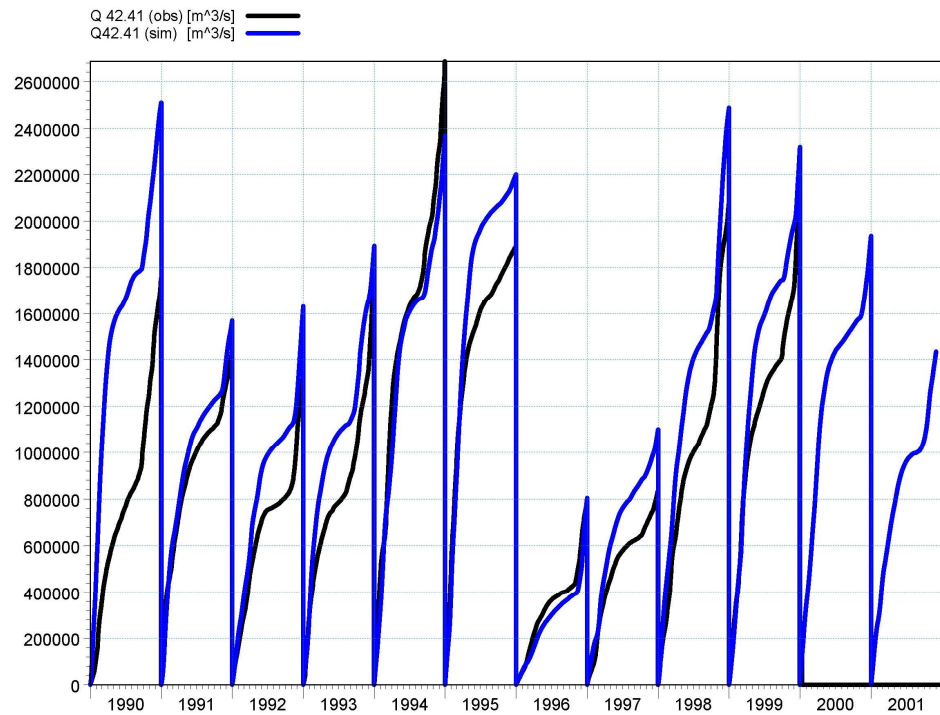
Figur 20 viser HU 42.41 for perioden 1990-2001. Det ses at der generelt er en god overensstemmelse, dog er der en tendens til at enkelte peak begivenheder ikke er helt repræsenteret i modellen. Dette kan skyldes usikkerheder på den benyttede nettonedbør. I sommerperioden er den simulerede afstrømning nær identisk med observeret, og de beregnede retentionskurverne følger generelt observationerne.

Figur 21 viser detaljer omkring 1995-1997. Specielt den tørre periode 1995-1996 viser et godt sammenhæng, og modellens medianminimum er tæt på den aktuelle. Den kan være en svag tendens til at modellen holder lidt længere på vandet i magasinet efter store nedbørsbegivenheder eller ved afslutningen af vintermaksimum. Årsagen hertil kan bunde i en nogle modelparametre, eller være at igangsætning af markvanding ikke er godt nok repræsenteret i modellen og herved halter modellen lidt bagud.

Varighedskurven, Figur 22, viser at modellen har en generel god repræsentation af afstrømningshændelserne.



Figur 22 Varighedskurve for hhv. simuleret og observeret afstrømning ved station HU 42.41



Figur 23 Akkumuleret afstrømning fra station HU 42.41

Modellen oversimulerer middelaflstrømningen med 9 %, hvilket viser sig tydeligt på den akkumulerede afstrømning. Overordnet set er der dog en god overensstemmelse mellem den observerede og beregnede akkumulerede afstrømning.

8.2.5 Kalibrering af grundvandsmodellen

Kalibreringen af den opstillede grundvandsmodel, er udført med 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. De endelige hydrauliske parametre er vist i Tabel 7.

Tabel 7 Hydrogeologiske parametre

Formation	Hydraulisk ledningsevne		Magasin-koefficient []
	Horisontal [m/s]	Vertikal [m/s]	
Sand 1	9,9E-04	9,9E-05	0.12
Ler 1	8,3E-06	8,3E-07	0.05
Sand 2	3,0E-04	3,0E-05	0.20
Ler 2	1,0E-07	1,0E-08	0.05
Sand 3	1,0E-05	1,0E-06	0.20
Dræn konstant	1,2E-06 s ⁻¹		
Vandløbs lækage	9,2E-05		

Tabel 8 Gennemsnitlige statistiske værdier for de enkelte beregningslag i modellen (som henfører til specifikke geologiske formationer)

Formation	Lag	Antal boringer	ME	MAE	RMSE
Sand 1	1	20	-0.22	0.39	0.26
Ler 1	2	3	0.07	0.58	0.47
Sand 2	3	0			
Ler 2	4	1	-0.20	0.33	0.33
Sand 3	5	2	0.51	0.56	0.37

Tabel 7 viser modelstatistikken for de enkelte beregningslag i modellen. Statistikken er beregnet ud fra de 26 pejleboringer, hvor der er en god datadækning. Pejleboringer hvor der kun er enkelte observationer, er dermed ikke medtaget i statistikken. Ud fra tabellen ses det at statistikken er noget ringere for boringer filter-sat i det dybe sand magasin. I forhold til de opstillede nøjagtighedskriterier ses det at kravet for ME er opfyldt for alle lag undtagen det dybe sandmagasin (Sand 3). Kravet for RMS er opfyldt for alle de geologiske lag.

Kalibreringsstatistikken for alle 26 benyttede pejleboringer kan ses i Bilag 1. Da hovedparten af pejleboringerne, 20 ud af 26 boringer, er filtersat i Sand 1, indeholder det efterfølgende afsnit en kort beskrivelse af pejleboringerne fra Sand 1.

8.2.6 Grundvandsobservationer i det øverste sandmagasin (Sand 1)

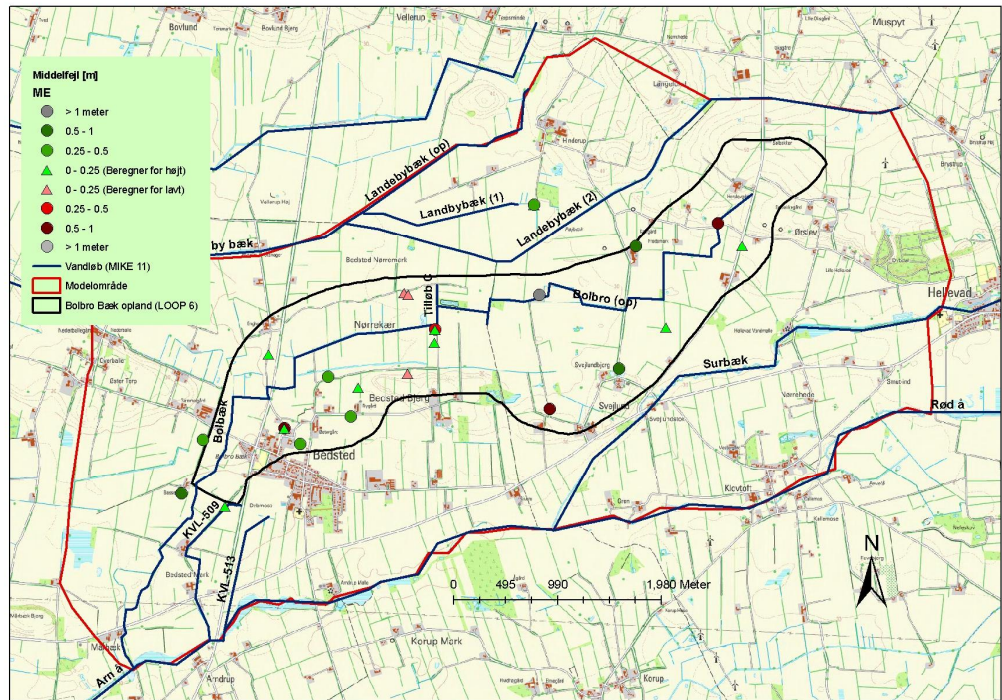
Det øverste sandmagasin (Sand 1) er den geologiske formation med flest observationer, og dermed også den formation som er bedst bestemt i modellen. Tabel 9 viser kalibreringsstatistikken for pejleboringer filtersat i det øvre sandmagasin.

Tabel 9 Kalibreringsstatistik for boringer i Sand 1

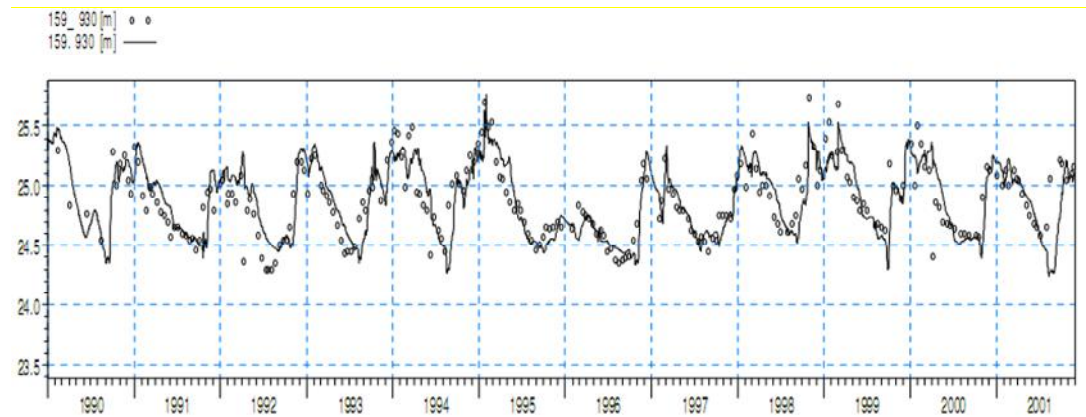
Boring	Lag	ME	MAE	RMSE	STDres	R	R2
159. 492	1	-0.16	0.21	0.24	0.19	0.76	0.21
159. 899	1	-0.03	0.14	0.17	0.62	0.81	0.62
159. 902	1	-0.62	0.62	0.68	0.26	0.79	-9.53
159. 905	1	-0.34	0.36	0.44	0.28	0.85	0.57
159. 912	1	0.15	0.21	0.26	0.21	0.69	0.06
159. 915	1	-1.53	1.53	1.55	0.27	0.83	-12.00
159. 921	1	-0.07	0.16	0.19	0.18	0.90	0.78
159. 924	1	0.94	0.95	1.01	0.36	0.83	-2.88
159. 925	1	-0.39	0.39	0.43	0.19	0.72	-1.90
159. 930	1	0.00	0.14	0.20	0.21	0.77	0.56
159. 935	1	-0.27	0.31	0.36	0.24	0.90	0.57
159. 940	1	-0.21	0.25	0.29	0.21	0.90	0.64
159. 945	1	-0.24	0.27	0.32	0.21	0.69	-1.98
159. 955	1	-0.11	0.23	0.30	0.28	0.88	0.67
159. 960	1	-0.54	0.54	0.59	0.25	0.91	-0.43
159. 979	1	-0.23	0.28	0.32	0.22	0.87	0.05
159. 981	1	-0.40	0.48	0.51	0.31	0.57	-1.14
159. 982	1	-0.31	0.35	0.44	0.32	0.65	-0.11
159. 984	1	-0.23	0.24	0.31	0.21	0.72	-1.01
159. 1053	1	0.13	0.16	0.20	0.16	0.85	0.23

Figur 25 viser et eksempel på observerede og beregnede grundvandsniveauer for en pejleboring filtersat i Sand 1. Den viste boring er rigtig godt repræsenteret af modellen. I Sand 1 er den gennemsnitlige middelfejlse mellem de observerede og beregnede værdier kun 22 cm, så generelt har modellen en rigtig godt repræsentation af det øvre grundvandsniveau.

Figur 24 viser fordelingen af middelfejlen. Middelfejlen er kun vist for de observationsboringer der er benyttet i kalibreringen (26 boringer). Det kan ses at middelfejlen er relativt jævnt fordelt i området.



Figur 24 Fordelingen af middelfejlen.

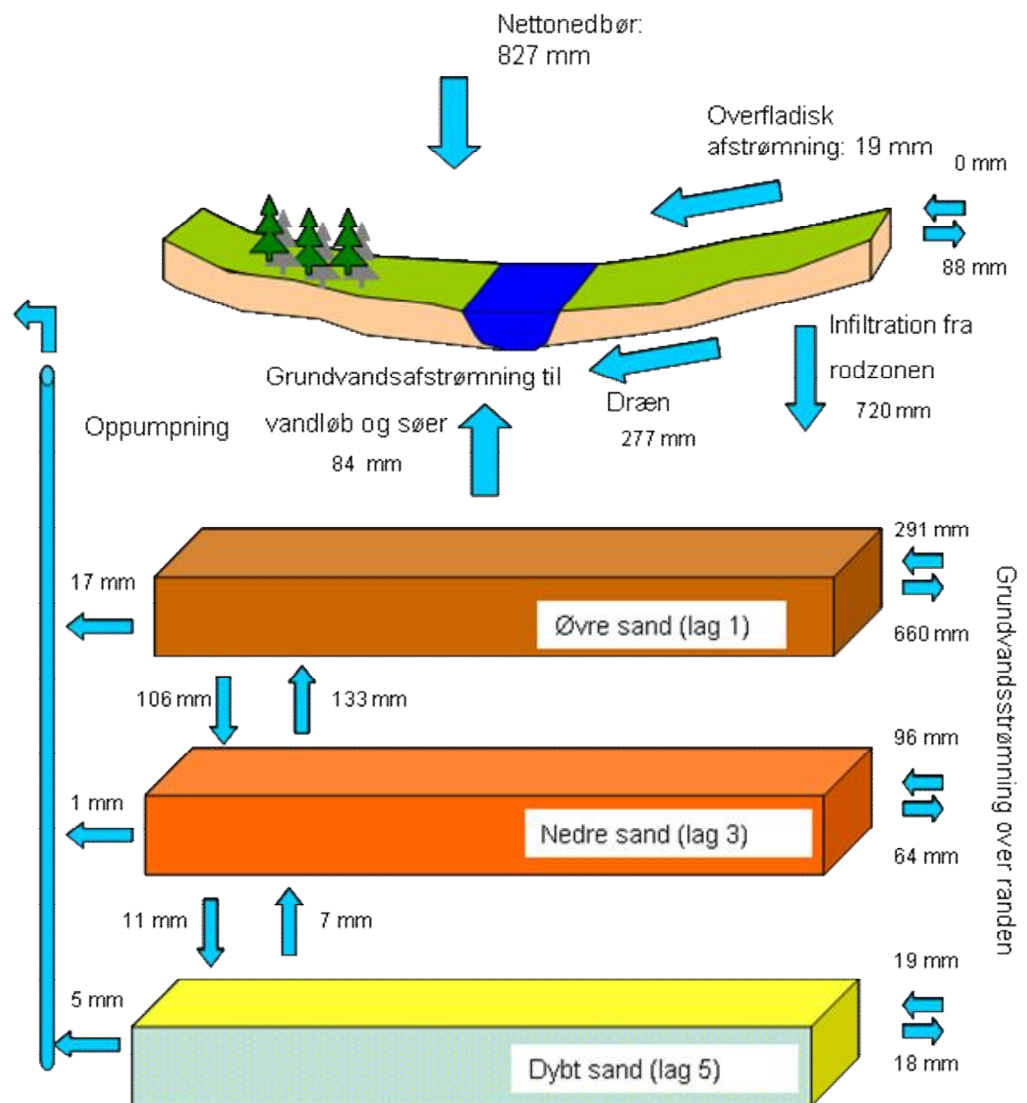


Figur 25 Eksempel på observeret grundvandniveau i det øverste sandmagasin – sand 1 (sort streg simulerede værdier, og prikker observerede værdier)

9 Vandbalance og modelresultater

9.1 Vandbalance

Der er for oplandet udtrukket vandbalancer der viser den overordnede vandbalance for oplandet (Figur 26), samt udvekslingen mellem de enkelte beregningslag i modellen.



Figur 26 Akkumuleret vandbalance for perioden 1991 til 2000. Alle værdier er i mm/år.

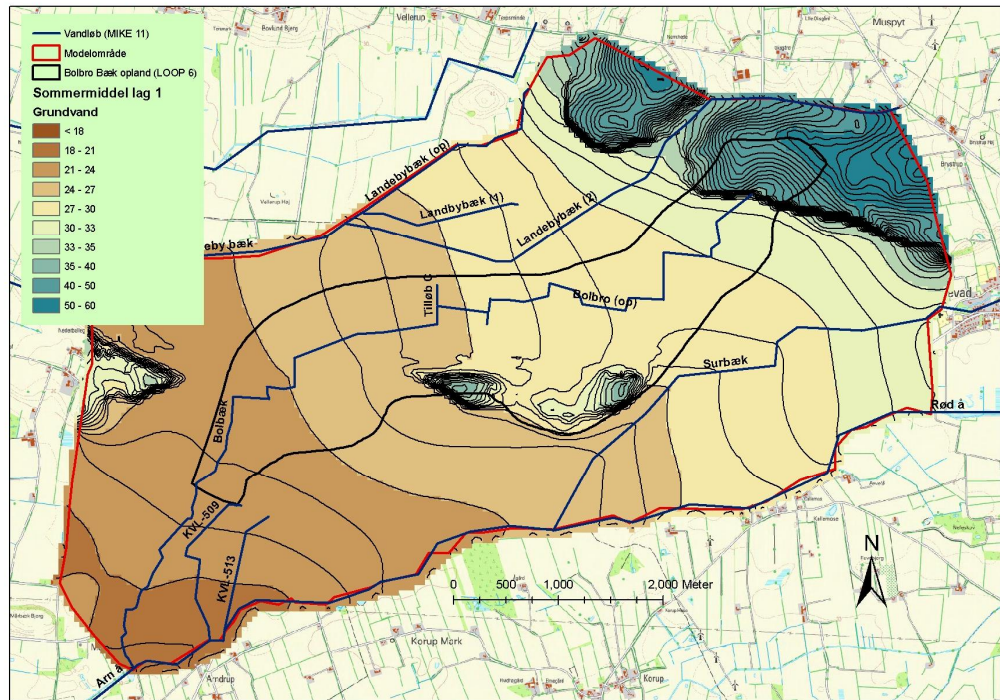
Ud fra den overordnede vandbalance kan følgende noteres:

- Ud af en total nettonedbør på 827 mm sker der en grundvandsstilstrømning til vandløbene på 84 mm, og en dræntilstrømning på 277 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 19 m/år.
- Der sker en nettoudstrømning af grundvand fra LOOP oplandet. Dette sker primært mod syd og nord, hvor der er mulighed for transport af vand ud af oplandet.

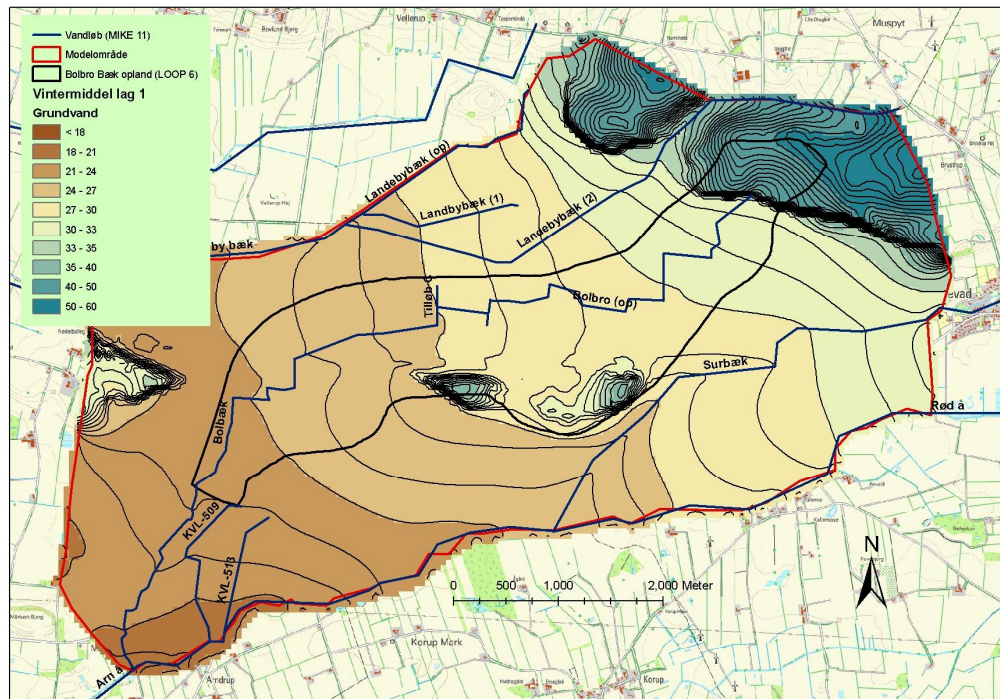
Figuren viser ligeledes at indvindingen primært sker i det øverste modellag, og at vandudvekslingen med det dybe lag 5 er under 5 % af den samlede nettonedbør og kan negligeres når man betragter vandbalancen som helhed.

9.2 Resultater fra strømningsmodellen

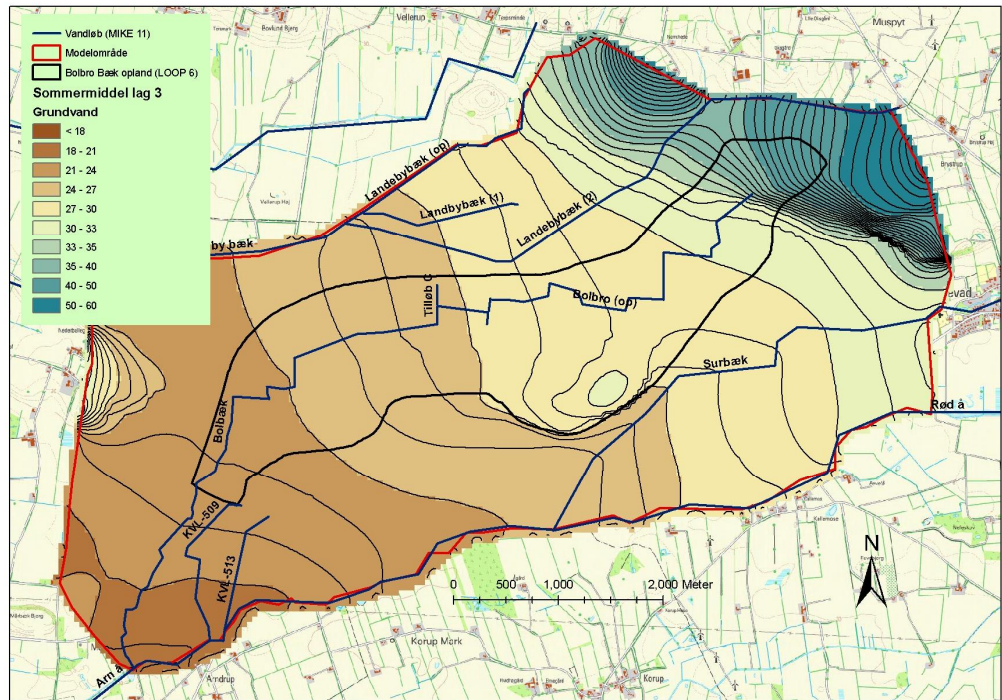
Figur 27, Figur 28, Figur 29 og Figur 30 viser grundvandsniveauet for hhv. Sand 1 og Sand 3. Grundvandsniveauet er præsenteret for en middel vinter og en middel sommer situation. Vintermiddel er beregnet som den gennemsnitlige dybde til grundvandet i månederne januar til marts for perioden 1991 til 2001. Sommermiddel er beregnet på tilsvarende måde for månederne juni til august.



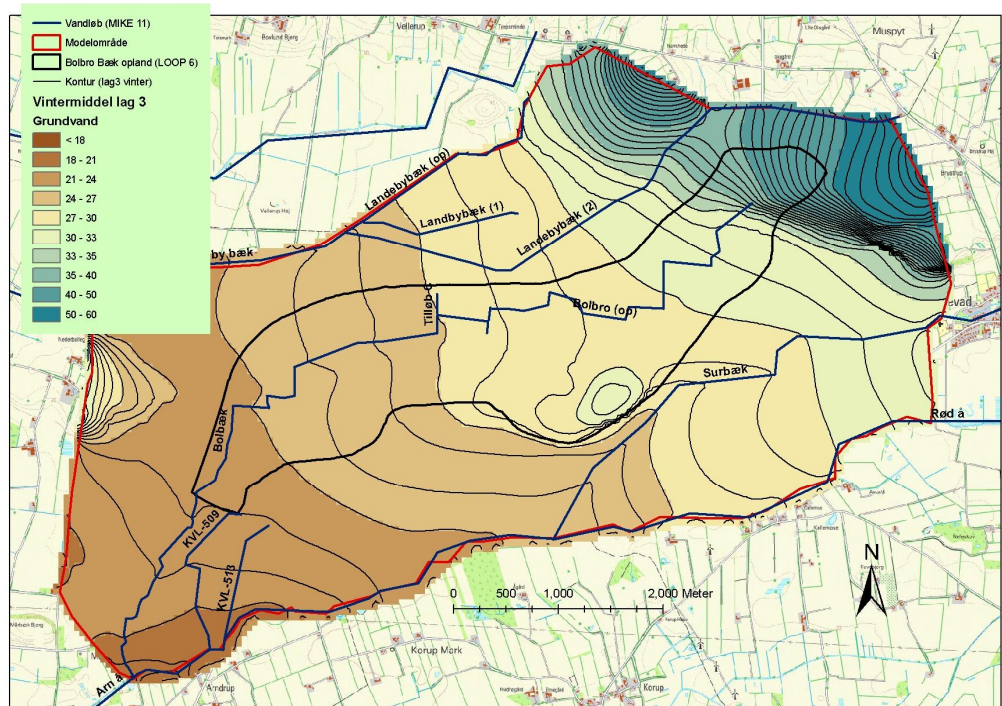
Figur 27 Grundvandsniveau (sommermiddel for Sand 1)



Figur 28 Dybde til grundvandet (vintermiddel for Sand 1)



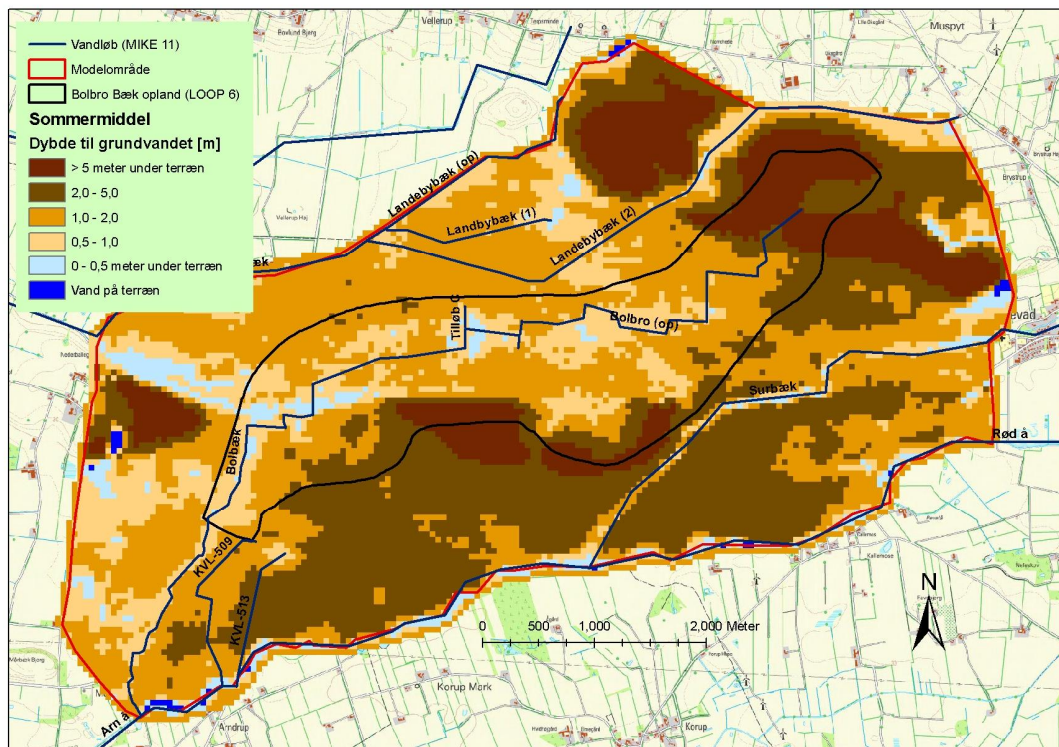
Figur 29 Dybde til grundvandet (sommermiddel for Sand 2)



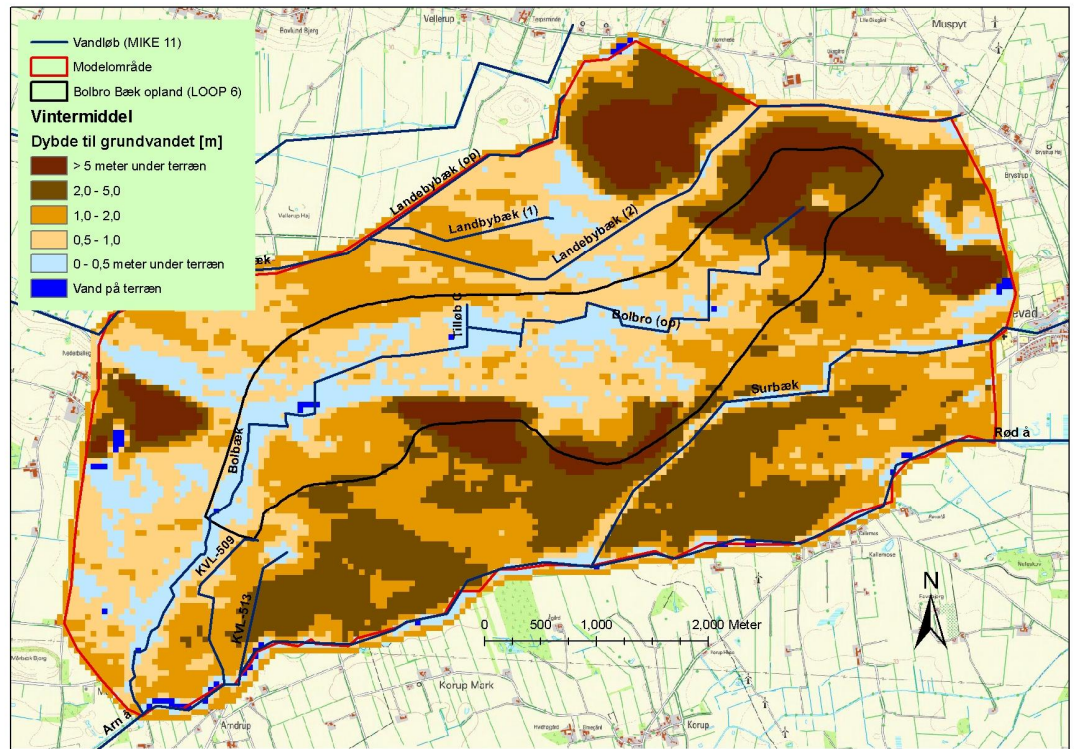
Figur 30 Dybde til grundvandet (vintermiddel for Sand 2)

Figur 31 og Figur 32 viser dybden til grundvandet for hhv. en middel sommersituation og en middel vintersituation. Vintermiddel er beregnet som den gennemsnitlige

dybde til grundvandet i månederne januar til marts for perioden 1991 til 2001.
Sommermiddel er beregnet på tilsvarende måde for månederne juni til august.



Figur 31 Dybde til grundvandet (sommermiddel)



Figur 32 Dybde til grundvandet (vintermiddel)

10 Opsummering

Formålet med denne rapport er at beskrive opstillingen og kalibreringen af en numerisk model til beskrivelse af vandtransporten i LOOP 6 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 6 oplandet. Dette kræver som udgangspunkt en god beskrivelse af hhv. drænfstrømning, grundvandsstrømningen omkring reduktionsfronten samt af udvekslingen mellem grundvand og overfladevand. Ud fra den opstillede model vurderes der at være skabt et grundlag, hvormed den kan benyttes som værktøj til mere detaljerede analyser af nitratomsætningen i LOOP 6 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. I forbindelse med modelopsætningen er der foretaget følgende:

- Der er opstillet en hydrostratigrafisk model der danner grundlaget for den opstillede strømningsmodel.
- Der er indhentet information ang. Pejleobservationer og indvindingsmængder.
- Nettonedbørsberegninger foretaget af DMU er medtaget som nettonedbør.
- Der er med udgangspunkt i DK-modellens vandløbsmodel opstillet en vandløbsmodel i MIKE 11 for modelområdet.
- Der benyttes en opdateret laser-skannet terrænmodel for området.

Den opstillede strømningsmodel er defineret i et 50 meter beregningsnet, og dækker perioden 1990 til 2001.

Ud fra de opstillede nøjagtighedskriterier er der foretaget en kalibrering mod hhv. vandløbsafstrømning og grundvandsniveau. Modellen er kalibreret med udgangspunkt i en initial følsomhedsanalyse hvorefter der er foretaget en automatisk optimering af modellen. For alle de hydrogeologiske parametre er der benyttet kon-

stante værdier i hele modelområdet. Grunden er at der ud fra det tilgængelige datagrundlag ikke er vurderet at være grundlag for yderligere zoneringsparametrene.

Ved kalibreringen af vandløbsmodellen har der været fokus på en god bestemmelse af afstrømningen ved begge stationer. De opstillede nøjagtighedsmål er overholdt for station 42.41. Station HU 42.42 har ikke helt nået målet, selvom E er betydeligt bedre end station 42.41. Overordnet set har modellen en rigtig god bestemmelse af afstrømningshændelserne, dette gælder både de store vinterhændelser, og minimumsafstrømningen om sommeren.

Ved kalibreringen af grundvandsobservationerne er der benyttet 26 pejleboringer, hvoraf de 20 er filtersat i Sand 1. Modellen har en god repræsentation af grundvandsniveauet i Sand 1. Dette medvirker ligeledes til den gode beskrivelse af vandløbsafstrømningen. I de geologiske formationer under Sand 1 er der kun 6 pejleboringer med repræsentative observationer. I alle underliggende lag undtagen Sand 3, er de opstillede nøjagtighedskriterier opfyldt. De få observationer medfører dog at denne vurdering bygger på et meget sparsomt grundlag.

Ved en overordnet vurdering af modellens egnethed i forhold til beskrivelse af nitrattransporten og omsætningen i oplandet, kan det konstateres at modellen har en god repræsentation af både vandløbsafstrømningen, samt den overfladenære afstrømning. Specielt den overfladenære grundvandsafstrømning er afgørende, idet reduktionsfronten forventes at være placeret tæt på terræn i hele oplandet. Nitrattransporten i dræn, er i LOOP 6 oplandet, beskedent, og det forventes at den største transport kommer fra grundvandet. Det vurderes at modellen med det givne datagrundlag er kalibreret til et niveau hvor den kan benyttes i de videre vurderinger.

11 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/ Vandmiljøplan II, Genopretning af vådområder, 2. Hydrologi, stofomsætning og opmåling. Skov og Naturstyrelsen (ISBN 87-7279-228-0).
- /4/ Håndbog i grundvandsmodellering, Sonnenborg & Henriksen (eds) © 2005/80 GEUS
- /5/ Fase 0 – Datagrundlag – delrapport for LOOP 6, juni 2009, ALECTIA for Miljøcenter Ribe.
- /6/ Landovervågning LOOP 6 – fase 1 – geologisk model – delrapport for LOOP 6, juni 2009, ALECTIA for Miljøcenter Ribe.
- /7/ Model for Bedsted, 2003 Carl Bro