DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE RAPPORT 1997/139

National vandressource model

Modelopstilling og kalibrering for Fyn

Hans Jørgen Henriksen, Christen J. Knudby,
Per Rasmussen og Per Nyegaard

DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE
MILJØ- OG ENERGIMINISTERIET

GEUS

DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE RAPPORT 1997/139

National vandressource model

Modelopstilling og kalibrering for Fyn

Hans Jørgen Henriksen, Christen J. Knudby,
Per Rasmussen og Per Nyegaard

DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE
MILJØ- OG ENERGIMINISTERIET

GEUS

Indhold

1. RESUME 5

2. INTRODUKTION 7

2.1 Formål med modelarbejdet 7

2.2 Modelbenyttelse 7

2.3 Beskrivelse af modelområdet: Region Fyn 10

3. KONCEPTUEL MODEL 13

3.1 Grundvandssystemet (antagelser om reservoirforhold) 13

3.2 Hydrologiske afgrænsninger (randbetingelser) 17

3.2.1 Modeloverflade, dræn- og vandløb 17

3.2.2 Vandudveksling mellem grundvand og vandløb (indre randbetingelser) 18

3.2.3 Modelrand og impermeabel bund (ydre randbetingelser) 20

3.3 Hydrauliske størrelser 20

3.4 Nedsivning og udstrømning (vandbalancen) 22

3.5 Vandbalance for grundvandsmagasin 24

4. BESKRIVELSE AF MODELKODEN 26

4.1 Antagelser 26

4.1.1 Overflade afstrømning (OC-modulet) 27

4.1.2 Grundvandsstrømning (SZ-modulet) 27

4.1.3 Beregning af vandudveksling mellem grundvand og vandløb (EX- modulet) 29

4.1.4 Beregning af nettonedbør ved hjælp af simpelt rodzonemodul på baggrund af nedbør og potentiel fordampning 30

4.2 Begrænsninger 31

4.3 Løsningsmetode 33

4.3.1 Overfladisk afstrømning og kanalstrømning 33

4.3.2 Grundvandsstrømning 35

4.3.3 Udveksling mellem vandløb og grundvand (EX-modulet) 37

4.3.4 Beregning af nettonedbør 38

4.4 Effekt på model 42

5. MODELOPSTILLING 44

5.1 Modelområdet 44

5.2 Hydrauliske parametre 49

5.2.1 Hydrauliske parametre som styrer nettonedbør og fordeling til grund-vand/overfladevand 49

5.2.2 Hydrauliske parametre som styrer grundvandsstrømningen 53

5.2.3 Hydrauliske parametre som styrer overfladisk afstrømning og vandløbsstrøm-ning 55

5.3 Input og output til vandbalancen 55

5.4 Randbetingelser 59

5.5 Valg af kalibreringsmål og kriterier for nøjagtighed 59
5.6 Numeriske parametre 61

6. Kalibrering **62**
6.1 Kvalitativ/kvantitativ analyse 64
6.1.1 Glacialtektonisk variabilitet 64
6.1.2 Dummy-koefficient 65
6.2 Følsomhedsanalyse og invers modellering 67
6.3 Verifikation af modelopstillingen 72
6.3.1 Verifikation vurderet udfra RMS-værdier 73
6.3.2 Verifikation udfra R^2-værdier 74
6.3.3 Vurdering af verifikationsperioden udfra FL-, FH- og volumenværdier 75

7. SUB-MODELLER **79**

8. SIMULERINGS SCENARIER **81**
8.1 Påvirkning af vandløbsafstrømning som følge af ændret oppumpning 81
8.2 Simulering af konsekvenser af ændrede nedbørsforhold 84
8.3 Eksempel på vurdering af infiltrationsoplande til større vandværker 85

9. DISKUSSION OG VURDERING **87**
9.1 Diskussion af resultater 87
9.2 Modellens begrænsninger 88
9.3 Forslag til forbedringer 90

10. KONKLUSIONER **91**

11. REFERENCER **93**

APPENDIX 1. SIMULEREDE OG OBSERVEREDE VANDFØRINGER 1991-96 FOR 3 VERIFIKATIONSKØRSLER: FYN25-53, FYN25-54 OG FYN25-55

APPENDIX 2. SIMULEREDE OG OBSERVEREDE POTENTIALER 1971-96

1. RESUME

Det er projektets overordnede formål at udvikle en landsdækkende vandressourcemodel som skal danne grundlag for vurdering af Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige variation og regionale fordeling.

Der er opstillet en konceptuel model for Fyn på baggrund af cirkeldiagramkort, litteratur og oplysninger i GEUS's borearkiv. På baggrund heraf er vandførende og lavpermeable lag med regional udstrækning fastlagt, med tolkning af rumlig udbredelse og sammenhæng. Den konceptuelle model består af 9 hydrostratigrafiske lag, hvor lag 1, 2, 4, 6 og 8 overvejende består af ler mens lag 3, 5 og 7 består af smeltevandssand. Lag 9 består af kalk.

Det er vurderet, at en horisontal diskretisering i et 1x1 km beregningsnet udgør en øvre grænse for, hvor groft topografiske og geologiske forhold, vandløbssystemer samt vandindvinding kan repræsenteres, såfremt de opstillede formål med modelarbejdet skal kunne opfyldes.

Som grundlag for opbygningen af DK-modellen er MIKE SHE systemet valgt. MIKE SHE er et deterministisk og fysisk baseret fuldt distribueret modelsystem som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske kredsløb. Beregningsmodulerne: OC (overland- and channel flow), SZ (saturated zone flow) og EX (exchange flow between aquifer and rivers) er anvendt. Input til modellen udgøres af daglig nettonedbør beregnet ved hjælp af et simpelt rodzonemodul.

Topografiske forhold, jordartsforhold, arealanvendelse og vandløbssystem er på baggrund af GIS-bearbejdning anvendt som input til DK-modellens 1x1 km beregningsmasker for Fyn. Topografi er baseret på KMS's 50 m griddata. Jordart er baseret på opdeling af jordarter på sand og ler udfra GEUS's digitale jordartskort. Arealanvendelse er baseret på Corine data. Vandløbssystem er baseret på data fra den digitale vandskelsdatabase (ZETA).

Som input til rodzonemodulet er anvendt døgnværdier for nedbør og potentiel fordampning på baggrund af et 40x40 km klimagrid for hele landet. Klimagriddata er beregnet af Dansk Jordbrugsforskning, Foulum. For hvert af de 5 klimagrid der indgår i DK-modellen for Fyn er genereret 6 forskellige nettonedbørsserier for forskellige kombinationer af arealanvendelse, jordart og kote. Der er anvendt kombinationerne: skov, vådbundsområde, åbent land/sandjord over kote 50, åbent land/lerjord over kote 50, åbent land/sandjord under kote 50 og åbent land/lerjord under kote 50. For hver af disse 30 kombinationer af klimagrid og arealtyper er beregnet en daglig nettonedbør for perioden 1971-96.

Det er vurderet, at en del af nettonedbøren, på grund af skalaen 1x1 km, skal routes direkte til OC, i stedet for til SZ. Den fysiske basis herfor er dels skalaforholdet, som generelt bevirker at modeltopografien er mere udjævnet end den faktiske topografiske variation. Derved undervurderes genereringen af overfladisk/overfladenær afstrømning. Desuden vil

regnvand på befæstede arealer i byområder blive afledt til overfladevandsystemet. Der er taget hensyn til disse forhold ved at fordele nettonedbøren mellem OC og SZ på baggrund af den topografiske variation og den procentvise andel af byområder indenfor hvert enkelt grid i modelområdet.

Indenfor hvert enkelt lag i den hydrostratigrafiske model er der antaget konstant hydraulisk ledningsevne. Transmissiviteten for de enkelte modellag er derfor udelukkende distribueret jf. tykkelsesvariationen over modelområdet. Lag bestående af smeltevandssand har samme hydrauliske ledningsevne (lag 3, 5 og 7). Den vertikale ledningsevne antages 10 gange lavere end den horisontale. Lerlag (lag 2, 4, 6 og 8) antages ligeledes at have samme hydrauliske ledningsevne. I modsætning hertil er transmissiviteten for kalken (lag 9) distribueret på grundlag af interpolation på basis af observationer fra borearkivet (specifik ydelse). Det øverste lerlag i modellen (lag 1) er som følge af bl.a. opsprækning vurderet at have en væsentlig højere ledningsevne i forhold til de øvrige lerlag. Af hensyn til den numeriske løsning (problemer med tynde beregningslag som løber tørre) er lag 1,2 og 3 slået sammen til ét beregningslag, således at beregningsmodellen består af ialt 7 lag. Ovenstående simplificering af det fysiske system er begrundet med dels et problem med at finde repræsentative målinger af f.eks den hydrauliske ledningsevne i forhold til en modelskala på 1x1 km, dels et hovedprincip om at søge så enkel og simpel en parametrisering som mulig, således at en risiko for en 'overparametrisering' undgås, og således at størst mulig gennemskuelighed fastholdes.

Samtlige oppumpninger større end 25.000 m^3/år for perioden 1985-96 er repræsenteret i modellen på baggrund af oplysninger i vandressource databasen. Desuden er anvendt supplerende data leveret af Fyns Amt for 2 år i perioden 1971-85. Oppumpninger er inkluderet med årlige værdier, og der er dermed set bort fra evt. sæsonvariationer.

Til kalibrering og verificering af modellen er anvendt en 'differentiel split sample test'. Som kalibreringsperiode er benyttet 1988-90. Verificering er foretaget udfra 1991-96. Ialt indgår 1510 trykniveauobservationer fra perioden 1970-96 samt simuleret og observeret daglig vandføring ved 12 stationer for 1988-90. Kalibreringen er foretaget i flere runder hvor modelsetup og parameterværdier gradvist er blevet detaljeret og distribueret og afvigelser kvantificeret i forhold til afstrømning og trykniveau. En verifikation af modelopstillingen er foretaget ved at udvælge 3 kalibreringskørsler med god overensstemmelse mellem simulerede og observerede data og køre disse for hele perioden 1971-96 og herefter udregne forskellige teststørrelser (RMS, FL- og R^2) med henblik på kvantificering af overensstemmelse i forhold til trykniveau i grundvand og vandløbsafstrømning. I verifikationen indgik en vurdering af betydningen af startværdier samt randbetingelser.

Der er givet eksempler på simuleringskørsler med ændret vandindvinding og ændret nettonedbørsinput. Endelig er der foretaget en partikelbaneberegning af indvindingsoplande til udvalgte større vandværker på Fyn. Herved er eksempler på brug af DK-modellen i forbindelse med vurderinger af vandressourcens størrelse søgt illustreret.

2. INTRODUKTION

2.1 Formål med modelarbejdet

Det er projektets overordnede formål at udvikle og etablere en landsdækkende vandressource model som skal danne grundlag for bedre at kunne vurdere Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige variation og regionale fordeling, samt muliggøre vurdering af ressourcens fremtidige udvikling.

Mere specifikt er formålene med modelarbejdet:

1. At forstå processer og parametre som styrer grundvandsdannelsen, herunder udvikling af værktøjer til generering af inputdata til vandressourcemodellen på basis af satellitdata samt udvikling af forbedrede beregningsrutiner til kvantificering af den arealdistribuerede nedsivning til grundvandet
2. At opbygge en national vandressourcemodel bestående af en 3-dimensional, dynamisk grundvandsmodel for Danmark. Dette giver mulighed for vurdering af ressourcens nuværende og fremtidige størrelse og fordeling samt mulighed for integrering af ressourceovervågning i vandmiljøplanens overvågningsprogram med henblik på en samlet vurdering af ferskvandsressourcens mængde, kvalitet og beskyttelse
3. At reorganisere og effektivisere det nationale ressource-overvågningsnet på grundvand, herunder opbygning og implementering af systemer for dataopsamling og lagring, transmission og bearbejdning under anvendelse af tidssvarende teknologi
4. At videreudvikle det tilgrundliggende modelsystem med rutiner og moduler, som er nødvendige i forbindelse med de særlige skalaforhold, krav til kalibrering og kvalitetsdokumentation, krav til opdatering og udveksling af modeldata samt nuværende og fremtidige behov i forbindelse med modellering af kvantitet, kvalitet og beskyttelse.

2.2 Modelbenyttelse

Det er målet med den nationale vandressourcemodel (DK-modellen) at kunne simulere det hydrologiske kredsløb med særlig vægt på grundvandssystemet og grundvandsressourcens størrelse under forskellige forudsætninger vedr. klimaforhold, arealanvendelse, krav til maksimal påvirkning af vandløb/vådområder og begrænsninger i den udnyttelige vandressource som følge af områder med dårlig vandkvalitet og/eller dårlige indvindingsforhold.

Input til simuleringerne udgøres af:

- klimadata (døgnværdier for nedbør og potentiel fordampning)
- arealanvendelsesdata (skov/åbent land/byområder/vådområder)
- vandindvindingsdata (årlig oppumpning i forbindelse med almene vandværker, erhvervsvanding og industri)

Output fra simuleringerne udgøres bl.a. af:

- grundvandspotentialer/afsænkninger (tidsserier, potentiale- og gradientkort)
- vandbalancedata (nettonedbør, infiltration, overfladisk afstrømning, drænvandsafstrømning, grundvandsdannelse til sekundære og primære grundvandsmagasiner, grundvandsafstrømning til vandløb/vådområder og hav)
- regionale strømlinier (flux/hastigheder, retninger, partikelbaner, transporttider og relationer mellem fx. vandindvindinger og størrelsen af grundvandsdannende oplande/arealer

Der opstilles en række udvalgte simuleringsscenarier på basis af aktuelle og kritiske forudsætninger vedr. klima input, arealanvendelse og vandindvinding. Scenarierne gennemregnes med den opstillede, kalibrerede og validerede model og konsekvenser for grundvandspotentiale, vandbalance og strømlinier vurderes. Modelsimuleringerne udgør således et grundlag for nærmere vurderinger af den udnyttelige grundvandsressources størrelse og udvikling.

Ved at kombinere modelsimulerede output vedr. vandressourcens størrelse med begrænsninger i den udnyttelige vandressource, som følge af områder med dårlig vandkvalitet (på grund af nitrat- eller pesticidforurening vurderet ud fra data fra grundvandsovervågningens boringskontrol og/eller GRUMO områder), restriktioner i udnyttelse som følge af krav til bla. restvandføring i vandløb, begrænsninger i den mulige afsænkning som følge af risiko for saltvandsindtrængning etc., kan DK-modellen desuden give mulighed for at vurdere den kvalitetsmæssige og recipientmæssige bæredygtige ressource.

Det er vigtigt ikke kun at se på grundvandet som en afgrænset enhed, men at se det i en sammenhæng med de øvrige dele af vandkredsløbet: bla. vandløb og vådområder. Et centralt forhold er i den forbindelse, at sikre en så fysisk korrekt beskrivelse af grundvandsmagasinsystemet (3D) og interaktionen mellem grundvand og overfladevand som muligt. Ved modelbenyttelsen er der lagt særlig vægt på, at beskrive grundvandsmagasinsystemet og randbetingelserne til dette. Ligeledes er der lagt vægt på en så præcis beskrivelse af den arealdistribuerede grundvandsdannelse som datagrundlaget giver mulighed for med en forankring i en nærmere forståelse af de styrende fysiske forhold. Der er således lagt vægt på, at beskrivelsen af topografi, jordartsforhold, dræn- og vandløbssystem samt hydrogeologiske forhold, som er styrende for vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand, bliver så detaljeret som muligt.

DK-modellen er en landsdækkende model. Formålet med modellen er, at kunne vurdere Danmarks samlede vandressource samt den regionale fordeling. Det er indledningsvist vurderet, at en horisontal diskretisering i et 1x1 km beregningsnet udgør en øvre grænse for hvor groft de fysiske forhold kan repræsenteres, idet valg af et beregningsnet på f.eks.

2 x 2 km giver for store usikkerheder i repræsentationen af topografiske og geologiske variationer, ligesom den decentrale vandindvindingsstruktur med relativt små vandværker sætter grænser for hvor groft et beregningsnet der giver mening og kan anvendes. Der er lagt vægt på en fysisk baseret model med en forankring af grundvandsmodellen på de faktuelle grundvandsmagasiner. Modellen skal på regionalt niveau kunne belyse relationer mellem konkrete grundvandsmagasiner og de arealer som bidrager til grundvandsdannelsen til disse. Det skal være muligt at belyse påvirkningsfaktorer på f.eks. minimumsvandføring som følge af ændret oppumpning ved større kildepladser.

Samspillet mellem klima, vegetation og jordbund har stor indflydelse på fordampningen og dermed på nedsivningen til grundvandet. På grund af den valgte skala med et beregningsgrid i 1x1 km vil DK-modellen imidlertid repræsentere en relativ grov forenkling af en række forhold bla. topografi, repræsentation af den geologiske variabilitet, repræsentation af dræn- og vandløbssystemer etc. Det er derfor i første omgang valgt at basere beskrivelsen af fordampning (og dermed nedsivning fra rodzonen) på et relativt simpelt vandbalancemodul for rodzonen, og samtidig at se bort fra de enkelte processer i den umættede zone. Denne forenkling betyder iøvrigt, at et evt. feed back fra f.eks afsænkning af grundvandspejlet som måtte påvirke fordampningen ikke kan håndteres umiddelbart på den måde modellen er benyttet. Det vil dog være relativt let at udbygge modellen med fx. mere detaljerede fordampningsrutiner og en umættet zone såfremt der er behov for sådanne vurderinger. Ved overordnede vurderinger på landsplan af ændringer mellem skov, åbent land, byområde og vådområder er modellen dog brugbar i den nuværende konfiguration.

Som grundlag for opbygning af DK-modellen er MIKE SHE systemet valgt (Refsgaard og Knudsen, 1996; Abbott et al. 1986a,b). MIKE SHE er en deterministisk og fysisk baseret fuldt distribueret model som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske kredsløb. MIKE SHE kan beskrive afstrømning på jordoverfladen (2D), i vandløb (1D), over og under grundvandspejlet (3D) samt drænvandsafstrømning (2D). Desuden giver systemet mulighed for beskrivelse af snesmeltning og aktuel fordampning.

Følgende beregningsmoduler fra MIKE SHE systemet (version 5.25) blev anvendt (DHI, 1997):

- OC - Overland- and Channel Flow (overfladisk afstrømning og kanalafstrømning)
- SZ - Saturated Zone (mættet zone)
- EX - Exchange between Aquifers and Rivers (vandudveksling mellem magasiner og vandløb)

Valget af disse moduler er i overensstemmelse med ovenstående bemærkninger vedr. modelbenyttelse. Input til modellen i form af daglige værdier for nettonedbør blev beregnet ved hjælp af et simpelt rodzonemodul, hvor aktuel fordampning og nedsivning fra rodzonen beregnes udfra nedbør, potentiel fordampning og et regnskab med vandindholdet i rodzonen.

Det er målet i løbet af 1998-99 at udbygge modellen med UZ (umættet zone). Flere forhold skal dog være opfyldt før denne udbygning evt. implementeres:

- Igangsætning af Ph.D. studium vedr. remote sensing og videnopbygning om arealdistribueret nedsivning
- Videreudvikling af UZ modulet med forbedret sprækkehåndtering, som forventes udviklet og testet i forbindelse med SMP 96 (Regional modellering af pesticider og grundvand) i løbet af 1998
- Afprøvning af UZ i forhold til nuværende simple rodzonemodul for et konkret område.

2.3 Beskrivelse af modelområdet: Region Fyn

Region Fyn består af hele Fyns Amt inkl. Langeland, Ærø, Tåsinge og øvrige mindre øer.

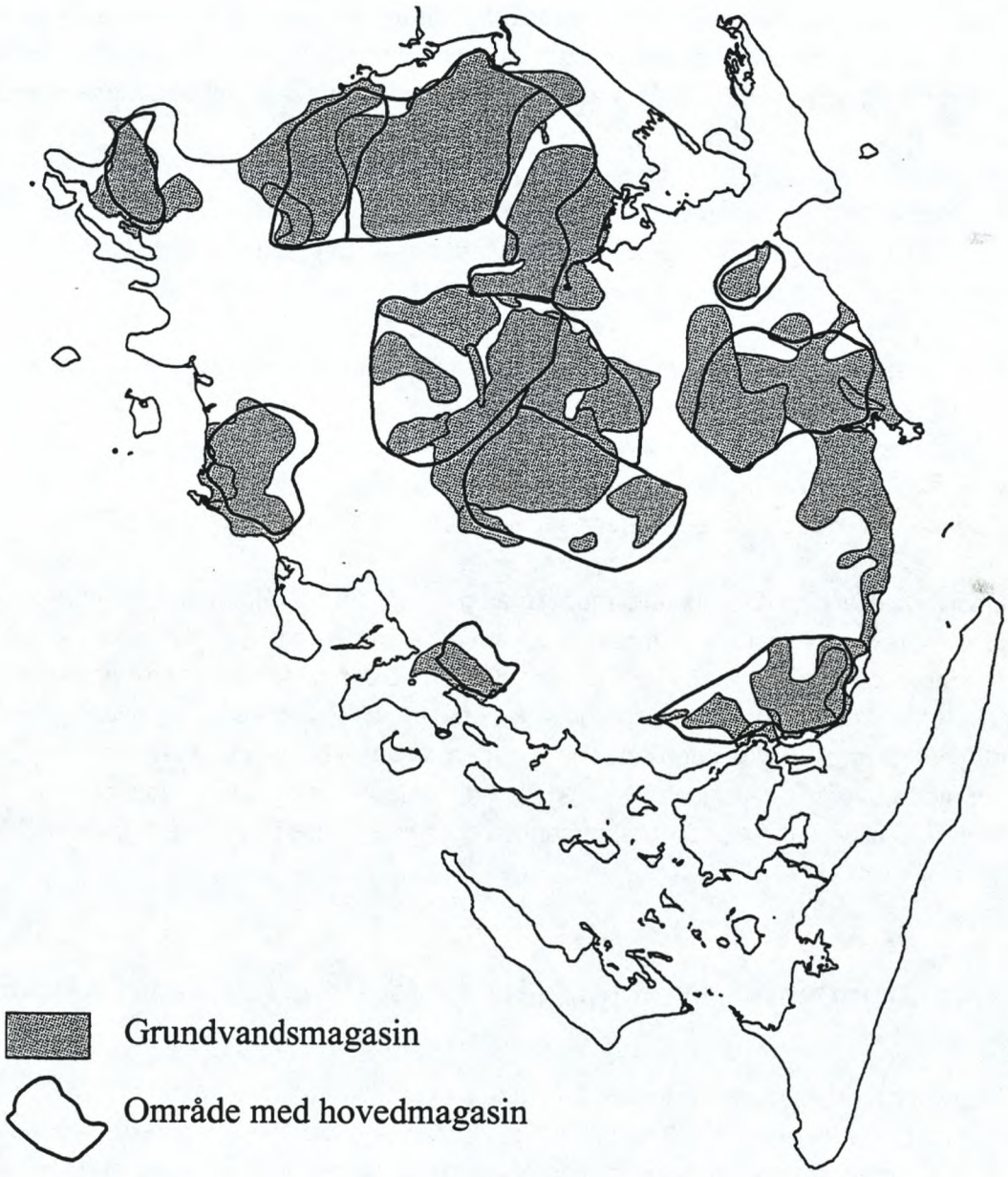
Der er udarbejdet 3 forskellige modelsetup:
1. model for hele Fyns amt (Fyn samt Langeland, Ærø, Tåsinge samt mindre øer)
2. model for Fyn
3. sub-model for område på østfyn (Nyborg området)

Fyn er et udpræget kulturlandskab. Næsten 70 % er dyrket, mens kun ca. 6 % udgøres af naturområder (søer, enge, overdrev, moser og strandenge). Disse naturområder findes overvejende i ådalene (23 %) indenfor en zone på 50 m langs vandløbene. I forhold til for 100 år siden er store naturområder forsvundet. I oplandet til Odense Fjord gælder det således 72 % af de større eng/moseområder. Den vigtigste årsag til denne udvikling er, at den 'fede' fynske jordbund er så velegnet til opdyrkning (Fyns Amt, 1997a).

Det fynske landskab er meget varieret fra flade hedesletter til meget kuperede områder. Bundforholdene i vandløbene afhænger af deres fald. Med stigende fald øges andelen af stenet/gruset bund, mens andelen af blød bund aftager. De fynske vandløb har de seneste århundreder undergået store fysiske ændringer og de seneste 100 år er udstrækningen af åbne vandløb på Fyn reduceret dramatisk, som følge af rørlægning af grøfter og vandløb, og udretning af vandløb. De har sammen med store dræningsarbejder og oprettelsen af pumpelag haft til formål at forbedre afvandingen af landbrugsjordene og dermed forøge dyrkningsmulighederne (Fyns Amt, 1997a).

Fyns Amt har beskrevet ialt 87 grundvandsmagasiner, hvis samlede horisontale udstrækning svarer til ca. halvdelen af amtets areal. Variationerne i magasinstørrelsen er store, idet de store regionale magasiners horisontale udstrækning er på 75-200 km^2, mens der også findes en lang række eksempler på små, lokale og velafgrænsede magasiner med en udstrækning på få tusinde m^2. En skønsmæssig vurdering af grundvandsmagasinernes volumenmæssige størrelse baseret på udstrækning, tykkelse og porøsitet, viser at indholdet af grundvand i Søndersø- eller Nyborgmagasinerne udgør i størrelsesordenen 1-2 mia m^3, mens der findes en række eksempler på små og velafgrænsede magasiner med et rumindhold på få hundredetusinde m^3 (Fyns Amt, 1997b).

De vigtigste hovedmagasiner på Fyn består af et eller sædvanligvis flere magasiner, der primært er artesiske og består af glacialt smeltevandssand og -grus. Undtagelserne er grundvandsmagasinet ved Nyborg, der er artesisk og består af danienkalk samt grønsandskalk og skifer fra selandien, grundvandsmagasinerne ved Middelfart, der overvejende er frie og uden beskyttende lerlag, og endelig magasinerne ved Assens og Svendborg, der er både artesiske og frie og består af glacialt smeltevandssand. Ved Svendborg består magasinerne dog også af interglaciale sandaflejringer, se figur 1 (Fyns Amt, 1997b).



Figur 1. *Områder med hovedmagasiner*

3. KONCEPTUEL MODEL

Opstilling af en konceptuel model (en hydrogeologisk tolkningsmodel) er i princippet en fortolkning af de væsentligste strømningskarakteristika for grundvandssystemet repræsentative for den skala i hvilken modellen arbejder. En hydrologisk matematisk model forudsætter en opdeling på beregningslag og -kasser, som må tilpasses geologien, uanset at forholdene i visse områder er meget komplekse som følge af bla. glacialtektoniske forstyrrelser (f.eks i randmoræne områder). En konceptuel model skal belyse de antagelser og den viden der ligger til grund for fastlæggelsen af de 'hydrostratigrafiske enheder', som grundvandssystemet er opdelt i. Hydrostratigrafiske enheder repræsenter en eller adskillige geologiske enheder slået sammen til et lag med bestemte hydrauliske egenskaber, men kan også være en underopdeling af et givet geologisk lag i flere enheder/beregningslag.

Parameterfastsættelsen af f.eks den hydrauliske ledningsevne i smeltevandssand eller moræneler skal ligeledes være repræsentativ for modelskalaen. Dette betyder, at heterogeniteter som følge af sprækker og sandvinduer skal repræsenteres med få effektive parametre, og at enkelte sprækker og sandvinduer ikke skal repræsenteres.

Fyn er dækket af kvartære aflejringer fra mindst fire istider med en total tykkelse varierende fra nogle få til godt 100 meters tykkelse. Størstedelen af den kvartære lagserie udgøres af moræneler med linser og lag af smeltevandssand og -grus i adskillige stratigrafiske niveauer. Reservoirerne er overvejende artesiske. Kun i den østlige del af Fyn (øst for Odense - Svendborg) forekommer der kalkreservoirer (Danienkalk, grønsandskalk).

Opstillingen af den konceptuelle model blev gennemført ved at udtegne et antal geologiske profiler fra øst til vest og nord til syd, samt ved at undersøge cirkeldiagramkort i 1:50.000 (Andersen, 1973) sammen med relevant litteratur. Der blev foretaget en systematisk analyse af filtermidtpunkter i forskellige områder med henblik på at vurdere hvilke lag, der havde de bedste vandførende egenskaber. På baggrund heraf blev vandførende og lavpermeable lag med regional udstrækning for Fyn fastlagt, således at der kunne foretages en tolkning af den rumlige udbredelse og sammenhæng af hvert enkelt hydrogeologisk modellag (se figur 2):

3.1 Grundvandssystemet (antagelser om reservoirforhold)

Den konceptuelle model er tolket i følgende 9 hydrostratigrafiske enheder:

1. Landområder: Øverste 3.5 meter, som antages opsprækket og relativt vandførende. Havområder: Øverste lag er defineret udfra vanddybden, og antages at have en meget høj hydraulisk ledningsevne, der svarer til, at trykniveauet fastholdes omkring 0 i havområder i lag 1.

Fyns Amt har opgjort den totale grundvandsdannelse til ca. 176 mill. m^3 pr. år (51 mm/år). Det er imidlertid kun en mindre del af den samlede grundvandsressource, der er udnyttelig, når hensynet til grundvandskvaliteten skal inddrages. Tages der hensyn til et fradrag i ressourcen som følge af problemområder bla. ved Middelfart, Hindsholm, Ærø, Langeland og Tåsinge kan den kvalitetsmæssige bæredygtige grundvandsressource for Fyn opgøres til ialt ca. 123 mill. m^3 pr. år (36 mm/år) svarende til ca. 12 % af nettonedbøren (Fyns Amt, 1997b).

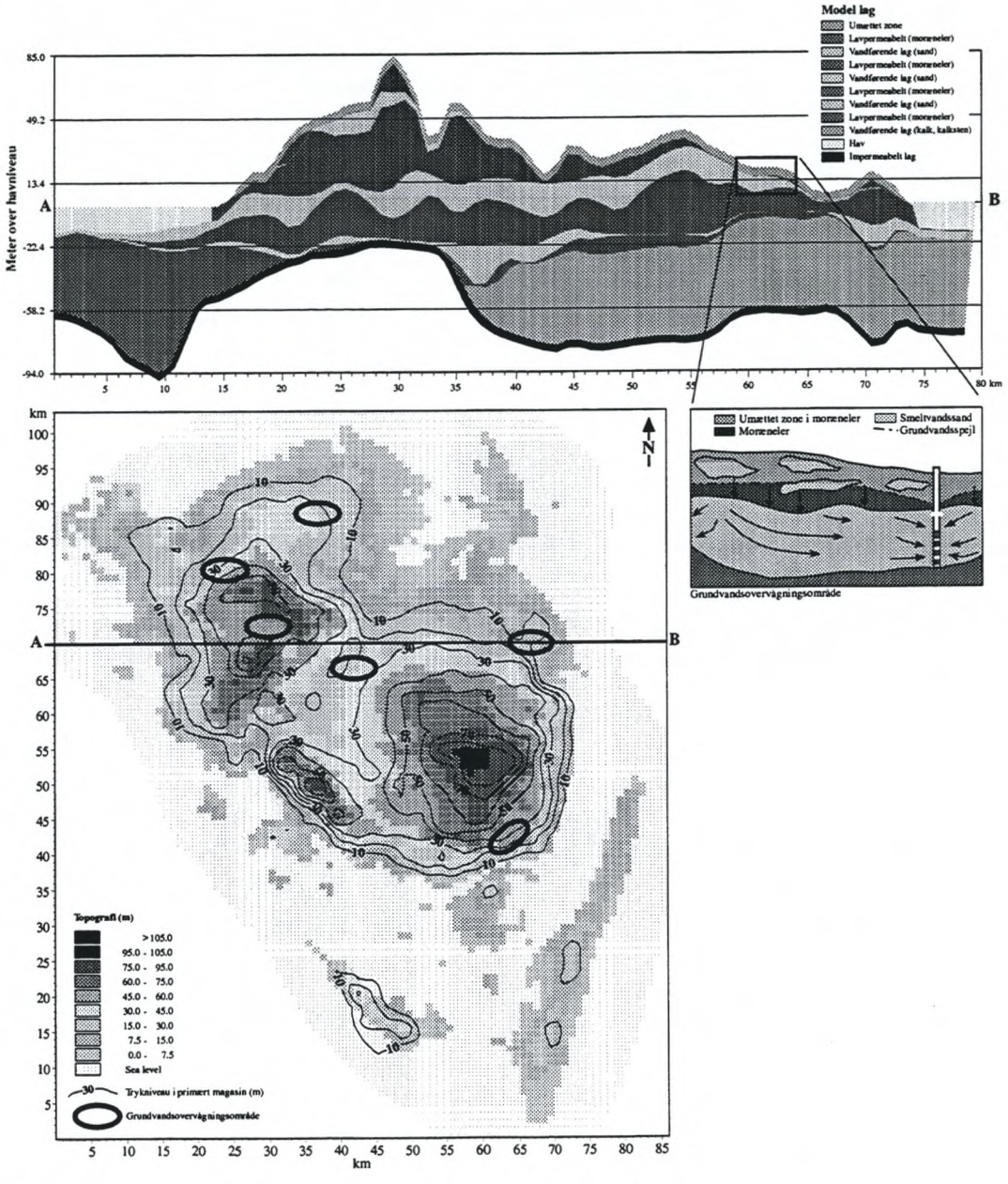
Begrænsningen af indvindingsmulighederne grundet tilstedeværelsen af miljøfremmede stoffer som f.eks chlorerede opløsningsmidler og pesticider i grundvandet udgør i dag et problem og vurderes også at ville udgøre det i fremtiden. Store kildepladser ved Middelfart, syd for Kerteminde og ved Odense, er belastede af miljøfremmede stoffer, men en estimering af reduktion af ressourcen er ikke mulig, idet udstrækningen af forureningen indenfor det enkelte magasin i reglen ikke kendes (Fyns Amt, 1997b).

Da grundvandsindvinding nedsætter vandløbenes vandføring, er det begrænset, hvor meget grundvand der kan indvindes, hvis målsætningerne for vandføringer skal kunne opfyldes i sommerperioden hvor vandføringen er mindst. Den grundvandsressource der kan indvindes med samtidig opretholdelse af målsætningerne for vandløbene, dvs. sikring af en passende restvandføring i vandløb, kaldes den recipientmæssige bæredygtige ressource. Den er for hele amtet beregnet til at være ca. 64 mill. m^3 pr. år (19 mm/år, Fyns Amt, 1997b).

Det fremgår af ovenstående, at det er den recipientmæssige bæredygtige ressource som stiller de største begrænsninger i udnyttelsen af vandressourcen. En nærmere vurdering af såvel den kvalitetsmæssige som recipientmæssige bæredygtige vandressource er vigtig, og DK modellen giver netop mulighed for at foretage konsekvensanalyser af disse størrelser, således at fradrag i ressourcen som følge af problemområder og konsekvenser for vandføring i vandløb kan vurderes og prioriteres.

Den totale vandindvinding udgør idag ca. 52 mill. m^3 pr. år. Restressourcen beregnet som den kvalitetsmæssige bæredygtige ressource fratrukket den aktuelle indvinding udgør ca. 71 mill. m^3 pr. år. Restressourcen er skævt fordelt over amtet. De store grundvandsoplande på Fyn har stadig en betydelig ressource. På Ærø, Langeland og ved Middelfart oppumpes derimod i øjeblikket mere grundvand end det kan forventes at der bliver dannet under perioder med små nedbørsmængder. Det samlede vandbehov forventes at vokse til ca. 61 mill. m^3 pr. år i år 2009 (Fyns Amt, 1997b).

2. Lavpermeabelt lag (øverste lerlag, forekommer kun lokalt i områder med topografi over ca. 50 m)
3. Vandførende lag (sekundært lokalt magasin bestående af sand/grus, forekommer kun i visse områder og kun med topografi over ca. 30 m)
4. Lavpermeabelt lag (dæklag af ler over primære regionale øvre sand/grus magasin)
5. Vandførende lag (primære regionale øvre sand/grus magasin)
6. Lavpermeabelt lag (lerlag som adskiller øvre og dybere regionale sand/grus magasiner)
7. Vandførende lag (primære regionale nedre sand/grus magasin)
8. Lavpermeabelt lag (lerlag mellem nedre regionale sand/grus magasin og prækvartære magasiner af danienkalk/grønsandskalk)
9. Vandførende lag (prækvartære magasiner af danienkalk/grønsandskalk)



Figur 2. *Tolkning af lavpermeable og vandførende lag for Fyn*

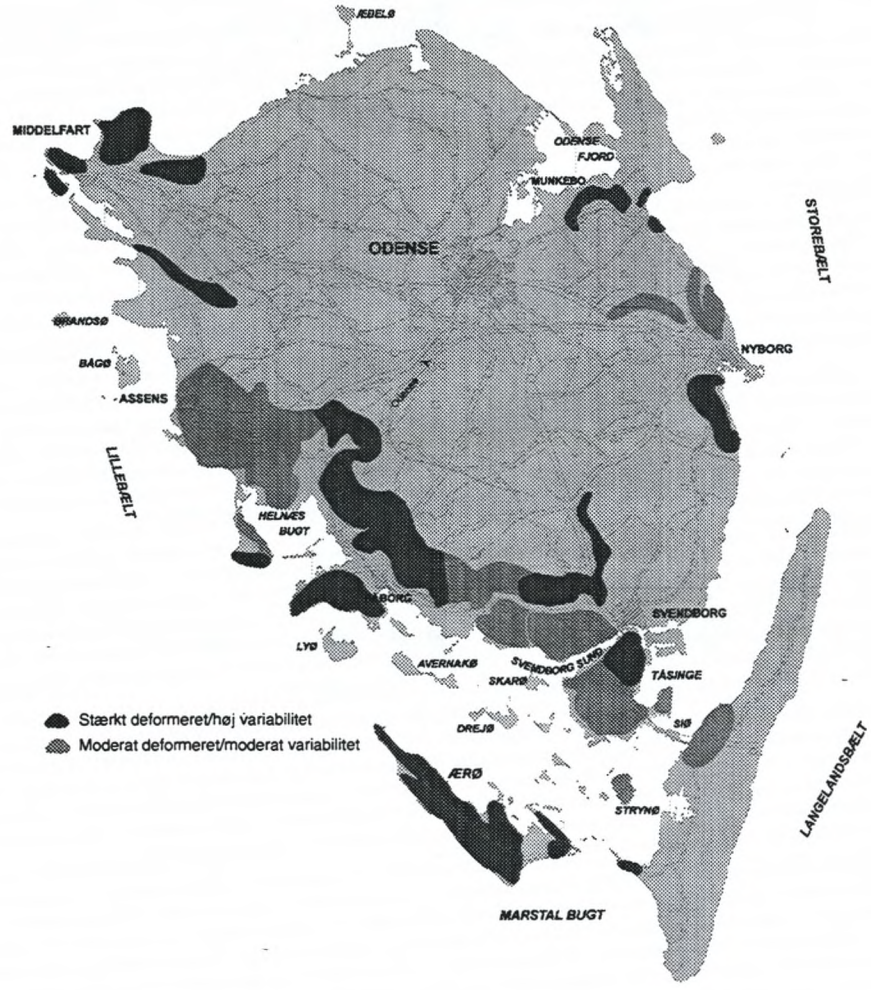
Lerlagene i de lavpermeable hydrostratigrafiske enheder (1, 2, 4, 6 og 8) består overvejende af moræneler. I visse områder indgår desuden Lillebæltsler, Røsnæsler, paleocænt ler og mergel, interglacialt, senglacialt og postglacialt ferskvandsler, samt interglacialt saltvandsler i disse enheder. For lavpermeable lag er den vertikale hydrauliske ledningsevne den vigtigste parameter, hvorimod den horisontale ledningsevne har mindre betydning. Den vertikale hydrauliske ledningsevne kan afhænge af forekomsten af sprækker og sandvinduer, og derfor kan denne for opsprækket moræneler (fx. lag 1) antages væsentligt højere end for de øvrige lavpermeable lag. Da udbredelsen af sprækker og sandvinduer imidlertid ikke kendes i detaljer, er det i DK-modellen antaget at lag 2, 4, 6 og 8 har samme horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne. Vandudvekslingens størrelse mellem et øvre og et dybere vandførende lag antages således omvendt proportional med tykkelsen af det lavpermeable lag ved en given trykniveauforskel, hvilket svarer til at den distribuerede lækagekoefficient bestemmes udfra den (uniforme) hydrauliske ledningsevne divideret med tykkelsen af det lavpermeable lag. Der er således ikke taget hensyn til at smeltevandsler har en lavere hydraulisk ledningsevne end fx. moræneler eller at visse sekvenser af moræneler kan være mere lavpermeable end andre.

Med hensyn til moræneleren kan denne inddeles i følgende 'sprækkezoner':

- de øverste 0-1.5 m hvor moræneleren er meget opsprækket som følge af udtørring, ormehuller, gravegange, rodhuller etc.
- fra ca. 1.5 m.u.t. til grundvandsspejlet (eller evt. sandlag) hvor der som oftest vil optræde udtørringssprækker og i 'belastet moræneler' sandsynligvis tektoniske sprækker forårsaget af isens tryk på underlaget
- under grundvandsspejlet vil der ligeledes ofte optræde tektoniske sprækker og i enkelte tilfælde fosile udtørringssprækker som følge af tidligere tørre klimaperioder (for bl.a. ca. 8500 år siden); de tektoniske sprækker har traditionelt en større hydraulisk ledningsevne i denne dybde og kan gennemsætte moræneleret til større dybde
- i områder præget af neotektonik f.eks saltdomer og forkastningszoner (fx. Carlsberg forkastningen i København) er moræneleren ofte gennemsat af sprækker

Kortlægning af sprækker forudsætter detaljerede undersøgelser og kan ikke vurderes alene udfra boringsdata. Det er derfor i DK-modellen antaget, at de øverste 3.5 m har en relativ høj hydraulisk ledningsevne, mens de dybere lerlag har en lavere værdi.

En analyse af moræneleren og dens sprækkekarakteristik kan baseres på jordartskort, geomorfologisk analyse og cirkeldiagramkort. I figur 3 er vist et resultat af en vurdering af den glacialtektoniske variabilitet for Fyn. Som det fremgår af figuren er der en række områder af Fyn hvor der forekommer glacialtektoniske deformationer af den kvartære lagserie. Her er sammenhængen mellem de forskellige vandførende og lavpermeable lag usikker.



Figur 3. *Områder med stærk eller moderat glacialtektonisk forstyrrelse*

Sandlagene i de vandførende hydrostratigrafiske enheder (3, 5 og 7) består overvejende af smeltevandssand og grus. Med den givne maskevidde på 1x1 km antages det, at transmissivitetsværdier, f.eks specifik ydelse fra borearkivet, ikke er repræsentative. De kan derfor ikke umiddelbart benyttes til en horisontal distribuering af den hydrauliske ledningsevne på baggrund af interpolation mellem observationerne. I stedet antages den hydrauliske ledningsevne for enhederne konstant. Variationen i transmissiviteten antages udelukkende at afhænge af tykkelsen af det vandførende lag (proportional med lagtykkelsen). De vandførende enheder falder typisk sammen med grundvandsmagasiner kortlagt af Fyns Amt og kan i disse områder have en betydelig tykkelse på 15-30 meter. I områder hvor der ikke er truffet lokale magasiner antages en beregningsmæssig tykkelse af de vandførende magasiner på 0.1 m, jf. at beregningsmodellen forudsætter en 'lagkage-geologi'.

For danienkalk/grønsandskalk antages det, at den beregningsmæssige tykkelse af den vandførende del er på 50 meter. Transmissiviteten for dette lag, modsat alle andre hydrostratigrafiske enheder, er distribueret og transmissivitetsfordelingen er baseret på en bilineær interpolation mellem observationer, som igen er baseret på specifik ydelse fra borearkivet. Tykkelsen på 50 meter er kun afgrænset til de områder af Fyn hvor kalken er opsprækket og dermed vandførende. For Vest- og Sydfyn antages en beregningsmæssig tykkelse på 0.1 m, svarende til at enhed 9 ikke har væsentlig betydning for strømningsforholdene i disse områder, idet kalken her er lavpermeabel.

3.2 Hydrologiske afgrænsninger (randbetingelser)

Af figur 2 fremgår en vurdering af grundvandets trykniveau for de primære øvre og dybere smeltevandsmagasiner på baggrund af pejledata fra borearkivet sammenlignet med topografi. Potentialet varierer mellem ca. 90 m og 0 m og afhænger af de topografiske variationer. Til sammenligning når topografien op over 100 m i de højstbeliggende områder.

3.2.1 Modeloverflade, dræn- og vandløb

Randbetingelsen for det øverste lag er defineret af grundvandsdannelsens størrelse som beregnes med et simpelt rodzonemodul på daglig basis udfra nedbør og fordampning og regnskab med vandindholdet i rodzonen. Nedsivning fra rodzonen genereres fortrinsvis i situationer hvor vandindholdet overstiger markkapaciteten, idet der ved et vandindhold mellem 70-100 % af markkapaciten kun antages en mere begrænset nedsivning. Der ses bort fra en evt. forsinkelse og magasinering i umættet zone. Afhængigt af nedsivningens størrelse, potentialet i det øverste lag og de hydrauliske parametre for grundvandsmodellen kan der genereres overfladisk afstrømning (afstrømning på terræn mod vandløb) eller drænvandsafstrømning (afstrømning gennem de øverste jordlag til dræn eller vandløb). Såvel overfladisk afstrømning som drænvandsafstrømningen vil følge den topografiske variation mod lavereliggende områder. Hvor disse lavtliggende områder gennemskæres af vandløb vil overfladisk afstrømning og drænvandsafstrømning tilføres vandløbsafstrømningen. Såfremt de lavtliggende områder ikke er gennemskåret af et vandløb, vil der afhængigt af den hydrauliske ledningsevne i jordlagene og grundvandstand, ske en nedsivning til grundvandet eller evt. en temporær eller permanent opstuvning af vand på terræn ('afløbsløse dræn').

De topografiske forhold er baseret på Kort & Matrikelstyrelsens digitale 50 m grid. Dette datagrundlag er behæftet med nogen usikkerhed som følge af de anvendte interpolationsrutiner og datagrundlaget. Et detaljeret kendskab til drænsystemer på Fyn findes ikke på let tilgængelig form. Med jordartsforhold hvor mere end 4/5 af Fyn udgøres af lerjorde antages det, at der i stort set alle beregningsmasker for Fyn vil være drænede arealer. Det er

derfor valgt at antage drænafstrømning overalt på landområder. En beregningsmæssig drændybde på 0.5 m under terræn er antaget.

Ved repræsentation af vandløb er samtlige digitale vandløbspunkter (1:500.000) svarende til højereordens vandløb grundlaget (typisk amtsvandløb). Det vil sige at lavere ordens vandløb typisk ikke er repræsenteret (bla. en del kommunevandløb og mindre private vandløb, drængrøfter/systemer osv.).

Det er vurderet, at de "afløbsløse dræn", som fremkommer i forbindelse med interpolationen af topografi til et 1x1 km modelnet og efter at vandløbssystemet ligeledes er introduceret i modelopsætningen (Andersen, 1996), enten i praksis er afdrænende til vandløb (på grund af intensivt jordbrug) eller skal tilskrives usikkerheder på interpolationen af topografi. "Afløbsløse dræn" er derfor, hvor der ikke foreligger dokumentation for, at der er tale om et vådområde som ikke afdrænes, søgt elimineret i forbindelse med modelopstillingen. Dette er sket ved a) at medtage lavere ordens vandløb i vandløbssetup'et, b) ved at justere vandløbskoten, c) ved at justere drænniveau og/eller topografien og d) ved at tvinge routningen af overfladisk og/eller drænvandsafstrømning fra et givent område til et bestemt vandløb uafhængigt af topografi eller drænkoter.

For Fyns modellen er fremgangsmåde a) og b) fortrinsvis anvendt til eliminering af 'afløbsløse dræn'. Drænvandsafstrømning dækker såvel kunstig afdræning som naturlig afdræning. I en skala på 1x1 km vil modeltopografien typisk være meget mere udjævnet i forhold til de faktiske topografiske variationer. Drænafstrømning vil i modellen blive beskrevet ved et niveau for drændybden og en tidskonstant for routningen af vand ud af elementet. Der anvendes en drændybde på 0.5 meter under terræn. Tidskonstanten for dræn er typisk i størrelsesordenen 1 10^{-6} til 1 10^{-7} s^{-1} og afhænger bl.a. af modelskalaen.

3.2.2 Vandudveksling mellem grundvand og vandløb (indre randbetingelser)

Der er foretaget en analyse af medianminimumsafstrømningen fra de enkelte vandløbsstrækninger (Fyns amt, 1995). Tilstrømningen for delstrækninger for ialt 50 delområder er sammenlignet med topografi, jordartskort og den hydrogeologiske tolkningsmodel.

Langt hovedparten af vandløbsstrækningerne (af størrelsesordenen 90 %) modtager under 5 l/s/km^2, mens under 9 % af vandløbene modtager 5-15 l/s/km^2. Under 1 % modtager mere end 15 l/s/km^2. Delstrækninger der *afgiver* vand til grundvandsmagasinet er ligeledes af størrelsesordenen 1 %.

Det overordnede geografiske mønster er, at der allerøverst i oplandene generelt ikke finder baseflowtilstrømning sted (0 l/s/km^2). Lidt længere nede i systemet forekommer lille tilstrømning fra grundvand (0-5 l/s/km^2). Midt i oplandene findes generelt de strækninger, hvor de større tilstrømninger finder sted. Delstrækninger uden tilstrømning til vandløbet fra

grundvandsmagasinerne findes ligeledes i de midterste strækninger (svarende til at minimumsvandføringen er faldende nedstrøms). Nederst i oplandene er tilstrømningen af baseflow atter lille: 0-5 l/s/km^2.

Disse forhold viser en tydelig sammenhæng med landskabets topografi. Hovedudstrømningsområdet for grundvand (> 5 l/s/km^2) er beliggende i den centrale del af Fyn langs den midterste del af bl.a. Odense å. Dette område er beliggende mellem de tre højtliggende områder. På yderflanken af de højtliggende områder ligger de øvrige strækninger, hvor en større udstrømning finder sted. Disse strækninger findes hovedsageligt i højdeintervallet 7.5-30 m. Under 7.5 m DNN er tilstrømningen atter 0-5 l/s/km^2.

På grundlag af et udtegnet kort over jordarter i og langs ådalene ses ingen entydig sammenhæng mellem strækninger med større udstrømning (> 5 l/s/km^2) og tilstedeværelsen af højpermeable sand- og grusaflejringer i og langs ådalene. Strækninger med lille tilstrømning (0-5 l/s/km^2) er heller ikke entydigt knyttet til områder med lavpermeable aflejringer som ferksvandstørv, ferskvandsdynd eller ler i eller langs ådalene.

Strækninger med stor tilstrømning (> 5 l/s/km^2) findes overvejende hvor ådalene har relativ god kontakt med dybereliggende primære regionale sandmagasiner (lag 5 i den hydrostratigrafiske model). Mere lokalt findes desuden stor udstrømning fra sekundære sandmagasiner i niveauet 45-60 m (lag 3 i den hydrostratigrafiske model).

Man kan konkludere, at den største udstrømning fra grundvand til vandløb forekommer de steder, hvor ådalene har relativ god kontakt med det primære grundvandsmagasin (lag 5). Dette er hovedsagelig i de centrale dele af Fyn langs den midterste strækning af Odense å, der ligger mellem de tre højtliggende områder i niveauet 7.5 - 30 m. Der sker dog også udstrømning på yderflanken af de højtliggende områder i dette niveau.

Udstrømningen fra sekundære sandmagasiner til vandløbene (lag 3) er derimod lille - med undtagelse af et lokalt område i 45-60 m DNN. Dette skyldes sandsynligvis, at der ikke forekommer tilstrækkeligt store opadrettede trykgradienter under ådalene i dette niveau.

Jordartsforholdene langs ådalene har tilsyneladende underordnet betydning for størrelsen af udstrømningen af grundvand til vandløbene på Fyn i forhold til de geologiske forhold.

Vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb kan i princippet beskrives som havende a) 'direkte kontakt', dvs. at de er udelukkende afhængige af de hydrauliske parametre for de geologiske lag langs vandløbet eller b) ' reduceret kontakt', dvs. at såvel lavpermeable sedimenter i vandløbsbunden som hydrauliske parametre for de geologiske lag langs vandløbet skal tages i regning. For Fyns modellen er antaget reduceret kontakt, dvs. at vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb styres af såvel den hydrauliske ledningsevne af de geologiske lag som af en lækagefaktor for bundsedimentet af vandløbet. Sidstnævnte antages konstant for hele modelområdet.

3.2.3 Modelrand og impermeabel bund (ydre randbetingelser)

De ydre randbetingelser er forskellige for de 3 forskellige modelsetup. For Fynsmodellen (inkl. øer) er der benyttet fastholdt trykniveau langs modelranden (se figur 2). For vandløb, som er ført gennem områder med 'hav' idet de af modeltekniske årsager skal afsluttes udenfor modelområdet, er lækagefaktoren fra det nederste vandløbstværsnit til udløbet (udenfor modelområdet) sat lig 0. Med denne ydre randbetingelse vil vandudvekslingen mellem grundvand og hav i praksis blive beskrevet så den afhænger af forekomst og tykkelse af lavpermeable dæklag mellem hav og vandførende lag med udstrækning under havbunden.

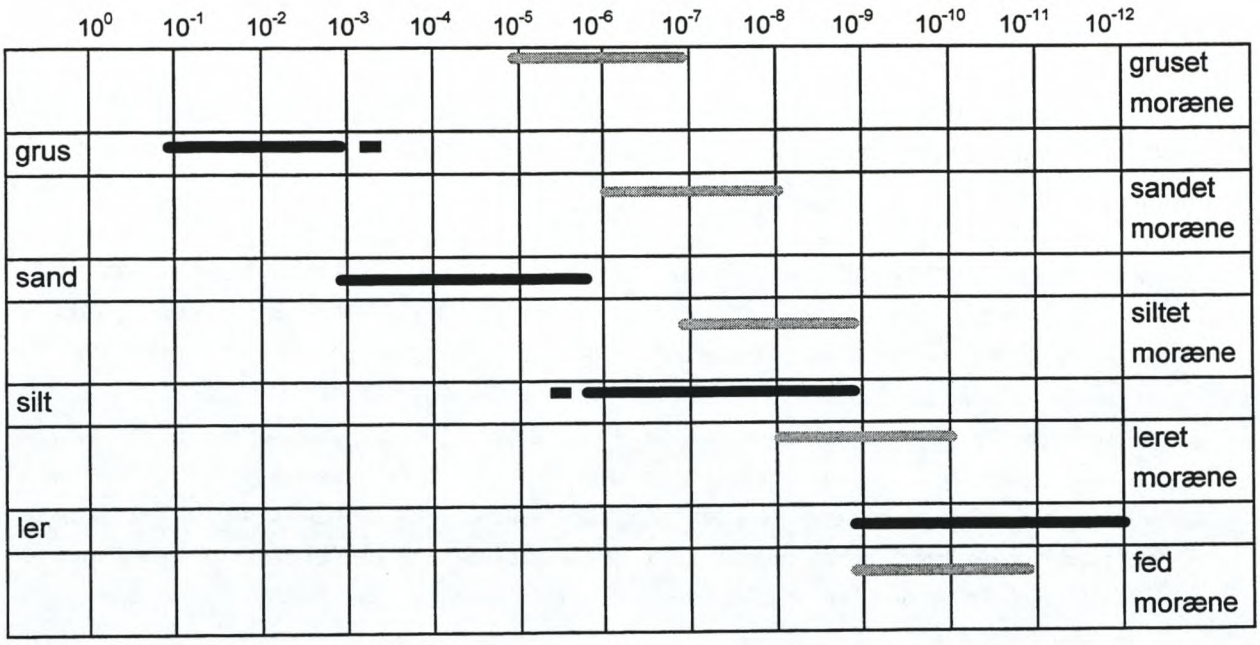
For modellen for øen Fyn (Fynsmodellen) er der benyttet fastholdt trykniveau langs modelranden som i dette tilfælde er placeret langs kystlinien. Hermed introduceres en randbetingelseseffekt i kystnære områder som følge af antagelsen af fastholdt trykniveau langs kystlinien. Det vurderes generelt, at antagelsen om direkte kontakt mellem hav og det primære magasin (geologisk lag 5/beregningslag 3) ved kystlinien for Fyn normalt vil være god (jf. figur 2). For sub-modellen for Østfyn er der benyttet en "no-flow" randbetingelse langs den sydvestlige rand (ind mod Fyn), mens der er benyttet fastholdt trykniveau langs kystlinien.

Det antages, at den impermeable bund i DK-modellen for Fyn udgøres af enten toppen af prækvartæret, hvor denne ikke er opsprækket/vandførende (Vest/Sydfyn) eller af en impermeabel bund beliggende 50 m under toppen af den vandførende del af kalken, hvor kalken er vandførende (Østfyn).

3.3 Hydrauliske størrelser

Størrelsen af den hydrauliske ledningsevne (K-værdien) er et udtryk for evnen til at transportere vand. Den angives i m/s. Den hydrauliske ledningsevne er den parameter, der er den mest styrende med hensyn til vandets strømningsretning og mængden af vand, der kan strømme i jorden (figur 4).

Størrelsen af den hydrauliske ledningsevne varierer meget for forskellige jordlag, som det fremgår af oversigten i figur 4. Sand- og grusaflejringer har høje K-værdier, hvorimod ler har lave K-værdier. Den hydrauliske ledningsevne varierer normalt en del inden for samme geologiske formation. Der kan tillige være tale om retningsbestemte variationer, som knytter sig til den orientering, hvori lagene i sin tid blev aflejret.



Figur 4. *Den hydraulisk ledningsevnes størrelse og variation (efter Carlsson og Gustafson, 1984)*

Skøn af den hydrauliske ledningsevne for hvert lag må på grund af skalaen for DK-modellen (1x1 km) og fordi heterogeniteter (sprækker/sandlag) indenfor en mindre skala ikke kan repræsenteres direkte i modellen, baseres på effektive værdier ("bulk-værdien"). De effektive værdier for de lavpermeable lag vil typisk være større end værdierne angivet i figur 4.

Tynde sandlag, vinduer, sprækker etc. er ikke repræsenteret i lerlagene og samlet vil de beregningsmæssige ledningsevnerne derfor blive forøget i forhold til værdierne i figur 4. Omvendt vil de effektive værdier for de vandførende lag typisk blive en gennemsnitsværdi for grus/sand.

På baggrund af feltundersøgelser ved Ringe (Nilsson et. al., 1997) er det vurderet, at den hydrauliske ledningsevne i moræneleren i den opsprækkede zone (2-3 meter under terræn) typisk varierer mellem: K = 10^{-4} til 10^{-5} m/s. For den dybere beliggende sekvens af den terrænnære moræneler, i dybder større end 5-6 m, blev den hydrauliske ledningsevne for moræneleren vurderet til mellem: K = 10^{-7} - 10^{-8} m/s. I større dybde er ledningsevnen antaget endnu lavere.

For lag 1 i den hydrostratigrafiske model antages en effektiv hydraulisk ledningsevne på 10^{-4} til 10^{-5} m/s. Det vurderes, at der godt kan være en betydelig anisotropi, således at den vertikale ledningsevne for moræneleren er væsentligt lavere: 10^{-5} til 10^{-7} m/s.

For de øvrige lavpermeable lerlag vurderes det, at den effektive "horisontale ledningsevne" varierer indenfor intervallet: 10^{-6} - 10^{-8} m/s. Det antages, at en rimelig variationsramme for

den vertikale ledningsevne af moræneleren udgør 10^{-7} til 10^{-9} m/s. Anisotropien mellem horisontal og vertikal ledningsevne for moræneleren antages til en faktor 10-100.

For sandlag antages den horisontale ledningsevne at skulle ligge i intervallet 10^{-3} til 10^{-5} m/s. Anisotropien mellem horisontal og vertikal ledningsevne for sandlag antages til en faktor 10.

Det vurderes, at observationer af transmissiviteten fra borearkivet baseret på specifik ydelse ikke er repræsentative for den anvendte skala (1x1 km). Samtlige sandlag (2,4 og 6) antages at have samme hydrauliske ledningsevne, og variationen i transmissivitet antages dermed at afhænge af lagtykkelsen. Det antages endvidere at de har samme anisotropifaktor (faktor=10). Tilsvarende antages alle lerlag (2,4,6 og 8) at have samme ledningsevne og anisotropifaktor. For lag 1 antages det at den hydrauliske ledningsevne for moræneleren er væsentligt større end i de øvrige lavpermeable lag jf. sprækkeeffekter. For kalken antages det derimod, at en interpolation på basis af transmissivitet bestemt udfra specifik ydelse (boredataarkivet) udgør det bedste grundlag for modelleringen.

For sandlinser i moræneleralag antages det, at de hydrauliske ledningsevner kan antages at være mellem 1-20 gange mindre end værdien for et vandførende sandlag.

Magasintallet for frit magasin antages, at variere indenfor området: 0,15 - 0,25. For artesiske forhold antages den specifikke magasinkoefficient (pr. meter) til en størelsesorden på 0,0001 (beliggende i invervallet 0,00001-0,001).

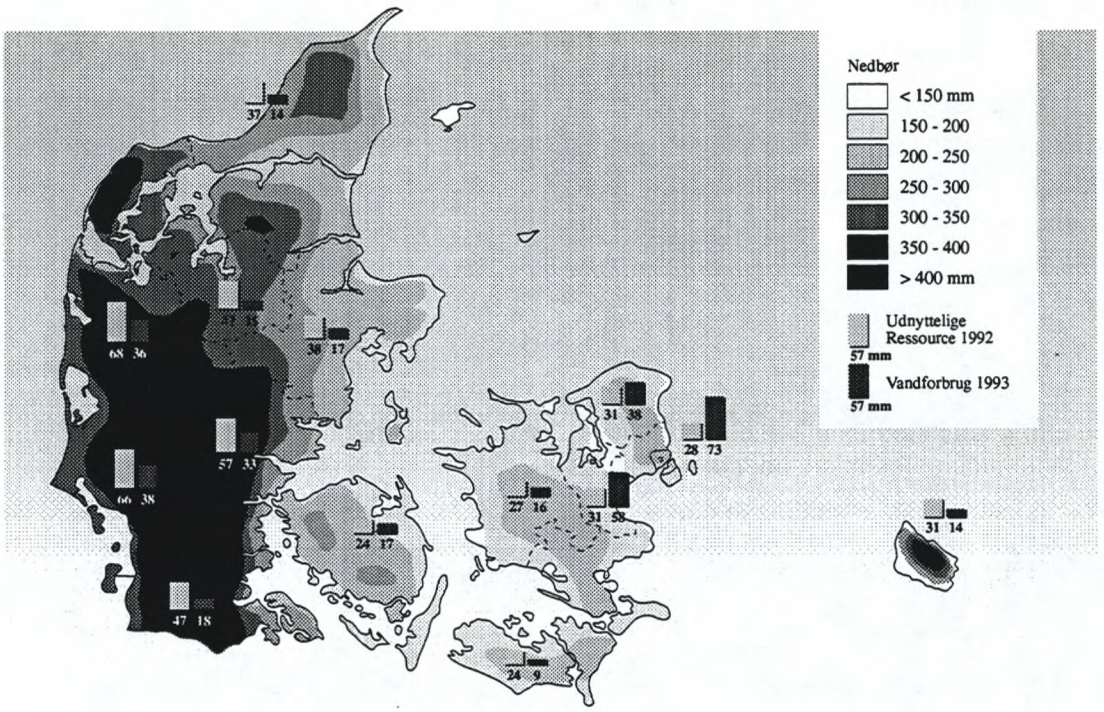
3.4 Nedsivning og udstrømning (vandbalancen)

Nedbørsfordelingen følger i grove træk terrænforholdene. Normalnedbøren (korrigeret) 1961-90 varierer således mellem ca. 650 mm/år i kystområderne og ca. 800 mm/år for den centrale del af Fyn. For de højest beliggende områder er nedbøren således ca. 10 % større end for de lavere beliggende områder. På øerne er nedbøren ligeledes relativ lav, helt ned til ca. 600 mm/år for den sydlige del af Langeland og Ærø. Nettonedbørens fordeling, den udnyttelige ressource og vandforbruget for Fyn er vist i figur 5.

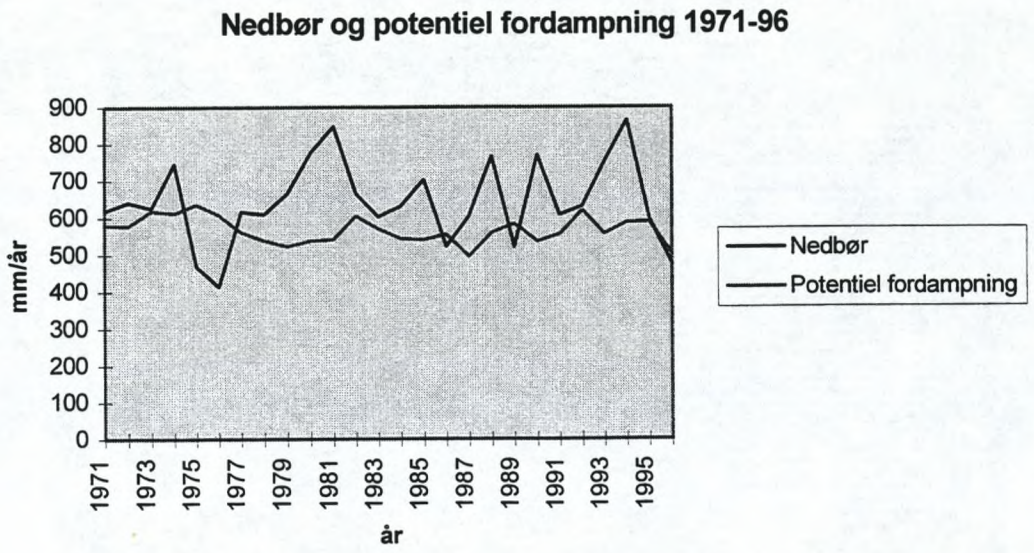
Det fremgår, at nettonedbøren i de højtliggende områder er over 250 mm/år. For den Sydvestlige del af øen Fyn og Tåsinge er nettonedbøren i lavere beliggende områder 200-250 mm/år, mens den i den nordøstlige del af øen Fyn er mellem 150-200 mm/år.

For perioden 1971-90 var den gennemsnitlige ukorrigerede nedbør for Fyn ca. 630 mm/år mens den potentielle fordampning udgjorde ca. 560 mm/år. For perioden 1989-96 var de tilsvarende værdier henholdsvis en ukorrigeret nedbør på ca. 640 mm/år og en potentiel fordampning på ca. 540 mm/år (baseret på gridværdier fra Dansk Jordbrugsforskning,

Landskontoret for Planteavl udfra nedbørs- og klimastationer fra Danmarks Meteorologiske Institut). I figur 6 er vist årlige værdier af nedbør og potentiel fordampning for Midtfyn.



Figur 5. *Nettonedbør i mm vist med skravering. Udnyttelige ressource jf. Vandrådet vist med venstre søjlet. Vandforbrug i 1993 med højre søjle..*

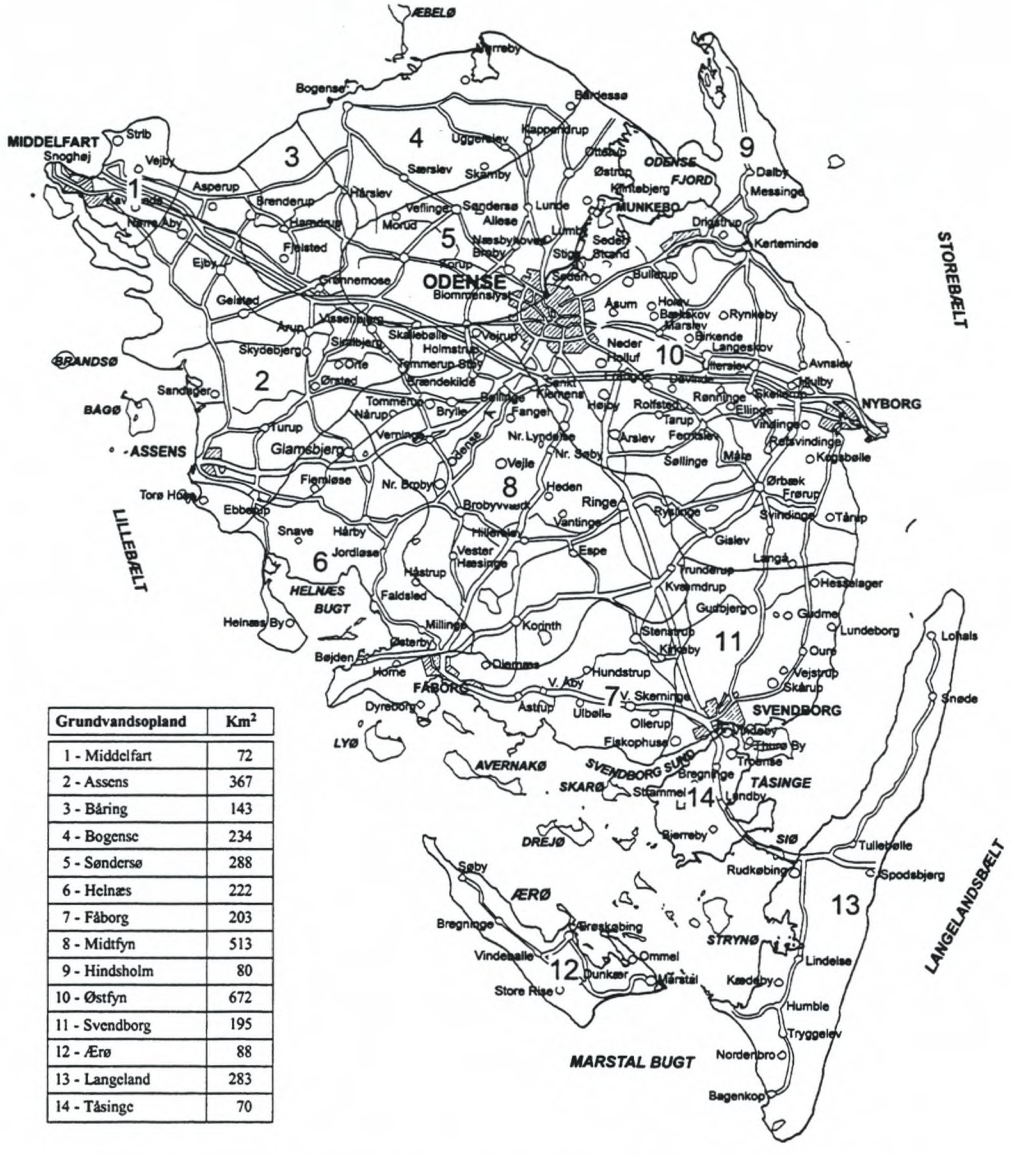


Figur 6. *Årlige værdier af nedbør og potentiel fordampning 1971-96 for Midtfyn*

3.5 Vandbalance for grundvandsmagasin

Fyns amt har opgjort grundvandsressourcens størrelse baseret på medianminimumsafstrømning, vandindvindinger og skøn af underjordisk afstrømning (Fyns Amt, 1997b) for en række overordnede grundvandsoplande (se figur 7). I nedenstående tabel 1 er disse skøn sammenfattet.

Placeringen af almene vandværker på Fyn med oppumpning i 1996 på baggrund af GEUS's vandindvindingsdatabase er vist i figur 8.



Grundvandsopland	Km²
1 - Middelfart	72
2 - Assens	367
3 - Båring	143
4 - Bogense	234
5 - Søndersø	288
6 - Helnæs	222
7 - Fåborg	203
8 - Midtfyn	513
9 - Hindsholm	80
10 - Østfyn	672
11 - Svendborg	195
12 - Ærø	88
13 - Langeland	283
14 - Tåsinge	70

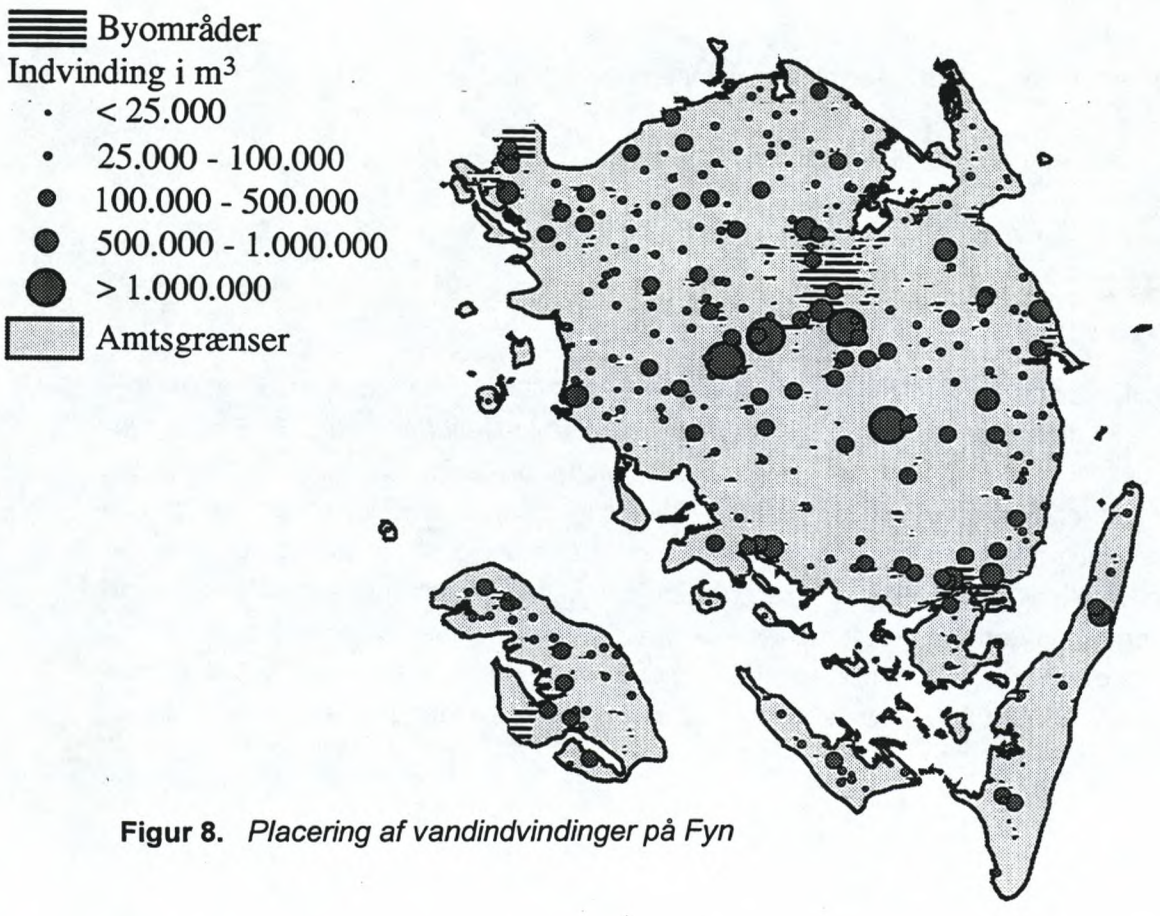
Figur 7. *Placering af overordnede grundvandsoplande 1-14 (Fyns Amt, 1997b).*

	Område nr.	Oplands areal	Total vandindvinding	Vandløbs medianminima excl. tørvejrs-spildevands-mængde	Underjordisk afstrømning	Total grundvandsdannelse
		km^2	1000 m^3/år	1000 m^3/år	1000 m^3/år	1000 m^3/år
Middelfart	1	72	1900	[1] 0	-	[2] 1400
Assens	2	367	3208	9720	4100	11900
Båring	3	143	1248	5910	1600	6200
Bogense	4	234	1968	11010	300	9300
Søndersø	5	288	4404	4800	0	6500
Helnæs	6	222	1661	8360	1800	8300
Fåborg	7	203	2968	6220	1900	7700
Midtfyn	8	513	10464	27240	1100	27100
Hindsholm	9	80	223	[1] 0	-	[2] 500
Østfyn	10	672	18452	25390	3400	33100
Svendborg	11	195	3149	6780	2600	8800
Ærø	12	88	564	[1] 0	-	[2] 800
Langeland	13	283	1564	[1] 0	-	[2] 1400
Tåsinge	14	70	415	[1] 0	-	[2] 400
I alt		3430	52000	105000	17000	176000

[1] Området indeholdt ikke vandløb med beregnede medianminimumsvandføringer

[2] Vurderet på grundlag af faktiske indvindinger og hydrogeologiske undersøgelser

Tabel 1. *Skøn af grundvandsdannelse for 14 overordnede oplande (Fyns Amt, 1997b)*



Figur 8. *Placering af vandindvindinger på Fyn*

4. BESKRIVELSE AF MODELKODEN

I det følgende beskrives modulerne:

- MIKE SHE overfladisk afstrømning (OC)
- MIKE SHE grundvandsstrømning (SZ)
- MIKE SHE udveksling mellem grundvand og vandløb (EX)
- beregning af nettonedbør (inputdata til MIKE SHE SZ/OC/EX)

Modulet MIKE SHE umættet zone (UZ) beskrives ikke i detaljer, idet dette modul ikke anvendes.

MIKE SHE version 5.25 (oktober 1997) har været anvendt. I forhold til den seneste officielle release (version 5.24, juli 1997) er håndteringen af infiltrationen revideret, når modulerne SZ + OC + EX anvendes uden brug af UZ. For en nærmere dokumentation henvises til:

- Dansk Hydraulisk Institut (1997): MIKE SHE. Pre- and Postprocessing. User Guide. Edition 1.1.
- Dansk Hydraulisk Institut (1997): MIKE SHE. Water Movement v. 5.2. User Guide. Edition 1.1.
- Dansk Hydraulisk Institut (1997): MIKE SHE. Water Movement. Technical Reference Manual. Edition 1.1.

Desuden har været anvendt et simpelt rodzonemodul udviklet af GEUS.

I det følgende er en del af illustrationerne baseret på (DHI, 1997).

4.1 Antagelser

MIKE SHE modelsystemet (Refsgaard and Knudsen, 1996), er en videreudvikling af SHE "Système Hydrologique Européen" systemet (Abbott et al. 1986a,b). MIKE SHE er en deterministisk, fuldt distribueret og fysisk baseret model til beskrivelse af de væsenligste strømningsprocesser af det hydrologiske kredsløbs landfase. MIKE SHE løser de partielle differentialligninger for processerne: overfladisk afstrømning, kanalstrømning, umættet zone og mættet zone. Hertil kommer snesmeltning, interception og evapotranspiration. Strømningsligningerne løses numerisk ved hjælp af finite differens løsningsrutiner. Med henblik på at optimere den numeriske løsning er der anvendt en version af MIKE SHE med en indbygget MODFLOW ligningsløser til kalibreringer og simuleringer med DK-modellen.

4.1.1 Overflade afstrømning (OC-modulet)

Når nettonedbøren overstiger infiltrationskapaciteten af jorden opmagasineres overskudsvandet på jordoverfladen. Denne vandmængde er tilgængelig som input til overfladisk afstrømning, der kan routes nedstrøms imod vandløbssystemet. Den præcise routning og afstrømningsvolumen bestemmes af topografi og strømningsmodstand såvel som af tab som følge af infiltration langs strømningsvejen.

Det vand der når vandløbssystemet som overfladisk og underjordisk strømning routes nedstrøms i et separat knudepunkts net. Både overfladisk afstrømning og kanalstrømning modelleres ved hjælp af St. Venants kontinuitets- og impulsbevarelses ligninger. Den tilgrundlæggende ligning for strømningen i vandløb er den en-dimensionelle version af ligningen for den to-dimensionale overfladiske afstrømning.

4.1.2 Grundvandsstrømning (SZ-modulet)

SZ-modulet beregner grundvandsstrømningen i modelområdet. MIKE SHE kan beskrive grundvandsstrømningen i 3 dimensioner for et heterogent magasinsystem med skiftende frie og artesiske forhold.

De rumlige og tidslige variationer i trykniveauet beskrives matematisk ved hjælp af den ikke-lineære Boussinesq ligning og løses numerisk ved hjælp af en iterativ differensmetode.

MIKE SHE giver mulighed for at vælge mellem to løsningsrutiner:

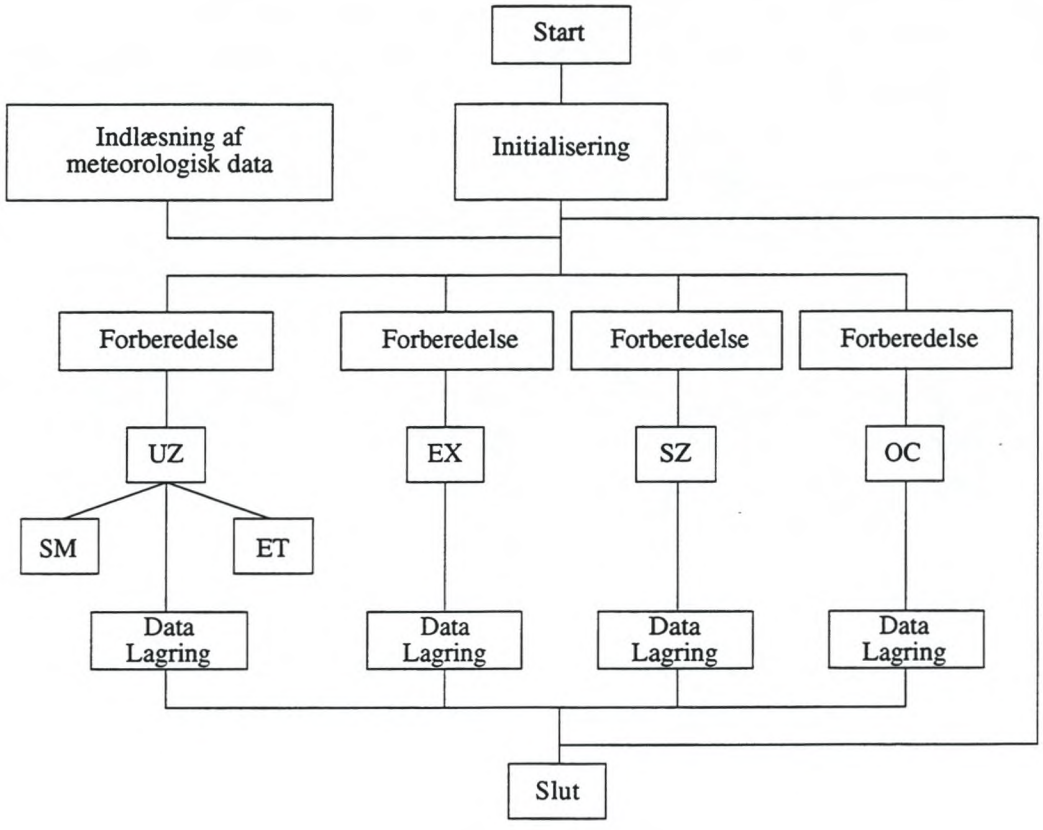
- SOR: Successive Over-Relaxation (oprindelig MIKE SHE ligningsløser)
- PCG: Preconditioned Conjugate Gradient (MODFLOW ligningsløser)

Formuleringen er i et vist omfang forskellig for de to løsningsrutiner.

Rækkefølgen for afviklingen af MIKE SHE modulerne (SZ, OC, EX og evt. UZ) er illustreret i figur 9. Først foretages en initialisering. Initialiseringsrutinerne, både den generelle og de specifikke for hvert modul, indlæser alle relevante data og initialiserer variable og arrays. Efterfølgende gennemføres kald af beregningsmoduler som kontrollerer dataflowet mellem de forskellige MIKE SHE moduler. Rækkefølgen gennemføres fra venstre mod højre i figur 9 dvs. først UZ så EX, SZ og OC.

En af de tilgrundliggende principper i konstruktionen af den modulære opbygning af MIKE SHE er, at det skal være fleksibelt at udskifte et vilkårligt beregningsmodul i systemet med en anden version (f.eks opdateret, mere omfattende eller forsimplet version) uden at skulle ændre ved andre dele af modelsystemet. Det er derfor muligt at introducere 'dummy'-komponenter for f.eks UZ (som det er gjort i DK-modellen) for modelopstillinger hvor den

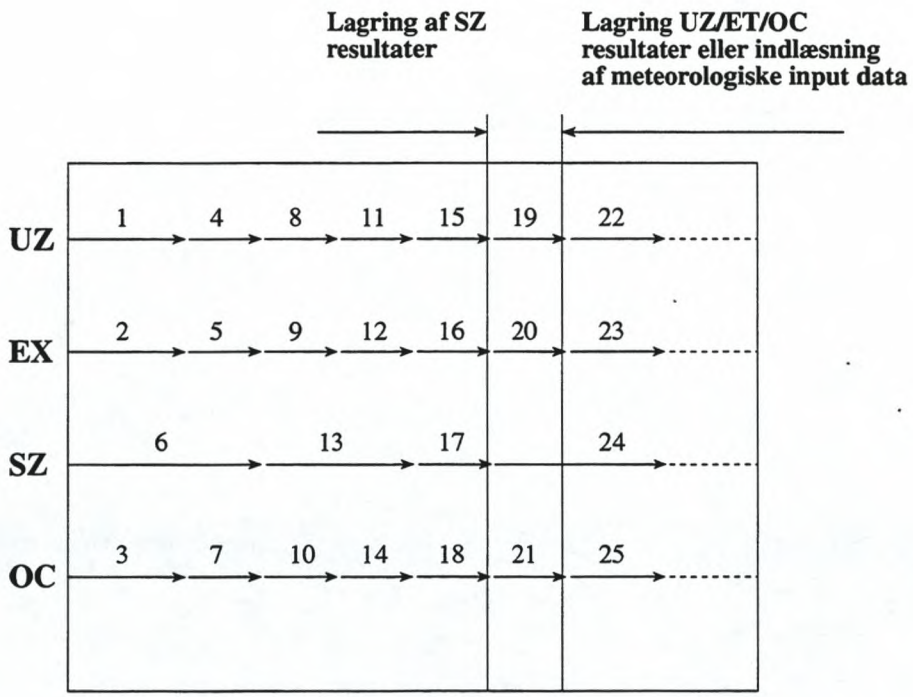
pågældende proces ikke medtages eller forenkles. Dummy-komponenten for UZ er anvendt i forbindelse med DK-modellen. Dummy-komponenten for UZ sikrer, at nettonedbøren (beregnet med det simple rodzonemodul) udveksles korrekt til grundvandsspejlet (SZ-modulet), idet der ses bort fra forsinkelse og magasinering i umættet zone. Ligeledes kan det i dummy-komponenten specificeres hvorvidt en brøkdel af nettonedbøren routes til OC i stedet for SZ, f.eks. i byområder.



Figur 9. *Oversigt over afvikling af moduler i MIKE SHE*

Tidsskalaen for de forskellige strømningsprocesser i et opland er forskellige. F.eks. reagerer overfladeafstrømningen meget hurtigere på et nedbørsinput end grundvandsafstrømningen. Et optimalt beregningsskridt (det størst mulige tidsskridt som kun medfører meget små numeriske fejl) er forskelligt for de forskellige moduler (OC, SZ og EX). I relativt tørre perioder kan der eventuelt benyttes et større tidsskridt end i meget våde perioder. I MIKE SHE benytter EX og OC det samme tidsskridt, hvorimod SZ kan specificeres til at køre med større tidsskridt, se figur 10.

I OC kan mindre tidsskridt (en brøkdel af den generelle værdi) anvendes i situationer med stor afstrømning. Kanalstrømningsrutinen reducerer automatisk tidsskridet på baggrund af maksimal ændring i vandspejlet i løbet af et tidsskridt.



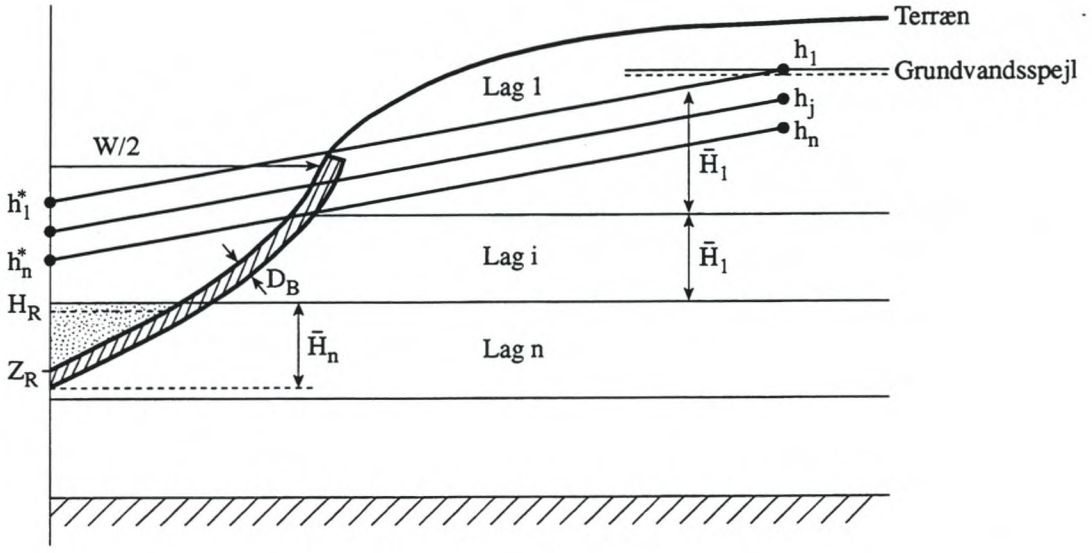
Figur 10. *Illustration af beregningssekvens for komponenter i MIKE SHE*

Tidsskridt størrelsen varieres derudover afhængigt af nedbørsinputet. Ved stor nettonedbør sætter MIKE SHE tidsskridtet ned til et minimalt niveau. Herefter forøges tidsskridtet igen gradvist indtil det maksimalt specificerede tidsskridt opnås.

4.1.3 Beregning af vandudveksling mellem grundvand og vandløb (EX-modulet)

Et vandløbssystem påvirker grundvandssystemet i et opland. Vandløb vil normalt styre grundvandsstanden i horisontal og vertikal retning og medføre at oplandet opdeles på infiltrationsområder og udstrømningsområder. Overfladearealet af et vandløbssystem er imidlertid lille sammenlignet med det totale modelområde og i regional modellering vil vandløbsbredden typisk kun udgøre under 1-2 % af beregningsmaskevidden. Vandløb kan derfor ofte repræsenteres af et separat knudepunktssystem placeret langs randen af beregningsmaskerne, som fungerer som linie input eller output. EX-modulet antager, at bredden af vandløb er lille sammenlignet med arealet af en beregningskasse (gridstørrelse). Hvis denne antagelse ikke er gyldig kan vandløb i stedet repræsenteres i modellen som en af randbetingelsestyperne beskrevet under SZ-modulet.

Beregningerne af vandløbsafstrømning udføres i hjørnepunkterne af beregningsmaskerne. Udveksling mellem vandløb og grundvand/overfladisk afstrømning antages at finde sted midt på den vandløbsstrækning som forbinder to beregningsknudepunkter i et vandløbssetup. I figur 11 er princippet for beregning af vandudveksling illustreret.



Figur 11. *Beregning af vandudveksling med antagelse af lavpermeabelt bundsedimentlag*

4.1.4 Beregning af nettonedbør ved hjælp af simpelt rodzonemodul på baggrund af nedbør og potentiel fordampning

Med henblik på vurdering af nettonedbøren blev anvendt et simplet vandbalancemodul for rodzonen (Kinzelbach, 1986) som på baggrund af en empirisk relation mellem aktuel og potentiel fordampning som funktion af vandindholdet i rodzonen, fordeler nedbøren mellem nedsivning og aktuel fordampning. Den grundliggende parameter udgøres af rodzonekapaciteten (markkapaciteten), som afhænger af vegetationstype og jordart. Rodzonekapaciteten er typisk større for lerblandede jordarter end for sandjord og afhænger af bl.a. roddybde og -tæthed.

I rodzonemodulet foretages desuden en korrektion af nedbøren på månedsbasis jf. følgende korrektionsfaktorer (moderat korrektion) for at tage højde for systematiske målefejl som følge af befugtningstab og vindkorrektion (jf. Allerup & Madsen, 1979), se figur 12.

Der antages desuden en nedbørsfordeling som distribueres ved at multiplicere højtliggende områder med faktor 1.1 og multiplicere lavtliggende områder med en faktor mindre end 1 (typisk mellem 0.9 og 1.0), som medfører at det samlede antal grid efter multiplikation indenfor et 40x40 km område (jf. Statens Planteavls nationale grid), samlet får en korrektionsfaktor på 1.0, svarende til at middelværdien er i overensstemmelse med beregnet gridværdi.

Måned	Korrektionsfaktor
januar	1.21
februar	1.22
marts	1.22
april	1.18
maj	1.15
juni	1.14
juli	1.12
august	1.11
september	1.13
oktober	1.14
november	1.16
december	1.19

Figur 12. *Korrektionsfaktorer for vind- og befugtningstab (moderat lækategori)*

For skovområder antages det desuden, at den potentielle fordampning er større end for landbrugsafgrøder. Dette indføres ved at multiplicere potentiel fordampning med en faktor > 1 (her er anvendt 1.1 for Fyn). For vådområder antages det, at der sker en potentiel fordampning året rundt, uanset nedbør. Dette betyder, at der i tørre perioder f.eks om sommeren hvor fordampningen er stor, beregnes en negativ nettonedbør. Med andre ord introduceres et vandforbrug i sådanne perioder fra det øverste lag i vådbundsområder. Beregningsmetoden er nærmere beskrevet i afsnit 4.3.4.

4.2 Begrænsninger

DK-modellen har til formål at simulere grundvandssystemet og vandudvekslinger mellem grundvand og overfladevand, som har betydning for vurderinger af grundvandsressourcens størrelse, regionale fordeling og tidslige variationer. Den konceptuelle model for Fyn antager, at de hydrostratigrafiske lag veksler mellem vandførende lag og lavpermeable enhe-

der og at disse enheder kan antages at have hydrauliske egenskaber som kan tilnærmes med ensformige (konstante) hydrauliske ledningsevner. Variation i transmissivitet for de kvartære aflejringers vedkommende afhænger derfor primært af de enkelte enheders tykkelse. Det er udelukkende for vandførende lag i kalken, at der antages en transmissivitetsfordeling, baseret på observationer. I kalken har tilstedeværelsen af bla. forkastninger stor betydning for permeabiliteten.

Disse antagelser er gjort for dels at forenkle hydrogeologien dels fordi enkeltobservationer af f.eks hydraulisk ledningsevne (udfra f.eks specifik ydelse) ikke er repræsentative for en modelskala på 1x1 km. Anvendelse af modellen til vurderinger af stoftransport hvor heterogeniteter i en mindre skala ofte vil have afgørende betydning kan derfor ikke umiddelbart foretages med den opstillede DK model. Sådanne vurderinger i konkrete områder vil forudsætte en yderligere detaljering af bla. den konceptuelle model (geologiske lag og linser dvs. en zonering indenfor de enkelte lag).

Anvendelse af modellen til vurderinger af grundvandsressourcens beskyttelse hvor sprækker og sandvinduer kan være afgørende for beskyttelsen af forskellige reservorier kan ligeledes ikke umiddelbart foretages for konkrete områder. Modellen kan dog give skøn for landet som helhed eller mellem forskellige regioner af typiske hydrogeologiske forhold. Desuden kan modellen være et godt udgangspunkt for mere detaljerede modelopstillinger (randbetingelser, input til konceptuel model osv.).

På grund af den regionale skala kan modellen ikke anvendes til vurdering af partikelbaner for mindre vandværker hvor det grundvandsdannende opland er lille i forhold til modelskalaen. Omvendt kan modellen dog give et kvalificeret skøn af grundvandsdannelsens størrelse til de konkrete magasiner mindre vandværker indvinder fra. Herved kan modellen give input til vurderinger af indvindingsoplandet ved simplere metoder, eller benyttes som input til randbetingelse til mere detaljerede modeller.

Beskrivelsen af grundvandsdannelsen i DK-modellen er væsentligt forenklet og ser i et vist omfang bort fra de styrende fysiske processer i umættet zone. Med det nuværede setup afhænger grundvandsdannelsens størrelse primært af den mættede hydrauliske ledningsevne i de øverste beregningslag (bestemt udfra hydrauliske parametre for lag 1, 2 og 3), nettonedbørens størrelse (afhængig af nedbør, sand/ler, skov/åbent land/vådbundsområde) samt antagelserne vedr. fordelingen af nettonedbøren mellem SZ og OC (dummykomponenten: byområder/variation i topografi etc.).

En implementering af UZ områdeintegreret ("lumped") kan evt. forbedre modellens beskrivelse af grundvandsdannelsen, uden at modellen iøvrigt bliver væsentligt mere beregningstung. Dette forudsætter for det første, at der kan defineres et antal delområder, hvor topografi, meteorologisk input, vegetationstype, jordtype og makroporeforhold kan antages ensartede. Denne forudsætning kan normalt opfyldes. For det andet forudsætter en lumped UZ beregning, at randbetingelser kan antages ensartede indenfor delområderne. Sidstnævnte forudsætning er imidlertid problematisk, idet såvel overfladisk afstrømning

som grundvandsspejlet vil varierer betydeligt fra grid til grid, således at antagelsen om ensartede randbetingelsesforhold er problematisk.

Det er derfor et åbent spørgsmål om implementering af UZ i praksis vil give en væsentlig forbedring af beskrivelsen af grundvandsdannelsen, i forhold til den forenklede løsning der i øjeblikket er benyttet. På den anden side vil implementering af UZ medføre, at der kan tages bedre hensyn til den hydrauliske ledningsevnes afhængighed af det aktuelle vandindhold i umættet zone, ligesom at makropore flow i givet fald vil kunne håndteres. Hertil kommer at mere detaljerede simuleringer af fordampning og snemagasinering/snesmeltning forudsætter implementering af UZ.

Kalibreringen af modellen er baseret på et datagrundlag bestående af tidsserier og enkeltobservationer af grundvandsspejlet, kontinuerte vandføringsdata for vandløb og synkronmålinger af minimumsvandføringen. Modellen er primært designet til overordnede vurderinger som gælder større områder (bestående af områder der dækkes af et større antal beregningsgrids). Vurderinger på basis af et enkelt eller få modelgrids på basis af DK-modellen kan ikke anbefales, hvorimod vurderinger for større områder (et større grundvandsopland, vandløbssystem eller lignende dækket af > 50 km^2) giver langt mere brugbare resultater.

Ved ændringer i arealanvendelse og vandindvinding, hvor udstrækningen af f.eks vådområder ændres væsentligt, vil modellen kunne simulere disse forhold forudsat at udstrækningen af vådområder og øvrige arealtyper revurderes i forbindelse med simuleringerne.

4.3 Løsningsmetode

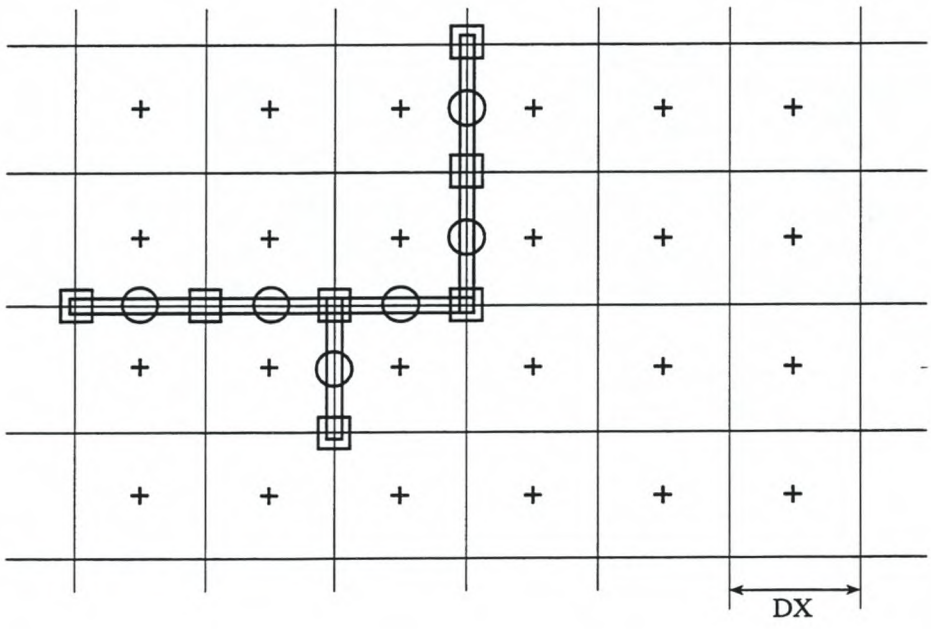
4.3.1 Overfladisk afstrømning og kanalstrømning

Under anvendelse af den kinematiske approximation og Strickler/Manning-formlen kan 'kanalstrømningen' i vandløb skrives (1D):

$$Q = A\,u = K\left(-\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^{1/2} A\,h^{2/3}$$

hvor Q = vandføring
A = tværsnitsareal (funktion af vanddybden h)
u = strømningshastighed (middel)
K = Strickler koefficienten (funktion af vanddybden h)
h = vanddybden h
Z = bundhældning
x = længdeenhed på vandløb

I MIKE SHE er vandløb placeret langs randen af de kvadratiske beregningskasser. Beregningsknudepunkter for kanalafstrømning er således placeret i hjørnerne af beregningskasserne, se figur 13. Ovenstående ligning løses numerisk ved hjælp af en implicit finite differens metode med hensyn til vandspejlsniveau ved knudepunkterne. Systemet kan håndtere konstante eller tidsvarierende input/output specificeret i bestemte knudepunkter (f.eks spildevandsudledninger).



Figur 13. *Placering af vandløb langs beregningskasser i en grundvandsmodel*

Tilsvarende fås for overfladisk afstrømning pr. længdeenhed i henholdsvis x- og y-retningen:

$$q_x = u\,h = K_x\left(-\frac{\partial z}{\partial x}\right)^{1/2} h^{5/3}$$

$$q_y = v\,h = K_y\left(-\frac{\partial z}{\partial y}\right)^{1/2} h^{5/3}$$

hvor

q_x, q_y	=	overfladisk afstrømning pr. længdeenhed i x-retning og y-retning
u,v	=	flow hastighed i x-retning/y-retning
h	=	strømningsdybde over terræn
K_x, K_y	=	Strickler/Manning koefficienter i de to retninger
z	=	vandspejlsniveau i forhold til referenceniveau (f.eks DNN)
x,y	=	koordinatretninger

Løsningsrutinen for overfladisk afstrømning er baseret på løsning af en lineær matrix med N ligninger og N ubekendte. Matricen løses iterativt ved anvendelse af Gauss-Seidel -metodik.

4.3.2 Grundvandsstrømning

Den styrende strømningsligning for en 3D grundvandsstrømning i et mættet porøst medium lyder:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-Q=S\frac{\partial h}{\partial t}$$

hvor

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}	=	hydraulisk ledningsevne i *x*, *y* og *z* retningen
h	=	trykniveau
Q	=	volumenflow pr. enhedsvolumen (input/output)
S_s	=	magasinkoefficient (specifik)

To specielle betingelser bør nævnes. Strømningsligningen er ikke-lineær i tilfældet frie strømningsforhold på grund af tilstedeværelsen af et (varierende) frit grundvandsspejl. Derudover er magasinkoefficienten ikke konstant, men vil svinge mellem en værdi for artesisk strømning og en anden værdi for frie magasinforhold. Der kan således forekomme pludselige skift med to eller flere størrelsesorder for denne parameter. Den styrende partielle differentialligning tilnærmes en finite differens algebraisk ligning, som beskriver vandbalancen for hver beregningskasse (jf. Darcy's lov i kombination med en massebalance for hver beregningskasse).

Input/output til grundvandsbalancen består af bla.

- oppumpning
- udveksling med vandløb
- udveksling med overfladisk afstrømning
- grundvandsdannelse (nedsivning)
- fordampning
- drænvandsafstrømning

MIKE SHE kan beskrive oppumpning fra en vilkårlig beregningskasse indenfor modelområdet. Tidsvarierende oppumpning specificeres for et punkt (f.eks UTM koordinater) eller langs en linie i et givent modellag. Oppumpning er effektiv så længe trykniveauet i pågældende kasse er over bundkoten.

Udveksling med vandløb håndteres ved hjælp af EX-modulet (se nedenfor).

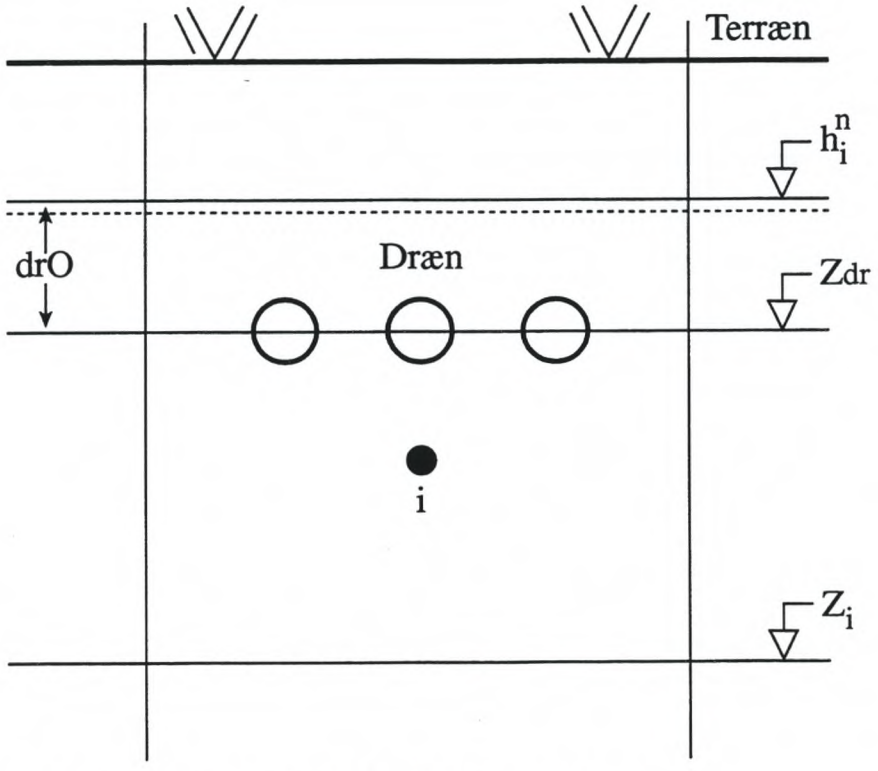
Udveksling med overladisk afstrømning afhænger af, hvilke MIKE SHE moduler der indgår i setupet. SZ-modulet beregner udveksling med vand opstuvet over terræn i punkter hvor UZ-modulet ikke er aktivt, dvs. såfremt UZ-modulet er ekskluderet (som det er tilfældet for DK-model pt.) eller såfremt trykniveauet er over terræn. Udvekslingen beregnes implicit ved opdatering af vanddybden for overfladisk flow jf. Darcy.

Grundvandsdannelse udgøres af strømningen på tværs af grundvandsspejl (f.eks netto-nedbør, såfremt UZ-modulet er ekskluderet).

MIKE SHE kan håndtere drænafstrømning, som forekommer når trykniveauet står over drænniveauet. Konceptuelt modelleres dræn som et 'stort' dræn i hver gridmaske, figur 14. Drænafstrømningen afhænger af højden over drænniveau og en specificeret tidskonstant, og beregnes som et lineært reservoir. Tidskonstanten karakteriserer bla. tætheden af drænene, se figur 14.

MIKE SHE giver mulighed for at route drænafstrømning til lavninger i terræn, vandløb eller modelrand.

PCG løseren giver mulighed for en stationær løsning, men kun såfremt alene SZ-modulet indgår i setupet. Denne løsningsrutine kan derfor ikke anvendes ved DK-modellen, da såvel SZ-, EX- og OC-modulet anvendes.



Figur 14. *Skematisk illustration af drænafstrømnings modellering*

Grundvandsmodellen giver mulighed for 3 typer randbetingelser for SZ-modulet:

- Dirichlet randbetingelse (fastholdt trykniveau)
- Neuman randbetingelse (fastholdt flux på tværs af randen)
- Fourier randbetingelse (trykniveau afhængig flux randbetingelse)

Fastholdt trykniveau kan specificeres for alle beregningskasser (ved rand som i interne kasser) og for samtlige lag. Trykniveauet kan være fast svarende til initialbetingelsen eller kan variere i tid jf. specifikation. Fastholdt gradient/flux kan specificeres i alle lag ved modelranden, men ikke med tidsvariation (bortset fra oppumpninger i interne masker). Hvis UZ ikke indgår kan grundvandsdannelse/evt. kapilær stigning som følge af fordampning fra vådbundsområder specificeres som tidsserier til øverste lag.

Udvekslingen mellem grundvand og vandløb (Fourier) gælder for samtlige beregningsmasker i øverste modellag som har kontakt til vandløbssystemet. Udvekslingen er en funktion af vandspejlsniveauet i vandløb, vandløbsbredde, vandløbskote og vandløbslækagefaktor (ålækage) og hydraulisk ledningsevne i den/de tilstødende beregningsmasker, som grænser op til vandløbssegmentet.

4.3.3 Udveksling mellem vandløb og grundvand (EX-modulet)

EX-modulet indeholder to forskellige options for beskrivelsen af udveksling mellem vandløb og grundvand:

- antagelse af fuld kontakt mellem vandløb og grundvand (men ikke nødvendigvis at vandløb fuldt 'gennemtrænger' grundvandsmagasinet)
- antagelse om et lavpermeabelt bundsedimentlag som adskiller vandløbet fra grundvandsmagasinet

I forbindelse med sidstnævnte option kan der vælges to forskellige beskrivelser.

Grundvandsstrømningen mellem to naboknudepunkter i grundvandsmodulet beregnes under antagelse af horisontal strømning og hydrostatisk trykfordeling i vertikal retning for beregningslaget. Denne antagelse er god når det gælder strømning mellem to knudepunkter i grundvandsmodellen, men i mange tilfælde mindre god, når det gælder strømning mellem et grundvandsknudepunkt og et vandløbssegment (liniesegment mellem to vandløbsknudepunkter). I naturen vil der ofte optræde vertikale trykgradienter tæt på vandløb som følge af, at vandløbet ikke fuldt gennemskærer beregningslaget. Dette vil give anledning til et ekstra tryktab ved vandløbet.

I MIKE SHE beregnes vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb ved at benytte Darcy's lov. Det ekstra tryktab kan i MIKE SHE simuleres på tilnærmet måde på baggrund

af en kombination af den hydrauliske ledningsevne i det vandførende eller lavpermeable lag i grundvandsmodellen og en vandløbs lækagefaktor for vandløbssedimentet. Ved den ene tilnærmelse sker beregningen alene udfra ålækagefaktoren, mens den anden metode, som er anvendt i DK-modellen baserer beregningen på både ålækagefaktor og hydrauliske ledningsevner.

4.3.4 Beregning af nettonedbør

Beregningen er jf. (Kinzelbach, 1986):

$$V_R(t + \Delta t) = V_R(t) + (N - E_A - R)\Delta t$$

hvor:

$V_R(t)$ er vandindholdet i rodzonen til tiden t,
N er nedbøren,
E_A er potentiel fordampning og
R er nettonedbøren (nedsivningen fra rodzonen)

Beregningen gennemføres på døgnbasis. Der indgår kun en styrende parameter nemlig markkapaciteten. Denne størrelse er typisk 60-80 mm for grovsandede/sandede jorder og 125-150 mm for lerjorde. Udover en afhængighed af jordtypen er rodzonekapaciteten desuden afhængig af vegetationstypen.

Følgende antagelser benyttes i beregningerne af nettonedbøren:

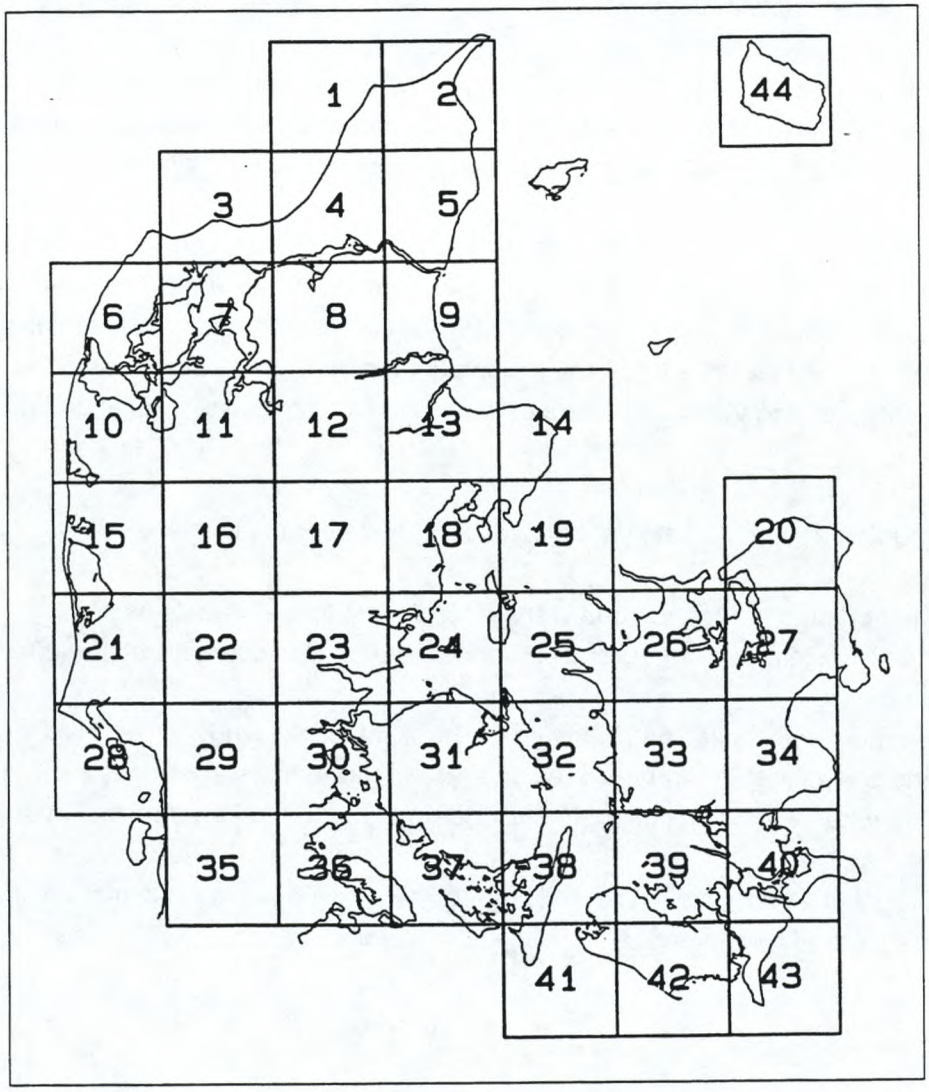
- Hvis vandindholdet i rodzonen (V_R) er større 0.7 gange markkapaciteten (V_{RC}) antages det, at den aktuelle fordampning er lig med den potentielle fordampning
- Hvis vandindholdet i rodzonen er mindre end 0.7 gange markkapaciteten antages det, at den aktuelle fordampning kan beregnes udfra ligningen:

  $$E_A = E_P \left[0.188 + 2\frac{V_R}{V_{RC}} - 1.2\left(\frac{V_R}{V_{RC}}\right)^2 \right]$$

  hvor
  E_A er aktuel fordampning
  E_P er potentiel fordampning
  V_R er vandindhold i rodzonen
  V_{RC} er markkapaciteten
- Hvis vandindholdet er mindre end 0.7 gange markkapaciteten til tiden $t = t + \Delta t$, antages det at nedsivningen er lig med nul
- Hvis vandindholdet er mellem 0.7 og 1 gange markkapaciteten til tiden $t = t + \Delta t$ antages det, at såfremt nedbøren er større end den aktuelle fordampning, beregnes nedsivningen (R) som 10 % af nedbørsoverskuddet (N - E_A)
- Hvis vandindholdet er større end markkapaciteten til tiden $t = t + \Delta t$, antages det, at den vandmængde der overstiger markkapaciteten nedsiver (R)

I forbindelse med modelberegninger anvendes ofte meteorologiske data fra udvalgte meteorologiske stationer. Denne metode har i operationelle sammenhænge en række ulemper, som kan sammenfattes i tre hovedpunkter. For det første vil der undertiden være perioder med dataudfald ved enkelte stationer. For det andet er der ofte små forskelle mellem stationernes registreringer, som ikke afspejler forskelle i makroklimaet, men forskelle i lokalklima ved de pågældende stationer. For det tredje kan det i operationel sammenhæng være besværligt at finde den nærmest liggende repræsentative station. Denne vanskelighed øges yderligere, hvis stationer nedlægges og nye oprettes (Plauborg & Olesen, 1991).

For at overkomme disse vanskeligheder benyttes registreringerne fra de meteorologiske stationer til beregning af døgnværdier i en række geografiske punkter (kvadrater) jævnt fordelt over landet. Dette system kaldes "klimagriddet". Værdierne i klimagriddet beregnes ved en geografisk interpolation af data fra de meteorologiske stationer. Klimagriddet består af 44 kvadrater på hver 40 x 40 km dækkende hele Danmark. Gridnettet er defineret i forhold til UTM zone 32, se figur 15. Beregningerne af værdier for klimagriddet er foretaget af Landskontoret for Planteavl, Foulum for perioden 1971-96.



Figur 15. *Nummerering af kvadrater i klimagriddet (Plauborg & Olesen, 1991)*

For hvert element i klimagriddet beregnes døgnværdier for en række meteorologiske elementer. Der skelnes mellem primære og sekundære elementer. De primære elementer beregnes ved interpolation ud fra registreringer ved meteorologiske stationer. De sekundære elementer beregnes ud fra de primære elementer i klimagriddet. De primære elementer er:

- ukorrigeret nedbør, mm
- døgnmiddel, minimum og maksimum temperatur i 0,2 og 2 meters højde, ^{o}C
- døgnmiddel jordtemperatur i 10 cm's dybde, ^{o}C
- døgnmiddel vindhastighed i 10 meters højde, m/s
- døgnmiddel relativ luftfugtighed i 2 meters højde, %
- døgnsum af globalindstråling, MJ m^{-2}

Det sekundære element er:

- døgnsum af potentiel fordampning, mm

Som grundlag for beregninger af værdier i klimagriddet benyttes døgnværdier af de primære elementer fra en række SYNOP-stationer og automatiske klimastationer, jf. figur 16. For SYNOP-stationer skal globalstråling først beregnes på grundlag af skydække.

Værdier i klimagriddet beregnes ved interpolation, hvor der benyttes en invers afstandsfunktion til vægtning af registreringer fra de meteorologiske stationer. For hvert kvadrat i gridnettet beregnes interpolerede værdier for fire punkter beliggende på koordinater (-15,-15), (-15,15), (15,15) og (15,-15) i forhold til kvadratets midtpunkt, hvor afstande er angivet i km. Den interpolerede værdi for kvadratet beregnes som middelværdien af de fire punkter i kvadratet.

Ved interpolation af værdier i et punkt benyttes følgende fremgangsmåde:

1. Alle stationer, som har manglende værdier for det aktuelle element kasseres
2. Afstandene mellem punktet og stationerne beregnes. Stationerne sorteres efter stigende afstand
3. Alle stationer, som ligger nærmere end 60 km fra punktet udvælges. Hvis der ligger mere end 5 stationer inden for en radius af 60 km fra punktet udvælges kun de 5 nærmeste stationer. Hvis der ikke ligger stationer inden for 60 km fra punktet udvælges den nærmeste station
4. Ved beregning af potentiel fordampning indgår kun synopsis og automatiske stationer. Ved beregning af nedbør indgår samtlige DMI stationer (ialt ca. 400-500, idag ca. 300)

Figur 16. *Danske SYNOP-stationer og automatiske klimastationer til beregning af værdier i klimagrid (Plauborg og Olesen, 1991)*

Daglig potentiel fordampning Ep er for perioden 1971-87, hvor der ikke foreligger data fra klimastationerne, beregnet ved hjælp af Makkink's ligning med modifikation (Plauborg og Olesen, 1991):

$$E_p = 0.7 \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_{si}}{\lambda}$$

hvor

- E_p er potentiel fordampning
- s er damptrykkurvens hældning ved temperaturen i 2 meters højde (Pa $^{\circ}C^{-1}$)
- γ er psykrometerkonstanten (66,7 Pa $^{\circ}C^{-1}$)
- R_{si} er globalindstrålingen (MJ m^{-2} dag^{-1})
- λ er vands fordampningsvarme (2,465 MJ mm^{-1})

For perioden 1986 - 97 er daglig potentiel fordampning E_P beregnet ved hjælp af en modificeret udgave af Penmans ligning (Mikkelsen & Olesen, 1991):

$$E_P = \beta_{A0} + \beta_{A1} \frac{sS_i}{\lambda(s+\gamma)} + \beta_{A2} \frac{\gamma f(u_2)(e_s - e_a)}{s+\gamma}$$

hvor

E_p	er potentiel fordampning (mm pr. døgn)
$\beta_{A0}, \beta_{A1}, \beta_{A2}$	er empiriske konstanter
s	er damptrykkurvens hældning (mb $°C^{-1}$)
S_i	er globalstråling (MJ pr. m^2 pr. døgn)
λ	er vands fordampningsvarme (2,465 MJ kg^{-1})
γ	er psykrometerkonstanten (0,667 mb $°C^{-1}$)
e_s, e_a	er mættede dampes tryk (mb) samt aktuel damptryk (mb)
$f(u_2)$	= 0,263(0,5+0,54 u_2) (mm mb^{-1} $døgn^{-1}$)
u_2	er vindhastighed i 2 meters højde (m/s)

Der benyttes tilnærmede værdier for de empiriske konstanter for hver dag i året baseret på Fourier-rækker. Vindhastigheden måles ved de fleste stationer i 10 meters højde. Omregning til vindhastighed i 2 meters højde er baseret på et logaritmisk vindprofil. Som ruhedslængde i vindprofilformlen er for kortklippet græs benyttet 0,01 m (Mikkelsen & Olesen, 1991). De beregnede potentielle fordampninger gælder derfor denne vegetationstype. For skov er antaget en anden ruhed, hvorfor potentiel fordampning for skov antages at være 1,1 gange værdien for kortklippet græs.

På grund af huller i data for perioden 1986-87 er benyttet data for potentiel fordampning beregnet ved hjælp af Makkink for perioden 1971-87. For perioden 1988-97 er anvendt den modificerede Penmann formel.

4.4 Effekt på model

På trods af de gjorte antagelser og forenklinger vurderes DK-modellen at være et pålideligt værktøj til vurdering af overordnede vandressourceforhold på landsplan, og til vurderinger af den regionale fordeling. Modellen er i stand til at simulere den tidslige udvikling i grundvandsstand og afstrømning i vandløb. Resultaterne har størst gyldighed ved regionale betragtninger og modelskalaen (1x1 km) bevirker at sammenligninger af simuleret og observeret vandspejl f.eks. i en pejleboring kan have betydelige systematiske afvigelser, som følge af, at der ikke tages hensyn til heterogeniteter indenfor det enkelte beregningsgrid (geologi) og som følge af, at det antages, at vandløb er placeret langs randen af det enkelte grid (med vandløbsknudepunkter i hjørnepunkterne). Vandløbene kan som følge heraf,

være repræsenteret med en beliggenhed som er op til 500 meter forkert i forhold til virkeligheden. Fluktuationerne i vandspejl vil kunne vurderes med modellen og systematiske fejl kan vurderes på baggrund af placeringen af den enkelte pejleboring indenfor griddet samt de nærmere geologiske forhold.

De gjorte antagelser bevirker, at simuleringer af vandløbsafstrømningen i de enkelte tilløb og mindre vandløb kan være afvigende i forhold til observationer. Imidlertid vil påvirkningen af vandføring som følge af ændringer i vandindvindingen kunne simuleres rimeligt pålideligt når det gælder de større vandløb eller vandløbssystemer. Ændringer i vandbalanceforhold som følge af ændrede klimaforhold (nedbør og fordampning) kan vurderes rimeligt sikkert med modellen. Ændringer i arealanvendelsen og konsekvenser heraf vil dog antageligt forudsætte en udbygning af DK-modellen med UZ, selvom rodzone-modulet giver mulighed for en grov vurdering mellem skov, by, ånære områder og åbent land. Med det benyttede setup betyder forenklingen af umættet zone, at der ikke sikres et feed back mellem ændringer i grundvandsspejl og vandindhold i jorden, og som følge heraf ændrede fordampningsforhold i tørre perioder. Normalt er dette en god antagelse.

5. MODELOPSTILLING

5.1 Modelområdet

Modelområdet fremgår af figur 2.

Modellen er opsat i forhold til UMT zone 32. Modelområdet er afgrænset ved

- UTM Øst: 542.000 - 628.000 og
- UTM Nord: 6064.000 - 6167.000.

Modellen for Fyns Amt har dermed en størrelse på 86 x 103 beregningskasser (1x1 km) svarende til et samlet område på 6535 aktive beregningskasser (2926 for model for Fyn). Modelranden er fastlagt på baggrund af en digitalisering af rand omkring Fyns Amt incl. mindre øer (orientering af model = 0 grader).

Modeltopografien er baseret på KMS's 50 m grid, idet der er anvendt midlede data for et 500 m grid. Som supplement hertil er for vandløbsgrids anvendt supplerende data idet der fra ZETA er udtrukket topografi til vandløbspunkter fra KMS's 50 m grid.

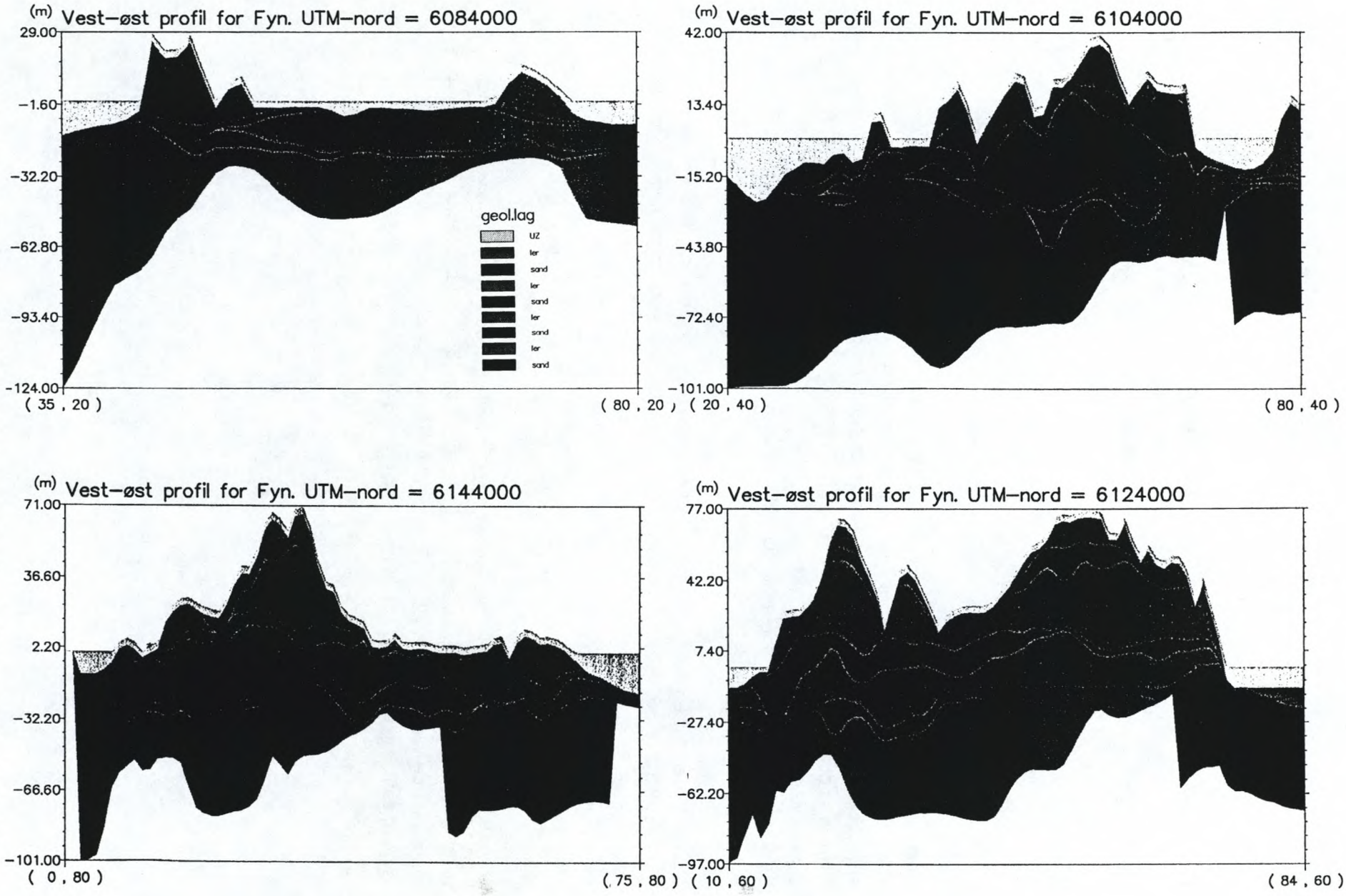
Kystlinien for Fyn og øerne er baseret på ZETA kystlinie. Havbund er fastlagt ved digitalisering af havdybde. I havområder er toppen af modellen defineret ved kote 0, mens den i landområder er baseret på terrænkote, se tabel 2.

Lag nr.	Lag betegnelse	Bjergart	Tykkelse (m)	Beregningslag
1	umættet zone (land) + havvand, *)	'UZ'	min. 3.5 - max. ...	1a
2	lavpermeabelt moræneleralag. *)	ML-1	min. 0.1 - max. ...	1b
3	øverste vandførende sandlag, *)	DS-1	min. 0.1 - max. ...	1c
4	lavpermeabelt moræneleralag	ML-2	min. 0.1 - max. ...	2
5	mellemste vandførende sandlag	DS-2	min. 0.1 - max. ...	3
6	lavpermeabelt moræneleralag	ML-3	min. 0.1 - max. ...	4
7	nederste vandførende sandlag	DS-3	min. 0.1 - max. ...	5
8	lavpermeabelt moræneleralag	ML-4	min. 0.1 - max. ...	6
	- prækvartæroverflade		min. 0.1 - max. ...	
9	prækvartært vandførende lag	PL, PR, R, LL, K, BK, ZK	min. 0.1 - max. 50	7
10	impermeabel bund **)			

* beregningslag 1a, 1b og 1c er slået sammen til ét beregningslag af hensyn til numerisk løsning

** prækvartæroverflade -50 m, hvor prækvartært magasin findes ellers prækvartæroverflade -0.5 m (PL: Selandien ler, PR: Selandien skifer, R: Skifer, LL: Selandien ler/Lillebæltsler, K: Kalk/kridt/kalksten, BK: Danien bryozokalk og ZK: Danien kalk)

Tabel 2. *Modellag og beregningslag.*



Figur 17. *Fire snit som viser de tolkede 9 geologiske lag for Fynsmodellen (øst-vest)*

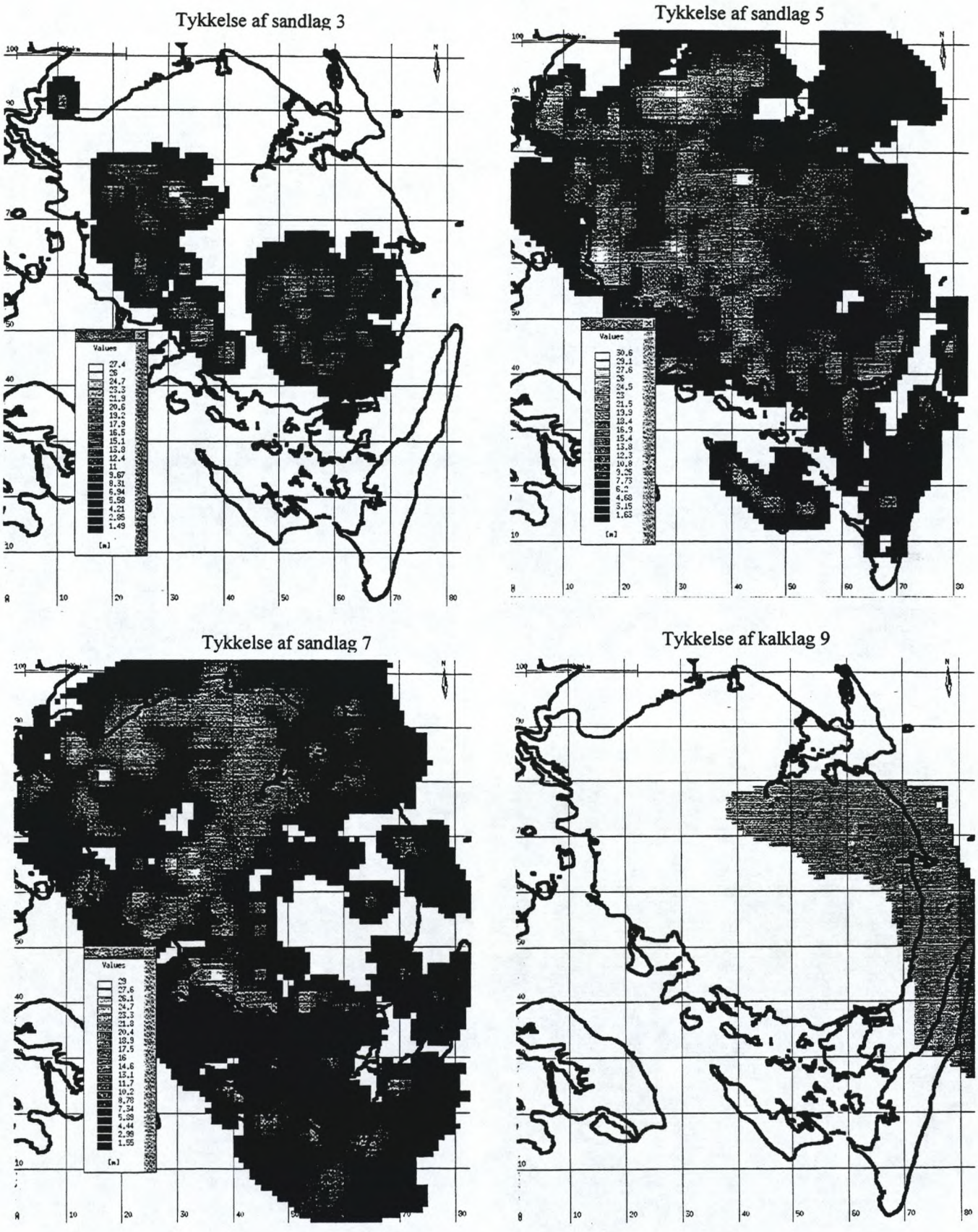
I forbindelse med den geologiske tolkning er de enkelte magasiner kun truffet i et delområde af det samlede modelområde. Således har de enkelte magasiner en udstrækning jf nedenstående (i et 2x2 km tolknings net som benyttes i den geologiske model).

Lag 3 defineret i 213 kasser (x 4 km^2)	$\approx$ 815 km^2
Lag 5 defineret i 891 kasser (x 4 km^2)	$\approx$ 3564 km^2
Lag 7 defineret i 894 kasser (x 4 km^2)	$\approx$ 2766 km^2
Lag 9 (prækvartæroverflade) defineret i 289 kasser (x 4 km^2)	$\approx$ 1156 km^2

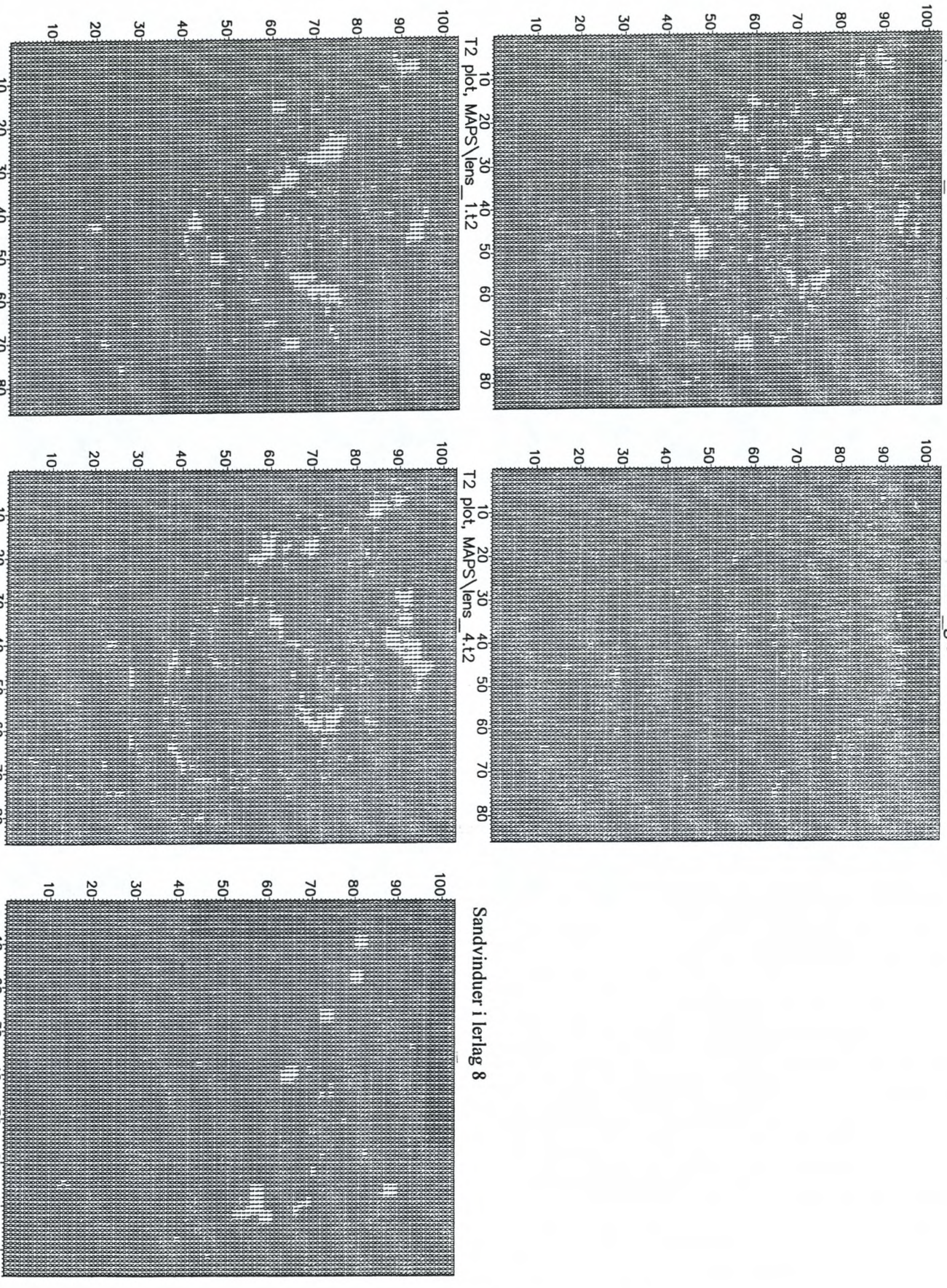
Som det er antydet i figur 17 eksisterer alle lag for hele modelområdet. Dette skyldes, at MIKE SHE kun kan operere med modellag der dækker hele modelområdet. Der er derfor anvendt en lagtykkelse på 10 cm hvor lag ikke er identificeret ved den geologiske tolkning. Bunden af det øverste lag i modellen er på landområder fastsat til en dybde på 3.5 m under modeltop. I havområder er tykkelsen af det øverste lag fastlagt ved vanddybden (figur 2). Ved interpolation og beregning af gridværdier er anvendt den bilineære interpolation som er en del af MIKE SHE's faciliteter.

Inddata til den geologiske model består af tolket topkote og tykkelse for de 3 smeltevandssandlag (lag 3, 5 og 7) i den hydrostratigrafiske model. Desuden indgår topkoter for den vandførende del af kalken (lag 9) samt tykkelse (antaget = 50 m hvor kalken er vandførende). I figur 17 er vist 4 geologiske øst-vest snit gennem modelområdet. Tykkelsen af de mest vandførende lag (lag 3, 5, 7) og det område hvor kalken er antaget vandførende er vist i figur 18.

På baggrund af oplysninger i borearkivet er de enkelte geologiske lag analyseret i forhold til indholdet af sand eller ler i de enkelte boringer. I figur 19 er sandprocenten i det øverste lag samt i de lavpermeable lag nr. 2, 4, 6 og 8 vist, samt implementerede linser hvor de lavpermeable lag er antaget at være mere permeable som følge af sandvinduer.



Figur 18. *Tykkelse af vandførende lag (lag 3, 5 og 7) samt det område hvor kalken er antaget vandførende*



Figur 19. *Implementerede linser i Fynsmodellen (sandlinser i lerlag).*

5.2 Hydrauliske parametre

De hydrauliske parametre kan opdeles i følgende 3 grupper:

- parametre som styrer beregning af nettonedbør og fordeling mellem grundvandsdannelse og overfladisk afstrømning (rodzonemodul og dummy-komponent)
- parametre som styrer grundvandsstrømning og drænvandsafstrømning (SZ-modul)
- parametre som styrer overfladisk afstrømning, kanalstrømning og udveksling mellem grundvand og vandløb (OC-modul og EX-modul)

5.2.1 Hydrauliske parametre som styrer nettonedbør og fordeling til grundvand/overfladevand

Der er benyttet inputdata i form af daglig nedbør og daglig potentiel fordampning fra klimagrid nr. 30, 31, 32, 37 og 38, se figur 15. Det sydlige Langeland og øvrige mindre øer udenfor disse klimagrid dækkes ind ved brug af data fra nærmeste af ovennævnte 5 grids. På baggrund af data for arealanvendelse (Corine data) er der ved hjælp af GIS-bearbejdning foretaget en opdeling af samtlige beregningsgrids (1 x 1 km) i arealtyperne skov og åbent land. For de grid hvor mere end 50 % af arealet udgøres af skov er arealanvendelsen skov tillagt disse grids. For de resterende grids er arealanvendelsen åbent land antaget. Ligeledes på baggrund af GIS bearbejdning af Corine data er den procentvise andel af hvert hvert grid som udgøres af byområder beregnet.

På baggrund af modeltopografien (figur 2) er det vurderet, hvilke områder der har en terrænkote over kote 50 og hvilke der ligger lavere end kote 50. Endelig er det på baggrund af modelkørsler vurderet, hvilke områder der må antages tilhørende vådbundsområder, dvs. områder hvor den aktuelle fordampning med en god tilnærmelse kan antages at være lig med den potentielle fordampning.

Vurderingen af vådbundsgrids er foretaget ved at antage, at vådbundsområder kan afgrænses som de grids hvor grundvandsspejlet ligger mindre end en given dybde under terræn. Den benyttede parameterværdi blev for Fynsmodellen fastlagt på baggrund af en række forsøg med forskellige parametre og vurdering i forhold til dels arealanvendelse og dels beregnede afstrømninger, idet sommerafstrømningen er stærkt afhængig af vådbundsarealets størrelse. Parameterværdien bør fastlægges efter en nærmere vurdering for hver modelopstilling. Betegnelsen "vådbundsarealer" må ikke forveksles med f.eks. ånære arealer som har et højt vandindhold i rodzonen eller et grundvandsspejl tæt på terræn. I DK-modellen er vådbundsarealer udelukkende defineret som arealer, der har potentiel fordampning året rundt. Det er således områder, hvor tykkelsen af umættet zone er så ringe (< 2-3 m), at der ved kapilær vandstigning, kan foregå en opadrettet vandtransport fra grundvandet til planternes rodzone. Fordampningen er således på størrelse med den po-

tentielle. Vådbundsarealet udgør med denne definition knap 15 % af det samlede landareal.

Efter ovenstående fremgangsmåde er det samlede landareal for Fyn (3452 km^2 i den opstillede model) opdelt i følgende arealtyper i de 5 klimagrid.

Arealtype fordeling	Område 1 nordvest	Område 2 nord	Område 3 nordøst	Område 4 syd	Område 5 sydøst	ialt km^2	%
Skov	12 (1)	46 (7)	10 (13)	37 (19)	30 (25)	135	3.9
Åbent land, sand, > 50 m	9 (2)	33 (8)	8 (14)	52 (20)	9 (26)	111	3.2
Åbent land, ler, > 50 m	1 (3)	305 (9)	38 (15)	135 (21)	81 (27)	560	16.2
Åbent land, sand, < 50 m	27 (4)	136 (10)	14 (16)	39 (22)	23 (28)	239	6.9
Åbent land, ler, < 50 m	186 (5)	761 (11)	254 (17)	348 (23)	361 (29)	1910	55.3
Vådbund	3(6)	290 (12)	43 (18)	103 (24)	23 (30)	498	14.4
ialt km^2	274	1571	367	714	527	3452	100
%	7.9	45.5	10.6	20.7	15.3	100	

Tabel 3. *Arealtypefordeling km^2 i modelopstilling for Fyn (i parentes er vist arealtypenummer)*

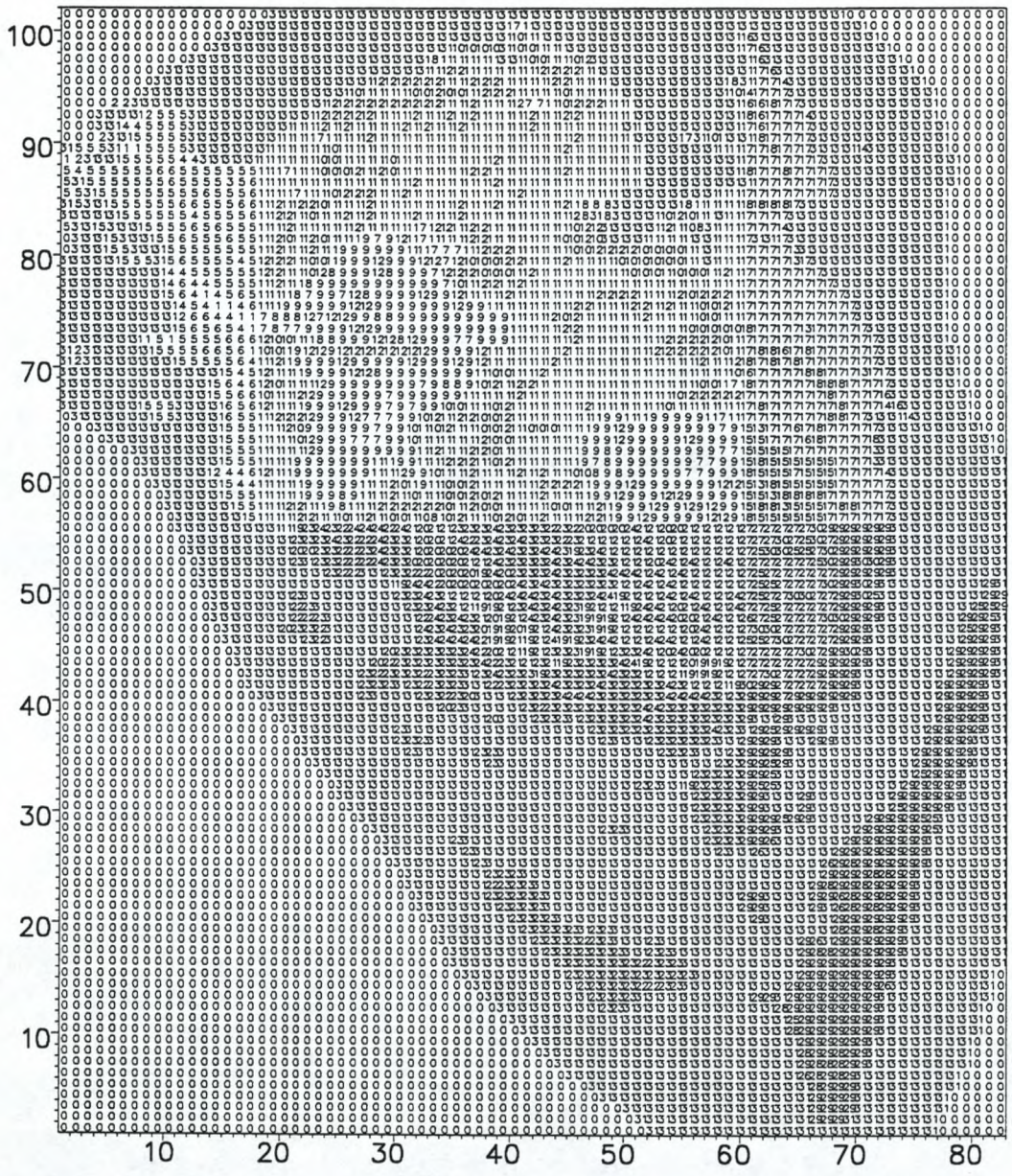
I Fynsmodellen indgår ialt 30 forskellige arealtyper, hvor der til hver type beregnes daglig nettonedbør som input til DK-modellen. Fordelingen af kodeværdier for Fyn fremgår af figur 20. Endelig er en nedsivning på 0 mm introduceret som arealtype 31, til brug for havområder.

I beregningen af nettonedbøren indgår korrektionsfaktorer jf. afsnit 4 til vurdering af korrigeret nedbør (vind- og befugtningstab). Følgende parametre er anvendt til beregningen af aktuel fordampning og nedsivning fra rodzonen:

Arealtype	Korrektionsfaktor for potentiel fordampning	Korrektionsfaktor for nedbør	Rodzonekapacitet
Skov	1.1	1.1	150 mm
Åbent land ,sand, > 50 m	1.0	1.1	70 mm
Åbent land, ler, > 50 m	1.0	1.1	140 mm
Åbent land, sand < 50 m	1.0	faktor 0.9-1 *)	70 mm
Åbent land, ler < 50 m	1.0	faktor 0.9-1 *)	140 mm
Vådbund	1.0	faktor 0.9-1 *)	-

*) Faktoren er beregnet således at den samlede nedbør indenfor området i modelopstillingen svarer til middelværdien fra det tilsvarende klimagrid

Tabel 4. *Anvendte parametre ved beregning af nettonedbør i rodzonemodulet*



Figur 20. *Distribuering af arealtypekoder (1-31)*

I MIKE SHE kan man ved hjælp af dummy-komponenten styre, at en brøkdel af nettonedbøren routes direkte til overfladisk afstrømning, i stedet for til grundvandet (SZ-modulet). Dette gøres ved at specificere en UZ-dummykoefficient, som definerer den brøkdel af nettonedbøren, der antages at nedsive til grundvandskomponenten/SZ, i forhold til den samlede nettonedbør.

Dummykoefficienten kan distribueres over hele modelområdet. I forbindelse med DK-modellen er det vurderet, at forskellige fysiske forhold og skalaforhold kan indgå i vurdering af dummy-koefficienten. Tre forskellige fysiske forhold er vurderet at kunne indgå i vurderingen af dummy-koefficienten (beregningskasse i,j):

$$Dummy - koefficient[i,j] = 1 - \alpha[i,j] - \beta[i,j] - \chi[i,j]$$

- Skalafaktor α : Det generelle skalaforhold (1 x 1 km) bevirker, at topografi og drænsystem er væsentligt udjævnede i forhold til de virkelige fysiske forholds variabilitet indenfor hver enkelt beregningsmaske. For at tage højde herfor skal en del af nettonedbøren routes direkte til OC/vandløb
- Byfaktor β : Befæstede arealer i forbindelse med byområder (normalt antages at ca. 33 % af byområderne udgøres af befæstede arealer) afleder regnvandet direkte til vandløb. Byfaktor multipliceret med 0.33 gange byprocent angiver den direkte afledning til OC indenfor hver beregningskasse
- Terrænhældningsfaktor χ : Lokalspecifik (modsat skalaspecifik) topografisk variation bevirker, at modelopstillingen vil undervurdere overfladisk/overfladenær afstrømning. Terrænhældningsfaktoren relateres til den GIS beregnede topografiske spredning indenfor hvert modelgrid og kompenserer for undervurdering af overfladisk/overfladenær afstrømning.

Antagelsen vedr. byområder og anvendelsen af nettonedbøren i stedet for nedbøren som grundlag for den direkte routning til overfladisk afstrømning fra byområder er en grov forenkling. Opgøres byområder på gridniveau fås fordeling angivet i tabel 5:

> 80 % byområde	55 km2	
60 - 80 % byområde	56 km2	
40 - 60 % byområde	65 km2	
20 - 40 % byområde	138 km2	
0 - 20 % byområde	315 km2	
ialt	629 km2	(ialt ca. 18 % af det samlede landområde)

Tabel 5. *Fordeling af byprocent indenfor de enkelte modelgrid i Fynsmodellen*

Gennemsnitsværdien for de 629 grids som i en del af griddet har byområder, svarer til en byprocent på 30 %. De 629 grids udgør ca. 18 % af Fyns Amts areal og multipliceret med 0.30 giver dette en procentvis andel som er byområde på 5.5 %. Dette areal er koncentreret omkring de kystnære områder bl.a. Odense, Svendborg, Nyborg og de øvrige mindre købsstæder, således at den procentvise andel af byområder opstrøms de 12 vandføringsstationer der indgår i kalibreringen kun udgør en mindre procentdel. En del af regnvandet ledes iøvrigt direkte til havet sammen med spildevand fra renseanlæg via afskærende ledninger. Samlet vurderes det derfor, at antagelsen vedr. byområder generelt er god, idet

formålet med simuleringerne er at vurdere grundvandsressourcen og ikke den overfladiske afstrømning eller maksimumsafstrømningen til vandløb eller kystnære farvande.

Af den del af nettonedbøren som nedsives direkte til SZ vil en del, afhængigt af drænvandsafstrømning og områder med begrænset infiltrationskapacitet (som følge af lav hydraulisk ledningsevne) efterfølgende afledes til overfladisk afstrømning (evt. til vandløb), afhængigt af hvorvidt grundvandsspejlet i det øverste beregningslag står over drænniveauet eller evt. står over terræn (som følge af begrænset infiltrationskapacitet i kortere eller længere perioder). Ovennævnte sum af faktorer der indgår i dummy-koefficienten udgør dermed kun en brøkdel af den samlede andel af nettonedbøren, som afstrømmer overfladisk eller via dræn til vandløb (og dermed ikke indgår i grundvandsdannelsen/-ressourcen). Kalibreringskørsler har imidlertid vist, at dummy-koefficienten har stor indflydelse på simulerings resultaterne.

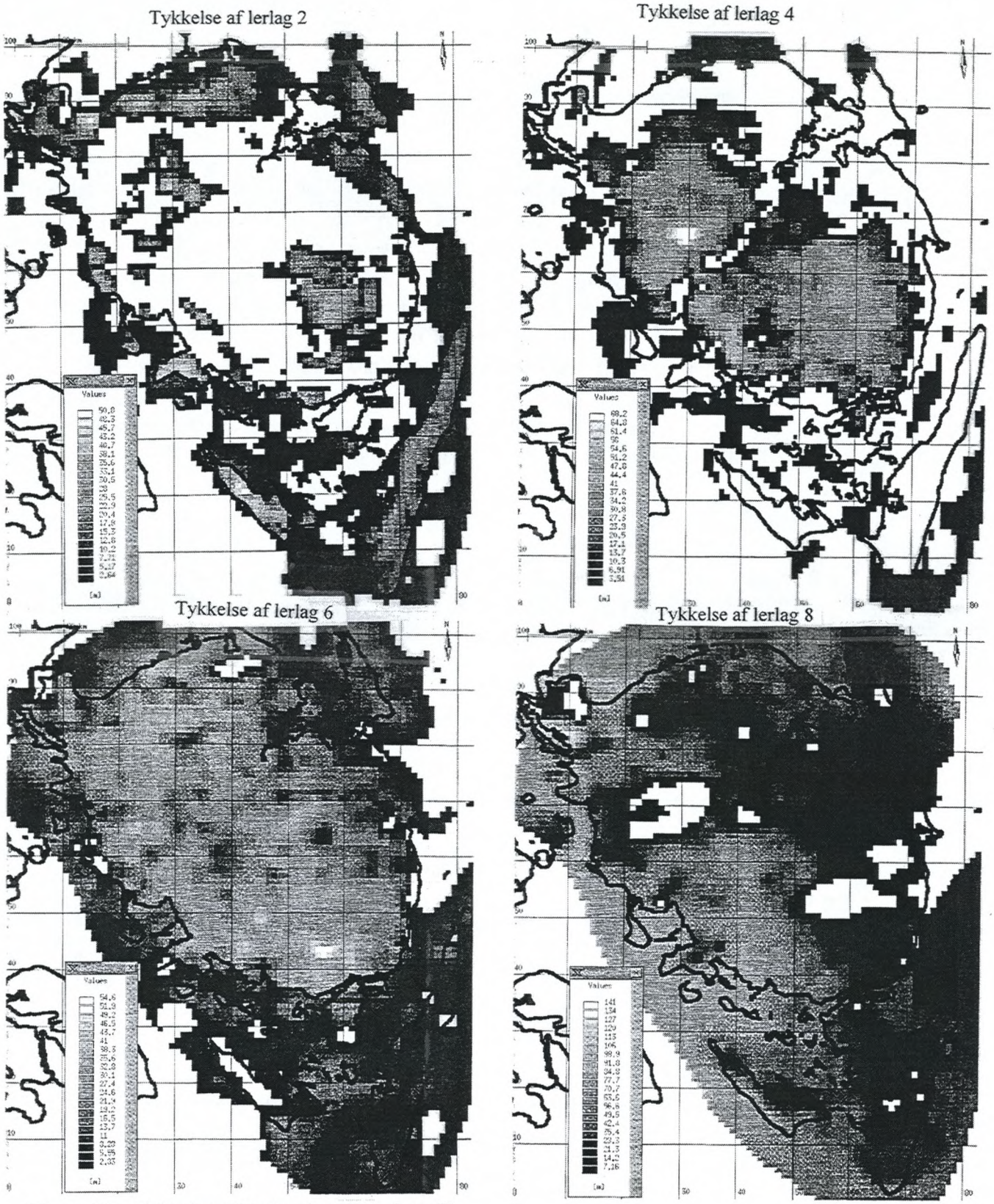
5.2.2 Hydrauliske parametre som styrer grundvandsstrømningen

I tabel 6 er vist de hydrauliske parametre, som var udgangspunktet for den endelige kalibrering af Fynsmodellen. Der er benyttet en vertikal hydraulisk ledningsevne for moræneleren på 10^{-8} m/s og en horisontal hydraulisk ledningsevne for sandmagasiner på 10^{-4} m/s. I det øverste lag i modellen er antaget en vertikal ledningsevne på 10^{-7} m/s (jf. større opsprækkethed), mens den horisontale ledningsevne her er antaget til 10^{-4} m/s (p.g.a. dels opsprækning af leren samt en højere ledningsevne i pløjelag mm.). For kalken er benyttet distribuerede værdier.

Geologiske lag/ linser	Horisontal hydraulisk ledningsevne m/s	Vertikal hydraulisk ledningsevne m/s	Frit magasintal og magasinkoefficient for artesiske forhold (pr. m)	
			frit	artesisk
lag 1	$1\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-7}$	0.2	0.0001
lag 2, 4, 6 og 8	$2\ 10^{-6}$	$1\ 10^{-8}$	0.2	0.0001
lag 3, 5 og 7	$1\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-5}$	0.2	0.0001
lag 9	distribueret	distribueret	0.2	0.0001
linse i lag 1,2,4,6 og 8	$1\ 10^{-5}$	$1\ 10^{-6}$	0.2	0.0001

Tabel 6. *Anvendte parametre som udgangspunkt for den endelige kalibrering*

I figur 21 er vist tykkelsen af lerlag i den hydrostratigrafiske model (lag 2, 4, 6 og 8).



Figur 21. *Tykkelse af lerlag (lag 2, 4, 6 og 8)*

Drænafstrømningen er beskrevet ved dels en drændybde for landområder på 0.5 m under terræn, dels en antaget tidskonstant for drænafstrømning på 1 e -7 s^{-1}.

5.2.3 Hydrauliske parametre som styrer overfladisk afstrømning og vandløbsstrømning

Følgende parametre er anvendt til beskrivelse af OC og EX komponenterne:

- Overflade Manningtal: = 5 $m^{1/3}$ pr. sek.
- Tærskelværdi for overfladisk afstrømning: = 0.01
- Vandløbs Manningtal: = 20 $m^{1/3}$ pr. sek.
- Vandløbslækagekoefficient: = 5 e-7 s^{-1}
- Kontakt mellem grundvand og vandløb: = reduceret kontakt (type a)

I havområder er lækagekoefficienten sat lig med 0. Drænfunktionen er ikke aktiv i havområder.

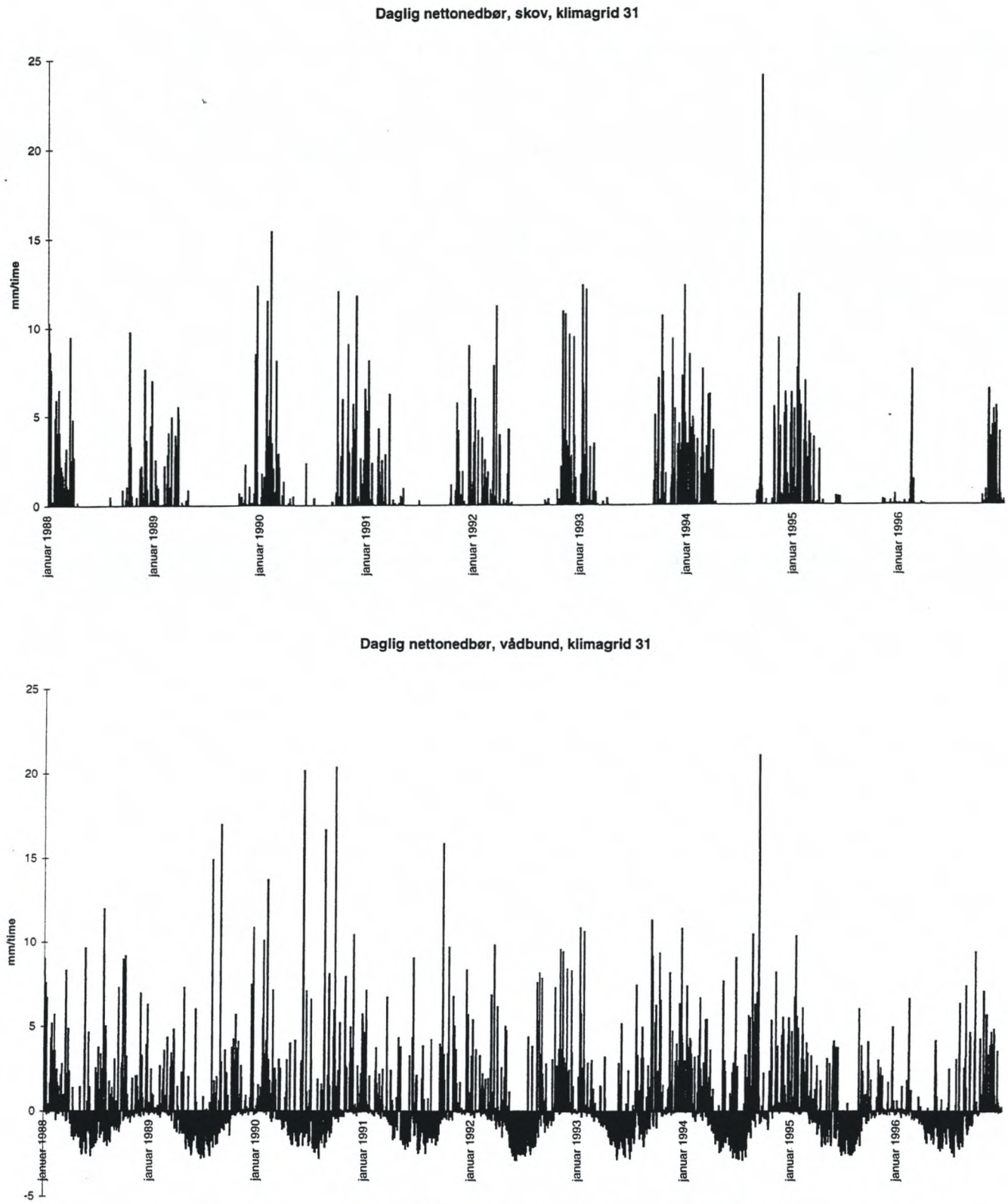
5.3 Input og output til vandbalancen

Input til modellen i form af nettonedbør for de arealtyper fremgår af nedenstående tabel 7 for perioden 1971-90.

Beregnet nettonedbør 1971-90	Skov mm/år	Åbent land sand, > 50 m mm/år	Åbent land ler, > 50 m mm/år	Åbent land sand, < 50 m mm/år	Åbent land ler, < 50 m mm/år	Vådbund mm/år
klimagrid 30	416	495	448	423	376	293
klimagrid 31	314	392	344	312	263	153
klimagrid 32	242	317	268	259	210	82
klimagrid 37	307	384	337	297	249	138
klimagird 38	238	313	265	252	202	72
middel 1971-90	304	380	332	309	260	148

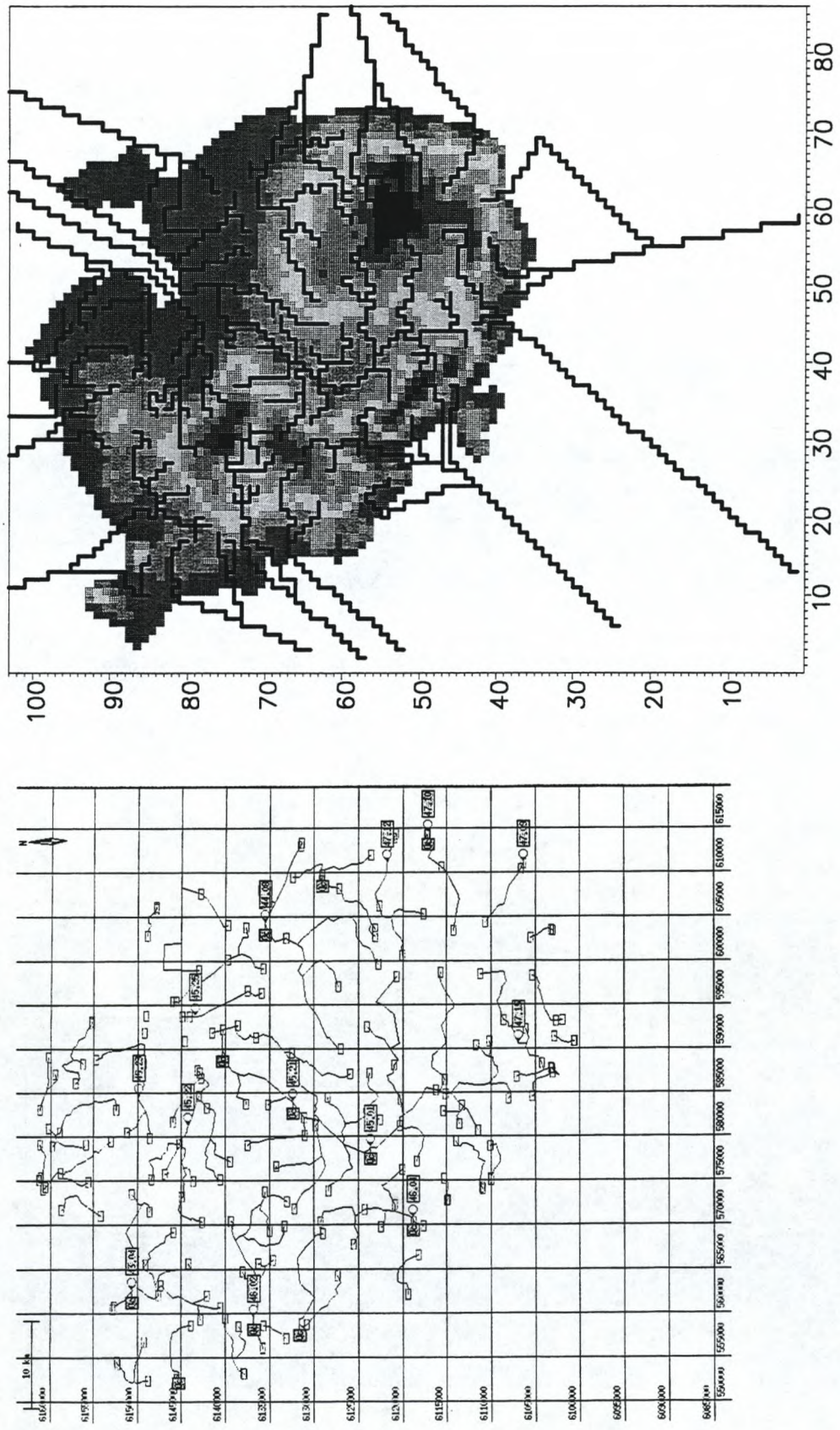
Tabel 7. *Beregnet nettonedbør som årsgennemsnit fordelt på klimagrid og arealtype.*

Der er en betydelig variation i nettonedbøren såvel fra år til år som indenfor året. I figur 22 er vist et eksempel på beregnet daglig nettonedbør for 1989-90 for klimagrid 31 for henholdsvis skov og vådbund. For skovområdet forekommer de største daglige nettonedbørsværdier i vintermånederne, hvorimod sommerhalvåret har meget begrænset nettonedbør eller slet ingen nettonedbør. For vådbund ses derimod de største værdier i sommermåneder, ligesom at nettonedbøren er negativ i løbet af sommerperioden i de tørre perioder. De negative værdier forekommer som følge af at fordampningen antages potentiel, således at der fra vådbundsområder i tørre perioder forekommer et direkte vandtab som hentes fra det øverste lag i SZ.



Figur 22. *Beregnet daglig nettonedbør for klimagrid 31 for skov og vådbund*

I figur 23 er vist det implementerede vandløbssetup, placering af tværprofiler og vandføringsmålestationer som indgår i kalibreringen (ialt 12). Desuden er vist det implementerede vandløbssystem efter generering af modelsetup (placering af vandløb langs rand af kasser)



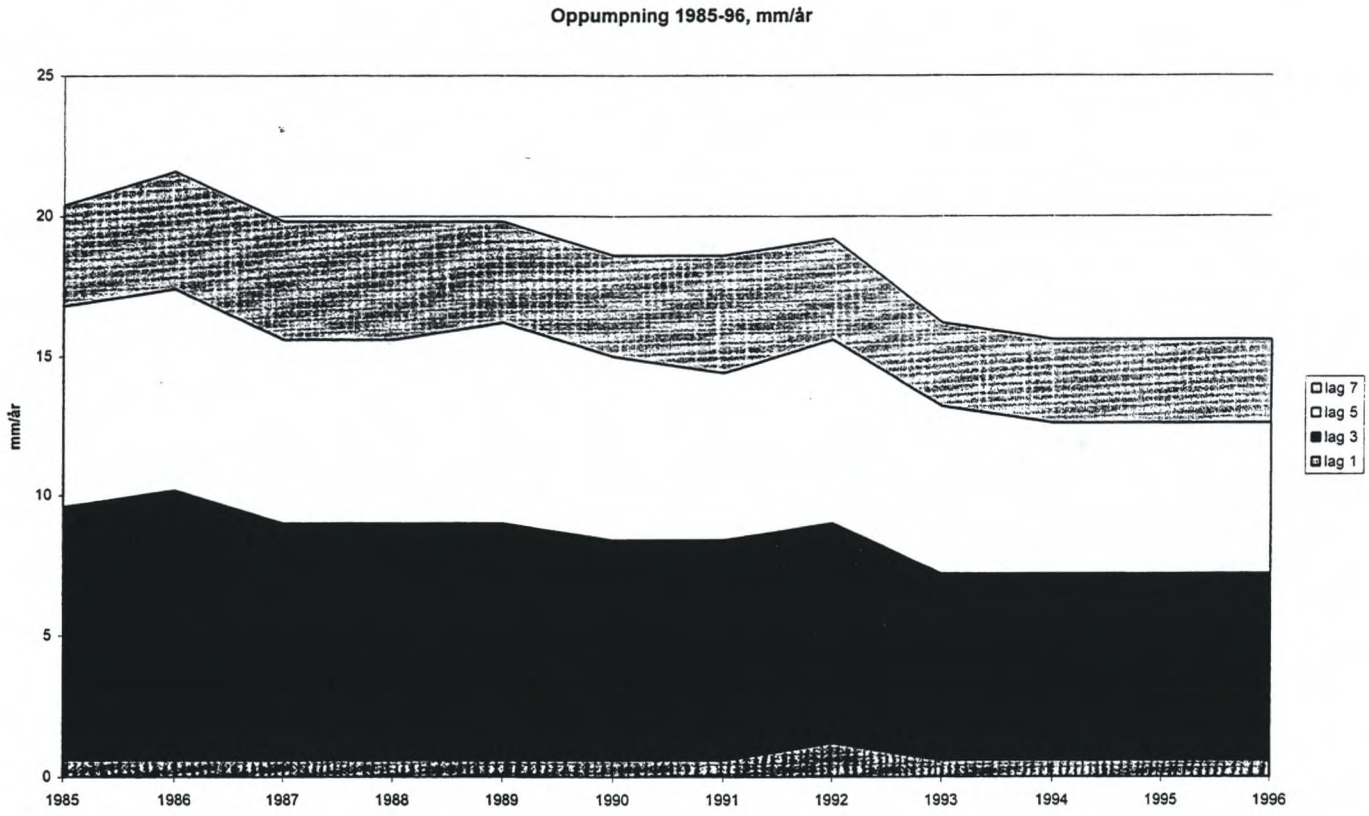
Figur 23. *Vandløbssetup og griddede vandløb*

Der er benyttet 6 forskellige forenklede trapezformede vandløbstværsnit. Placeringen af de forenklede tværsnit er fastlagt med udgangspunkt i medianminimumsafstrømningen (se tabel 8), en analyse af opmålte profiler og en sammenligning med tilhørende medianminimumsafstrømninger. Mellem tværprofiler i setupet interpolerer MIKE SHE tværprofiler for øvrige knudepunkter.

Tværprofil	Medianminimums afstrømning (l/s)	Bundbredde (m)	Bredde ved krone (m)	Dybde (m)	Manningtal/ vandløbslækage koefficient
1	5	ca. 1.0 m	ca. 3 m	ca. 1 m	20 / 5 e-7
2	25	ca. 2.8 m	ca. 6 m	ca. 1 m	20 / 5 e-7
3	100	ca. 3.5 m	ca. 8 m	ca. 1.5 m	20 / 5 e-7
4	250	ca. 5 m	ca. 11.5 m	ca. 1.5 m	20 / 5 e-7
5	1000	ca. 10 m	ca. 16 m	ca. 1.1 m	20 / 5 e-7
6	fra udløb til rand	ca. 14 m	ca. 18 m	ca. 1 m	30 / 0

Tabel 8. *Anvendte forenklede tværprofiler samt tilhørende fysiske parametre*

Vandløbsafstrømninger ved de enkelte stationer fremgår af plot af tidsserier i afsnittet om kalibrering.



Figur 24. *Tidsserier af oppumpningen for beregningslag 1, 3, 5 og 7 1985-96*

I modellen er inkluderet en række større spildevandsudledninger (ialt 11). Det antages at vandføringen i vandløbet momentant forøges med en konstant vandmængde ved disse udledninger. Eksempelvis i Odense å opstrøms 45.01 med 90 l/s, opstrøms 45.21 med 70 l/s og ved Odense med 650 l/s. I Vindinge å opstrøms 44.08 med 35 l/s samt 7 øvrige udledninger med i størrelsesordenen 5 - 25 l/s.

5.4 Randbetingelser

I såvel modellen for Fyns Amt som modellen for Fyn er anvendt fastholdt trykniveau ved randen. I sub-modellen for Østfyn er anvendt fastholdt trykniveau langs nordlige og østlige rand, mens der mod syd og sydøst er anvendt 'no flow' randbetingelse. En test hvor der i Fynsmodellen kun blev anvendt fastholdt trykniveau i det øverste modellag ved randen gav numeriske problemer og måtte forkastes. En sammenligning af modellen for Fyns Amt i forhold til Fynsmodellen gav stort set samme simuleringsresultater, såvel med hensyn til simulering af trykniveau som med hensyn til vandbalance. Trunkeringen af Fynsmodellen ved kysten og anvendelsen af fastholdt trykniveau er derfor en relativ god antagelse, når der ses bort fra simuleringer af forholdene tæt på kysten (f.eks ændret vandindvinding fra vandværker i dette område).

Beliggenheden af vandløb er baseret på data i vandskelsdatabasen (ZETA). For hvert vandløbspunkt er der udtrukket en bredkote ud fra KMS's 50 m topografi griddata. Redigeringen er sket ved hjælp af MIKE SHE's "River Editor". Der er foretaget en dataopretning af en stor del af koterne i vandløbssetuppet, idet der er store usikkerheder på koterne jf. KMS's 50 m grid. Dataopretningen blev gennemført ved en editering i længdeprofiler og ved sammenligning med 5 m niveaukurver fra kort. Desuden er vandløbskoter justeret i forbindelse med eliminering af afløbsløse dræn.

5.5 Valg af kalibreringsmål og kriterier for nøjagtighed

Der er opstillet mål for kalibreringen i forhold til simulering af trykniveau i grundvand og simuleret daglig afstrømning i vandløb.

Der foreligger et stort antal observationer af trykniveauet fra boringer med filtersætning i forskellig dybde (svarende til forskellige beregningslag). Ved kalibreringen anvendes data fra perioden 1970-96 fra PC ZEUS. Modellen kalibreres ved en række kørsler i perioden 1985-90, idet der benyttes "hotstart" data fra 1985 simuleret udfra en indledende kørsel for perioden 1971-96. Fra hver kalibreringskørsel udtrækkes midlede simulerede trykniveauer for feb./apr./jun./aug./okt. og dec.1990 svarende til placeringen af observationspunkter og

afvigelsen med observationsværdierne beregnes for hver boring (residualværdi). Udfra samtlige residualværdier for hvert beregningslag. Herefter beregnes en RMS værdi (se nedenfor under kalibrering) for hvert beregningslag og en middelværdi af samtlige 7 RMS værdier.

Kravet til maksimal RMS-afvigelse er afhængig dels af variationen i trykniveau indenfor modelområdet (trykniveauet varierer mellem ca. - 2 m til over 90 m), dels den tidslige variation i den periode som er grundlag for udvælgelsen af observationer: 1970-96, hvor der typisk ses variationer på ca. 2.5 m. Endelig giver usikkerhed på topografi og maskevidden på 1x1 km betydelige usikkerheder. Trykniveauvariationen over en beregningsmaske er typisk ca. 2 - 5 m (dog ca. 10 m i visse områder). Hertil kommer usikkerheder og evt. fejl på observationer af trykniveauet for en del af boringerne, idet vandspejlskoten for nogen boringer kan være fastlagt på baggrund af en aflæst terrænkote og ikke et egentligt nivellement af boringernes målepunkter.

En sammenligning af udvalgte 50 m gridpunkter udtrukket for hver 500x500 m med modeltopografien (1 km grid) viste, at RMS værdien for disse to datasæt var lig med 4,89. For specielt de øvre beregningslag i modellen hvor trykniveauet er specielt afhængig af terrænkoten, må man derfor forvente RMS værdier over 5 meter, selv med en velkalibreret model. For de dybere beregningslag, hvor betydningen af topografi er mindre vil de tidslige variationer på ca. 2,5 m spille en relativt større rolle. Der er opstillet følgende RMS krav til afvigelsen i forhold til trykniveau-observationer i kalibreringen af Fynsmodellen:

- maksimal kravværdi for RMS værdi for et beregningslag: < 8 m
- vægtet middelværdi af 7 RMS værdier: < 6 m
- gennemsnit af RMS værdier for 7 lag: < 5,5 m
- gennemsnit af 3 RMS værdier for regionale vandførende lag: (beregningslag 3, 5 og 7): < 5 m

Afvigelsen mellem simuleret og målt daglig vandføring baseres på en sammenligning af resultater for 12 større oplande, hvor der foreligger data for perioden 1985-96. Selvom der benyttes hotstart går der ca. 2-3 år før vandføringer finder en ny rytme som følge af ændrede parameterværdier. Ved beregning af teststørrelser (FL- og R^2-værdier) er derfor benyttet perioden 1988-90, altså daglige vandføringer fra 3 år.

For teststørrelsen FL, som beskriver modellens tilpasning til specielt minimumsvandføringen, kan der ikke opstilles et direkte krav, idet denne parameter er meget varierende fra vandløb til vandløb og ikke er normaliseret. Der foretages i forbindelse med kalibreringen en normalisering af FL-værdier i forhold til resultater fra den kørsel som danner udgangspunkt for de øvrige kørsler. Såfremt FL-værdien derfor er 1,0 så svarer den pågældende kørsel til udgangskørslen. FL-værdier mellem 0 og 1 afspejler en bedre simulering af min. vandføringer og FL-værdier over 1 FL $\in [0;\infty[$ svarer til en dårligere simuleringen af minimumsvandføringen.

R^2-værdier kan være noget afhængige af afstrømningshydrografen, således at vandløb i Vestjylland med lille årstidsvariation og relativ betydelig grundvandsafstrømning (baseflow) kan afvige med hensyn til hvor god en R^2-værdi der kan opnås i forhold til vandløb i Sydøstdanmark med større årstidsvariation og lille sommervandføring. R^2-værdier på under 0,6 vil typisk svare til store afvigelser mellem simulerede og målte daglige vandføringer, ved en visuel bedømmelse. Ved værdier mellem 0,7 - 0,9 vil der normalt være god overensstemmelse, mens R^2-værdier over 0,9 vil være sjældne og samtidig udtryk for en meget fin overensstemmelse. For mindre vandløb vil R^2-værdierne typisk være lavere, specielt med en maskevidde på 1x1 km. Kravet til R^2-værdier er samlet fastsat til:

- middel R^2-værdi for de 12 stationer på: > 0,65
- max. 75 % af stationerne (dvs. 3 ud af 12) må have R^2-værdier på < 0,60

I det følgende tillægges FL-værdierne størst betydning ved finkalibreringen. Der gennemføres imidlertid en bred vifte af kørsler, idet det hermed belyses mere generelt hvilket parametersæt der giver mest pålidelige resultater for henholdsvis en kørsel med focus på grundvandsafstrømningen og dels simulering af middel og max. afstrømninger. Der er udvalgt ialt 12 vandføringsstationer til kalibreringen. Stationer med relativt små oplande er udeladt. Stationerne dækker forskellige oplandstyper og samtidig en stor del af Fyns samlede areal.

5.6 Numeriske parametre

Ved de dynamiske simuleringer er anvendt følgende tidsskridt's parametre og iterations parametre:

- max. tidsskridt for SZ = 24 timer
- max. nettonedbørsmængde (P) = 1 mm
- SZ løsningsrutine = PCG solver
- max. antal SZ iterationer = 200
- SZ iterations stop kriterie = 0,01
- max. antal OC iterationer = 100
- OC iterations stop kriterie = 1 e-5
- max. antal vandløbsiterationer = 100
- vandløbs iterations stopkriterie = 0,01

Data er gemt med følgende tidsintervaller:

- vandløb: 24 timer (svarende til 1 dag)
- overland flow: 240 timer (svarende til 10 døgn)
- grundvand (SZ): 1440 timer (svarende til 60 døgn eller hver 2. måned)

6. Kalibrering

Til kalibrering og verificering af modellen blev anvendt en 'differentiel split sample test' (Klemes, 1986), hvor der som kalibreringsperiode blev benyttet data fra 1988-90 og verificering udfra 1991-96. Kalibreringskriteriet R^2 er benyttet ved sammenligning af simuleret og observeret daglig vandføring (Green and Stephenson, 1986). RMS værdier ('Root mean square') af afvigelser mellem simuleret og observeret trykniveau er baseret på data fra PC ZEUS i perioden 1971-96. Teststørrelser er beregnet ved hjælp af et pc-program udviklet i forbindelse med DK-modellen: 'GridGym' (Hansen, 1997). Desuden anvendes til test af minimums-/maximumsafstrømninger en metode foreslået af (Wood, 1986), udfra størrelserne FL (teststørrelse med særlig vægt på minimumsafstrømninger) og FH (teststørrelse med særlig vægt på maksimumsafstrømninger), (Henriksen og Knudby, 1997).

$$RMS = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{j}^{N}\left(\left(H_{s,j} - H_{o,j}\right)^2\right)} \quad , j = 1, N \text{ trykniveauobs.}, \quad \in [0;\infty[$$

$$R^2 = \frac{\sum_i \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)^2 - \sum_i \left(Q_{s,i} - Q_{o,i}\right)^2}{\sum_i \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)^2} = 1 - \frac{\sum_i \left(Q_{s,i} - Q_{o,i}\right)^2}{\sum_i \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)^2} \quad , \qquad \in]0;\infty]$$

$$FL = \sum_i \left[\frac{\left(Q_{o,i} - Q_{s,i}\right)\overline{Q_o}}{Q_{o,i}^2}\right]^2 , \qquad FH = \frac{1}{n}\sum_i \left[\frac{Q_{o,i} - Q_{s,i}}{\overline{Q_o}}\right]^2 \qquad \in [0;\infty[$$

hvor

$H_{s,j}$: simuleret trykniveau for boring svarende til observation j (m)

$H_{o,j}$: observeret trykniveau for observation j (m)

$Q_{s,i}$: simuleret daglig vandføring for dag i (l/s)

$Q_{o,i}$: obseret daglig vandføring for dag i (l/s)

$\overline{Q_o}$: middelvandføring i testperioden (kalibrering: 1988-90)

Bemærk at teststørrelsen FL er relativ følsom overfor den observerede minimumsvandføring og ikke kan anvendes såfremt vandføringen er 0. Denne teststørrelse forudsætter dermed udvælgelse af vandløb med en minimumsvandføring forskellig fra 0, dvs. vandføringsstationer med større oplande. I de efterfølgende tabeller er FL-værdien derfor normeret, i forhold til en udgangskørsel (Fyn25-6):

$$FL_{normeret} = \frac{FL}{FL_{Fyn25-6}}$$

I forbindelse med udvælgelse af observerede trykniveaudata fra borearkivet er der foretaget en udtynding, enten hvor der forelå et stort antal observationer indenfor den sammen beregningskasse og lag eller hvor en nærmere gennemgang viste, at enkelte observationer havde betydelige afvigelser i forhold til det generelle billede i området (hvor f.eks en enkelt observation afveg betydeligt fra øvrige observationer; evt. fordi denne afspejlede en observation af et vandspejl i en pumpeboring, eller udtrykte et vandspejl fra boringens etablering før iværksættelse af en større vandindvinding i området). Herved er det oprindelige datagrundlag reduceret for de enkelte beregningslag (tabel 9):

Beregningslag	Antal observationer før udtynding	Antal observationer efter udtynding	% af 1510
1 (geolag 1+2+3)	202	184	12
2 (geolag 4)	262	261	17
3 (geolag 5)	438	437	29
4 (geolag 6)	306	303	20
5 (geolag 7)	209	204	14
6 (geolag 8)	72	70	5
7 (geolag 9)	51	51	3
IALT	1540	1510	100

Tabel 9. *Datagrundlag ved beregning af RMS værdier udfra observationer af trykniveau fra boredataarkivet 1970-96.*

Det fremgår af tabel 9, at der ialt er udtyndet 30 observationer, hvoraf de fleste fra beregningslag 1 (ialt 18 ud af 30). I det følgende vil udover den midlede RMS værdi fra de 7 lag også blive benyttet en vægtet RMS værdi på baggrund af fordelingen vist i tabel 9.

I tabel 10 er vist de 12 faste vandføringsmålestationer Fynsmodellen er kalibreret udfra.

Station	Driftsperiode	Opland km^2	Medianminimum incl. spildevand 1971-90
43.04 Storå, St. 4.6 km	1976-	136.8	170
44.08 Vindinge å, St. 9.9 km	1976-	127.6	120
45.21 Odense å, Kratholm	1979-	485.9	486
45.22 Stavids å, St. 8.25 km	1977-	78.0	75
45.23 Lunde å, St. 10.0 km	-	35.7	9
45.25 Vejrup å, St. 2.3 km	1978-	41.6	65
46.02 Brende å, St. 5.3 km	1976-	102.4	110
46.04 Hårby å, St. 3.1 km	1978-	78.5	140
47.09 Vejstrup å, St. 1.8 km	1978-	40.0	15
47.10 Stokkebæk, St. 1.8 km	1976-	53.3	85
47.12 Kongshøj å, St. 6.05 km	-	53.6	85
47.15 Hundstrup å, St. 6.86 km	1984-	57.8	55

Tabel 10. *Faste vandføringsmålestationer som anvendes ved kalibrering*

6.1 Kvalitativ/kvantitativ analyse

Kalibreringen af Fynsmodellen er foretaget i flere kalibreringsrunder:

1. Tilnærmet årstidsvariation (nettonedbøren antaget jævnt fordelt over vinterhalvåret)
2. Daglig nettonedbør/dynamisk model, men ingen distribuering over modelområdet
3. Distribueret daglig nettonedbør (som beskrevet ovenfor under modelopstilling)
4. Som 3, men med forbedret vandløbssetup (afløbsløse huller elimineret og flere vandløbstilløb medtaget, kørsel Fyn97-12)
5. Afprøvning af implementering af glacialtektonisk variabilitet og sandlinser (Varia-1 til Varia-8)
6. Mere fysisk baserede dummy-koefficienter som beskrevet ovenfor (Fyn25-1 til Fyn25-5)
7. Dynamisk finkalibrering og følsomhedsanalyse (Fyn25-6 til Fyn25-33)
8. Afsluttende kalibreringsrunde hvor de følsomme parametre finjusteres (Fyn25-33 til Fyn-52)

Nogle af de tidlige kørsler (kalibreringsrunde 1 og 2) gav relativt store RMS-værdier i størrelsesordenen 10-15 for beregningslag 1, 5-6 for beregningslag 3 og 4-5 for beregningslag 7. I de første kørsler (udført i juli-november 1996) var vandløbsafstrømningen for de fleste vandløb desuden relativt dårligt simuleret. Specielt var de første kørsler ikke i stand til at beskrive sommerperioden korrekt, idet der ikke indgik vådbundsområder (som har potentiel fordampning året rundt og dermed virker som et 'sink' i sommerperioden). I dele af modelområdet var vandbalancen desuden stærkt afvigende i forhold til observationerne.

En væsentlig forbedring blev opnået i simuleringen af vandløbsafstrømning i forbindelse med simulerings-runde 3 og 4 (udført med PCG-solveren i foråret 1997), som introducerede såvel de distribuerede nettonedbørsværdier som beskrevet i afsnit 5, med en opdeling på skov, åbent land, vådbund, samt hensyntagen til nedbørsfordeling og jordart, men også et forbedret vandløbssetup, hvor afløbsløse huller blev elimineret enten ved at tilføje flere vandløbsgrene eller ved at justere på drænniveau/topografien. Her blev det også erkendt at en dummyfaktor på mellem 0.7 og 1 gav bedre simuleringsresultater i forhold til antagelsen om, at hele nettonedbøren skulle føres til grundvandet.

6.1.1 Glacialtektonisk variabilitet

En test af den glacialtektoniske variabilitet gav ikke forbedringer af modelkalibreringen. De forskellige forsøg gav dårligere resultater i forhold til en version helt uden linser og i forhold til versionen med sandlinser i lerlag, som beskrevet i afsnit 5.

For sandlinser i moræneleren er det antaget, at den hydrauliske ledningsevne er 10 gange lavere end ledningsevnen for smeltevandssand. For tektonik-linser er det antaget, at den horisontale ledningsevne er 10 gange mindre i områder med stærkt deformerede lag end

for uforstyrrede lag og 5 gange mindre end uforstyrrede lag i områder med moderate forstyrrelser. For den vertikale ledningsevne blev det antaget at stærkt forstyrrede områder havde 10 gange større ledningsevner i forhold til uforstyrrede lag, mens moderat forstyrrede områder havde vertikale ledningsevner der var 5 gange større end uforstyrrede lag.

I tabel 11 er resultater af testkørsler med forskellige linsesetup vist. De forskellige betegnelser dækker over:

- sand-linser: Linser der beskriver sandvinduer i moræneler i jf. boringsdata fra PC ZEUS med > 75 % sand. Implemenenteret for lag 1, 2, 4, 6 og 8
- tektonik-linser: Linser der beskriver områder med moderat og stærk forstyrrel se i sand lag og lerlag (jf. figur 3). Implementeret for lag 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8
- tektonik-lerlinser: Som tektonik-linser. Kun implementeret for lerlag 1,2,4,6 og 8
- tektonik-lerlag 2 linser: Som tektonik-lerlinser. Kun implementeret for lerlag 2.

Kalibreringsidentifikation: Test af betydning af glacialtektonisk forstyrrelsesgrad og implementering af sandlinser i moræneler	Kørsels-nummer	RMS værdi middel for 7 lag: tryk-niveau 'fit'	FL-norm. baseflow 'fit', *)	R^2-værdi mid. af 12 stationer 'fit'
Udgangskørsel (version 5.23 - foråret 1997)	Fyn97-12	6.06	-	0.64
Som Fyn97-12, men helt uden linser	varia-1	5.96	0.94	0.64
Som Fyn97-12, uden sand-linser med tektonik-linser	varia-2	6.27	0.93	0.64
Som Fyn97-12, kun sand-linser	varia-3	5.99	0.95	0.64
Som Fyn97-12, både sand-linser og tektonik-linser	varia-4	6.30	0.94	0.64
Som Fyn97-12, sand-linser og tektonik-lerlinser	varia-5	6.34	0.98	0.64
Som Fyn97-12, ikke sand-linser men tektonik-lerlinser	varia-6	6.32	0.97	0.64
Som Fyn97-12, ikke sand-linser men tektonik-lerlag 2 linser	varia-7	6.05	0.96	0.64
Som Fyn97-12, ikke sand-linser kun tektonik-lerlag 2-linser	varia-8	6.02	0.94	0.64

Tabel 11. *Testkørsler med vurdering af betydning af glacialtektoniske forstyrrelser og linser. Bemærk at FL værdien *) er normeret i forhold til kørsel Fyn25-6 i tabel 13.*

Tidligere kørsler var kalibreret med sand-linser. På baggrund af tabel 11 blev det besluttet at bibeholde sand-linserne (varia-3) i de følgende kørsler, men at se bort fra tektonik-linserne.

6.1.2 Dummy-koefficient

Med henblik på en mere fysisk baseret vurdering af dummy-koefficienten, dvs. fordelingen mellem nettonedbør til grundvand og overfladevand (OC), som ved en maskevidde på 1 x 1 km er en central problemstilling, blev der efter kalibreringsrunde 5 foretaget en GIS ana-

lyse af topografiforhold med en vurdering af variationen af topografien indenfor hvert beregningsgrid. Ligeledes blev byprocenten i hvert grid bestemt. Som beskrevet i afsnit 5 er den endelige dummy-koefficient baseret på tre forhold:

- generel hensyntagen til modelskalaen (konstant procentdel af nettonedbøren routes direkte til OC)
- hensyntagen til befæstede arealer (yderligere 33 % af byområder routes direkte til OC)
- hensyn til topografisk variabilitet (yderligere max. 33 % routes til vandløb afhængig af spredning i topografi indenfor hvert grid)

Forud for valget af de endelige antagelser vedr. den distribuerede dummy-koefficient blev der afviklet en række kørsler hvor forskellige antagelser blev nærmere vurderet:

1. Fyn 25-1: antagelse om dummy-koefficient = 0,7 for alle grids med terrænkote over 30 m og dummy-koefficient = 1,0 for alle grids under kote 30
2. Fyn 25-2: som 1. med antagelse af dummy-koefficient = 0,85 for grids med terrænkote under 30 m samt inddragelse af byfaktor (by-faktor = byprocent x 0,33)
3. Fyn 25-3: som 2. men dummy-koefficient for grids med terrænkote under 30 m antages = 0,90 i stedet for 0,85
4. Fyn 25-4: set bort fra skalafaktor (= 0), inddragelse af byfaktor (= byprocent x 0,33) samt inddragelse af terrænhældningsfaktor (= 0,0033 x maksimal topografisk spredning i hvert grid)
5. Fyn 25-5: som 4. men antagelse af en skalafaktor = 0,15 i stedet for 0.

Middel-, maksimums- og minimums- dummy-koefficient hørende til de 5 kørsler er angivet i tabel 12, sammen med beregnet RMS-afvigelse for alle 7 beregningslag på baggrund af sammenligning af simulerede trykniveauer for 1990 sammenlignet med observerede trykniveauer fra PC ZEUS (1970-96). FL- og R^2 middelværdi er beregnet udfra simuleret og observeret daglig afstrømning 1988-90 ved 12 vandføringsstationer. Jo lavere RMS og FL-værdier, desto bedre overensstemmelse mht. trykniveau i grundvand og baseflow i vandløb og jo højere R^2 værdi, desto bedre overensstemmelse vedr. max. afstrømninger.

Testkørsel	Middel dummy koefficient	Min. dummy koefficient	Max. dummy koefficient	RMS - værdi (trykniveaufit)	FL-norm., (baseflow fit)	R^2 - værdi (afstrømningsfit)
Fyn25-1	0.785	0.700	1.000	5.99	0.95	0.70
Fyn25-2	0.768	0.410	0.850	5.95	0.98	0.67
Fyn25-3	0.796	0.410	0.900	5.96	0.97	0.68
Fyn25-4	0.917	0.402	1.000	6.01	0.81	0.69
Fyn25-5	0.767	0.252	0.850	5.96	0.87	0.71

Tabel 12. *Vurdering af 5 forskellige modelopstillinger til fordeling af nettonedbør mellem overfladevand (OC) og grundvand (SZ) med hensyn til middel, max. og min. dummykoefficient på gridniveau og tilhørende RMS/FL/R^2 værdier*

Som det fremgår af tabel 12 har kørsel Fyn25-5 en RMS værdi som er den næst laveste men en R^2 værdi som er den bedste af de 5 kørsler. På dette grundlag er det valgt at benytte kørsel Fyn25-5 som grundlag for de efterfølgende kalibreringskørsler. Samtidig er det besluttet at teste dummy setupet fra Fyn25-4 i en senere kalibreringskørsel, idet denne kørsel giver en flot normeret FL-værdi, selvom RMS- og R^2-værdierne er lidt dårligere end for Fyn25-5.

6.2 Følsomhedsanalyse og invers modellering

I løbet af 1996 er der opbygget en kobling mellem MIKE SHE og PEST (modelværktøj til parameter-estimering baseret på et generelt "paraply program" som anvender invers modellering). På grund af problemer med at finde en tilstrækkelig robust stationær løsning til MIKE SHE (som kun er implementeret i MIKE SHE når det gælder anvendelse af SZ alene, dvs. uden kobling af SZ, OC og EX), har et forsøg på anvendelse af PEST til en følsomhedsanalyse og invers kalibrering indtil videre måttet udskydes. En sådan vil blive gennemført når problemet med stationær løsningsrutine til MIKE SHE bliver løst.

En invers kalibrering er interessant, idet et større antal minimumsvandføringer fra synkronmålinger i vandløb til delstrækninger kan indgå som supplement for lokaliteter med faste vandføringsmålestationer. En egentlig optimering af grundvandskomponenten vil derved kunne udføres, forud for dynamiske kalibreringer og følsomhedsanalyser.

I tabel 13 er vist resultater af en traditionel følsomhedsanalyse, hvor de enkelte parametre henholdsvis fordobles/halveres, med henblik på at vurdere overfor hvilke parametre modellen er mest følsom. Beregningerne er i lighed med øvrige kørsler startet i 1985 udfra hotstartdata fra Fyn25-6, som er kørt for hele perioden siden 1971. Resultaterne i tabel 13 viser, at de vigtigste parametre specielt i relation til RMS/R^2- værdier er:

- den horisontale ledningsevne i sandlag (kørsel Fyn25-7 og Fyn25-8)
- den vertikale ledningsevne i lerlag (kørsel Fyn25-9 og Fyn25-10)
- det frie magasintal (kørsel Fyn25-28 og Fyn25-29)
- tidskonstanten vedr. drænvandsafstrømning (kørsel Fyn25-32 og Fyn25-33)
- vandløbslækagefaktoren (kørsel Fyn25-15, Fyn25-16 og Fyn25-17)

Ud fra resultaterne i tabel 13 blev det besluttet først at ændre det frie magasintal til 0,25, den artesiske magasinkoefficient til 5 e-4, drænkonstanten til 0,5 e-7 og vandløbslækagefaktoren til 7 e-7. I den afsluttende kalibrering blev indledningsvist fokuseret på forskellige kombinationer af horisontal ledningsevne for sandlagene (3+5+7) og vertikale ledningsevner for lerlagene (2+4+6+8). Endelig blev der foretaget en analyse af betydningen af ledningsevner for det øverste lag (lag 1). En række parametre har således mere begrænset betydning, det gælder bl.a. linserne. Når kørsel Fyn25-18 og Fyn25-19 giver bedre RMS-værdier skyldes det primært, at den vertikale ledningsevne for leren er sat ned til 0,5 e-8 og først sekundært de ændrede parametre for linserne.

Kalibreringsidentifikation	Kørsels-nummer	RMS værdi middel for 7 lag: tryk-niveau 'fit'	FL -norm baseflow 'fit' *)	R^2-værdi mid. af 12 stationer 'fit' afstrømning
Udgangskørsel, fyn25-5 (som beskrevet i afsnit 4)	Fyn25-5	5.96	0.87	0.71
Hotstartkørsel, som fyn25-5, men for perioden 1971-96	Fyn25-6	5.90	1.00	0.68
Horisontal ledningsevne for sand sat ned til 0.5e-4	Fyn25-7	6.33	0.74	0.67
Horisontal ledningsevne for sand sat op til 2 e-4	Fyn25-8	5.46	1.79	0.70
Vertikal ledningsevne for ler sat ned til 0.5 e-8	Fyn25-9	5.35	0.95	0.68
Vertikal ledningsevne for ler sat op til 2 e-8	Fyn25-10	6.54	1.11	0.69
Vertikal ledningsevne for sand sat ned til 0.5 e-5	Fyn25-11	5.89	0.98	0.69
Vertikal ledningsevne for sand sat op til 2 e-5	Fyn25-12	5.89	0.98	0.69
Horisontal ledningsevne for ler sat ned til 1 e-6	Fyn25-13	5.93	0.96	0.69
Horisontal ledningseven for ler sat op til 1 e-6	Fyn25-14	5.83	1.02	0.69
Vandløbslækagefaktoren sat ned til 1 e-7	Fyn25-15	5.92	0.75	0.67
Vandløbslækagefaktoren sat ned til 3 e-7	Fyn25-16	5.90	0.88	0.68
Vandløbslækagefaktoren sat op til 7 e-7	Fyn25-17	5.89	1.04	0.69
Vertikal ledningsevne for sandlinser sat ned til 0.5 e-6, vertikal ledningsevne for ler sat ned til 0.5 e-8	Fyn25-18	5.35	0.95	0.68
Vertikal ledningsevne for sandlinser sat op til 2 e-6, vertikal ledningsevne for ler sat ned til 0.5 e-8	Fyn25-19	5.35	0.95	0.68
Vertikal ledningsevne for sandlinser sat ned til 0.5 e-6, vertikal ledningsevne for ler sat op til 2 e-8	Fyn25-20	6.53	1.10	0.69
Vertikal ledningsevne for sandlinser sat op til 2 e-6, vertikal ledningsevne for ler sat op til 2 e-8	Fyn25-21	6.54	1.10	0.69
Horisontal ledningsevne for sandlinser sat ned til 0.5 e-5, horisontal ledningsevne for ler sat ned til 1 e-6	Fyn25-22	5.93	0.96	0.69
Horisontal ledningsevne for sandlinser sat op til 2 e-5, horisontal ledningsevne for ler sat ned til 1 e-6	Fyn25-23	5.92	0.96	0.69
Horisontal ledningsevne for sandlinser sat ned til 0.5 e-5, horisontal ledningsevne for ler sat op til 4 e-6	Fyn25-24	5.84	1.02	0.69
Horisontal ledningsevne for sandlinser sat op til 2 e-5, horisontal ledningsevne for ler sat op til 4 e-6	Fyn25-25	5.83	1.02	0.69
Magasinkoefficient, Sartesisk sat ned til 0.0005	Fyn25-26	5.88	1.01	0.69
Magasinkoefficient, Sartesisk sat op til 0.00002	Fyn25-27	5.92	0.96	0.69
Frit magasintal sat ned til 0.15	Fyn25-28	5.89	0.92	0.65
Frit magasintal sat op til 0.25	Fyn25-29	5.90	1.07	0.71
Manningtal (vandløb) sat ned til M = 15	Fyn25-30	5.89	0.97	0.69
Manningtal (vandløb) sat op til M = 25	Fyn25-31	5.88	1.02	0.58
Dræn tidskonstant sat ned til 0.5 e-7	Fyn25-32	5.93	1.45	0.70
Dræn tidskonstant sat op til 2 e-7	Fyn25-33	5.87	1.02	0.59

Tabel 13. *Dynamisk finkalibrering og følsomhedsanalyse (RMS-værdier beregnet udfra simuleret trykniveau 1990 med middelværdi for 7 lag. FL- og R^2-værdier beregnet udfra 12 stationer for perioden 1988-90). Bemærk, at FL-værdier er normeret i forhold til Fyn25-6 *).*

I tabel 14 er vist RMS-, FL- og R2-værdier for Fyn25-6, Fyn25-8 og Fyn25-9:

Fyn25-6 horisontal ledningsevne for sand = 1e-4, vertikal ledningsevne for ler = 1e-8													
Station:	47.12	43.04	45.23	47.15	47.09	47.10	45.25	45.22	46.02	44.06	44.08	45.21	
FL-værdier	0.44	1.61	3.59	15.2	3808	2.84	2.78	6.77	25.0	2.09	7.09	0.37	
FL-norm.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	$FL-_{norm}$ middel = 1.00
R2-værdier:	0.59	0.64	0.74	0.66	0.79	0.68	0.71	0.38	0.82	0.53	0.75	0.91	R^2 middelværdi = 0.68
RMS:	5.75	7.91	6.07	6.49	5.23	6.29	3.53						RMS middelværdi = 5.90
(lag)	1	2	3	4	5	6	7						vægtet RMS middelværdi = 6.25
													middel lag 3+5+7 RMS værdi = 4.94
Fyn25-8 som Fyn 25-6 men horisontal ledningsevne for sand forøget til 2e-4													
FL-norm.	2.89	2.11	1.01	1.45	1.23	2.23	1.24	2.03	1.61	2.04	1.84	1.78	$FL-_{norm}$ middel = 1.79
R2-værdier:	0.59	0.72	0.77	0.79	0.74	0.63	0.68	0.46	0.81	0.43	0.81	0.91	R^2 middelværdi = 0.70
RMS:	5.97	7.52	5.42	5.63	4.80	5.36	3.13						RMS middelværdi = 5.46
(lag)	1	2	3	4	5	6	7						vægtet RMS middelværdi = 5.74
													middel lag 3+5+7 RMS værdi = 4.45
Fyn25-9 som Fyn 25-6 men vertikal ledningsevne for ler sænket til 0.5 e-8													
FL-norm.	0.90	0.81	1.14	0.94	0.97	1.01	0.88	0.88	1.00	0.88	0.99	1.01	$FL-_{norm}$ middel = 0.95
R2-værdier:	0.59	0.63	0.74	0.65	0.81	0.68	0.68	0.37	0.83	0.50	0.73	0.90	R^2 middelværdi = 0.68
RMS:	5.54	7.38	5.40	5.50	4.73	5.34	3.57						RMS middelværdi = 5.35
(lag)	1	2	3	4	5	6	7						vægtet RMS middelværdi = 5.62
													middel lag 3+5+7 RMS værdi = 4.57

Tabel 14. *Kalibreringsteststørrelser RMS-, FL- og R^2 -værdier for kørsel Fyn25-6, Fyn25-8 og Fyn25-9*

For samtlige kørsler er 3 R^2 værdier < 0.60, dvs. dette kriterium er netop opfyldt for alle 3 kørsler. Kravet til R^2 middelværdien > 0.65 er opfyldt for alle 3 kørsler. Krav til max. RMS værdi (< 8.0) er opfyldt for alle 3 kørsler. Kravet til vægtet RMS middelværdi (< 6.0) er opfyldt for de to sidste kørsler men ikke for Fyn25-6. Kravet til RMS middelværdi af 7 lag (<5.5) er ligeledes kun opfyldt for de sidste to kørsler.

Det fremgår af tabel 14 at de normaliserede FL-værdier er mindst for kørsel Fyn25-9 (og dermed et udtryk for det bedste fit for denne kørsel). Der er altså ikke en overensstemmelse mellem det kalibreringssignal R^2-værdien udtrykker og det signal FL-værdier giver. Dette er essentielt, idet en optimering af parametre og en validering af hydrologiske modeller ofte har været baseret på R^2-værdier (Refsgaard, 1997). Det er således problematisk at tillægge teststørrelser som f.eks R^2 en overordnet betydning, men på den anden side nødvendigt at benytte kvantitative mål for at kunne gennemføre en kalibrering af en så distribueret og regional model som DK-modellen. Derfor er valget af teststørrelse vigtig. Anvendelsen af forskellige teststørrelser som f.eks RMS-, R^2 -og FL-værdier stiller samtidig flere krav til modellens performance, ved nærmere at karakterisere delprocesser i kredsløbet, f.eks baseflow, drænafstrømning, overfladisk afstrømning, grundvandsdannelse etc.

I praksis betyder dette, at man skal vælge hvorvidt man foretrækker at vægte en optimering i forhold til den samlede afstrømningshydrograf (og i særdeleshed middel- og maksimumsafstrømninger), eller hvorvidt man ønsker en optimering i forhold til minimumsafstrømninger og dermed grundvandsafstrømningen. I de følgende kalibreringskørsler tages udgangspunkt i FL-værdien.

Kalibreringsidentifikation: Supplerende kalibreringer udfra Fyn25-8	Kørselsnummer	RMS værdi middel for 7 lag	$FL_{norm.}$ værdi middel af 12 stationer	R^2-værdi middel af 12 stationer
Udgangskørsel	Fyn25-8	5.46	1.79	0.70
Vertikal ledningsevne for ler = 0.3 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4	Fyn25-34	5.11	2.61	0.68
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4	Fyn25-35	5.18	2.53	0.69
Vertikal ledningsevne for ler = 0.7 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4	Fyn25-36	5.31	2.51	0.70
Vertikal ledningsevne for ler = 0.3 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 3 e-4	Fyn25-37	5.07	4.11	0.67
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 3 e-4	Fyn25-38	5.08	4.01	0.68
Vertikal ledningsevne for ler = 0.7 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 3 e-4	Fyn25-39	5.18	3.99	0.69
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4, og sand lag 1= 0.3 e-4	Fyn25-40	5.18	1.55	0.68
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4, og sand lag 1= 0.5 e-4	Fyn25-41	5.18	1.82	0.68
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4, og sand lag 1= 0.7 e-4	Fyn25-42	5.18	2.09	0.69
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, og for sand lag 1 = 0.5 e-7 horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4,	Fyn25-43	5.18	2.59	0.69
Vertikal ledningsevne for ler = 0.5 e-8, og for sand lag 1 = 2 e-7 horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4,	Fyn25-44	5.18	2.51	0.69

Tabel 15. *Supplerende kalibreringskørsler på baggrund af optimering udfra RMS-, FL- og R^2-værdier. (Fyn25-8)*

Kørslerne Fyn25-34 og Fyn25-38 giver udfra en samlet vurdering på basis af RMS-værdier og R^2-værdier det bedste fit i forhold til såvel trykniveau som den samlede afstrømningshydrograf i perioden 1988-90. Fyn25-34 giver en R^2-middelværdi på 0,68, en vægtet RMS middelværdi på 5,39 og en middel RMS-værdi for lag 3, 5 og 7 på 4,40. Til sammenligning giver Fyn25-38 en R^2-middelværdi på 0,68, en vægtet RMS-værdi på 5,38 og en RMS-middelværdi for lag 3, 5 og 7 på 4,29. Ialt 10 ud af 12 vandføringsstationer opfylder kravet på > 0,60 til R^2-værdien. Udfra en optimering af R^2 og RMS er denne kørsel dermed mest optimal. Imidlertid er FL_{norm} værdien for kørsel Fyn25-38 hele 4,01. Minimumsafstrømningen i vandløb er dermed dårligt simuleret, selvom RMS-værdien for trykniveau ved kørslerne er de hidtil bedste (Fyn25-34 = 5,11 og Fyn25-38 = 5,18). Konklusionen på denne test er derfor at en nærmere optimering af parameterværdier ikke giver en entydig forbed-

ring for samtlige teststørrelser, idet RMS- og R^2-værdier blev forbedrede samtidig med at FL_{-norm} værdien blev dårligere. Konklusionen må derfor være, at det i forbindelse med den endelige kalibrering og udvælgelse af optimalt parameterværdisæt tilstræbes, at samtlige teststørrelser holdes indenfor de opstillede kalibreringsmål, og at beslutninger om mest optimale parameterværdier desuden træffes på baggrund af en kvalitativ bedømmelse af modellens beskrivelse af afstrømningens tidslige variationer, trykniveauefordelinger etc.

Den afsluttende kalibreringsrunde tager herefter udgangspunkt i Fyn25-9. Parametervær-dierne for dette setup kan resumeres jf. tabel 16:

Parameterværdier Fyn25-9	Smeltevandssand, lag 3+5+7	Moræneler, lag 1	Moræneler, lag 2+4+6+8	Sandlinser i ler, lag 1+2+4+6+8
Horisontal hydraulisk ledningsevne	1 e-4 m/s	1 e-4 m/s	2 e-6 m/s	1 e-5 m/s
Vertikal hydraulisk ledningsevne	1 e-5 m/s	2 e-6 m/s	0.5 e-8 m/s	1 e-6 m/s
Frit magasintal	0.20	0.20	0.20	0.20
Artesisk magasinkoefficient	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Tabel 16. *Parameterværdier for Fyn25-9*

I de sidste kalibreringer er det i første omgang valgt at justere den artesiske magasinkoef-ficient ned til 0,00005, det frie magasintal ned til 0,18 for alle kørsler (Fyn25-45), hvorimod den horisontale hydrauliske ledningsevne for moræneleren finkalibreres ved antagelse om værdier på henholdsvis: 0,3 e-4 m/s (Fyn25-46), 0,2 e-4 m/s (Fyn25-47), 0,1 e-4 m/s (Fyn25-48) og 0,05 e-4 m/s (Fyn25-49). Endelig er den herefter mest optimale kalibre-ringskørsel (fortsat Fyn25-9) af disse fire benyttet til en test af parameterværdierne for sandlinser i ler, dels ved at antage at disse ikke har en betydning (dvs. en kørsel uden sandlinser: Fyn25-50) og dels ved at antage at de hydrauliske ledningsevner for sandlinser svarer til værdierne for smeltevandssand i lagene (Fyn25-51). To yderligere kørsler er til sidst afviklet med parametre som Fyn25-9, dels med ændrede dummy betingelser jf. Fyn25-4 (Fyn25-52) samt dels en kørsel med dummy-koefficient = 1,0 (Fyn25-53).

Resultaterne af finkalibreringen er vist i Tabel 17.

Kørsel Fyn25_09 har pæne værdier for såvel RMS, FL og R^2. Kørsel Fyn25-45 har en me-get fin FL-norm. værdi, hvorimod R^2 værdien for denne kørsel en mindre god. Endelig giver kørsel Fyn25-51 med ændret dummy-koefficienter pæne værdier for såvel RMS, FL og R^2.

En visuel vurdering af afstrømningshydrografen for kørsel Fyn25-45 i forhold til Fyn25-09/Fyn25-51 tyder dog på at Fyn25-45 er lidt dårligere når det gælder en korrekt beskrivel-se af retentionsperioderne, specielt i forårs-sommerperioden. Det kan tyde på at enten de ændrede magasintal for denne kørsel, eller den ændrede hydrauliske ledningsevne i det

øverste lerlag ikke er helt optimale. Fyn25-09 og Fyn25-51 beskriver begge retentionsperioderne pænt.

Kalibreringsidentifikation: Finkalibrering	Kørsels-nummer	RMS værdi middel for 7 lag	FL-norm. værdi middel af 12 stationer	R^2-værdi middel af 12 stationer
Udgangspunkt for finkalibrering horisontal ledningsevne for sand = 2 e-4	Fyn25-09	5.35	0.95	0.68
Horisontal ledningsevne for lag 1 = 0.3 e-4	Fyn25-45	5.36	0.75	0.63
Horisontal ledningsevne for lag 1 = 0.2 e-4	Fyn25-46	5.36	0.79	0.62
Horisontal ledningsevne for lag 1 = 0.1 e-4	Fyn25-47	5.37	0.85	0.61
Horisontal ledningsevne for lag 1 = 0.05 e-4	Fyn25-48	5.37	0.89	0.61
Som Fyn25_09, men uden sandlinser i ler	Fyn25-49	5.36	1.01	0.68
Som Fyn25_09, men med ledningsevner for sandlinser = ledningsevner for sandlag	Fyn25-50	5.33	1.04	0.68
Som Fyn25_09, men med ændrede dummy som Fyn25-04	Fyn25-51	5.37	0.91	0.67
Som Fyn25-09, men med ændret dummy-koefficient = 1.00	Fyn25-52	5.38	1.00	0.61

Tabel 17. *Resultater af finkalibrering af ledningsevner i moræneler (lag 1), sandlinser og dummy-komponent*

Med henblik på modelverifikationen er samtlige 3 kørsler dog udvalgt til en verifikation ved kørsel udfra den samlede periode 1971-96 og sammenligning af trykniveau og afstrømning i vandløb for perioden 1991-96, samt udvalgte pejletidsserier for perioden 1971-96:

- Verifikationskørsel Fyn25-53: udfra Fyn25-9
- Verifikationskørsel Fyn25-54: udfra Fyn25-45
- Verifikationskørsel Fyn25-55: udfra Fyn25-51

6.3 Verifikation af modelopstillingen

Målet med verifikationen af modelopstillingen er at teste kalibreringsresultatet udfra 1988-90 i forhold til data der ikke har været anvendt fra perioden. Perioden 1991-96 er udvalgt til testen. Herved kan det dels vurderes hvorvidt modellen er i stand til at simulere de meget ekstreme forhold, dels i forbindelse med ekstrem stor nedbør i løbet af 1994-95 og dels i forbindelse med ekstrem lille nedbør i den følgende perioden (vinteren 1995-96 og sommeren 1996).

Endelig kan det vurderes, hvorvidt modellen i løbet af perioden 1991-96 fortsat er stabil og repræsentativ i forhold til målinger, eller hvorvidt modellen efterhånden får afvigelser som er stigende i forhold til kalibreringsperioden. Dermed kan modellens robusthed vurderes og

evnen til at lave pålidelige prognoser kan vurderes nærmere. I verifikationen inddrages desuden pejleserier til en test af modellens evne til at simulere fluktuationer i grundvandsspejlet. Evnen til at simulere trykniveauet vurderes imidlertid ikke nærmere under verifikationen, udover at der foretages en beregning af RMS-værdien i forhold til 1996.

Ved at opgøre testværdier for 1988-90 men med opstart af verifikationskørsler i 1971 i stedet for 1988 kan det vurderes hvilken følsomhed modellerne har i forhold til startværdier.

Resultater af verificeringen er i det følgende vurderet v.h.a. RMS-værdier, R^2-værdier og FL-værdier. Desuden indgår en visuel vurdering af simuleringer i forhold til observationer for perioden 1991-96.

6.3.1 Verifikation vurderet udfra RMS-værdier

De 3 verifikationskørsler giver RMS-værdier som vist i tabel 18.

RMS værdi	Fyn25-53	Fyn25-54	Fyn25-55
1990	5.42	5.41	5.42
1996	5.47	5.49	5.47

Tabel 18. *RMS værdier beregnet udfra simulerede trykniveauer for 1990 og 1996 i forhold til observerede trykniveauer 1970-96 ved tre verifikationskørsler*

Det fremgår af tabel 18 at de tre verifikationskørsler stort set giver RMS-værdier i samme størrelsesorden i forhold til såvel 1990 som 1996 simuleringsresultater. Samtlige værdier opfylder iøvrigt kravet om at RMS-værdien skal være < 5.5. I tabel 19 er vist beregnede RMS-værdier for hvert enkelt beregningslag i Fynsmodellen.

Beregningslag	Antal observationer	Fyn25-53 RMS-1990	Fyn25-54 RMS-1990	Fyn25-55 RMS-1990
1 Øvre ler+sand	184	5.50	5.29	5.34
2 Ler	261	7.83	7.78	7.81
3 Sand	437	5.40	5.46	5.41
4 Ler	303	5.41	5.48	5.46
5 Sand	204	4.79	4.81	4.84
6 Ler	70	5.36	5.45	5.43
7 Kalk	51	3.63	3.60	3.65
Vægtet middel	krav= < 6.0	5.69	5.69	5.69
Middel af 7 lag	krav= < 5.5	5.42	5.41	5.42
Middel af 3/5/7	krav= < 5.0	4.61	4.62	4.63
Max	krav= < 8.0	7.83	7.78	7.81

Tabel 19. *Beregnede RMS-værdier for de enkelte beregningslag i Fynsmodellen ved tre verifikationskørsler*

Vurderet udfra ovenstående må det fortsat konkluderes at alle 3 kørsler dels overholder de opstillede krav for kalibreringen. Kørslen Fyn25-54 giver lidt bedre RMS-værdier i de øverste 2 lag i modellen og i kalken, men en nærmere vurdering af hvilken en af de 3 kørsler der er den bedste, må afhænge af vurderingen af R^2- og FL-værdier i det følgende.

6.3.2 Verifikation udfra R^2-værdier

Middelværdier af R^2 -værdier bør tages med et vist forbehold, idet dårlige fit vejer meget tungere end gode fit, idet skalaen ikke er lineær.

Resultatet af verifikationskørslerne mht. R^2-værdier er vist i tabel 20.

Periode	Fyn25-53	Fyn25-54	Fyn25-55
1988-90	0.63	0.67	0.57
1991-96	0.67	0.69	0.63

Tabel 20. *Beregnede gennemsnitlige R^2-værdier for tre verifikationskørsler for 1988-90, 1991-95 og 1996*

Det fremgår af tabel 20 at kørsel Fyn25-54 for kalibreringsperioden opfylder kravet på >0.65 til R^2-værdien. For perioden 1991-95 er denne kørsel ligeledes mest optimal, ligesom kravværdien er opfyldt. Fyn25-53 opfylder ligeledes kravværdien for 1991-96. Kørsel Fyn25-55 opfylder ikke kravværdier, hverken for perioden 1988-90 eller for perioden 1991-96. Når kravværdien tidligere blev opfyldt for perioden 1988-90, udfra hotstart for 1985 skyldes det antageligt betydningen af startværdier, hvor verifikationskørslen med opstart i 1971 er mindre afhængig af startværdier i forhold til kalibreringskørslen udfra hotstartdata fra Fyn25-06 for 1985.

I tabel 21 er vist beregnede R^2-værdier for samtlige 12 faste vandføringsstationer for perioden 1988-90, 1991-96 og det ekstremt tørre år 1996.

R^2-værdierne for verifikationsperioden 1991-96 opfylder de opstillede krav om >0.65 for middelværdien og at max. 3 stationer må have en værdi under 0.60 for kørsel: Fyn25-54. Ingen af de øvrige kørsler opfylder begge opstillede krav. Kongshøj å, Stor å og Stokkebæk er de 3 vandløb hvor kravværdien >0.60 ikke er opfyldt for Fyn25-54. Samlet vurderet er Fyn25-54 den kørsel der giver det bedste fit, m.h.t. R^2-værdier når alle stationer tages i betragtning såvel for 1991-96 som for 1996.

R^2-værdier Station:	Fyn 25-53 1988-90	Fyn 25-54 1988-90	Fyn 25-55 1988-90	Fyn 25-53 1991-96	Fyn 25-54 1991-96	Fyn 25-55 1991-96	Fyn 25-53 1996	Fyn 25-54 1996	Fyn 25-55 1996
47.12 Kongshøj å (53,6 km^2)	0.57	0.41	0.58	0.56	0.45	0.59	0.61	0.57	0.65
43.04 Storå (136,8 km^2)	0.66	0.71	0.55	0.40	0.53	0.25	-0.23	0.36	-0.44
45.23 Lunde å (35,7 km^2)	0.66	0.65	0.63	0.70	0.68	0.69	-3.62	-2.25	-3.49
47.15 Hundstrup å (57,8 km^2)	0.45	0.53	0.29	0.71	0.63	0.66	0.11	0.45	0.09
47.09 Vejstrup å (40,0 km^2)	0.74	0.81	0.78	0.86	0.86	0.87	0.71	0.70	0.77
47.10 Stokkebæk (53,3 km^2)	0.63	0.52	0.67	0.69	0.58	0.74	0.70	0.48	0.69
45.25 Vejrup å (41,6 km^2)	0.61	0.63	0.52	0.78	0.77	0.75	-1.25	-0.38	-1.58
45.22 Stavids å (78,0 km^2)	0.43	0.54	0.30	0.55	0.66	0.47	-1.60	0.05	-1.89
46.02 Brende å (102,4 km^2)	0.77	0.89	0.77	0.72	0.85	0.73	-0.32	0.29	-0.26
46.04 Hårby å (78,5 km^2)	0.55	0.78	0.45	0.49	0.71	0.37	-0.61	0.41	-0.60
44.08 Vindinge å (127,6 km^2)	0.66	0.66	0.59	0.72	0.67	0.67	-1.34	-0.36	-1.53
45.21 Odense å (485,9 km^2)	0.81	0.87	0.74	0.83	0.86	0.79	-0.08	0.50	-0.31
Middelværdi	0.63	0.67	0.57	0.67	0.69	0.63	-0.58	0.07	-0.66
antal st. > 0.60	8	8	5	8	9	8	3	1	3
mindste R^2-værdi	0.45	0.41	0.29	0.40	0.45	0.25	-3.62	-2.25	-3.49

Tabel 21. *Beregnede R^2-værdier for 1988-90, 1991-96 og 1996 for 12 faste vandføringsstationer ved 3 verifikationskørsler*

De beregnede R^2-værdier for det ekstreme år 1996 er klart dårligere end de øvrige år i kalibreringsperioden. Således havde Fyn25-54 R^2-værdier for de enkelte år på: 0.61 (1991), 0.53 (1992), 0.59 (1993), 0.59 (1994), 0.76 (1995) og 0.07 (1996). Når værdierne bliver så relativt dårlige for 1996 skyldes det ikke at modellen har problemer med at simulere vandføringerne korrekt, men at teststørrelsen er afhængig af kvadratet på den summerede differens mellem den observerede vandføring pr. dag og middelvandføringen. For år hvor denne forskel er relativ lille (som tilfældet var for 1996 på grund af ekstrem tørke med begrænsede maksimumsafstrømninger), bliver nævneren i brøken som fratrækkes 1 i R^2-beregningen et lille tal, hvorved brøken bliver et stort tal, så R^2 evt. ender med at blive et negativt tal for mange stationer. Modsat 1996 var året 1995 et vådt år med stor afstrømning specielt i efteråret. R^2-værdien for dette år blev således også relativt pænt = 0.76.

6.3.3 Vurdering af verifikationsperioden udfra FL-, FH- og volumenværdier

Det er i det følgende valgt ikke at normalisere eller midle FL-værdierne, men at præsentere de beregnede størrelser for hver enkelt vandføringsstation, idet teststørrelsen er meget følsom overfor minimumsvandføringens størrelse for hver enkelt station, og idet året 1996 desuden var ekstremt tørt.

Nedenfor er vist FL-værdier, FH-værdier og massebalance (volumen) for verifikationskørslerne for perioden 1991-96. For samtlige teststørrelser gælder at det bedste fit er opnået ved den mindste numeriske fit. Et perfekt fit giver værdien 0.

Kørsel/periode	47.12	43.04	45.23	47.15	47.09	47.10	45.25	45.22	46.02	46.04	44.08	45.21
Fyn25-53 FL 91-96	1.46	10.2	15 e3	337	86e3	16.5	6.79	54	97	2.71	54	2.64
Fyn25-54	2.19	9.4	2 e3	229	99e3	20.3	6.63	54	123	2.55	46	2.42
Fyn25-55	1.09	3.8	15 e3	273	50e3	5.9	4.47	14	81	1.24	22	1.61
Fyn25-53 FH-værdi	0.91	0.70	0.66	0.47	0.25	0.57	0.23	0.78	0.39	0.47	0.52	0.20
Fyn25-54	1.13	0.55	0.71	0.61	0.25	0.78	0.24	0.58	0.21	0.27	0.61	0.17
Fyn25-55	0.84	0.87	0.70	0.55	0.23	0.49	0.27	0.92	0.38	0.57	0.61	0.25
Fyn25-53 Volumen	0.27	-0.39	-0.11	-0.32	-0.07	0.21	0.04	-0.46	-0.19	-0.33	-0.29	-0.13
Fyn25-54	0.28	-0.36	-0.11	-0.32	-0.09	0.22	0.06	-0.40	-0.18	-0.31	-0.28	-0.11
Fyn25-55	0.26	-0.39	-0.10	-0.34	-0.09	0.21	0.04	-0.45	-0.20	-0.33	-0.30	-0.13

Tabel 22. *Beregnede FL-, FH- og volumenbalance værdier*

Ser man på volumenbalancen fremgår det, at Fyn25-54 rammer bedst ved 7 ud af de 12 stationer, og dermed giver det bedste volumenfit. FH-værdien (fit af max. afstrømning) er bedst for 5 af stationerne for denne kørsel (her er Fyn25-55 bedst for 3 stationer og Fyn25-53 bedst for 4 stationer). Når det gælder FL-værdien er Fyn25-55 bedst ved 10 af de 12 stationer, mens Fyn25-54 er bedst ved 2 stationer. Et tilsvarende billede fås for 1996.

I Appendix 1 er vist plot af simuleret og observeret daglig vandføring for Fyn25-53, Fyn25-54 og Fyn25-55. Det fremgår af Appendix 1, at Fyn25-54 giver et bedre fit end de øvrige kørsler af den samlede afstrømningshydrograf, herunder retentionsperioder. Fyn25-55 giver dog lidt bedre simuleringer af minimumsvandføringen for nogen af stationerne. Alle kørsler har relativ god overensstemmelse ved et flertal af stationerne.

Samlet vurderes det, at Fyn25-54 giver det bedste fit, når såvel RMS-, R^2 - og FL-, FH-værdier samt volumenbalance tages i betragtning.

De ekstreme forhold med stor nettonedbør i 1994-95 og meget lille nettonedbør i 1996 beskrives godt af Fyn25-54 for St. 43.04 Storå, St. 44.08 Vindinge å, St. 45.21 Odense å, St. 45.22 Vejrup å, St. 46.04 Hårby å og St. 47.15 Hundstrup å. Disse 6 stationer svarer til et samlet oplandsareal på 964,4 km^2, eller ca, 75 % af det samlede areal til de 12 målestationer der indgik i kalibreringen (areal for 12 stationer ialt = 1291 km^2). Det vil sige at der er opnået gode simuleringer af vandløbsafstrømningen for 3/4 dele af det samlede opland, hvorimod 1/4 af oplandene er forskellige årsager giver et mindre godt fit.

Ved St. 45.23 Lunde å simuleres vandføringen generelt for lavt i sommerperioden (årsminimumsværdier er dog i rimelig overensstemmelse). Ved St. 45.25 Vejrup å simuleres vandføringen for lavt, men i tørre år er der god overensstemmelse (f.eks. 1989, 1992 og 1996). For 1995 ses stor forskel mellem simuleret og observeret vandføring i sommer-

perioden. Ved St. 46.02 Brende å simuleres en minimumsvandføring som er større end den observerede. Ved St. 47.09 Vejstrup å simuleres afstrømningen for højt i sommerperioden, mens maksimumsafstrømningen simuleres lidt for lavt. Ved St. 47.10 Stokkebæk simuleres vandføringen lidt for højt i sommerperioden, hvorimod maksimumsafstrømningen simuleres for lavt. Ved St. 47.12 Kongshøj å simuleres minimumsvandføringen flot, hvorimod maksimumsafstrømningen simuleres alt for lavt.

De 3 stationer hvor der er opnået et mindre godt fit i såvel minimums- som øvrige vandføringer har et opland på (46.02, 47.09 og 47.10) ialt 195,7 km^2, svarende til 15 % af det samlede opland til de 12 stationer. Modellen giver dermed en god beskrivelse af minimumsafstrømningen for 85 % af det samlede opland.

Man kan konstatere at der generelt simuleres minimumsvandføringer som er lidt større end de observerede værdier. For enkelte stationer simuleres desuden for små maksimumsafstrømninger. Førstnævnte forhold kan evt. forklares ved, at mange de mindre vandindvindinger under 25.000 m^3/år ikke er implementeret i modellen, og at påvirkningen af disse dermed heller ikke indgår. I det omfang disse indvindinger, eller de øvrige indvindinger der er med i modellen, tilmed har væsentlige sæsonvariationer (med størst indvinding i de tørre år/årstider), kan de godt have en betydning for forløbet af minimumsafstrømningen, specielt for oplande med relativt sandede jorde og et stort vandingsforbrug. Sidstnævnte forhold kan skyldes at størrelsen af vådbundsarealet evt. er undervurderet for enkelte oplande.

I Appendix 2 er vist simulerede og observerede grundvandspotentialer ved 7 pejlestationer på baggrund af Fyn25-54. Det fremgår at modellen for boring 137.46 (Otterup nord for Odense), 137.2B (Messinge nord for Kerteminde), 155.184 (Måre sydøst for Nyborg), 127.11 (Roerslev nordøst for Odense) og 165.34 (Vejstrup nordvest for Svendborg) giver en god beskrivelse af såvel fluktuationer indenfor året og langperiodiske fluktuationer. Modellen er imidlertid ikke i stand til at give en præcis beskrivelse af niveauet idet der for enkelte stationer er afvigelser på indtil ca. 10 m på niveauet og for de øvrige stationer er afvigelser på 1-5 meter. Disse afvigelser skyldes til dels at boringer ikke ligger centralt i griddet (1x1 km grid) og illustrerer de fundne RMS-værdier på i størrelsesordenen ca. 5 meter.

Pejleboring 154.101 (Strandby nordvest for Fåborg) er placeret kun 200 m fra den nærmeste indvindingsboring og tyder iøvrigt på stor sæsonvariation i oppumpingen (som ikke er repræsenteret i modellen). Pejleboring 136.34 (Morud vest for Odense) er en vandværksboring og der er yderligere 2 vandværksboringer 50 og 125 m fra boringen. Dette kan formentlig forklare den lidt afvigende tendens mellem simuleret og observeret trykniveau.

Den simulerede afstrømning er ca. 10 % mindre end den observerede. Dette kan evt. forklares ved at de benyttede korrektionsfaktorer for nedbøren er baseret på ældre skøn (Allerup & Madsen, 1979). Nyere skøn tyder på at nedbøren skal korrigeres op med ca. 20 % (imod det ældre skøn på ca. 16 %) og at det specielt er korrektionen af fast nedbør (sne) som er undervurderet. Antages det at nedbøren er undervurderet med ca. 4 % i DK-

modellen, vil dette svare til en underestimering af inputtet på ca. 30 mm/år. Ialt ca. 80 % af nettonedbøren vil afstrømme til vandløb (evt. via grundvand). En mere korrekt vurdering af nedbørsinputtet, med de nye skøn, vil dermed kunne forklare den forskel i afstrømningsvolumenet som der er konstateret.

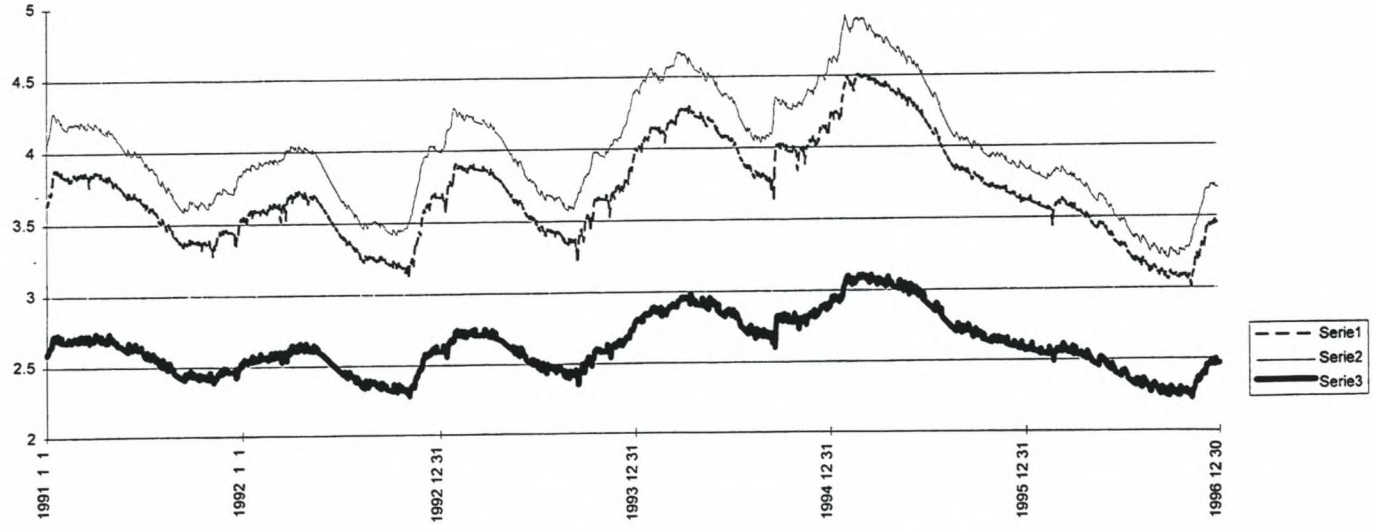
Sammenligner man vandbalancen for de 3 verifikationskørsler fås følgende hovedtal for modellag 1:

Kørsel	Nedsivning fra rodzone (mm/år)	Afstrømning til vandløb (mm/år)	Afstrømning til modelrand (mm/år)
Fyn25-53			
1971-90	205	145	12,8
1989-96	235	180	16,3
1996	117	77	8,5
Fyn25-54			
1971-90	243	179	15,8
1989-96	287	226	21,2
1996	140	86	9,7
Fyn25-55			
1971-90	205	146	11,4
1989-96	241	185	15,6
1996	117	67	5,6

Tabel 23. *Simuleret vandbalance for modellag 1.*

For perioden 1989-96 har modellen simuleret en grundvandsafstrømning til havet på ca. 16 mm/år for Fyn25-54 og ca. 14 mm/år for Fyn25-55. Dette er mindre end der blev simuleret med den tidligere kørsel Fyn97-12 på ca. 21 mm/år. Verifikationskørsel Fyn25-55 giver dermed en grundvandsafstrømning til havet som er ca. 10-20 % mindre end Fyn25-54.

I figur 25 er vist simuleret baseflowafstrømning for de 3 verifikationskørsler for 1974-96



Figur 25. *Simuleret baseflowafstrømning 1974-96 for 3 verifikationskørsler*

7. SUB-MODELLER

Der er opstillet en model i en maskevidde på 500x500 m for Østfyn området. Der er foretaget følgende:

- detaljering af topografien udfra KMS's 50 m grid
- detaljering af vandløbssetup ved at inkludere flere vandløb og tilløb
- vurdering af randbetingelser på baggrund af Fynsmodellen
- geologiske lag, linser og dummy er uændrede i forhold til Fynsmodellen

SUB-modellen har dels været anvendt i forbindelse med test af forskellige udviklinger af Fynsmodellen dels været benyttet til simuleringer af grundvandsdannelse (se Figur 26).

SUB-modellen for Østfyn har iøvrigt været anvendt i forbindelse med en afprøvning af zoneringsmetoder (GEUS, 1997), hvor der også indgik partikelbanesimuleringer. Disse simuleringer er baseret på Fyn97-12 versionen, altså ikke den seneste kalibrerede og verificerede model.

Simuleringerne viser at en finere maskevidde på 500x500 m i forhold til 1x1 km ikke giver væsentligt ændrede resultater, selvom f.eks grundvandsdannelse og partikelbanebeskrivelser bliver mere detaljerede. Ved en ændring fra en skala på 1x1 km til 500x500 m er der derfor kun et meget begrænset behov for rekalibrering af modellen, hvorimod ændringen af modeltopografi og vandløbssystem kræver et ekstra ressourceforbrug.

Sammenligningen af simuleret daglig vandføring ved to stationer med henholdsvis submodel og Fynsmodel viser at Fynsmodellen giver den bedste beskrivelse af afstrømningen. Der er derfor behov for en rekalibrering af sub-modellen i forbindelse med ændret skala. Sub-modellen giver for stor grundvandsdannelse/minimumsafstrømning i forhold til den regionale Fynsmodel. Den dårligere beskrivelse kan desuden skyldes randbetingelsesproblemer i opstrøms del af de to vandløbsoplande.

Figur 26. *Topografi og simuleret grundvandsdannelse for 1x1 km og 500x500 m beregningsnet samt simuleret vandføring ved st. 44.08 Vindinge å ved 0.5 x 0.5 km sammenlignet med 1 x 1 km.*

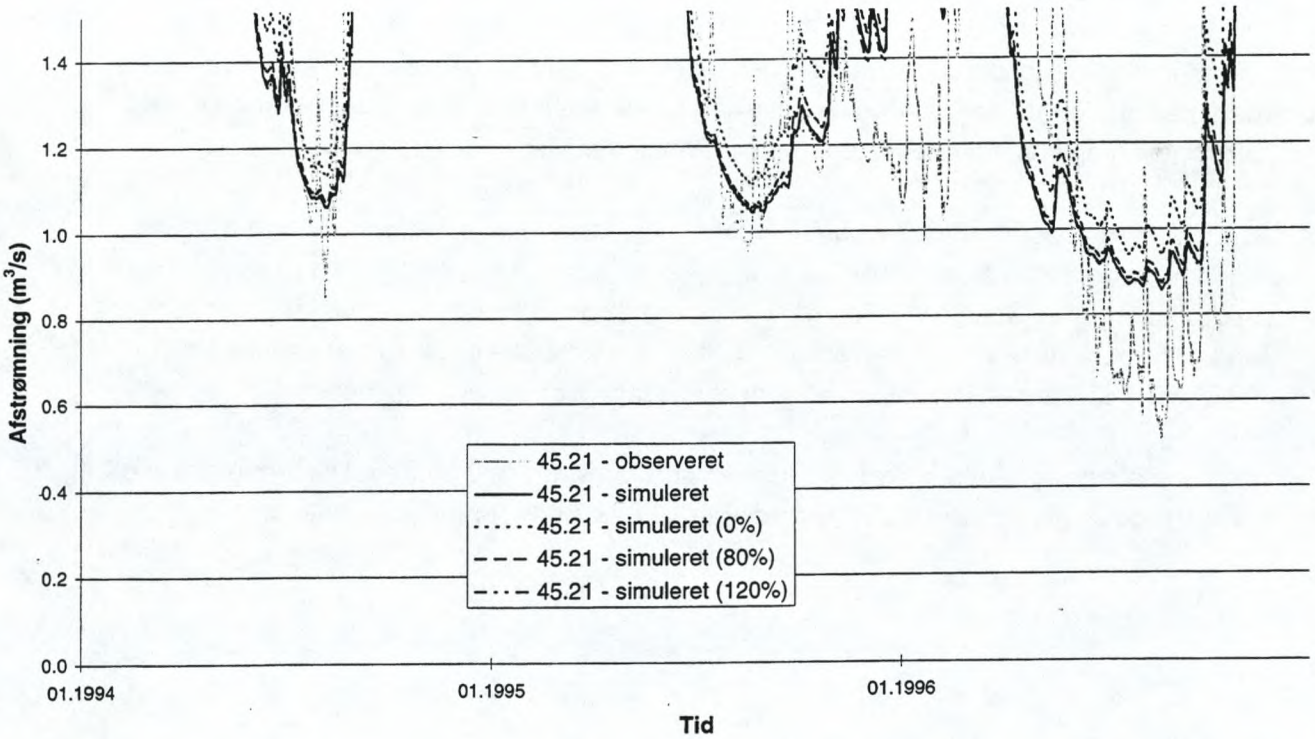
8. SIMULERINGS SCENARIER

Der er foretaget følgende simuleringskørsler:

- simulering uden oppumpning 1971-96
- simulering med 80 % af oppumpningen 1971- 96
- simulering med 120 % af oppumpningen 1971- 96
- simulering med klimainput for 1996 i en 20 årig periode
- simulering med input for 1972-76 i en 20 årig periode
- partikelbane simulering for udvalgte større vandværker

8.1 Påvirkning af vandløbsafstrømning som følge af ændret oppumpning

Påvirkningen af vandløbsafstrømningen som følge af ændret oppumpning er eksemplificeret for de 4 simuleringskørsler i figur 27.



Figur 27. *Påvirkning af afstrømning ved station 45.21 Odense å Kratholm ved ændret vandindvinding*

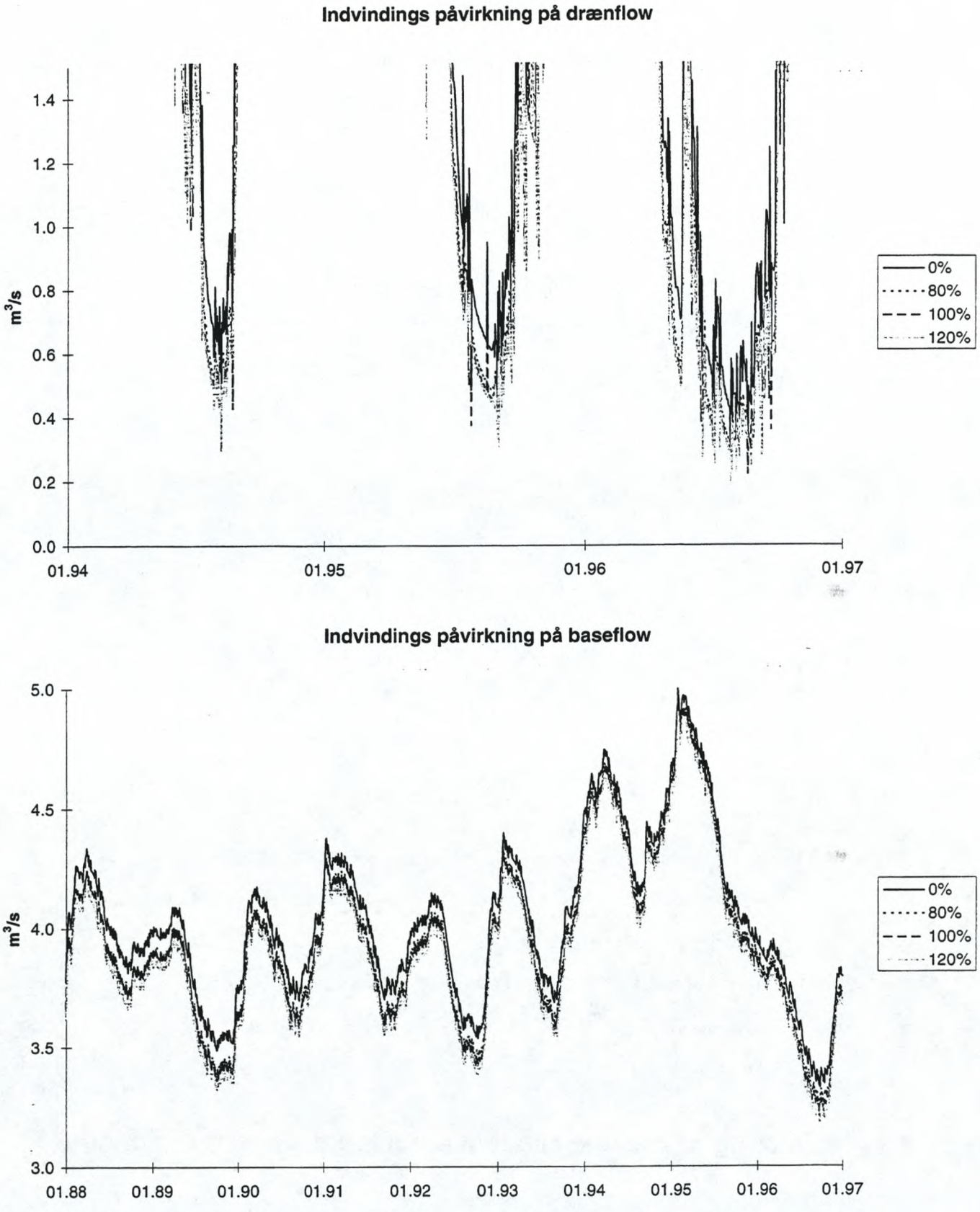
I figur 27 er focuseret på minimumsafstrømningen. Det fremgår, at ændringen i minimumsvandføring fra en situation uden oppumpning (0 %) til nuværende oppumpning er i størrelsesordenen 100 l/s. Den nuværende oppumpning reducerer vandføringen med omkring 10 % i forhold til en upåvirket minimumsafstrømning på ca. 1000 l/s. Det fremgår af figuren at simuleringen af minimumsvandføringen for 1996 overvurderer afstrømningen betragteligt, hvorimod beskrivelsen af minimumsafstrømning for 1994-95 er langt bedre.

For perioden 1991-96 var oppumpningen ca. 16 mm/år for Fyn. Simuleringerne viser at reduktionen i den samlede vandløbsafstrømning var på ca. 12 mm/år, svarende til en påvirkningsfaktor på 0.75 i forhold til den samlede vandløbsafstrømning. Den resterende del af påvirkningen må her tolkes primært at påvirke afstrømningen til modelranden. Selvom påvirkningen (som ventet) således primært sker i forhold til vandløbsafstrømningen, er det imidlertid væsentligt at vurdere hvilke led i vandbalancen som påvirkes mest, samt om påvirkningen har en sæsonvariation.

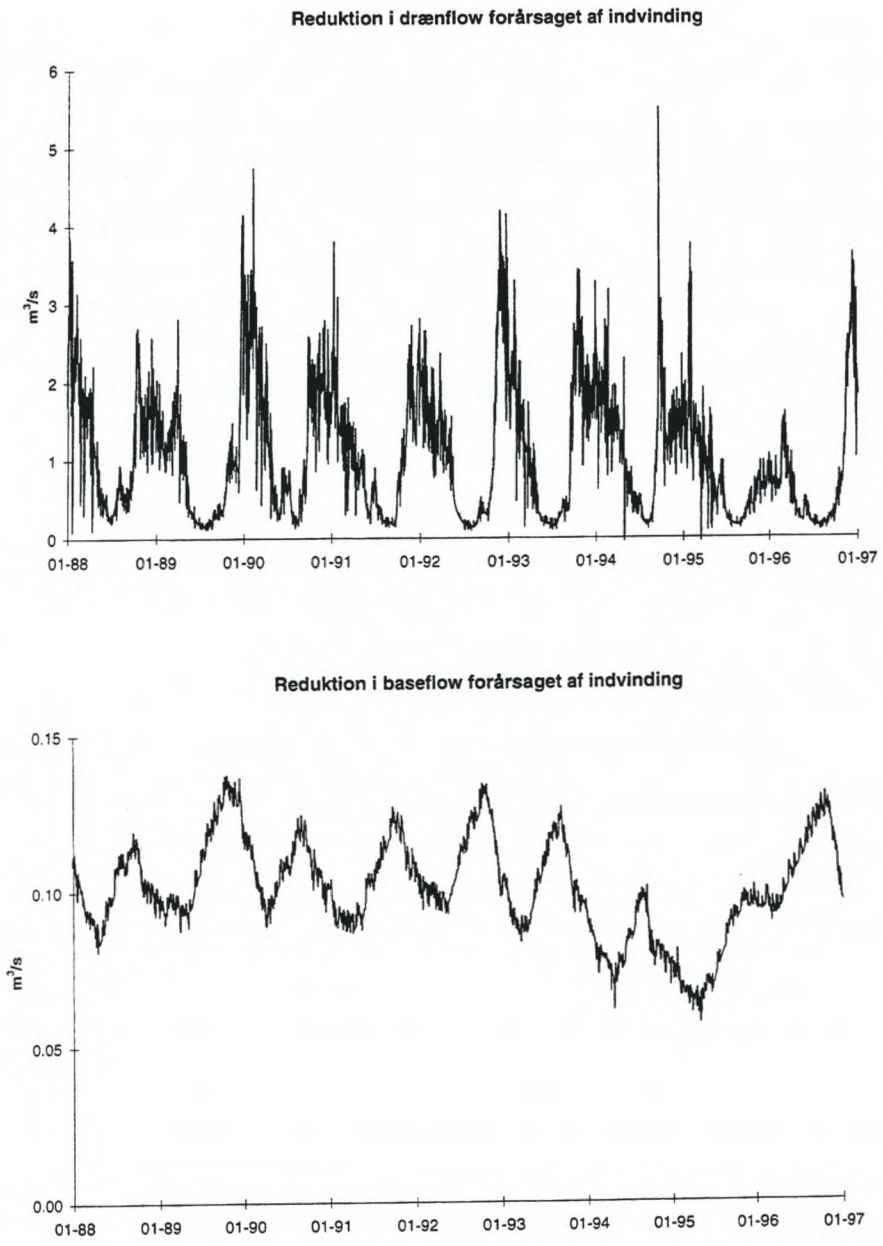
I figur 28 og 29 er den samlede påvirkning af såvel drænvandsafstrømning og baseflow afstrømning vist for Fyn som helhed for de 4 simuleringer. Af denne figur fremgår det at påvirkningen i minimumssituationen er ca. 150 l/s for både baseflow og drænvandsafstrømningen. Den samlede reduktion i minimumsafstrømningen bliver dermed ca. 300 l/s, ud af en minimumsafstrømning for kørslen uden oppumpning på ca. 3700 l/s, altså en samlet påvirkning på ca. 8 %. Den samlede minimumsafstrømning (fra baseflow og drænvandsafstrømning) udgør ca. 39 mm/år. Reduktionen i minimumsafstrømning bliver dermed 8 % af 39 mm/år eller ca. 3 mm/år, svarende til en påvirkningsfaktor i forhold til minimumsafstrømningen på ca. 0.15 - 0.20. Da den samlede påvirkningsfaktor for vandløbsafstrømningen var 0.75 må den største del af påvirkningen dermed forekomme i vinterperioden med stor drænvandsafstrømning. Dette er illustreret i figur 29 hvor reduktionen i drænafstrømning og baseflow ved nuværende indvinding er vist.

Reduktionen i baseflow fra en situation uden indvinding til en situation med den nuværende indvinding ses at falde i 1994-95 som følge af faldende vandindvinding men også stor nedbør. Der er en årstidsvariation således at reduktionen i baseflow er størst i sommerperioden og det tidlige efterår før nedsivning til dels kompenserer for reduktionen. I 1996-97 fortsætter reduktionen i baseflow, afbrudt af en stagnation i få vintermåneder.

Til sammenligning hermed sker reduktionen i drænafstrømning primært i vintermånederne. Her er reduktionen typisk i størrelsesordenen 1000-2000 l/s for Fyn som helhed.



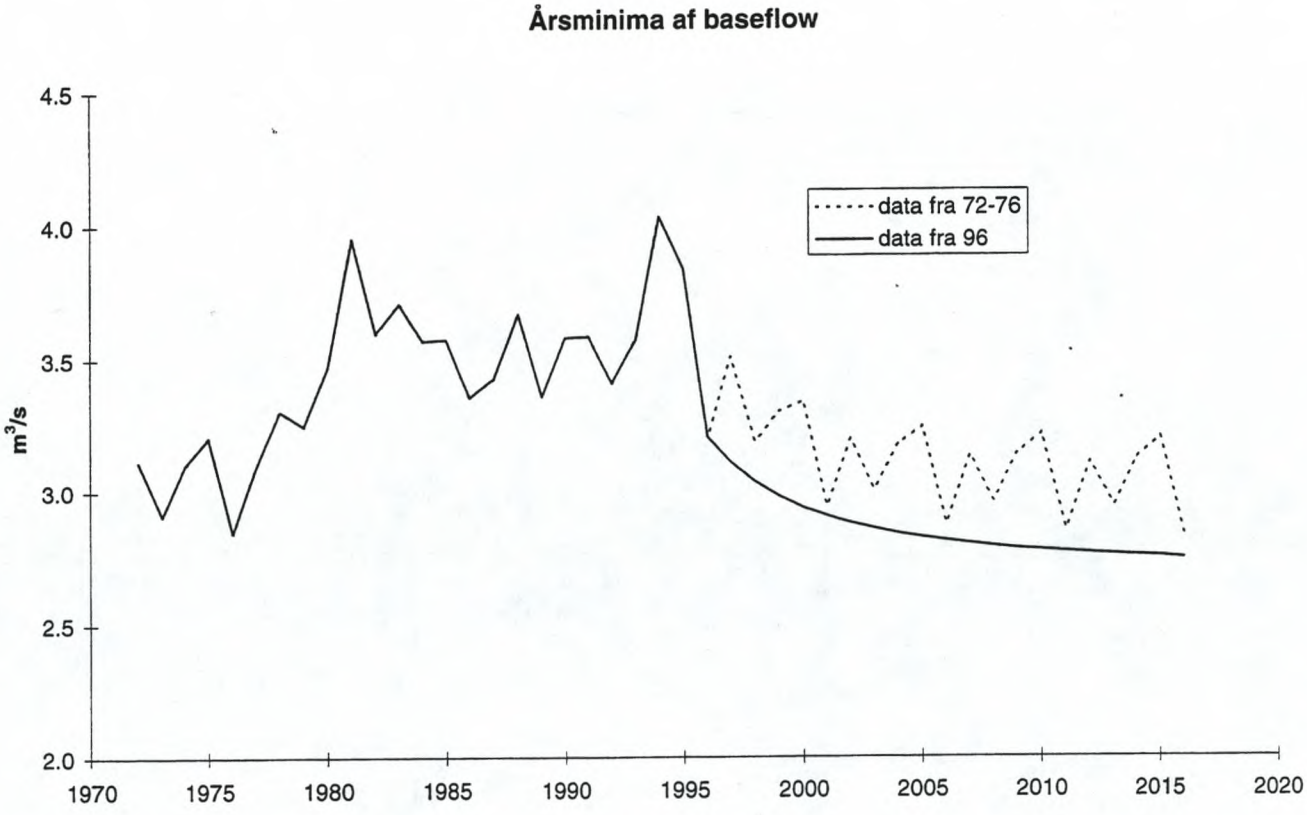
Figur 28. *Reduktion i drænvandsafstrømning og baseflow som følge af ændret oppumpning (nuværende oppumpning sammenlignet med 0 %, 80 % og 120 % af nuværende)*



Figur 29. *Reduktion i drænvandsafstrømning og baseflow for Fyn som helhed (nuværende oppumpning sammenlignet med 0 % oppumpning)*

8.2 Simulering af konsekvenser af ændrede nedbørsforhold

Betydningen af ændrede nedbørsforhold er søgt illustreret på baggrund af en fremskrivning af 1996 situationen i 20 år og 1972-76 situationen ligeledes i 20 år. De beregnede årsminima tidsserier er vist i figur 30. Situationen 1996 gentaget i en 20 årig perioden vil repræsentere en ekstrem kritisk hændelse, hvorimod en gentagelse af 1972-76 i en 20-årig periode er mere realistisk (formentlig ikke så langt fra tørkeperioden 1880-1990).



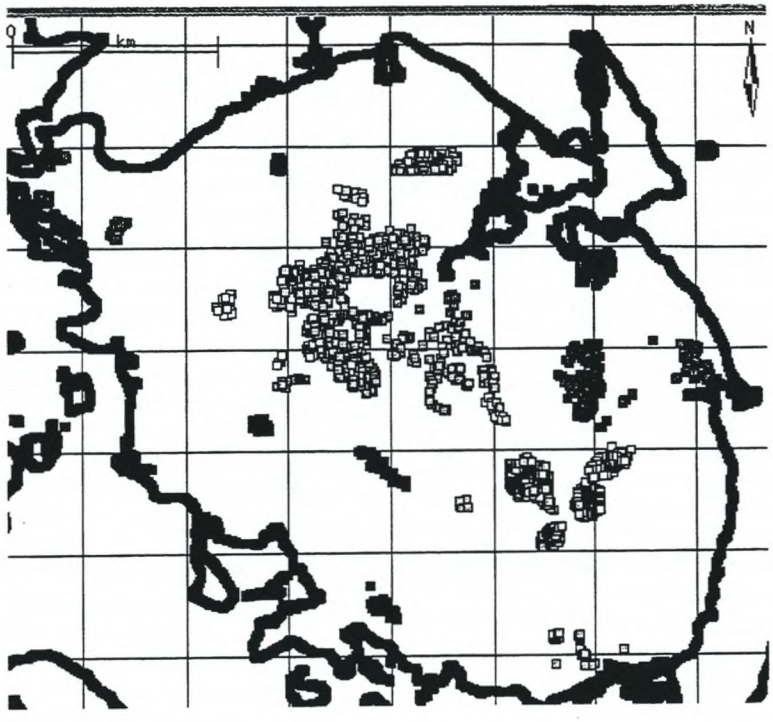
Figur 30. *Sammenligning af grundvandsafstrømning til vandløb for 1996 nettonedbør gentaget i 20 år og 1972-76 nettonedbør gentaget i 20 år.*

8.3 Eksempel på vurdering af infiltrationsoplande til større vandværker

Der er på baggrund af en tidligere kørsel (Fyn25-6) gennemført en partikelbaneberegning af infiltrationsområder til udvalgte større vandværker. Beregningen er gennemført for en 500-årig periode hvor der indgik en vurdering af partikelbaner fra terræn til ialt 43 større vandværker. Det blev i beregningen antaget at porøsiteten udgjorde 10 %. Denne antagelse begrundes med at der formentlig vil være foretrukne strømningsveje som betyder at en der i stedet for en porøsitet på 0.25-0.30, beregningsmæssigt antages en mindre porøsitet og dermed en hurtigere transport fra terræn til indvindingsboringer.

Ved beregningerne blev det vurderet at infiltrationsområdet til samtlige vandværker der indgik i analysen efter ca. 500 år kunne opgøres til ialt ca. 370 km^2, eller ca. 10-15 % af det

samlede areal for Fyn. I figur 31 er vist infiltrationsområder til partikler som havner i de 43 vandværkers kildepladser.



Figur 31. *Simulerede infiltrationsområder for 43 større vandværker på Fyn*

Simuleringerne viste desuden, at transporttiden fra de respektive infiltrationsområder til kildepladserne var meget forskellige. Kun ca. 16 % af partiklerne havde således nået frem til indvindingsboringerne i løbet af 25 år. Efter 50 år havde ialt 30 % af partiklerne nået en indvindingsboring. Efter 100 år havde 46 % af partiklerne nået en boring og efter 200 år var dette tal 68 %. Ialt 15 % af partiklerne/infiltrationsområderne har transporttider til indvindingerne på mere end 400 år. Disse transporttider er dog usikre som følge af et manglende kendskab til porøsiteten, men illustrere dog at en nærmere vurdering af infiltrationsområder og transporttider kan gennemføres for større vandværker.

9. DISKUSSION OG VURDERING

9.1 Diskussion af resultater

Brugen af distribuerede hydrologiske modeller med henblik på simulering af grundvandsstrømning for regionale grundvandsmagasiner og i særdeleshed en validering af sådanne i forhold til 'in-situ' målinger i felten eller laboratorie analyser, er problematisk og omdiskuteret blandt fagfolk på grund af den store variabilitet i rum og tid af de hydrologiske parametre (Ganoulis, 1994).

DK-modellen er en deterministisk hydrologisk model hvor heterogeniteten er søgt repræsenteret på overordnet niveau men ikke i detaljer. Den konceptuelle model er udtryk for en væsentlig forenkling af variationerne i geologien. Der er således ikke skelnet mellem forskellige typer moræneler (bortset fra en skelnen i forhold til øvre 3.5 m og dybere ler) og heller ikke skelnet mellem moræneler og f.eks smeltevandsler, som ofte kan have en lavere permeabilitet i forhold til opsprækket moræneler. Det er vurderet at parametre der karakteriserer vandudveksling mellem grundvand og vandløb samt drænforhold ikke nødvendigvis skal repræsenteres med distribuerede værdier. Ledningsevner i sandlag er desuden antaget konstante. Modellen er således primært designet til overordnede vurderinger som gælder større områder (bestående af områder som dækker et større antal beregningsgrids, og bør derfor ikke unden videre anvendes til mere detaljerede formål.

Modelskalaen på 1x1 km betyder, at der i modellen skal repræsenteres effektive værdier for hydraulisk ledningsevne, uden at f.eks de enkelte sprækker eller sandvinduer repræsenteres.

Anvendelse af modellen til vurderinger af stoftransport hvor heterogeniteter i en mindre skala ofte vil have afgørende betydning kan derfor ikke umiddelbart foretages med den opstillede DK model. Sådanne vurderinger vil i konkrete områder forudsætte en yderligere detaljering af den koceptuelle model. Anvendelse af modellen til vurdering af grundvandsressourcens beskyttelse hvor sprækker og sandvinduer kan være afgørende for beskyttelsen kan ligeledes ikke umiddelbart foretages for konkrete områder. Modellen kan dog give væsentlige input og randbetingelser til mere detaljerede modeller. Endelig kan modellen ikke anvendes til vurdering af partikelbaner for mindre vandværker, selvom modellen kan give et kvalificeret skøn af f.eks grundvandsdannelsen.

Observationsboringerne er ikke nødvendigvis repræsentative for det simulerede trykniveau i modellens knudepunkter, ligesom at der ved kalibreringen udfra trykniveaudata er set bort fra tidslige variationer. Det er derfor ikke overraskende, at der i forbindelse med kalibreringen er betydelige afvigelser mellem simuleret og observeret trykniveau. Når det alligevel er

muligt at anvende trykniveaudata fra borearkivet for 1970-96 skyldes det, at en minimering af de akkumulerede teststørrelser (RMS-værdier) på trods af store afvigelser på enkeltværdier, alligevel udgør et brugbart instrument til kvantificering af afvigelser mellem simuleret og observeret trykniveau. Håndtering af oppumpning med årlige værdier er yderligere en væsentlig forenkling.

Ved DK-modellen er kalibrering og verificering baseret på dynamiske simuleringer, idet der ikke idag foreligger en stationær løsningsrutine til MIKE-SHE som omfatter såvel SZ som OC og EX modulerne. Selvom der evt. havde forelagt en sådan løsningsrutine er det iøvrigt et åbent spørgsmål, om dynamikken i grundvandsdannelsen vil kunne beskrives tilstrækkeligt tilfredsstillende på stationær basis. De forsøg der har været gjort med DK-modellen har vist, at såvel en detaljeret distribuering af nettonedbøren, en anvendelse af daglige værdier, en yderligere detaljering af vandløbssetupet og en fysisk baseret styring af fordelingen mellem OC og SZ på baggrund af topografisk variation og byområder er nødvendig, såfremt modellens evne til at simulere de tidslige variationer, f.eks i afstrømning fra grundvand til vandløb, skal forbedres. Man kan således ikke beskrive et dynamisk strømningssystem (som grundvandssystemet og dets udveksling med overfladevand) ved hjælp af en stationær grundvandsmodel.

Resultaterne af modelkalibrering og verificering viser at DK-modellen er i stand til at give en god beskrivelse af fluktuationerne i grundvandets trykniveau og af vandløbsafstrømningen på daglig basis, specielt for oplande større end 50 km^2. Ved et mindretal af vandføringsmålestationerne gav modellen afvigende resultater i forhold til målinger, som dog formentlig vil kunne elimineres ved en fortsat kalibrering.

9.2 Modellens begrænsninger

Et kritikpunkt som har været fremført af adskillige forfattere imod distribuerede modeller omhandler de mange parameterværider, som kan modificeres under kalibreringsprocessen. Beven (1989, 96) vurderer, at modeller der normalt påstås at være fysisk disbribuerede, i virkeligheden er 'lumped conceptual models', blot bestående af langt flere parametre. Et centralt problem er således, at der er en stor risiko for overparametrisering (Refsgaard, 1997). Grayson et. al. (1995) lægger i denne forbindelse vægt på vigtigheden af, at evaluere distribuerede modellers 'opførsel' i stedet for integrerede værdier så som simuleringen af afstrømning, i forbindelse med vurderingen af performance af distribuerede parameter modeller.

Som beskrevet af Rosso (1994):

"In principle, spatially distributed models can accept experimental data at each grid element or calculation node. In practical, because of heterogenity of parameter values, differences between measurement scales and model grid scales, and experimental constraints, the specification of parameter values is very difficult. These constraints also apply to the

validation of distributed model predictions by using measurements of internal system response. Conventional strategies for distributed model validation typically rely on the comparison of simulated model variables to observed data for specific points representing either external boundaries or intermediate locations on the model grid... Traditional validation based on comparying simulated with observed outflows at the basin outlet still remains the only attainable option in many practical cases. However, this method is poorly consistent with spatially distributed modelling..."

Som påpeget af Refsgaard (1997) kan kalibrering af en distribueret model derved blive en 'never-ending story', idet der altid er muligheder for forbedringer af modellen. I denne sammenhæng, skal det bemærkes, at jo flere parameter værdier som justeres gennem kalibrering, desto flere felt data bør inkluderes og desto mere arbejde kræves af modelløren.

Det er interessant, at Refsgaard (1997) for Karup å kan konstatere, at ved en maskevidde over 1 km bliver nogle vigtige processer skala afhængige. Simuleringerne med Fynsmodellen udført tidligere i projektet med en 2x2 km model, gav et tilsvarende resultat. Brugen af dummy-koefficienten fremgår af nærværende simuleringer at have relativ stor betydning for resultaterne ved en skala på 1x1 km. Hermed være ikke ment at skala forhold ikke har betydning ved en mindre skala. Dette kan tyde på, at skalaforholdene allerede ved 1x1 km har stor betydning og dummy derfor er nødvendig ved 1x1 km, specielt i områder med stor topografisk og geologisk variation som for Fyn, til forskel fra Karup å, hvor grundvandsmagasin systemet er mere regulært, ligesom grundvandsstrømningsforholdene er tættere på mere stationære forhold.

I DK-modellen er det valgt at vurdere modellen i forhold til såvel trykniveauer i pejlestationer som vandføringer ved udvalgte faste vandføringsmålestationer. Dertil kommer, at der også er intentioner om at lade aldersdatering af grundvandet spille en central rolle i forbindelse med fremtidige valideringer af DK-modellen (testes nærmere for Vestsjælland i løbet af 1998).

I DK-modellen er en række forhold forenklet. Det er valgt at:

- fastholde parametre for sand og ler og derved undgå overparametrisering, selvom en evt. yderligere distribuering kunne give forbedrede 'fit'.
- verificere kalibrerede parametersæt for en periode som ikke indgik i modelkalibreringen
- gennemføre verifikationen for 3 forskellige parametersæt
- udskyde en yderligere distribuering af parameterværdier til opstilling af evt. submodeller eller en invers kalibrering

9.3 Forslag til forbedringer

DK-modellen er i den nuværende opsætning et godt værktøj til at foretage simuleringer af grundvandsressourcens størrelse og fordeling. Det opnåede kalibreringsresultat vil dog yderligere kunne forbedres for Fynsmodellen som helhed eller indenfor de enkelte oplande, ved en yderligere forbedring af inputdata eller ved en detaljering af parameterværdier.

En række muligheder foreligger:

- opstilling af UZ, incl. forbedrede snesmeltnings- og fordampningsrutiner
- invers kalibrering af de 3-5 vigtigste parameterværdier
- distribuering af hydrauliske ledningsevner, dræn tidskonstant og ålægkage
- forbedrede topografiske input (et forbedret 50 m griddatasæt fra KMS)
- revurdering af vegetationsafhængige korrektioner af potentiel fordampning
- inkludering af usikkerhedsestimater på såvel klimainput som ressource output

10. KONKLUSIONER

Der er opstillet og kalibreret en regional 3D MIKE SHE strømningsmodel for Fyn bestående af 7 beregningslag og en diskretisering med en 1x1 km maskevidde. Modelopstillingen består af MIKE SHE komponenterne 'overfladisk afstrømning og kanalstrømning' (OC), 'vandudveksling mellem grundvandsmagasiner og vandløb' (EX) og 'grundvandsstrømning i mættet zone' (SZ). Som input til modellen er opstillet et simpelt rodzonemodul, der på baggrund af nedbør og fordampning i et landsdækkende 40x40 km klimagrid beregner aktuel fordampning og nedsivning fra rodzonen. Det valgte koncept, som ikke indeholder umættet zone, har vist sig funktionelt i forbindelse simulering af det hydrologiske kredsløb, beskrivelse af grundvandsdannelsens tidslige variation og regionale fordeling, samt til beskrivelse af vandløbsafstrømning på daglig basis.

Modelopstilling og kalibrering har vist, at en nærmere styring af fordelingen af nettonedbøren mellem OC og SZ er nødvendig, med en skala som den der anvendes for Fyn. Tidligere modelstudier ved Karup har vist, at der ved en maskevidde på 2 km i stedet for 1 km optræder sådanne skalaeffekter, som der skal tages højde for såfremt f.eks. afstrømningen i vandløb skal beskrives korrekt. For Fyn viser resultaterne af DK-modellen at sådanne skalaeffekter også skal tages i regning ved en maskevidde på 1 km, formentlig på grund af den store heterogenitet i såvel topografi som geologi, i forhold til Midt- og Vestjylland (Karup). For Fyn blev det vurderet, at den topografiske variation indenfor hvert beregningsgrid samt andelen af byområder med befæstede arealer var nøgleparametre for fordelligen af nettonedbøren mellem OC og SZ.

Et andet væsentligt resultat af modelopstillingen for Fyn viser, at det ligeledes af hensyn til en korrekt fordeling af nettonedbør mellem OC og SZ er af afgørende betydning at vandløb repræsenteres så detaljeret som muligt i setupet, dvs. mindre tilløb inkluderes, samt at det er nødvendigt at bearbejde modeltopografien grundigt for at sikre, at der ikke af modeltekniske årsager introduceres lavninger i topografien, som ikke afdrænes korrekt til vandløb. En nærmere redigering af vandløbssystem og -koter og eliminering af afløbsløse dræn gav således stærkt forbedrede resultater.

Et væsentligt forbedret kalibreringsresultat blev opnået efter distribueringen af nettonedbøren i forhold til skov, vådbundsområder og åbent land (sidstnævnte blev yderligere distribueret i forhold til jordart ler/sand samt terrænkote).

Ved opstilling af fysisk baserede distribuerede hydrologiske modeller, som DK-modellen for Fyn, er der en risiko for overparametrisering. Ved opstilling og kalibrering af Fynsmodellen er dette søgt undgået ved at anvende konstante hydrauliske ledningsevner for ler og sand og undlade en yderligere distribuering. I modsætning hertil er der for kalken anvendt en ledningsevnefordeling, som er baseret på målinger af

specifik ydelse. En lignende forenkling er tilstræbt også for øvrige parameterværdier bl.a. dræn-tidskonstanten, å-lækagefaktoren, magasintal etc. På trods af denne forenkling har modellen for såvel kalibrerings- som simuleringsperioden givet resultater som opfylder de opstillede krav til afvigelser i trykniveau (RMS-værdier) og afvigelser i forhold til målte daglige vandføringer (R^2-værdier). Følsomhedsanalyser har vist at denne parametriseringsstrategi er fordelagtig i forbindelse med modelkalibrering, idet der er identificeret ca. 5-7 vigtige parametre: den horisontale hydrauliske ledningsevne for sandlag, den vertikale hydrauliske ledningsevne for lerlag, tidskonstanten for drænvandsafstrømning, ålækagefaktoren, magasintallet og den hydrauliske ledningsevne for de øverste 3-5 meter af morænelen (som er opsprækket).

En test af forskellige parametriseringer af sandvinduer i moræneleren og områder med glacialtektonisk deformerede lag gav ikke forbedret kalibreringsresultat. Det er dog for tidligt at konkludere endeligt desangående.

Udfra mere end 50 kalibreringskørsler er udvalgt 3 parametersæt, som er anvendt til verificering af modelopstillingen for perioden 1991-96. For den ekstremt våde periode 1994-95 og det ekstremt tørre år 1996 gav modellen en god overensstemmelse med observeret daglig vandføring for 3/4 af det samlede opland til de 12 stationer der indgik. For 85 % af oplandet var minimumsafstrømningen tilmed godt beskrevet med modellen.

Modellens beskrivelse af fluktuationer i grundvandsspejlet i forhold til pejleserier fra det nationale pejlestationsnet er ligeledes god, såvel når det gælder årstidsvariation, som når det gælder langperiodiske fluktuationer. I områder med intens vandindvinding forudsætter en korrekt modellering dog mere tidsligt detaljerede inputdata end de årlige oppumpninger som er anvendt i DK-modellen for Fyn.

Det må derfor konkluderes, at modellen er anvendelig til simuleringer af grundvandsdannelsens regionale og tidsmæssige variation og til vurderinger af påvirkninger af vandføringen i vandløb eller oplande som følge af vandindvinding, når dette sker for oplande på større end ca. 50 km^2, hvorimod modellen ikke umiddelbart kan anvendes til vurdering af detailforhold indenfor mindre områder. Modellen er anvendelig til generering af randbetingelser og indledende vurdering af parameterværdier for submodeller opstillet for f.eks områder med særlige drikkevandsinteresser, indvindingsoplande for vandværker og/eller detailmodeller for grundvandsmoniteringsområder.

Anvendelse af modellen til vurdering af stoftransport, partikelbaner for mindre vandværker eller grundvandets beskyttelsesforhold, hvor heterogeniteter i en mindre skala kan have afgørende betydning, kan ikke umiddelbart foretages med den opstillede DK-model. Modellen kan dog give kvalificeret skøn af grundvandsdannelsens størrelse til konkrete magasiner som mindre vandværker indvinder fra eller danne udgangspunkt for opstilling af mere detaljerede modeller, bl.a. vurdering af randbetingelser.

11. REFERENCER

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a): An introduction to the Europeen Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of af Physically-Based, Distributed Modelling System. J. Hydrol. 87, 45-59.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b): An introduction to the Europeen Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: Structure of af Physically-Based, Distributed Modelling System. J. Hydrol. 87, 61-77.

Andersen, J. (1996): Application of GIS in hydrological models. MSc. Thesis, Department of Geography, University of Copenhagen.

Allerup, P. and Madsen, H. (1979): Accuracy of Point Precipitation Measurements. Klimatologiske Meddelelser No. 5, Danmarks Meteorologiske Institut.

Andersen, L.J. (1973): Cyclogram techniques for geological mapping of borehole data. Danmarks Geologiske Undersøgelse. 3. række, nr. 41, 25 pp.

Beven, K. (1989): Changing ideas in hydrology - the case of physically based models. Journal of Hydrology 105, 157-172.

Beven,, K.J. (1996): A discussion of distributed hydrological modelling. In: Abbott, M.B. , Refsgaard, J.C. (Ed.), Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic. pp. 255-278.

Carlsson, L. & G. Gufstafson (1984): Provpumpning som geohydrologisk undersöknings-metodik. Byggforskningsradet, Chalmers Tekniske Högskola, Göteborg. R41:1984.

DGU (1992): Variationer i grundvandsspejlet 1950-90. Revideret udgave. DGU data-dokumentation nr. 2.

DHI (1997): MIKE SHE User Guide and Technical Reference Manual. Edition 1.1. June 1997.

Fyns Amt (1997, a): De fynske vandløb. Tema: Ferskvand. Vandkvalitet og biologiske forhold. Naturgivne og kulturskabte forhold. Forureningskilder. Årsager og udvikling 1976-96. Maj 1997.

Fyns Amt (1997, b): Kortlægning af grundvandsressourcen. Forslag til udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser. Maj 1997.

Fyns Amt (1995): Bestemmelse af medianminimum i Fyns Amt, 1995. Hedeselskabet.

Ganoulis, J. G. (1994): Engineering Risk Analysis of Water Pollution. Probabilities and Fuzzy Sets. VCH forlag.

Grayson, R.B., Blöschl, G., Moore, I.D. (1995): Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C. In: Singh, V.P. (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, pp. 669-696.

Green, I.R.A. and Stephenson, D. (1986): Criteria for comparison of single event models. Hydrol. Sci. J. 31(3), 395-411.

Henriksen, H. J. and Knudby, C. (1997): Application of MIKE SHE for the Isle of Funen. DHI 2nd User Software Conference, June 1997.

Kinzelbach, W. (1986): Groundwater Modelling. An Introduction with Sample Programs in BASIC. Elsevier.

Klemes, V. (1986): Operational Testing of Hydrological Simulation. Hydr. Sci. J. 31(1), 13-24.

Mikkelsen, H. E. og Olesen, J.E. (1991): Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning. Beretning nr. S 2157 - 1991.

Nielsson, B., R.C. Sidle, K.E. Klint, C.E. Bøgild and K. Broholm (1997): Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogenous till and sand aquifer system". (submitted for Journal of Hydrology)

Plauborg, F. og Olesen, J.E. (1991): Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingsstyring i landbruget. Beretning nr. S 2113. Afdelingen for Jordbrugsmeteorologi.

Refsgaard, J.C. (1997): Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198, pp 69-97. Elsevier.

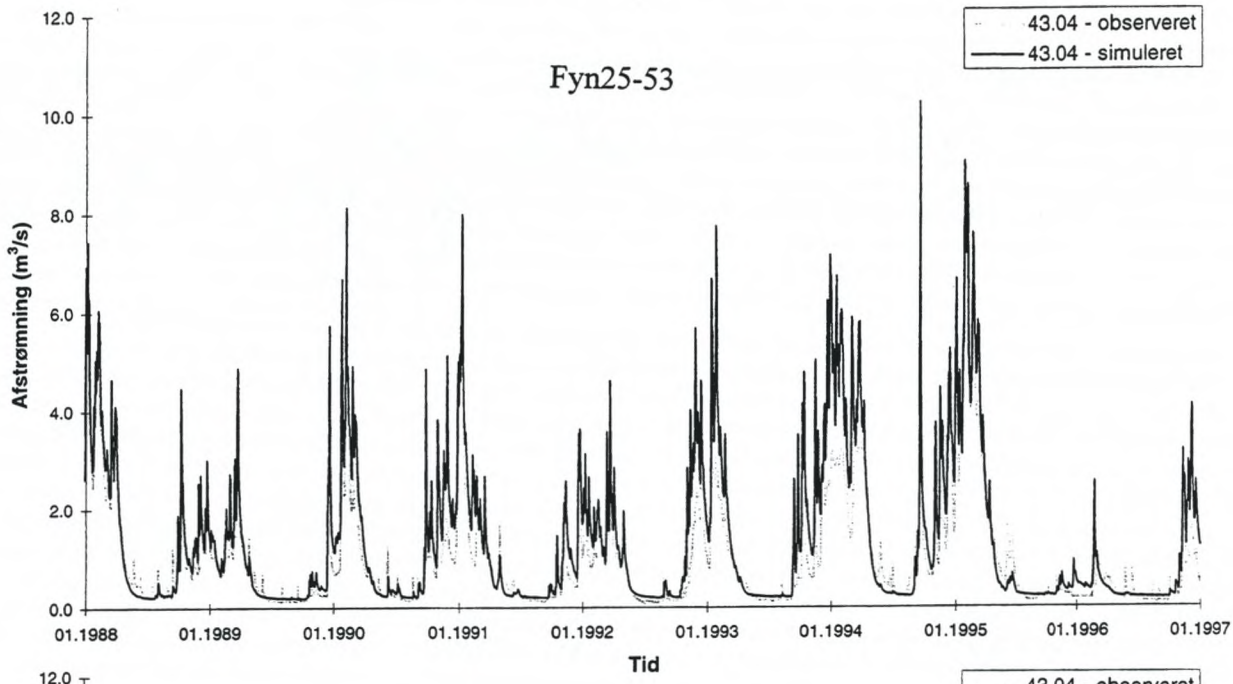
Refsgaard, J.C. & Knudsen, J. (1996): Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. Water Resources Research. 32(7), 2189-2202.

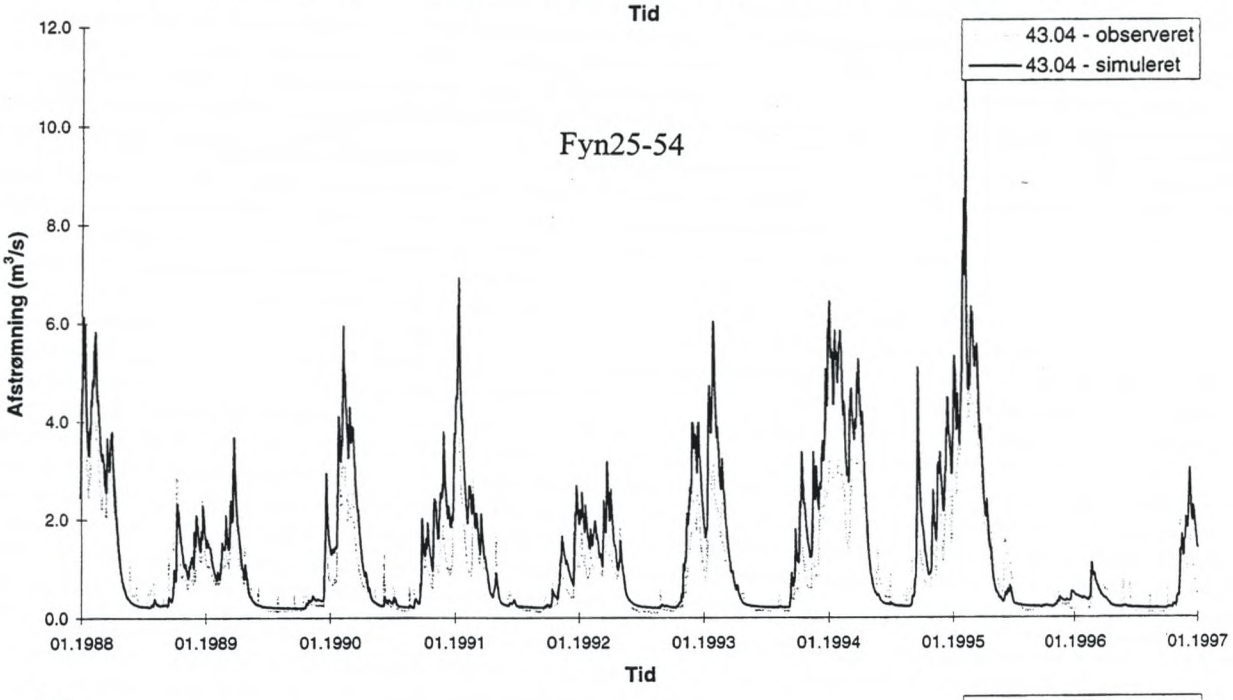
Rosso, R. (1994): An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In: Rosso, R., Peano, A., Becchi, I., Bemporad, G.A. (Eds.), Advances in Distributed Hydrology. Water Resources Publications, pp. 3-30.

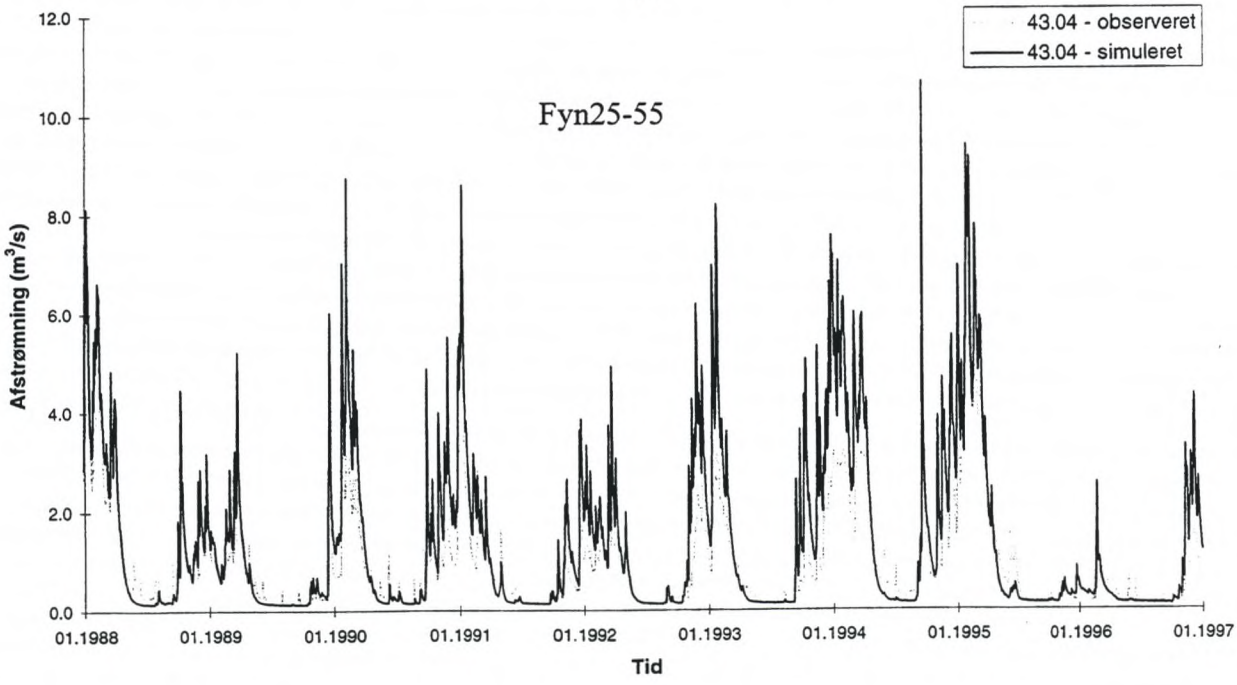
Wood, S.R. (1974): A catchment simulation model developed for urbanizing catchments with particular reference to the use of automatic optimisation techniques. In: Proc. of IFPF Conference on Computer Simulation of Water Resources Systems (Ghent, Belgium), 209-217.

Appendix 1. Simulerede og observerede afstrømninger ved 12 faste målestationer 1991-96 for Fyn25-53, Fyn25-54 og Fyn25-55

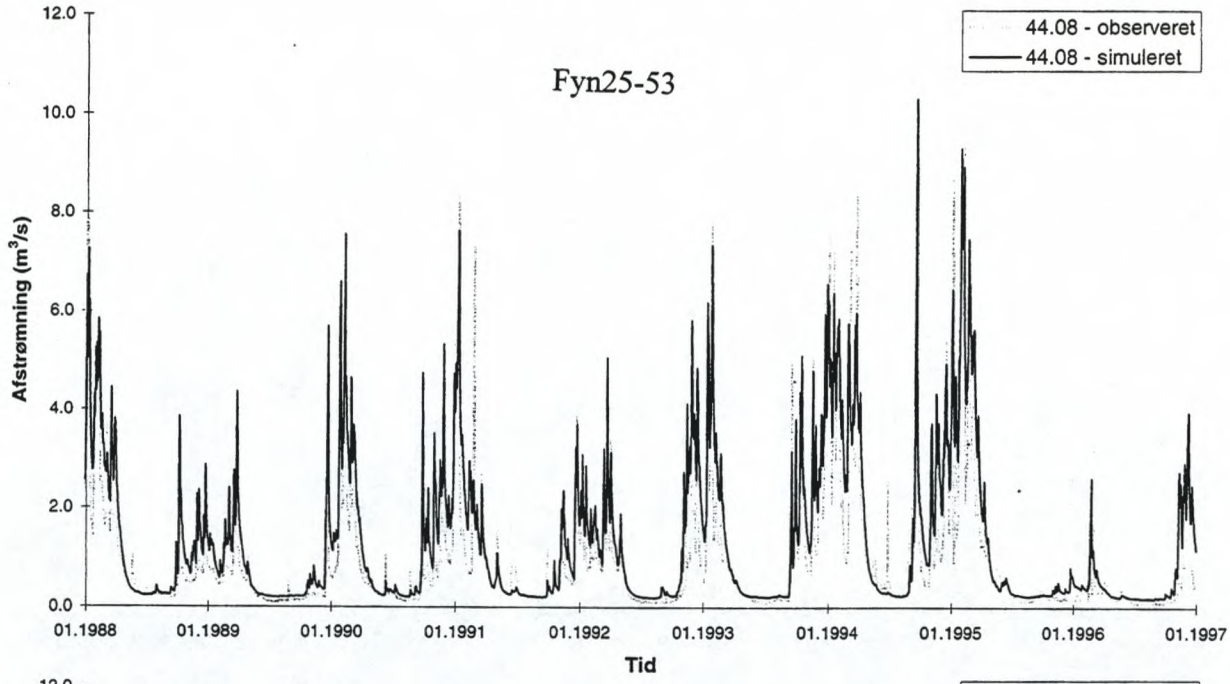
Afstrømning ved station 43.04

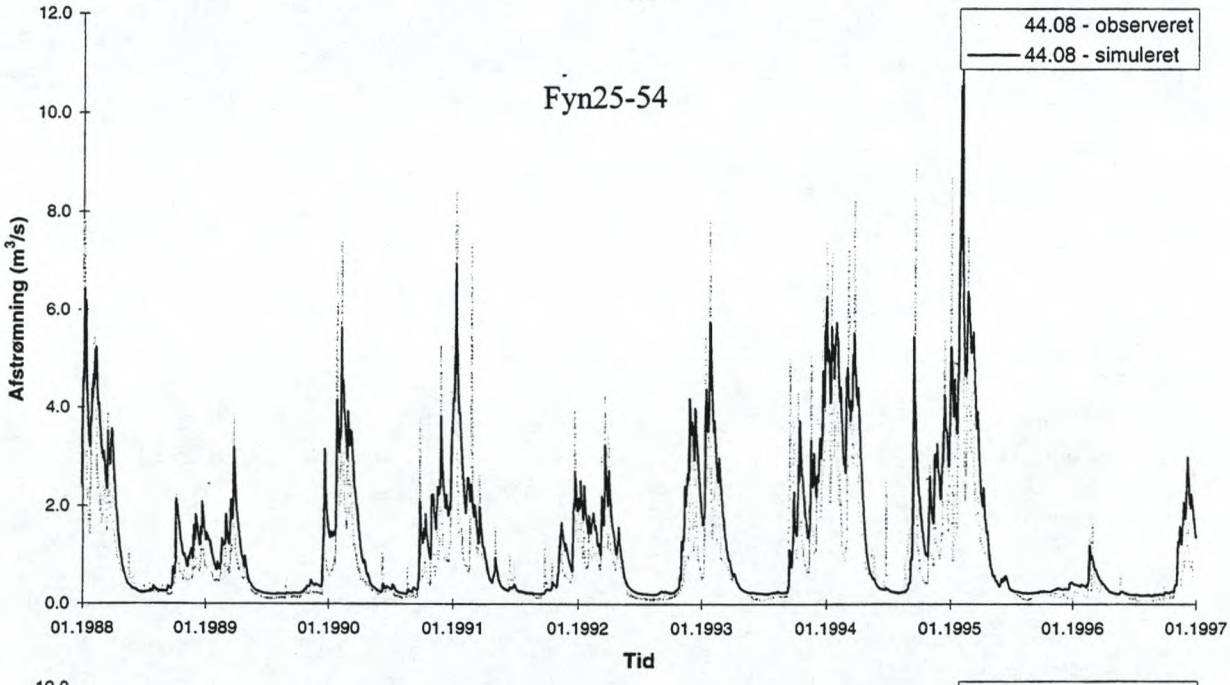


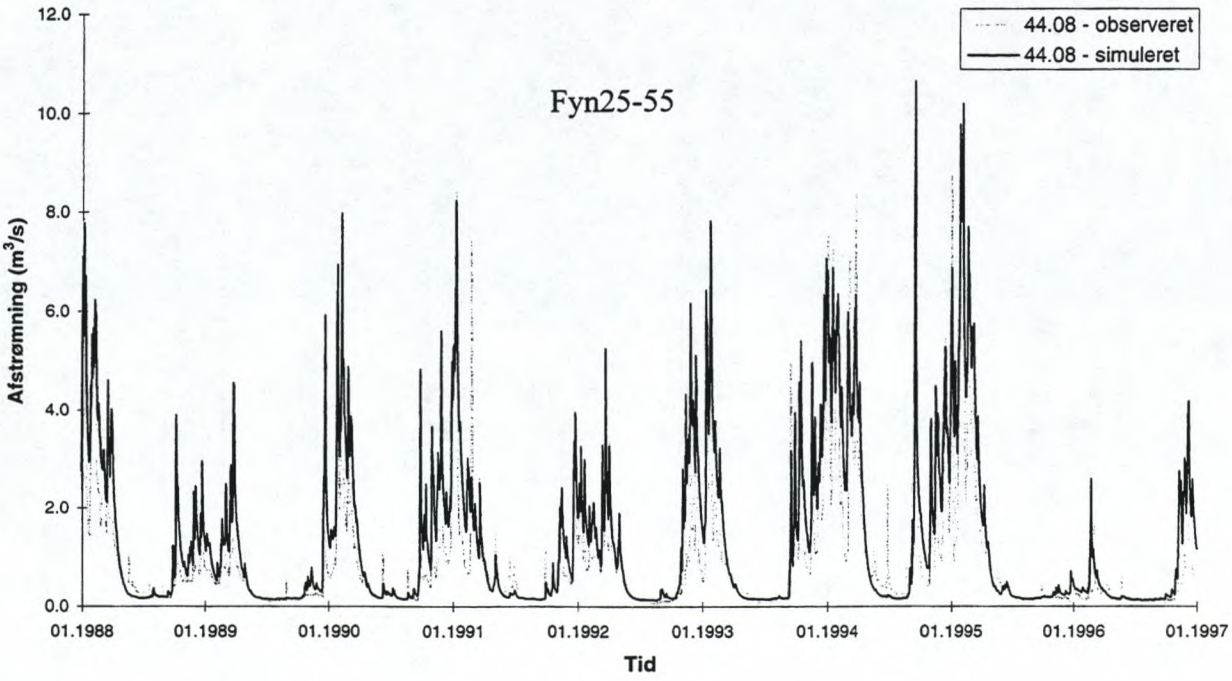




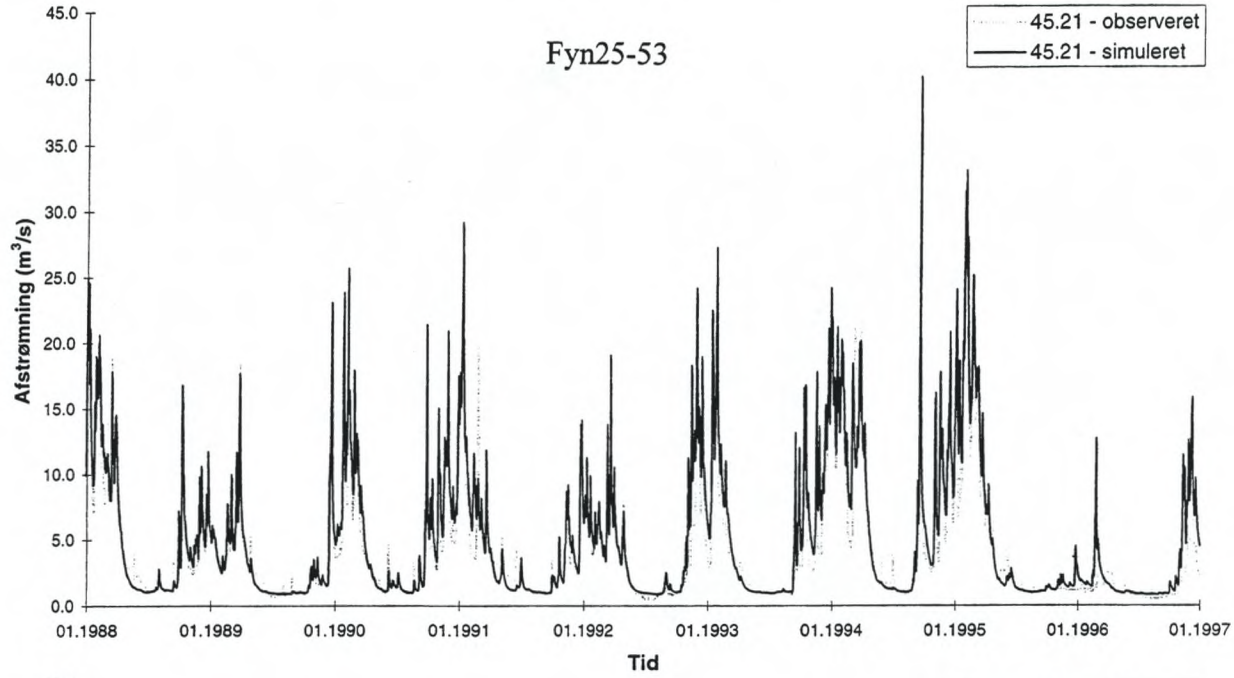
Afstrømning ved station 44.08

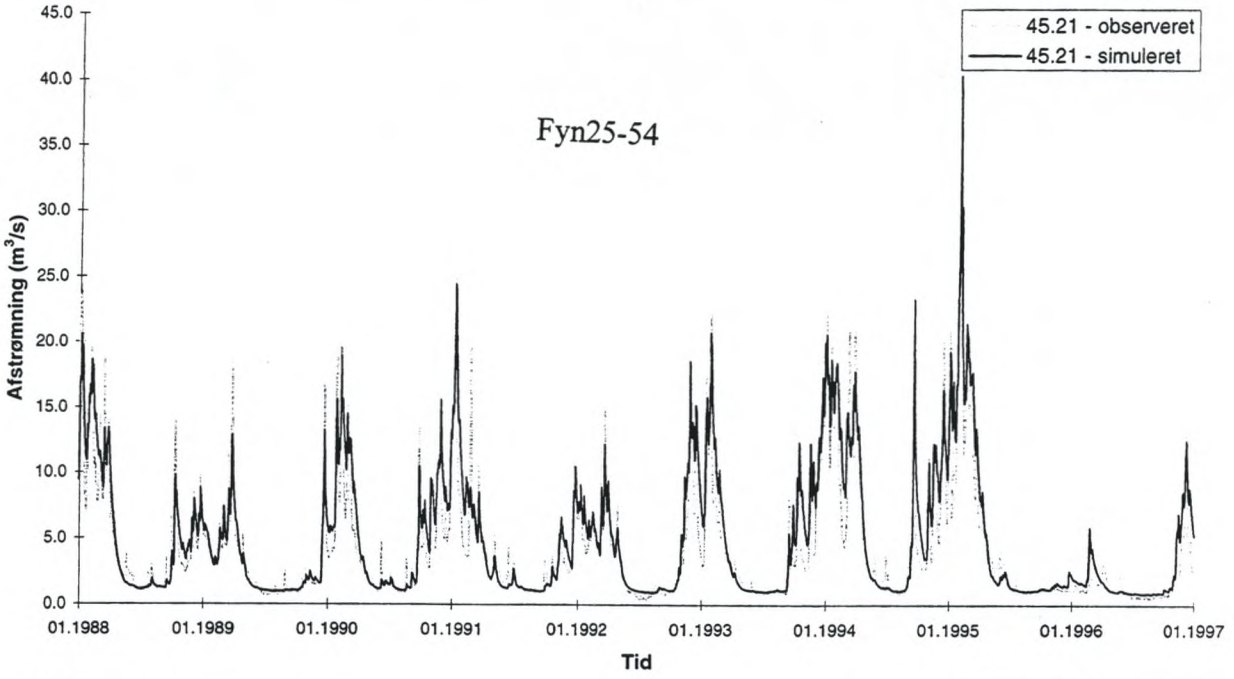


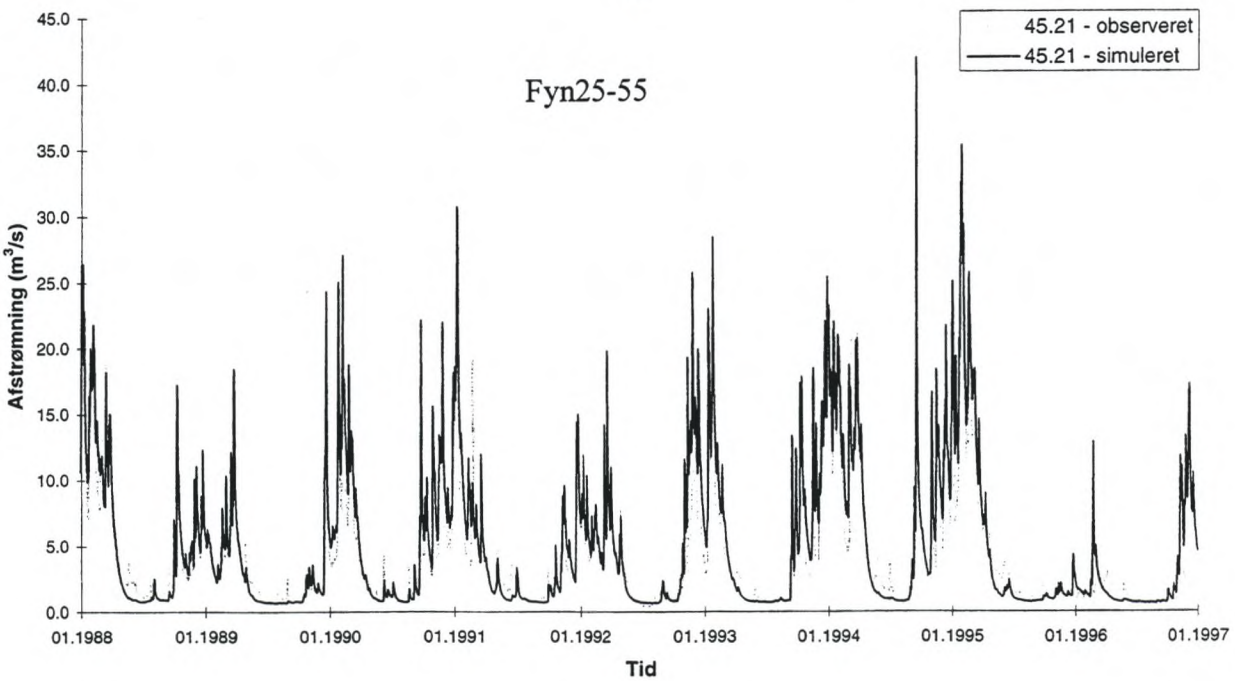




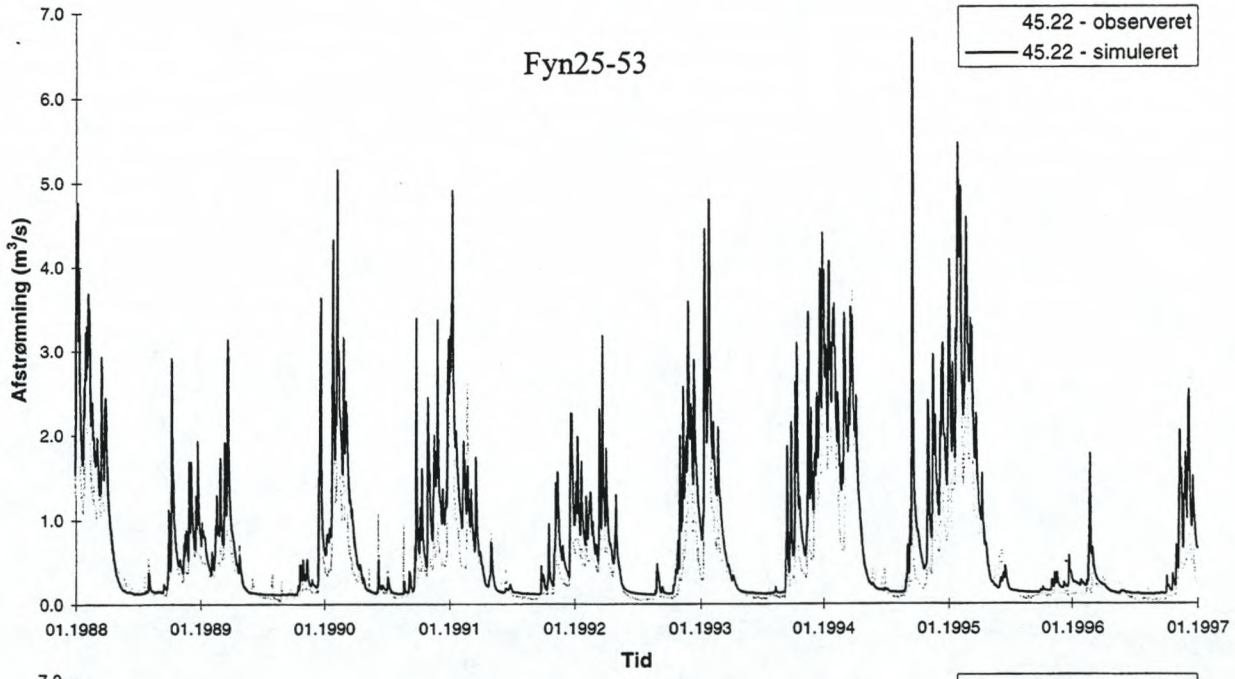
Afstrømning ved station 45.21

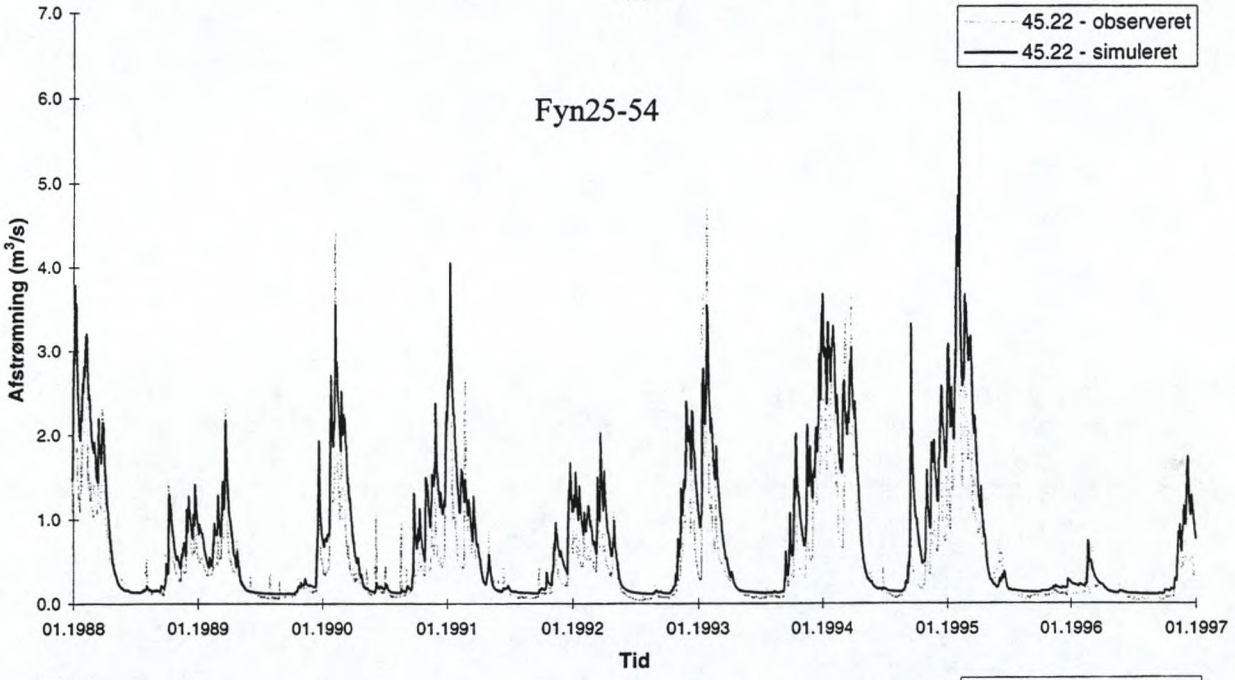


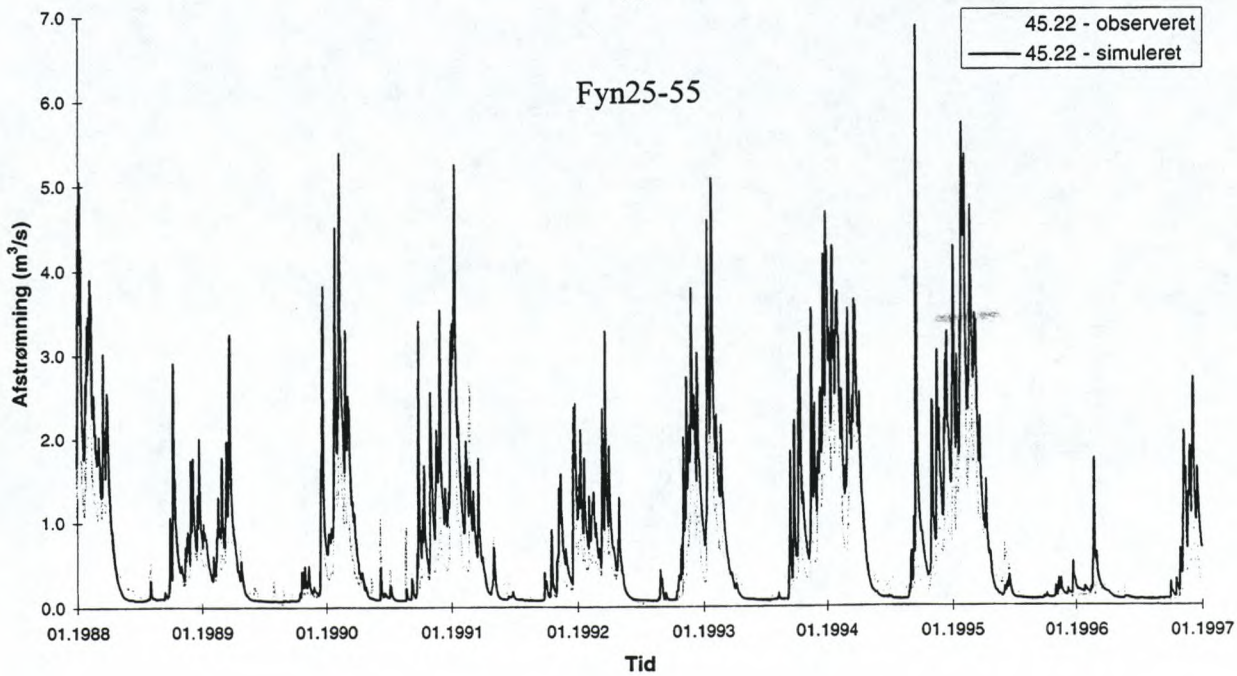




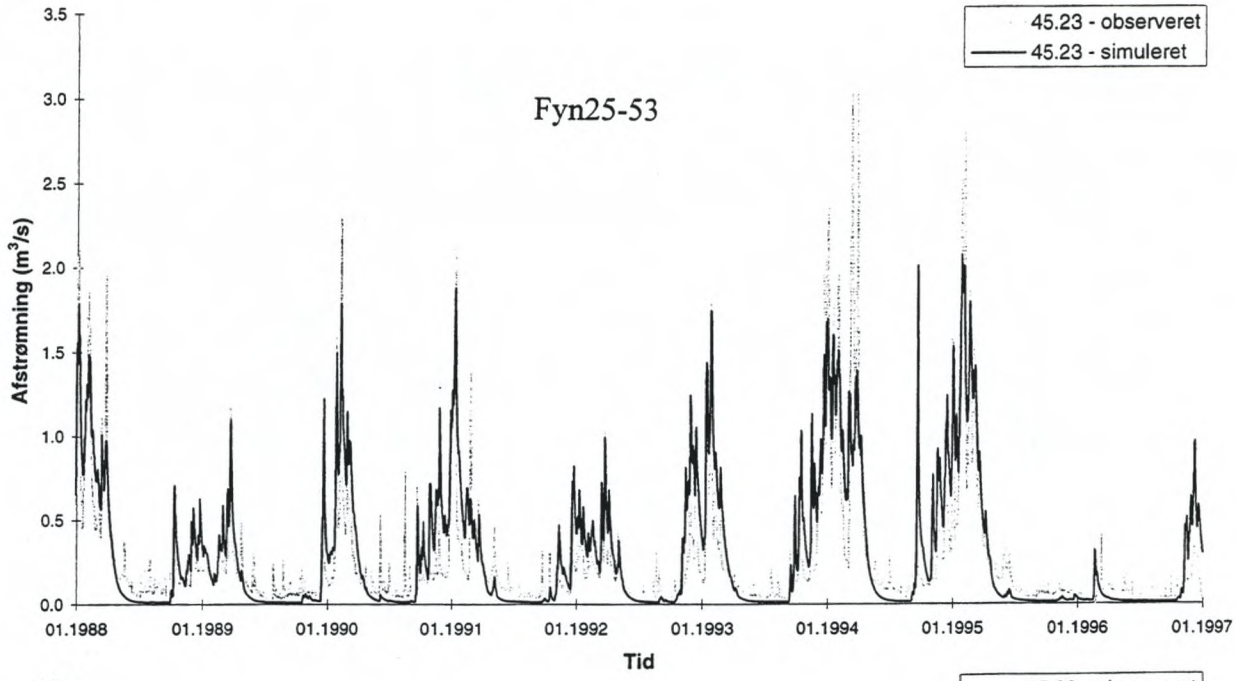
Afstrømning ved station 45.22

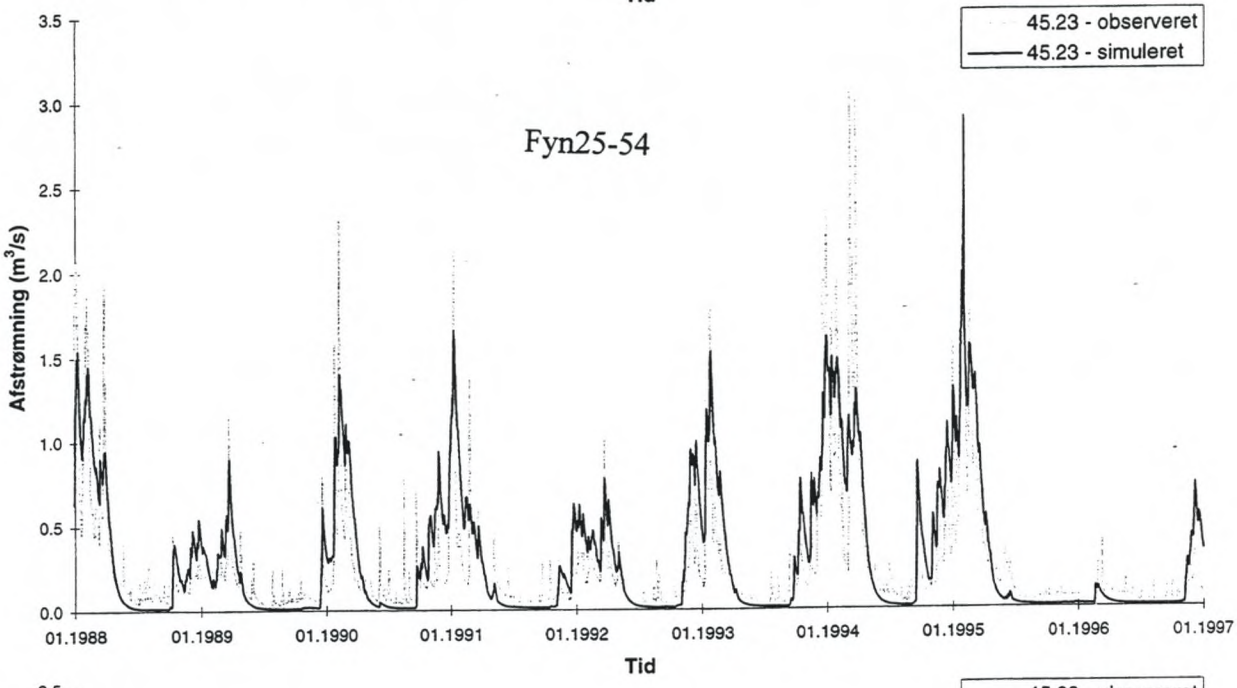


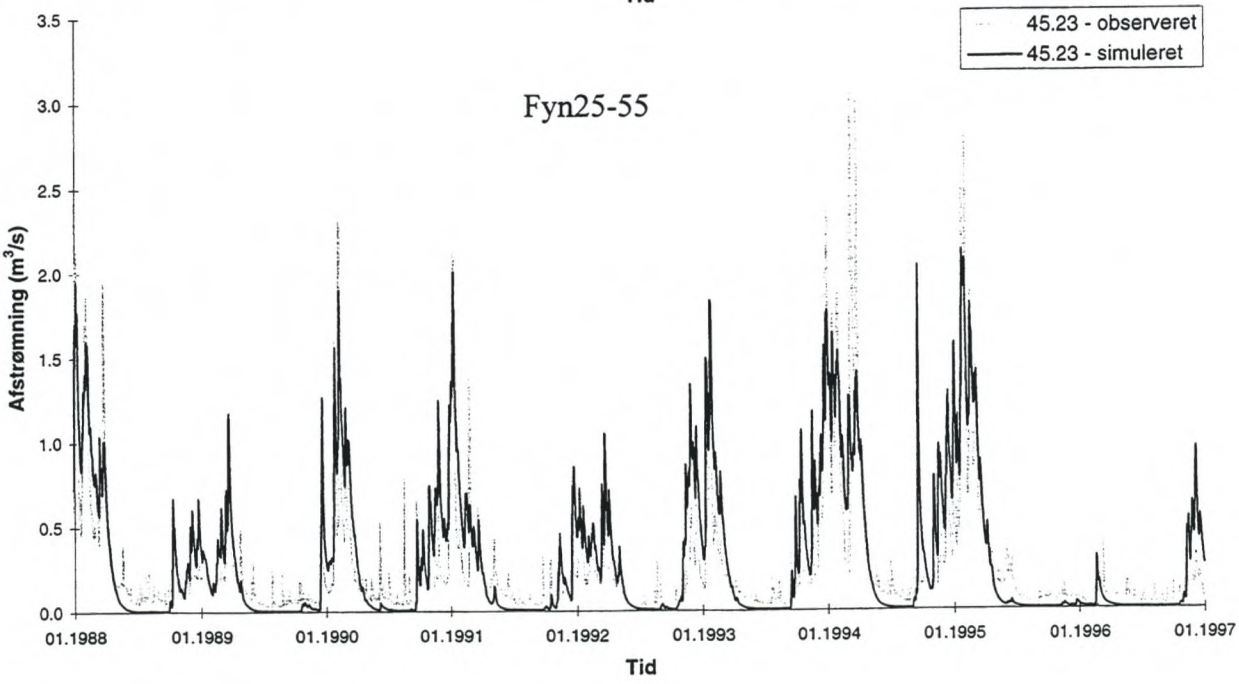




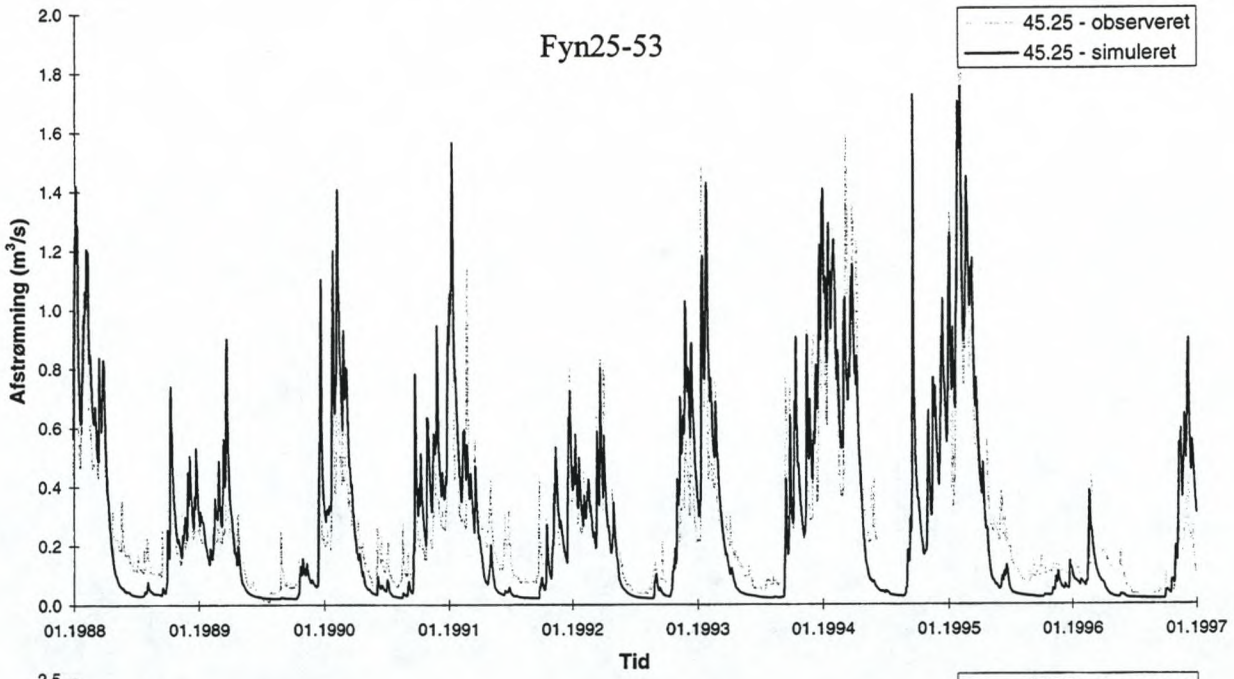
Afstrømning ved station 45.23

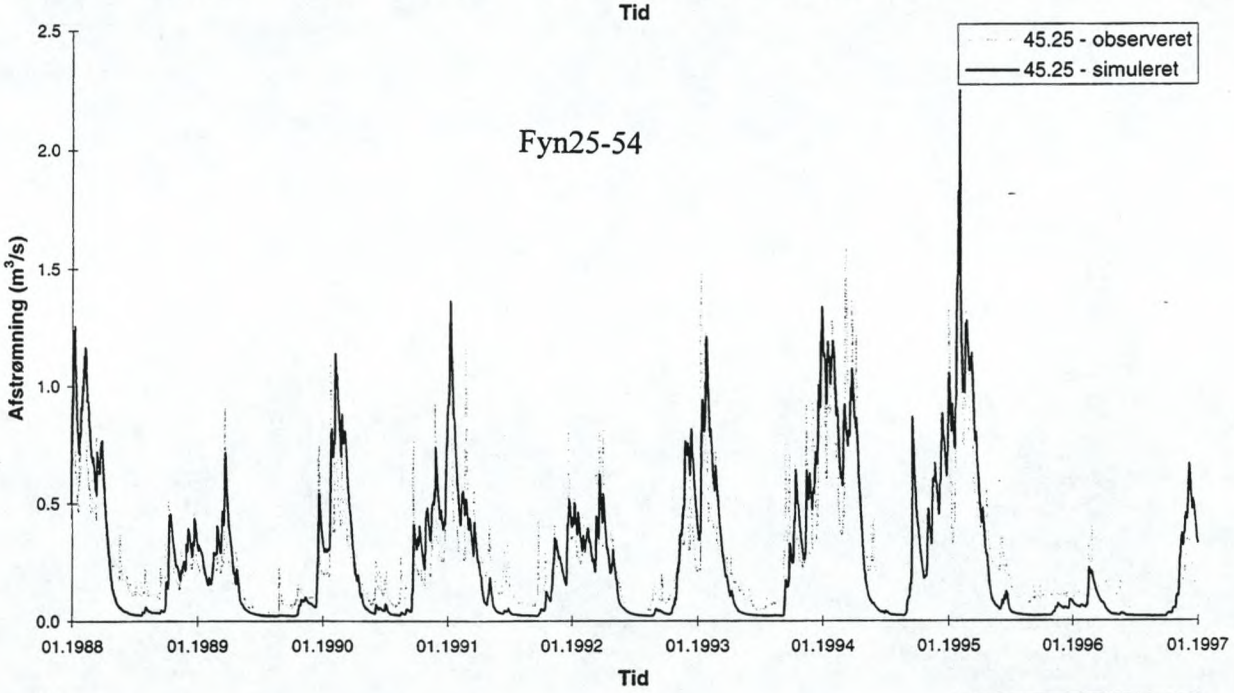


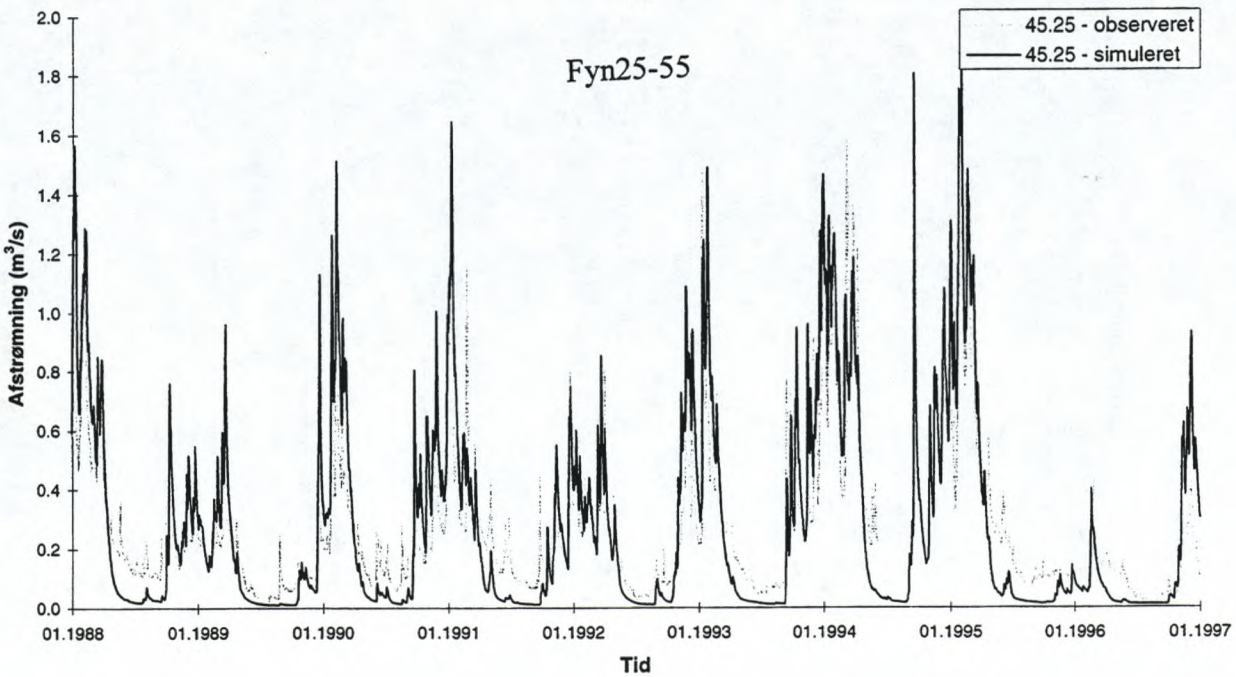




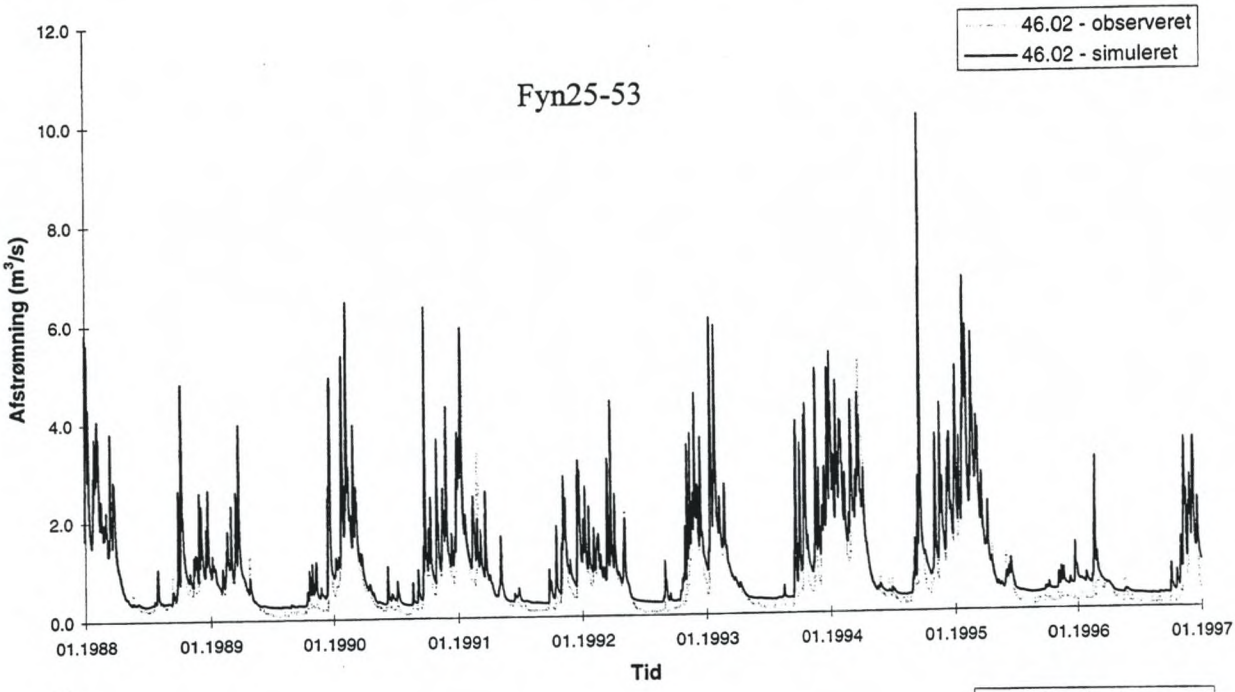
Afstrømning ved station 45.25

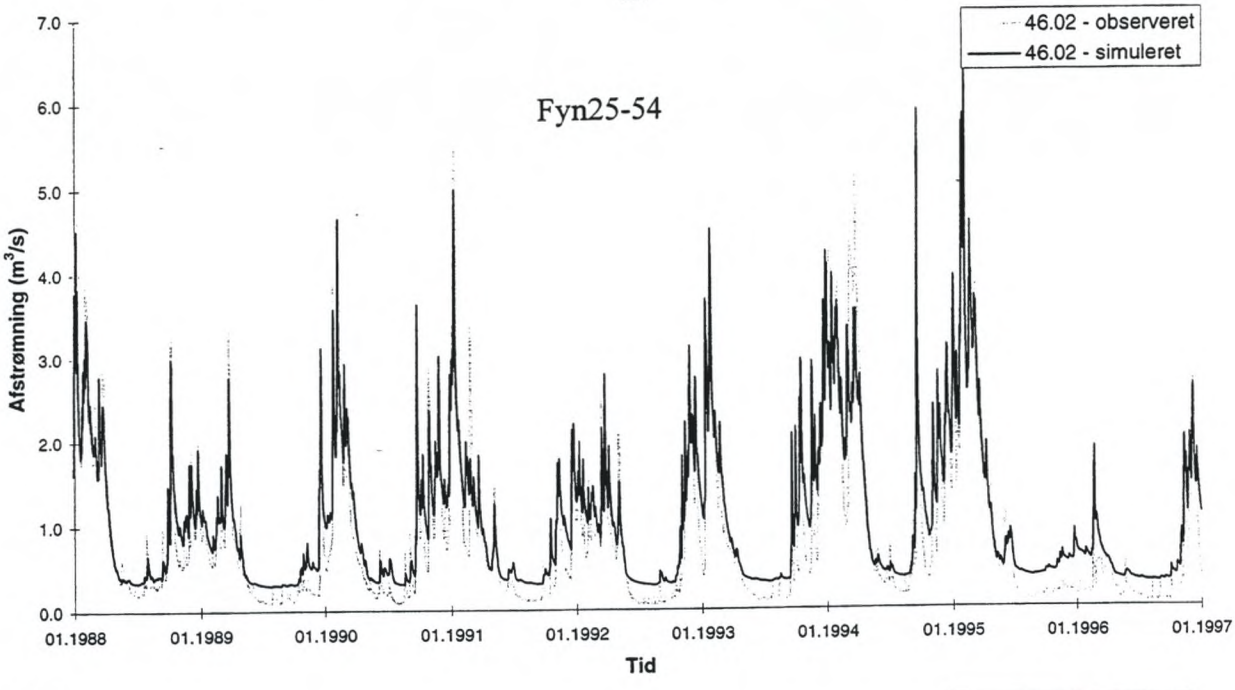


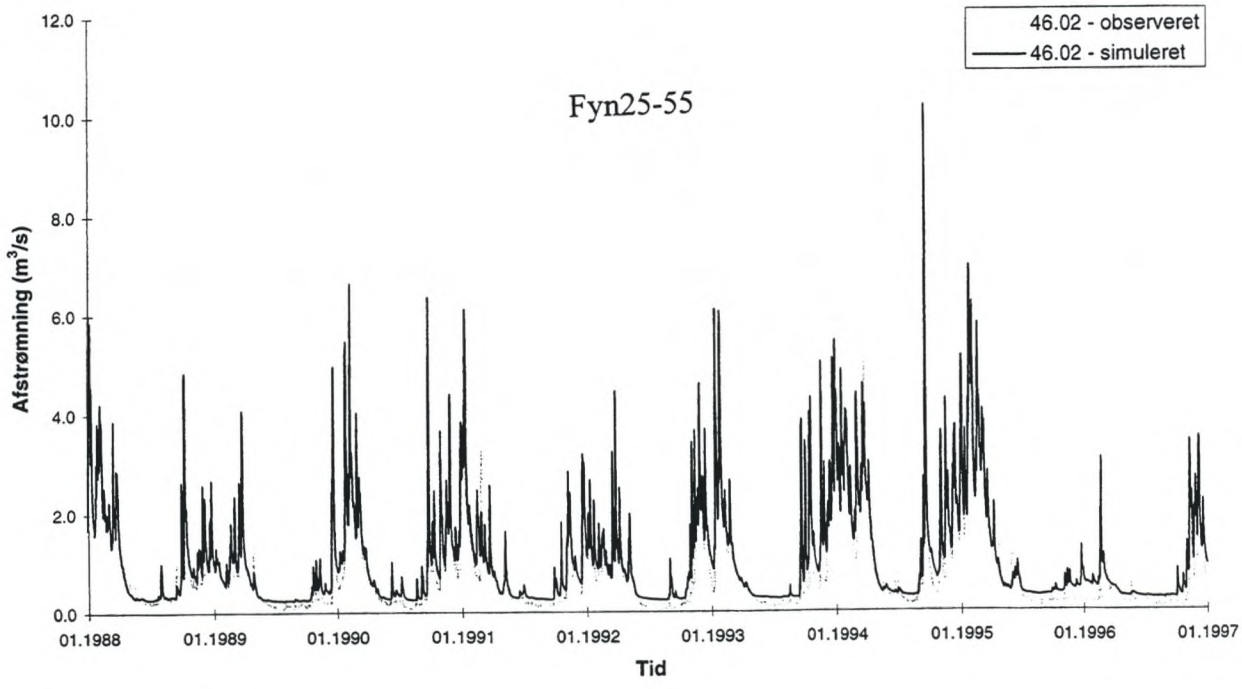




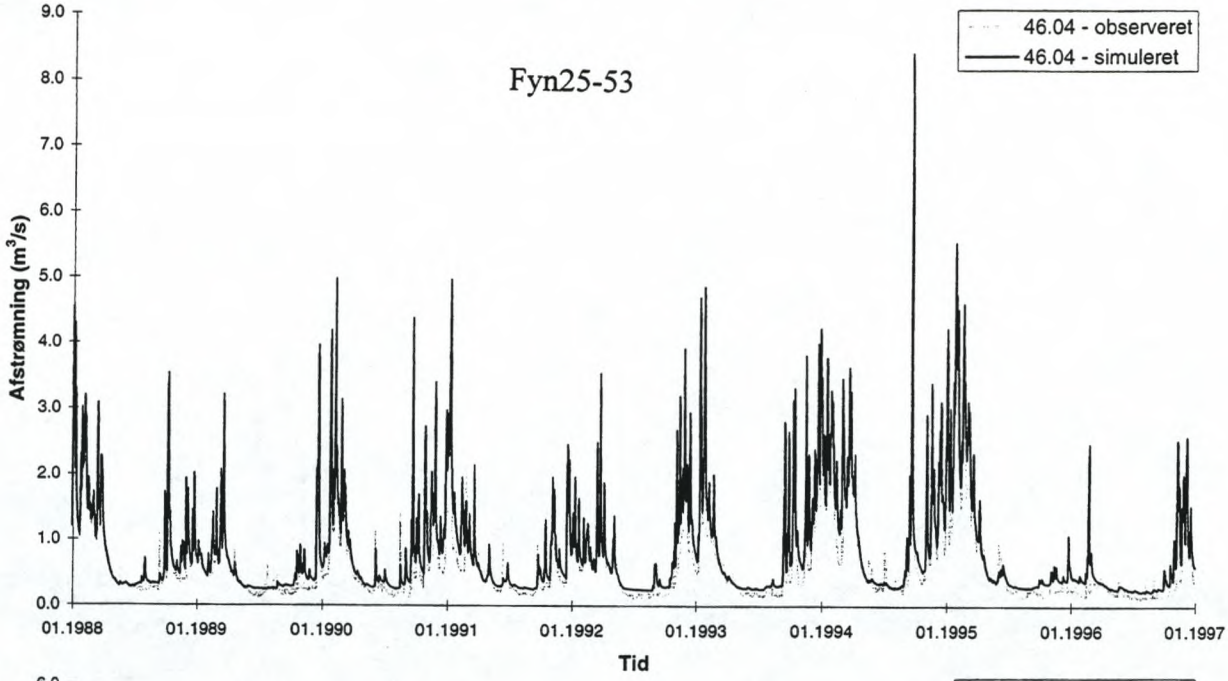
Afstrømning ved station 46.02

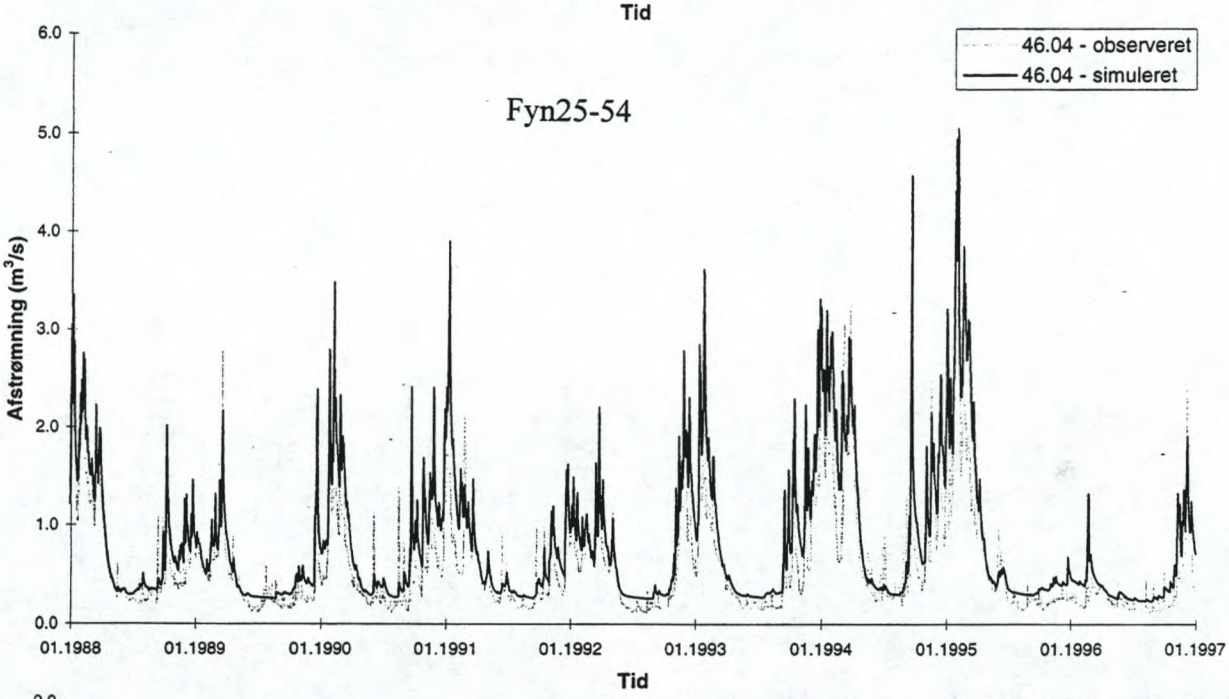


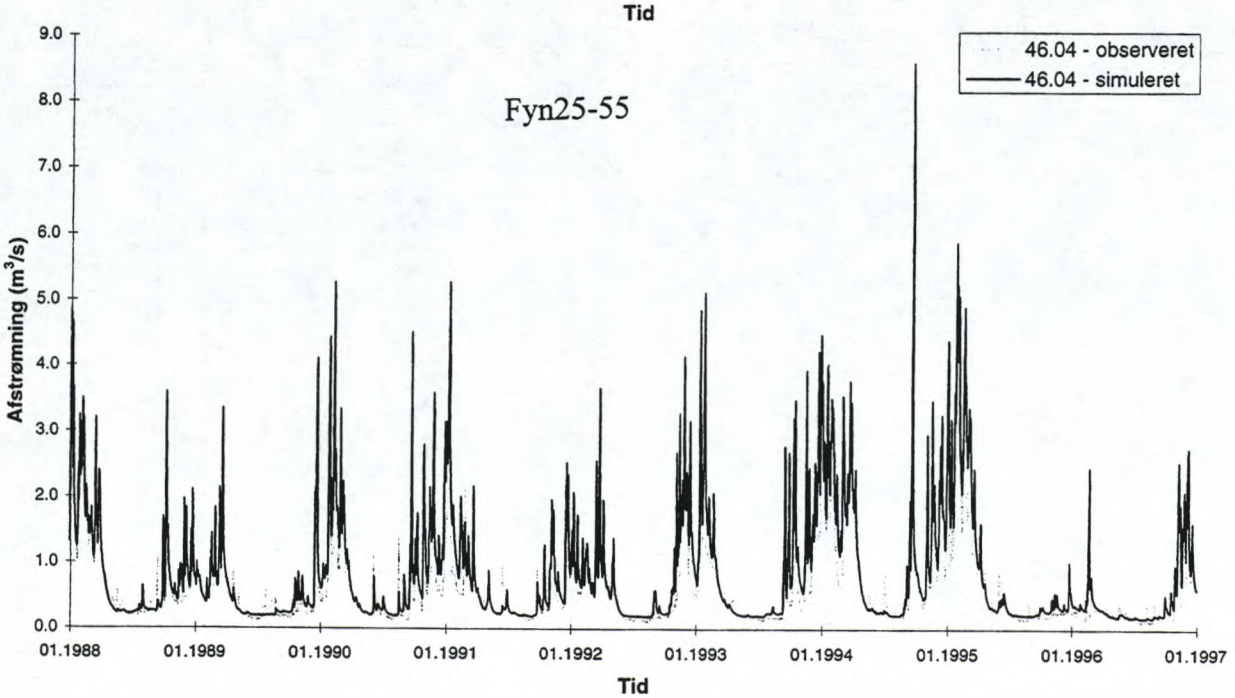




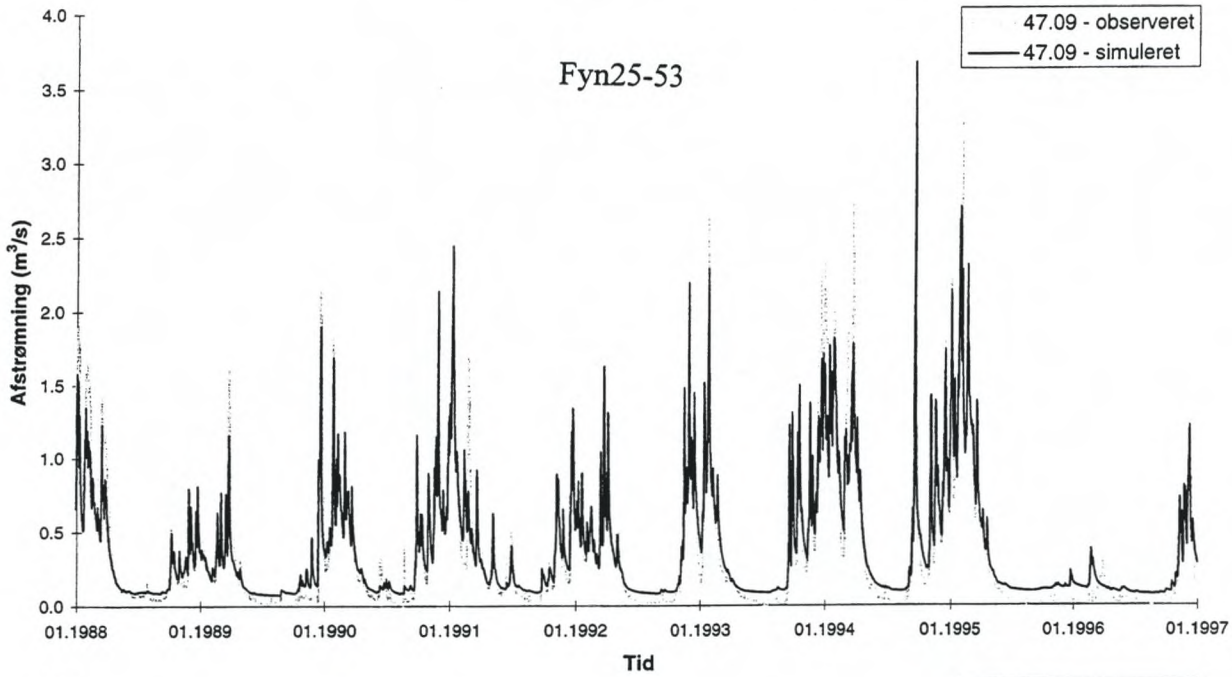
Afstrømning ved station 46.04

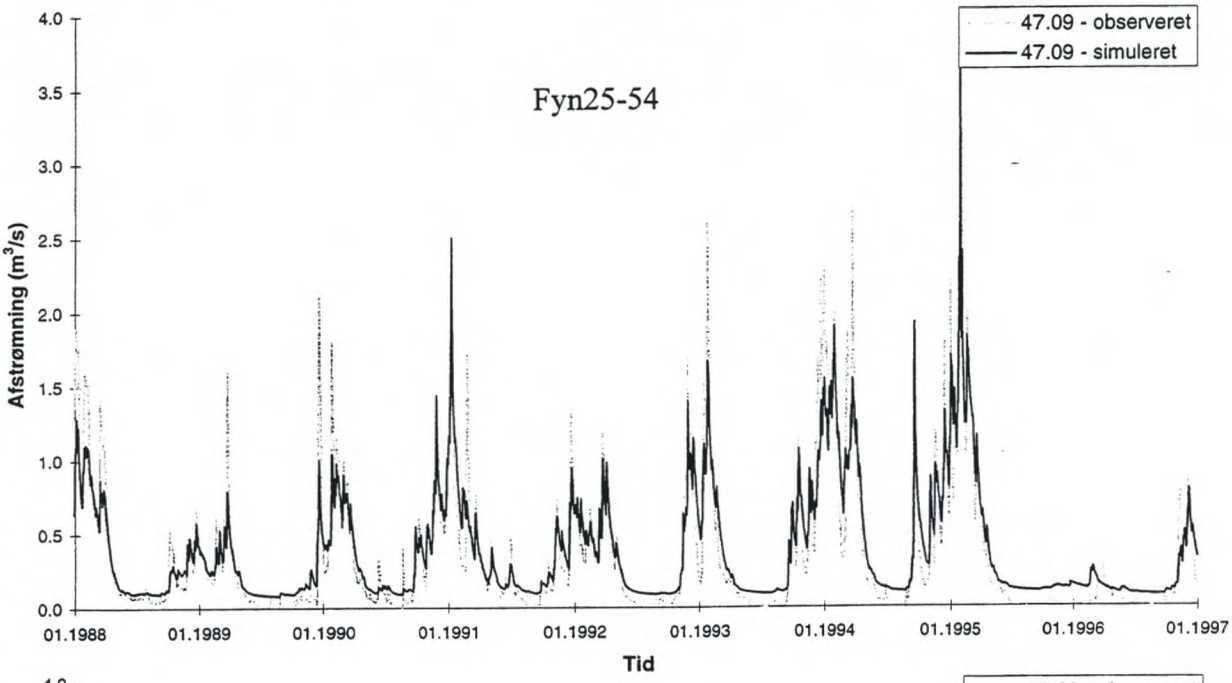


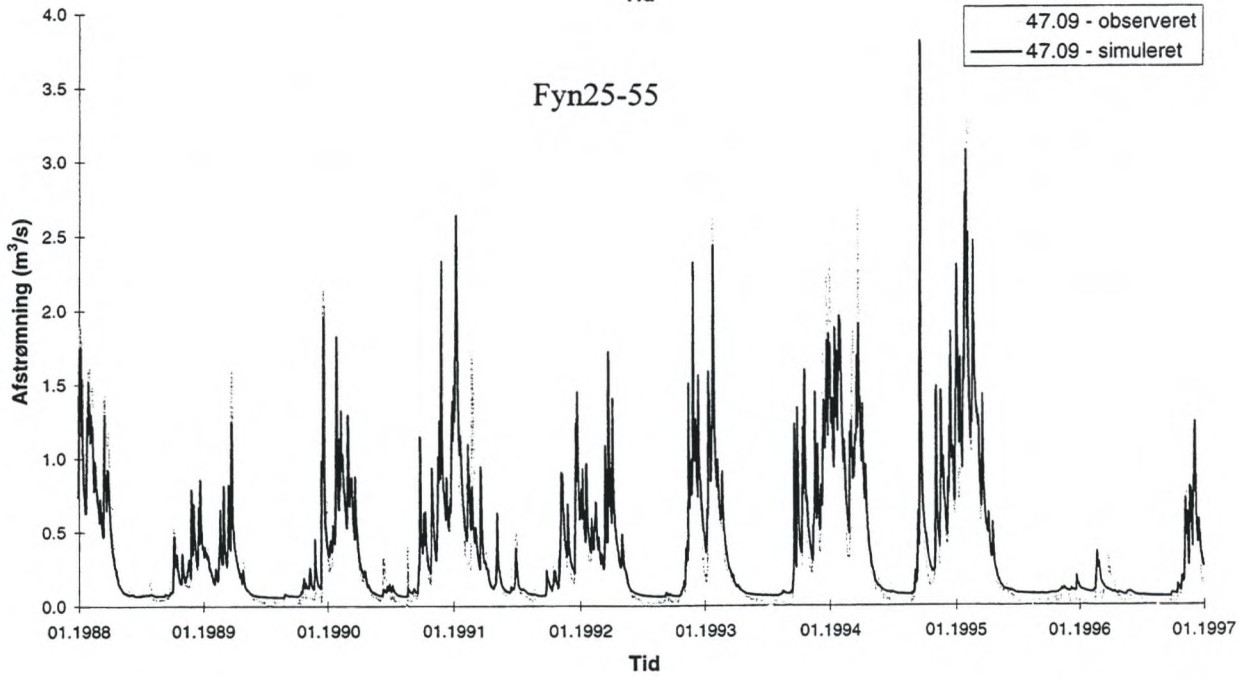




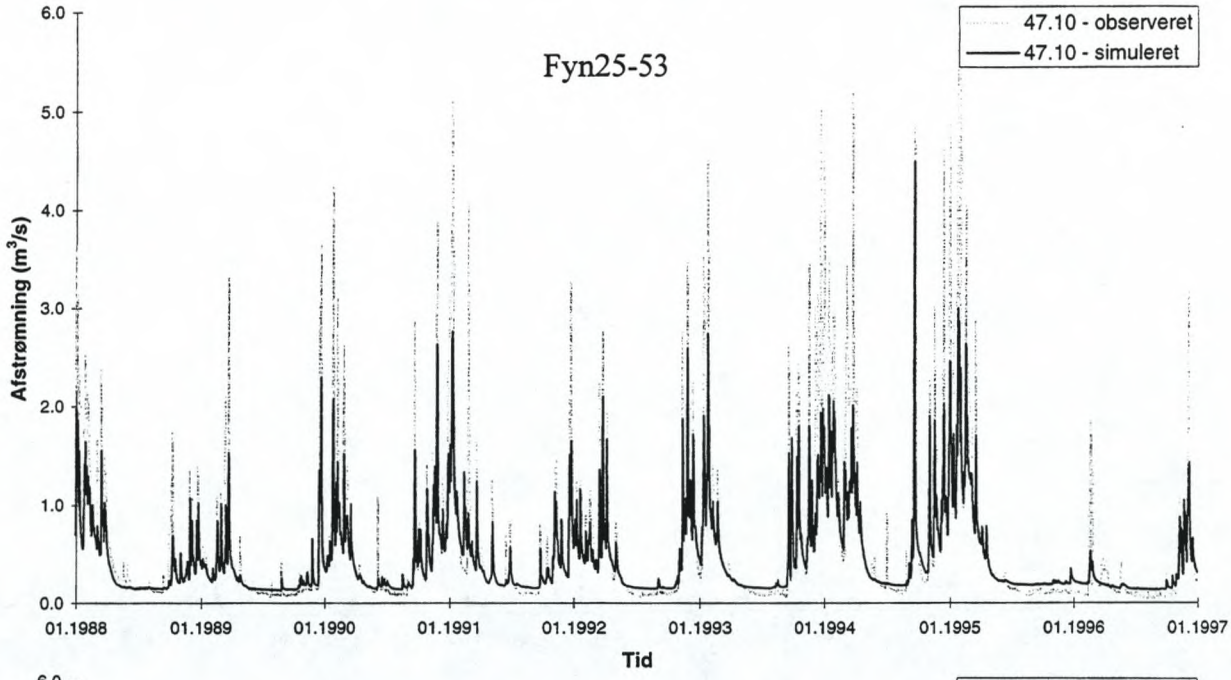
Afstrømning ved station 47.09

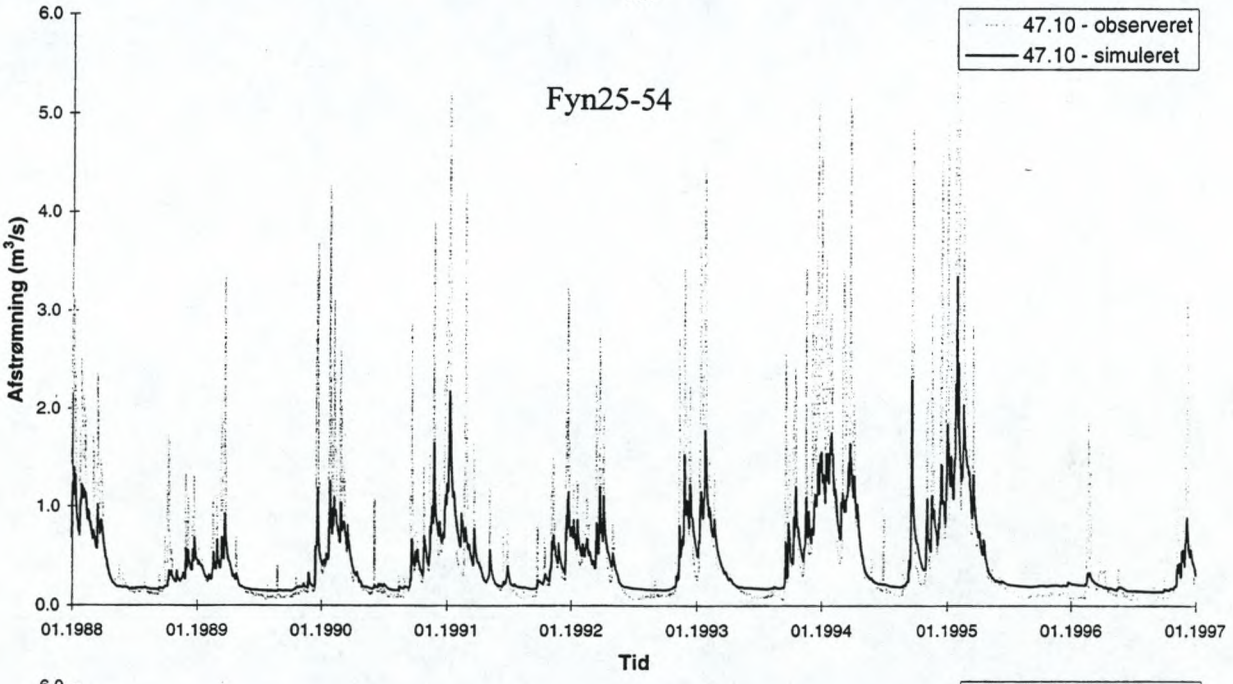


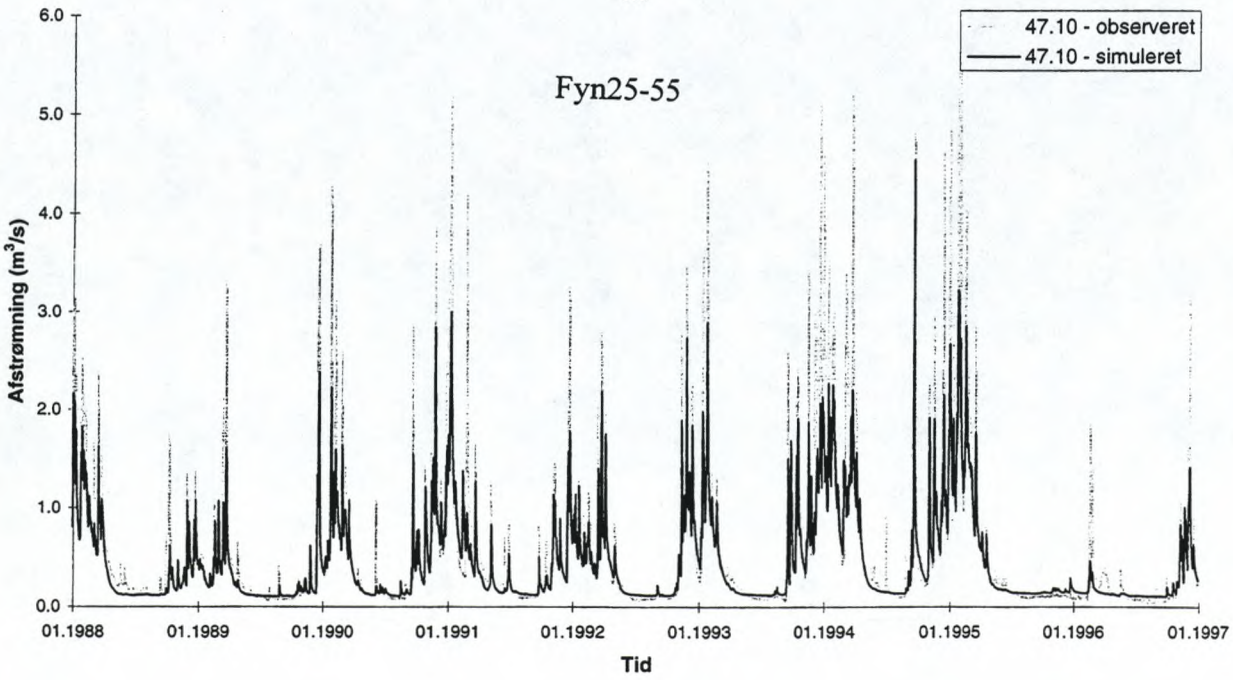




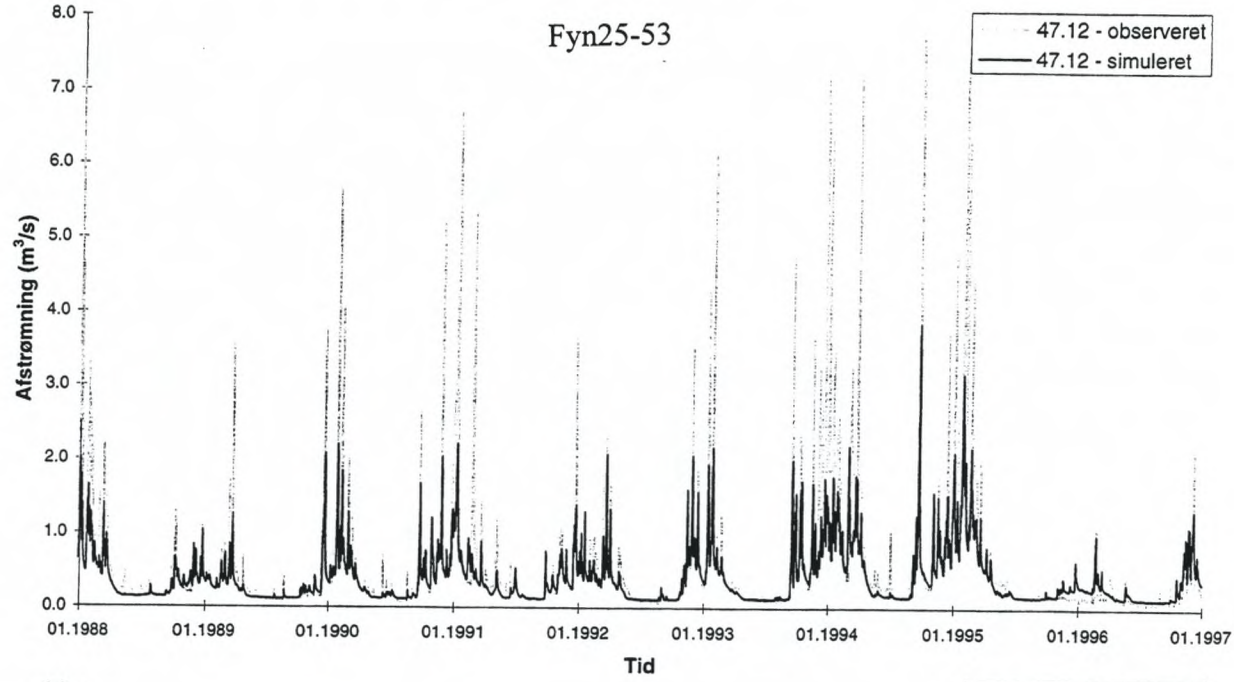
Afstrømning ved station 47.10

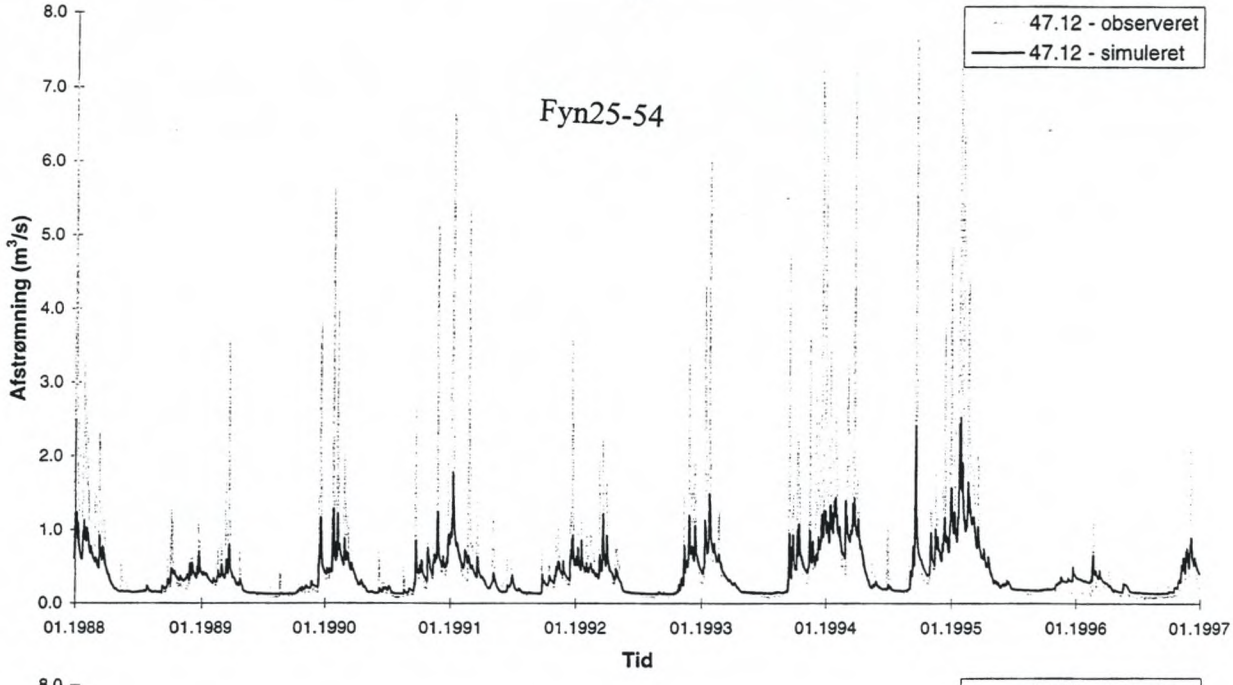


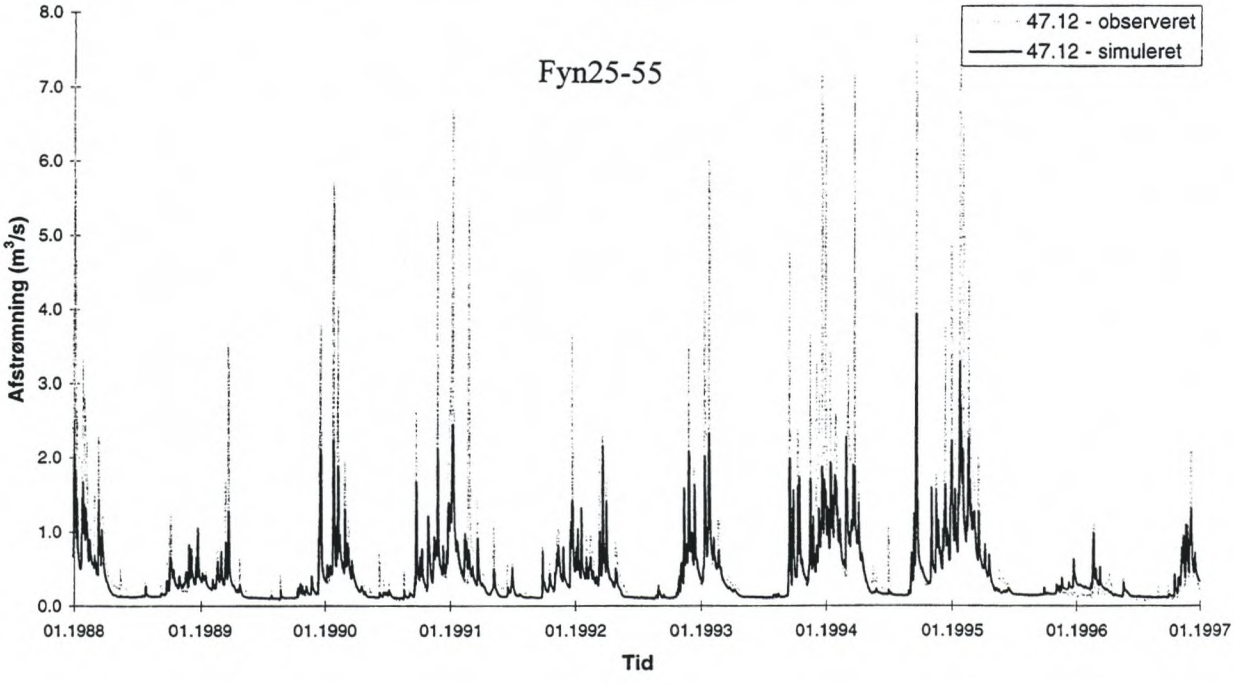




Afstrømning ved station 47.12

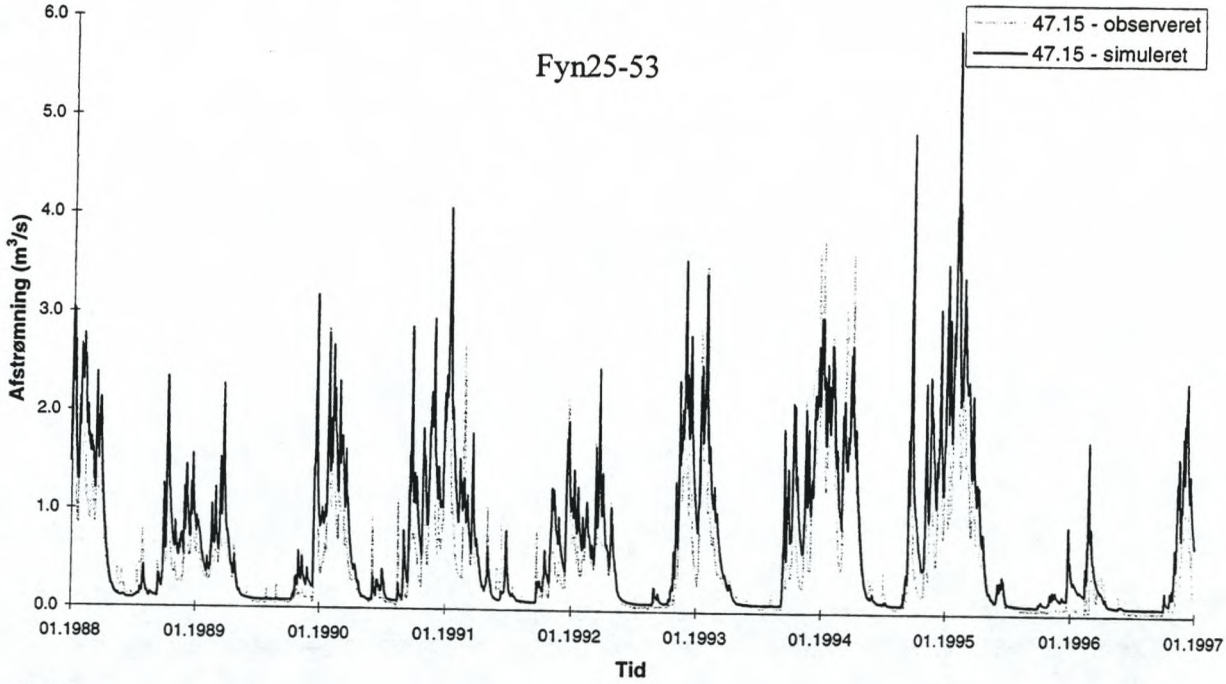


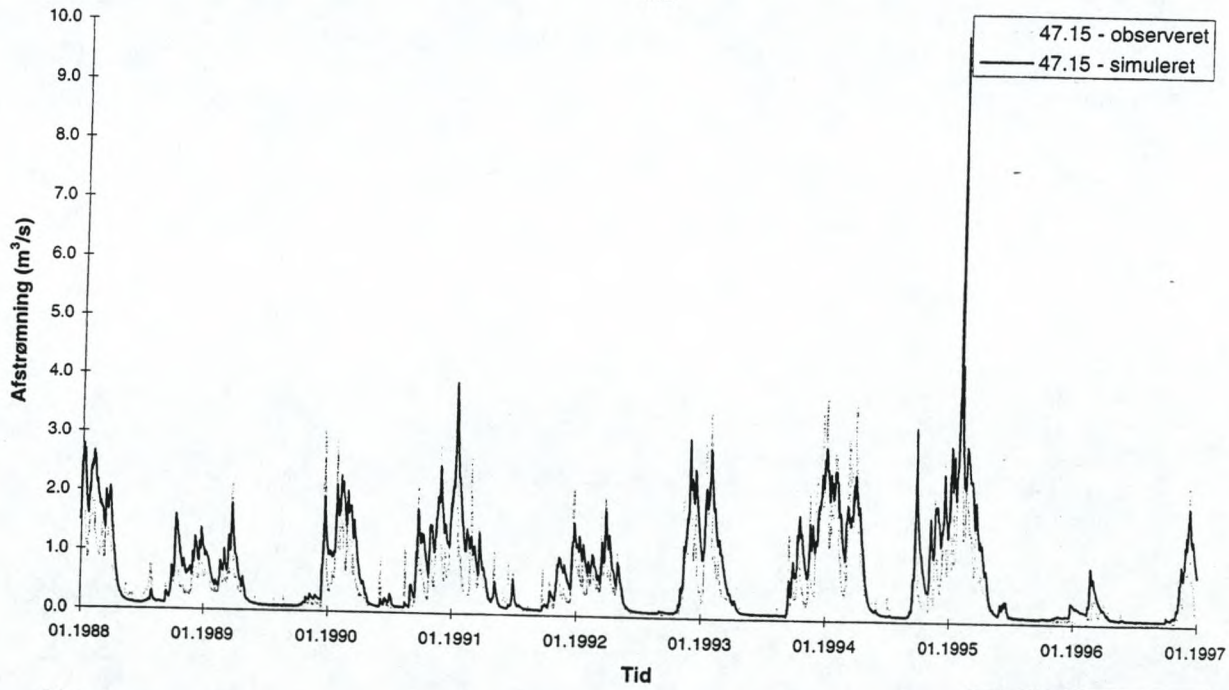


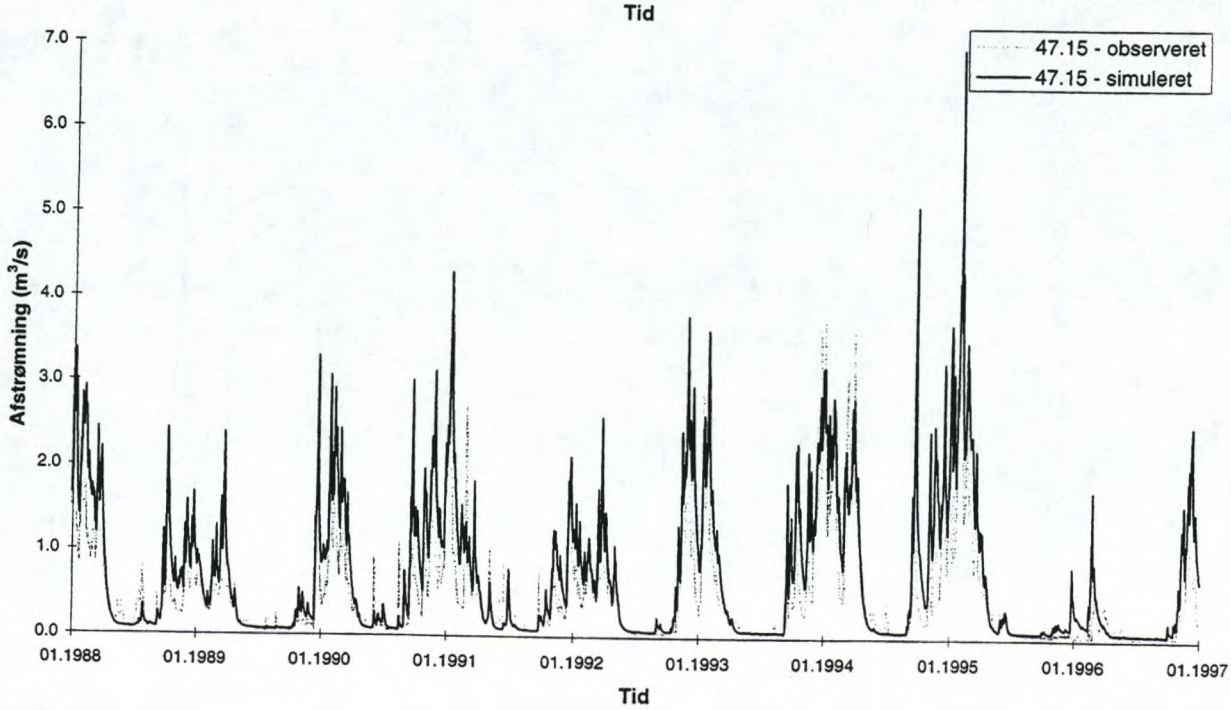


Afstrømning ved station 47.15

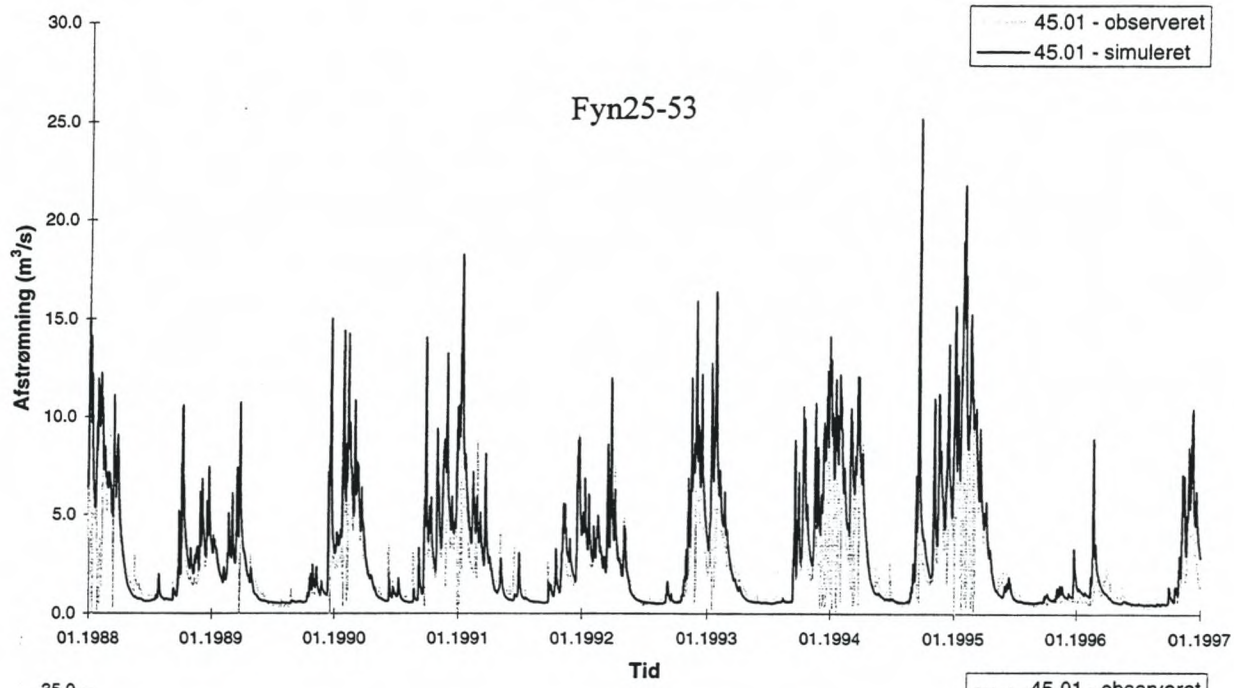
Fyn25-53

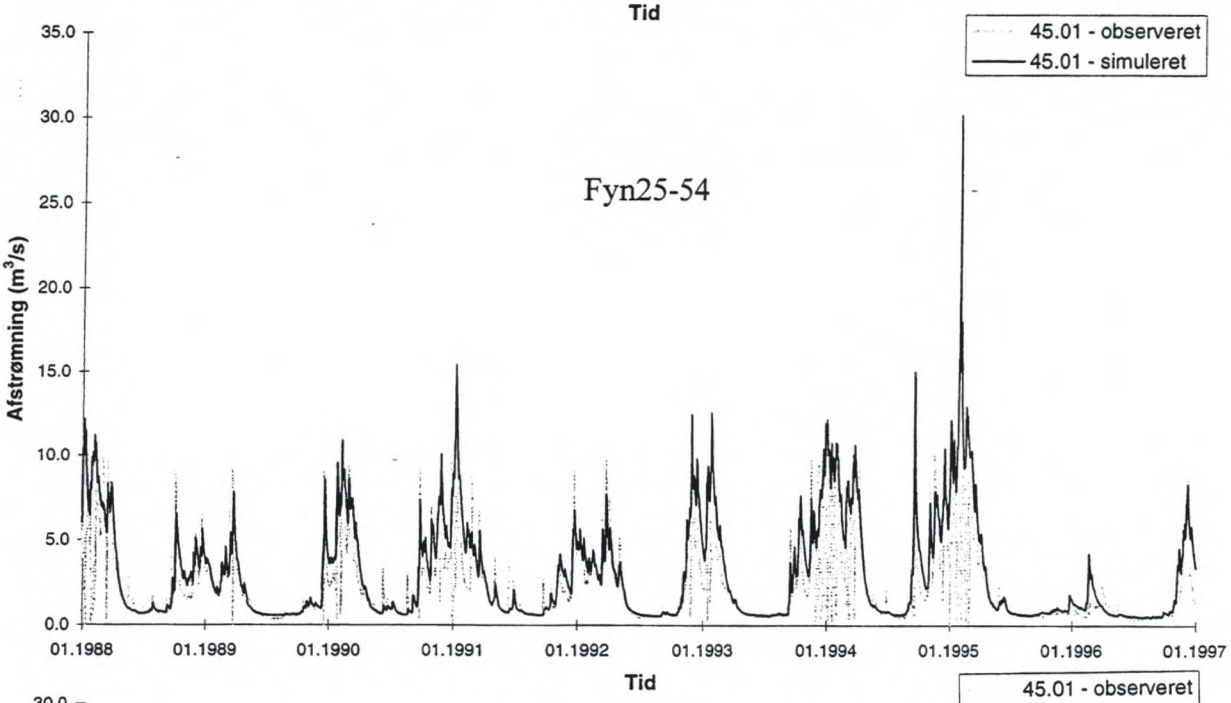


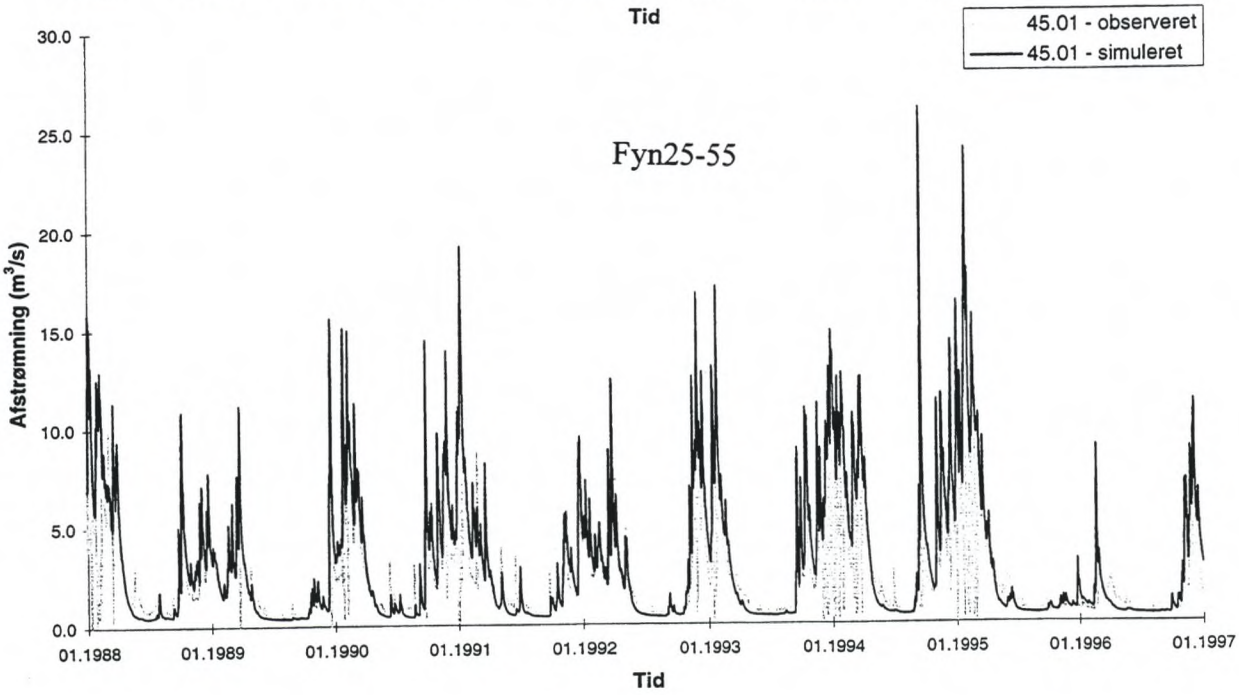




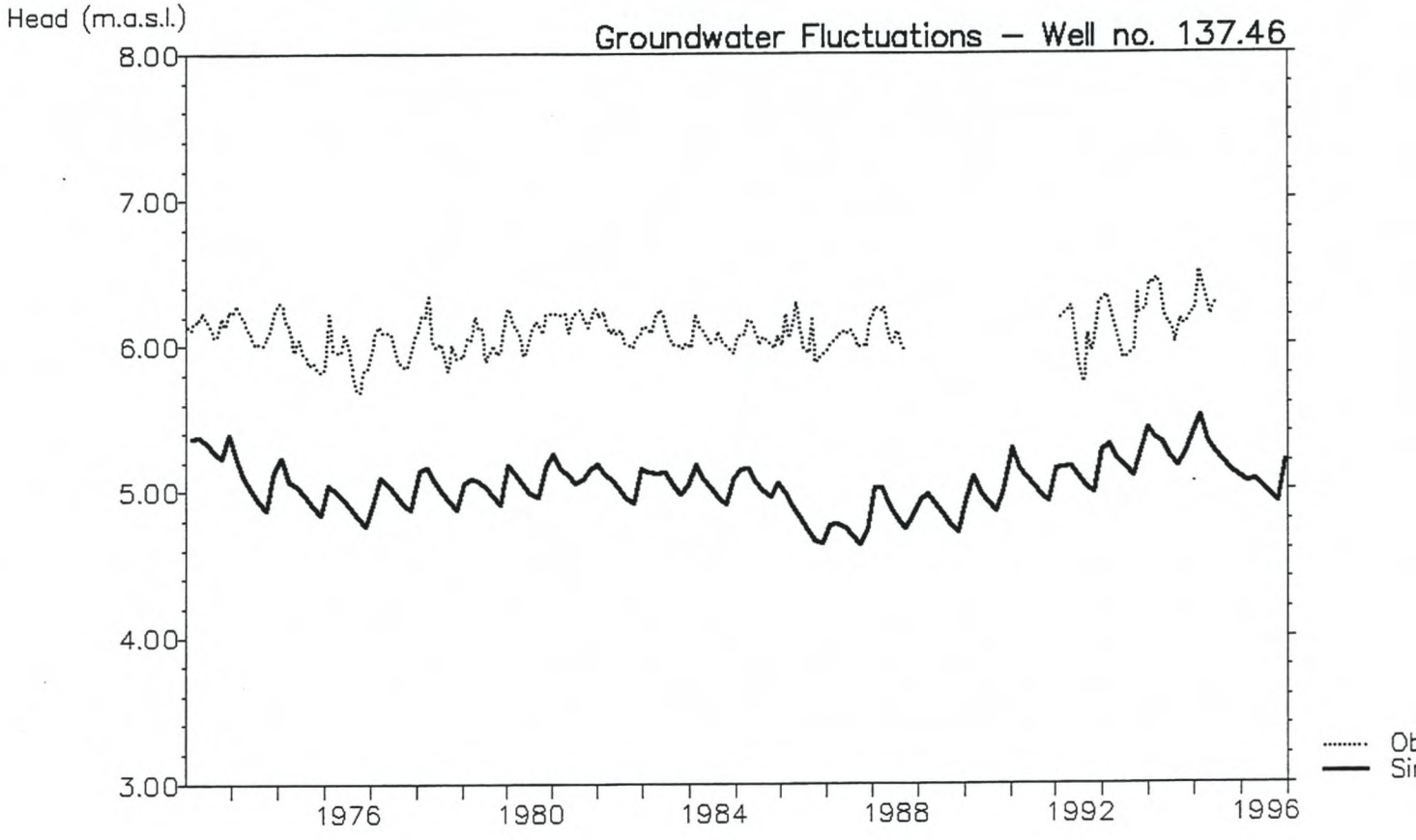
Afstrømning ved station 45.01

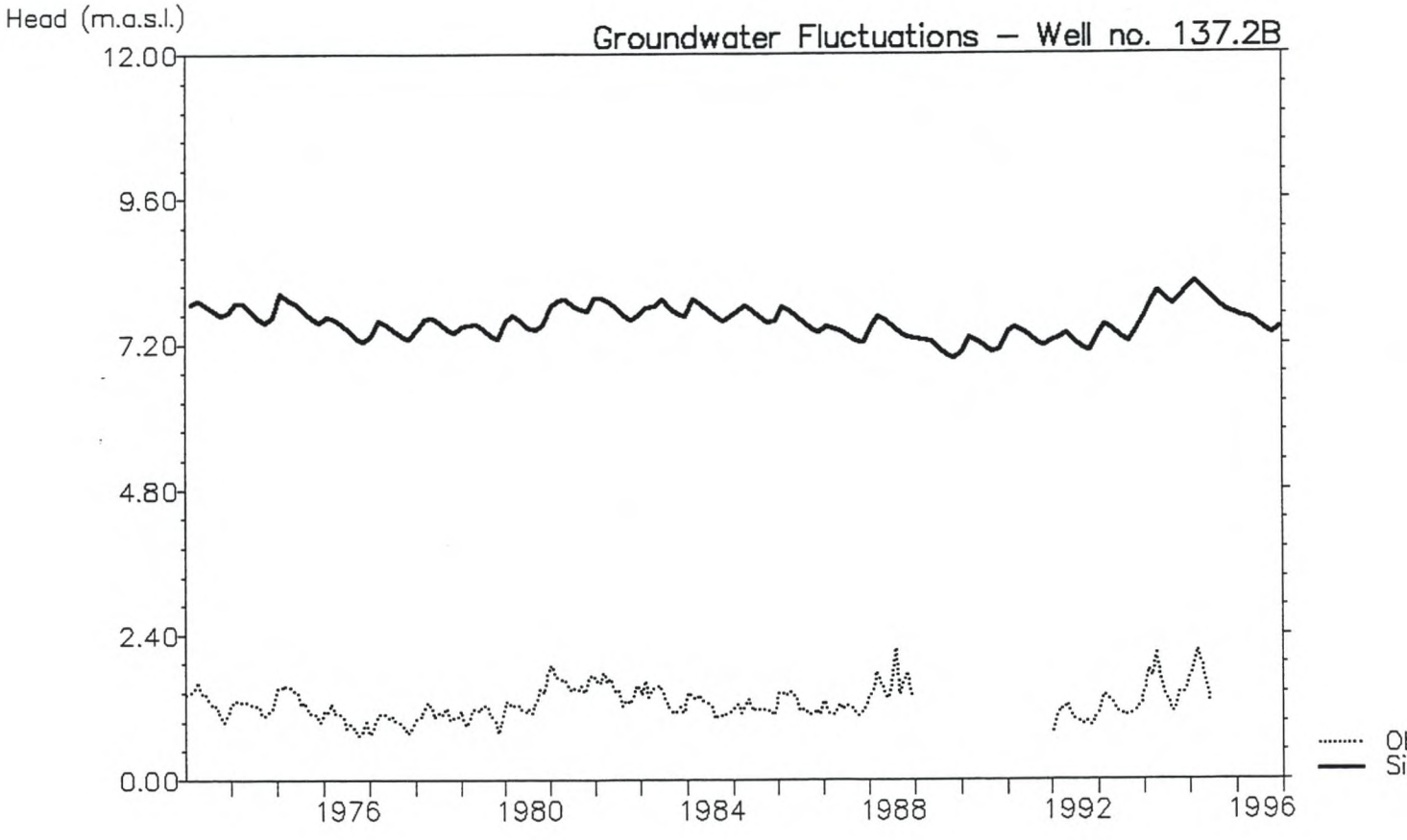


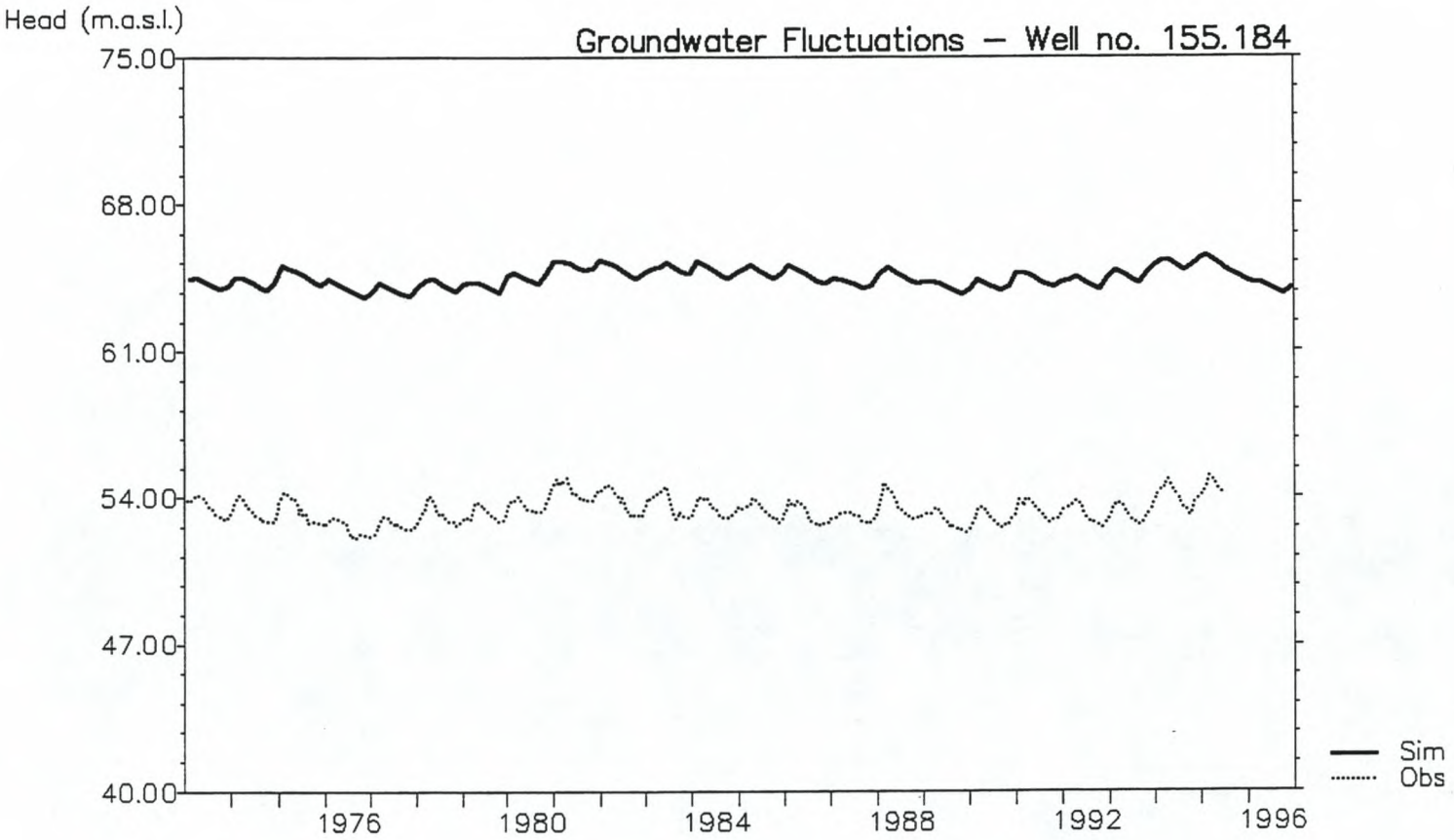


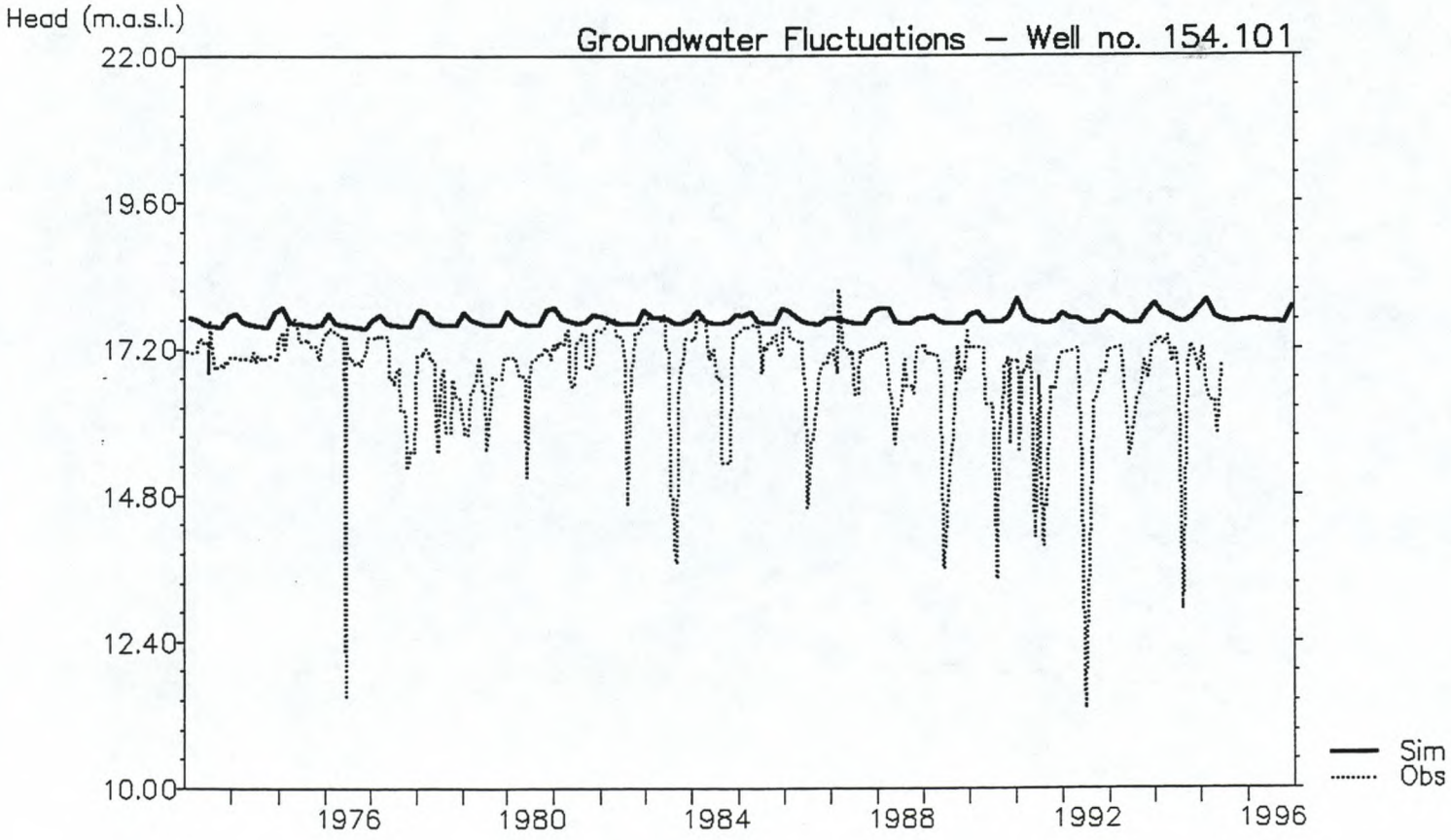


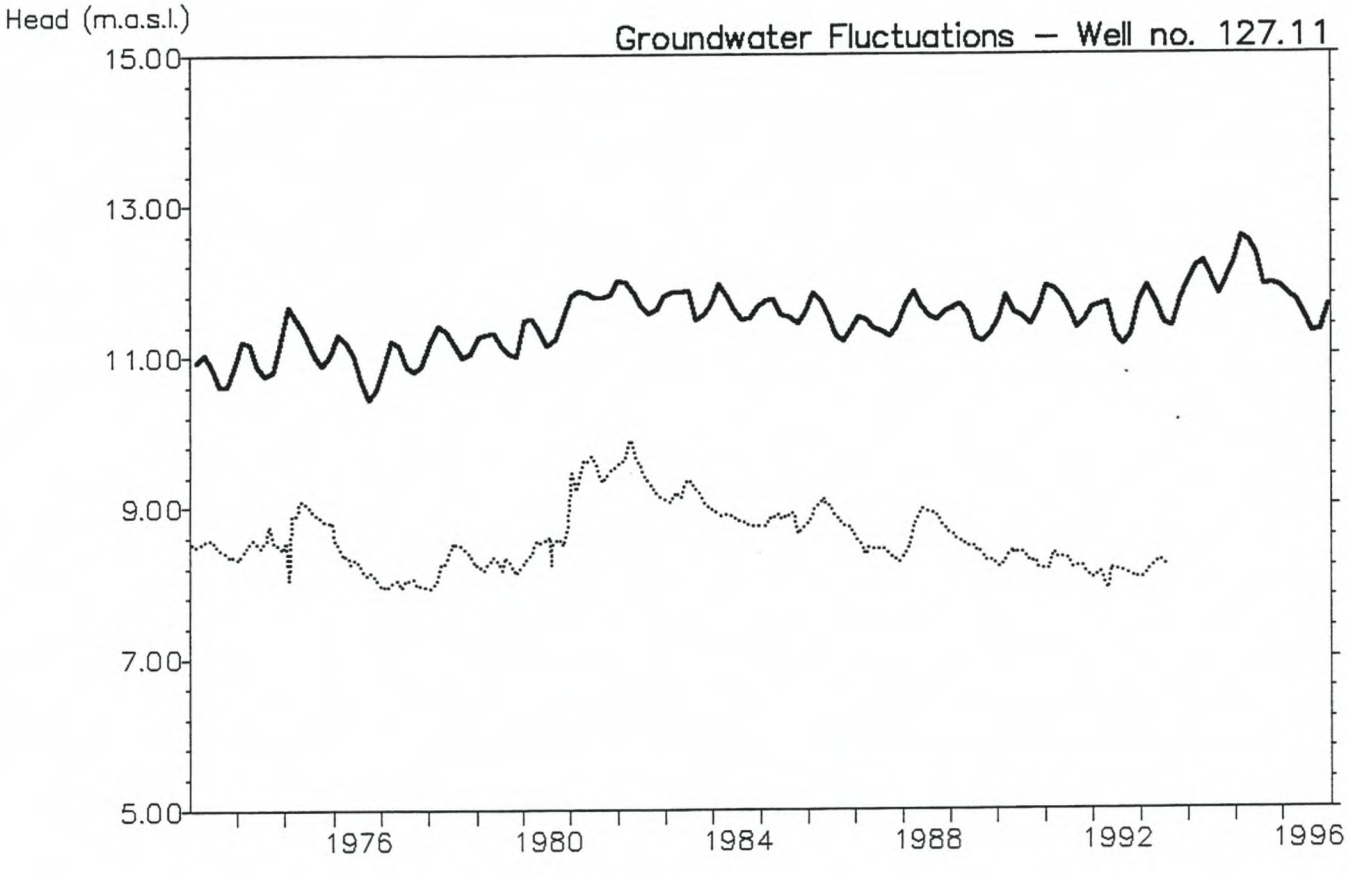
Appendix 2. Simuleret og observeret potentiale 1971-96

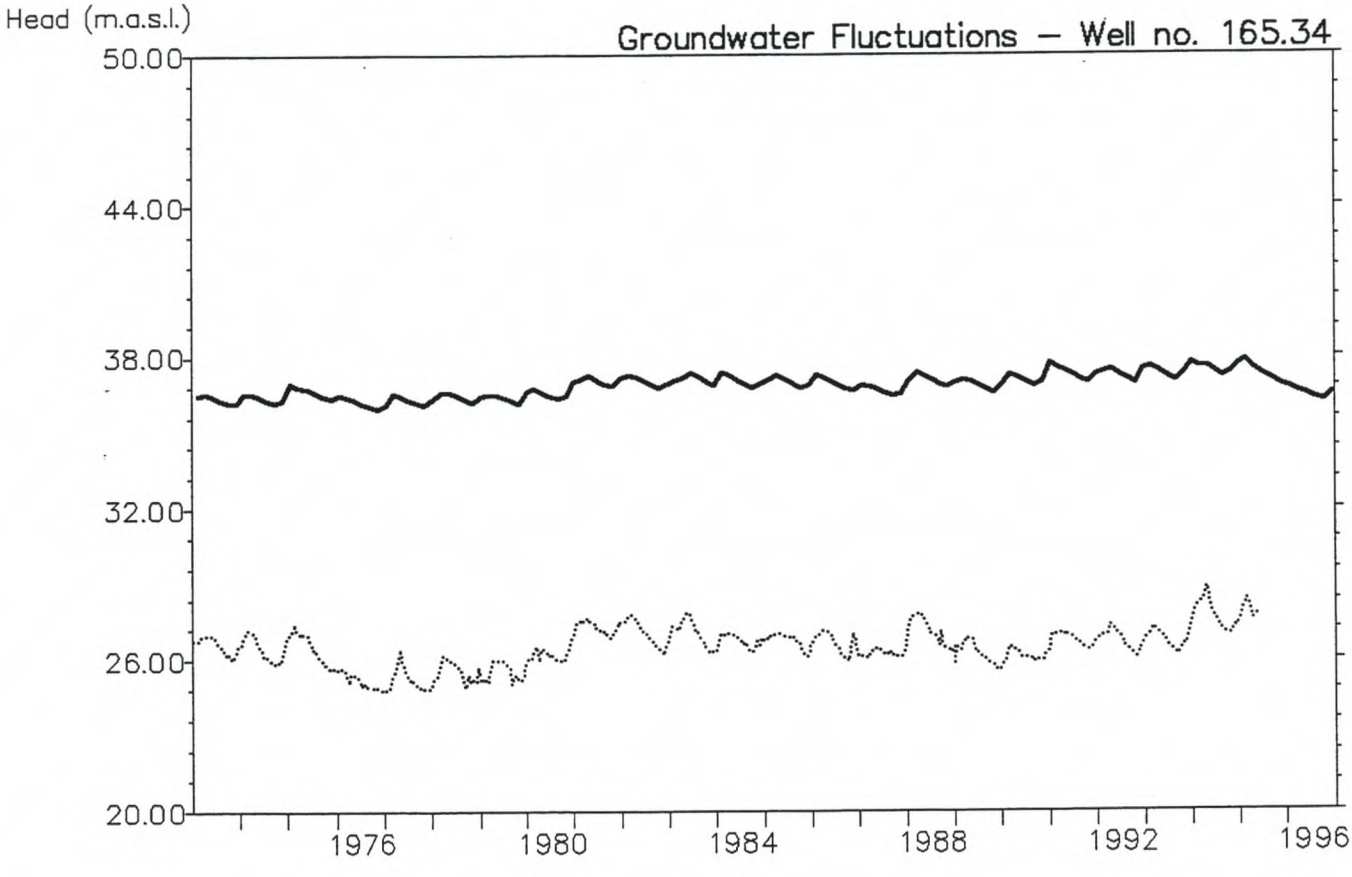

Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 137.46
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996

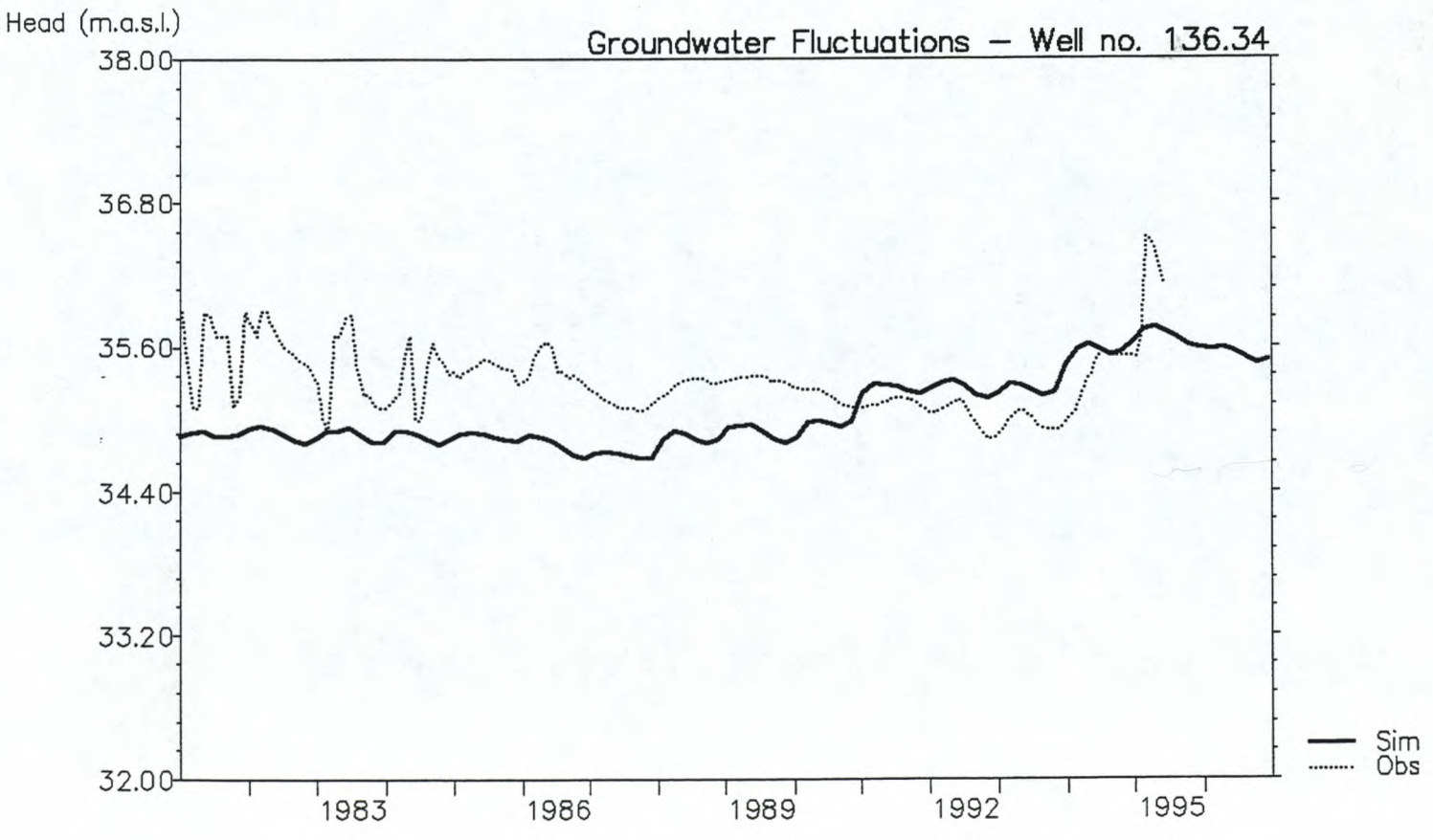

Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 137.2B
12.00
9.60
7.20
4.80
2.40
0.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996


Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 155.184
75.00
68.00
61.00
54.00
47.00
40.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996
Sim
Obs


Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 154.101
22.00
19.60
17.20
14.80
12.40
10.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996
Sim
Obs


Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 127.11
15.00
13.00
11.00
9.00
7.00
5.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996
Si
Ob


Head (m.a.s.l.)
Groundwater Fluctuations – Well no. 165.34
50.00
44.00
38.00
32.00
26.00
20.00
1976
1980
1984
1988
1992
1996
Si
Ob


Groundwater Fluctuations – Well no. 136.34
Head (m.a.s.l.)
38.00
36.80
35.60
34.40
33.20
32.00
1983
1986
1989
1992
1995
Sim
Obs