

DK-Model Bornholm

Model opstilling og kalibrering

Lars Troldborg, Hans Jørgen Henriksen
& Per Nyegaard



DK-Model Bornholm

Model opstilling og kalibrering

Lars Troldborg, Hans Jørgen Henriksen
& Per Nyegaard

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	4
1.1	Formål	4
1.2	Modelbenyttelse DK-model Bornholm	5
2	Konceptuel model	6
2.1	Vandbalance	9
2.2	Hydrauliske parametre	12
3	Modelopstilling	13
3.1	Modelområdet	13
3.2	Randbetingelser	18
3.3	Vandløb	18
3.4	Drænaforstrømning.....	20
3.5	Indvindinger.....	21
3.6	Nedbørsfordeling - klimakoder	21
3.7	Overflade afstrømning - dummy faktor	24
4	Kalibrering	27
4.1	Kalibreringsmetodik	27
4.2	Numeriske parametre	28
4.3	Observationer anvendt under kalibrering.....	28
4.4	Kalibreringsmål.....	30
4.5	Udgangspunkt for kalibrering – fase 0	32
4.6	Kalibrering af hydrauliske ledningsevner – fase 1	34
4.7	Kalibrering af dynamiske parametre – fase 2	36
5	Valideringsresultater	40
5.1	Metodik.....	40
5.2	Resultater	41
5.3	Kvantitative performance kriterier	42
5.4	Kvalitative performance kriterier	42
5.5	Konklusion på validering.....	43
6	Diskussion	45
6.1	Vurdering i forhold til formål.....	45
6.2	Mulige forbedringer (checkliste)	45
6.3	Mulige scenarier	46
6.4	Fremtidigt samarbejde.....	46
7	referencer	47

1 Introduktion

1.1 Formål

Den Nationale Vandressource Model (DK-model) blev iværksat i 1996 med henblik på kvantificering af vandressourcens størrelse og regionale og tidslige variation.

Der var behov for at få udviklet og etableret et landsdækkende system, der kobkede målinger af grundvandstanden fra det nationale pejlestationsnet og afstrømningsmålinger i vandløb med hydrologiske modelanalyser. Målet hermed var, på baggrund af input til modelsystemet i form af nedbør og fordampning, at kunne foretage en mere præcis kvantificering og overvågning af udviklingen i grundvandsressourcens aktuelle størrelse og regionale fordeling.

Integrering med den eksisterende overvågning af grundvandskvaliteten kunne ydermere give et væsentligt forbedret grundlag for vurdering af Danmarks samlede tilgængelige ferskvandsressource med hensyn til mængde og kvalitet.

Det er projektets (DK-modellens) overordnede formål *at udvikle og etablere en landsdækkende vandressource model som grundlag for at bestemme Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige variation og regionale fordeling, samt vurdere den mulige fremtidige udvikling* (Henriksen, 2001).

Mere specifikt er formålene med projektet:

- At forstå processer og parametre der 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
- 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 samlet vurdering af ferskvandsressourcens mængde, kvalitet og beskyttelse
- At reorganisere og effektivisere det nationale ressource-overvågningsnet (pejlestationsnettet) på grundvand, herunder opbygning og implementering af systemer for dataopsamling og lagring, transmission og bearbejdning under anvendelse af tidssvarende teknologi
- At videreudvikle det tilgrundliggende modelsystem med rutiner og moduler, som er nødvendige i forbindelse med de særlige skalaforhold, krav til kvalitetsdokumentation, krav til opdatering og udveksling af modeldata samt nuværende og fremtidige behov i forbindelse med modellering af kvantitet, kvalitet og beskyttelse.

1.2 Modelbenyttelse DK-model Bornholm

Opgavens indhold, formål, GEUS` ydelser og krav til slutprodukt er nærmere beskrevet i Ferskvandets Kredsløb, NOVA 2003 rapport. DK-model Bornholm omfatter en færdiggørelse af DK-modellen med en kalibrering og validering der er målrettet BRK's nærmere formål med modellen, jf. nedenfor.

Herudover gælder følgende:

- Modellen skal afleveres til BRK i et brugbart format så BRK selv kan opdatere den geologiske og hydrologiske model inkl. indføring af modelkyndig medarbejder fra BRK i arbejdet. Modellen færdiggøres i en MIKE SHE / MIKE 11 version hos GEUS, som efterfølgende kan anvendes til dynamiske simuleringer af ferskvandskredsløbet (efter nærmere aftale / modellen vil kræve en betydelig modellerings ekspertise, det er ikke realistisk i første omgang at opbygge en sådan i BRK indenfor projekts rammer, så BRK selv kan foretage simuleringer med VD model Bornholm).
- Modellen vil have en detaljeringsgrad så den kan bruges som den model, BRK skal udfærdige i forbindelse med det modelleringsarbejde, der skal laves som følge af Vandrammedirektivet. I nærværende projekt foretages dog alene en kalibrering og validering af en vandbalance og strømningsmodel (dvs. der opstilles ikke i projektperioden en egentlig stoftransportmodel, men modellen vil kunne udbygges til en sådan hvis der bliver behov herfor).
- Modellen vil kunne gøre det ud for den model, der skal laves for Smålyngen i forbindelse med NOVANA-arbejdet det vil sige at der foretages en afgrænsning af indvindingsoplandet til GRUMO-Smålyngen med den kalibrerede og validerede DK-model Bornholm (Dette punkt afventer dog resultaterne af et sideløbende eksamensprojekt).
- Modellen vil evt. kunne leveres f.eks. "tilpasset" MODFLOW format i køreklar version (denne opgave er dog ikke indeholdt i nærværende budget)

2 Konceptuel model

De ældste bjergarter på Bornholm er Prækambriske gnejser og granitter, som er gennemsat af forkastningszoner. Dette grundfjeld er i tidlig Kambrisk tid blevet overlejret af den røde, limnisk Neksø sandsten og den marine kvartsrige Balka sandsten. I Sen-Kambrium, Ordovicium og Silur består aflejringerne af mørke mudder og kalk aflejringer rig på organisk materiale. Aflejringerne er domineret af "Grønne skifre". "Alun skifre" og "Graptolit skifre" med indslag af tynde kalkaflejringer. Aflejringer fra Devon, Kul og Perm og det meste af Trias mangler på Bornholm, som tidsmæssigt falder sammen med den Sen-Kaledoniske og den Hercyniske orogene perioden. Sedimenter fra Sen Trias består af limnisk røde og grønne ler og sand aflejringer. I tidlig Jura ("Rønne formationen") er der aflejret multifarvede sand og ler i floder og søer efterfulgt af ler, sand og kul som deltaaflejringer. Disse aflejringer overlejres af mere marsk-prægede sedimenter. Derpå aflejres "Hasle formationen" som marine finkornet sandsten med silt og grus. Den afløses af deltaaflejringer med kul, ler og sand som delta aflejringer. I nedre Kridt aflejres derpå først Rabekke formationer, først med flodaflejringer med sand og grus, efterfulgt af sort ler med kul i et sump miljø. Derpå kommer Robbedale formationen med sand aflejringer i et kystmiljø med barriere ører og tidevand. Så følger Jydegård formationen som er aflejret i et lagune/sø miljø og domineres af lerede sedimenter. De yngste Prækvartære aflejringer er fra øvre Kridt, og består hovedsageligt af marint grønsand (glauconitholdigt)- Arnager Formationen og Bavnodde formation adskilt af en marin kalk – Arnager kalk Formationen. De kvartære aflejringer dækker grundfjeldet og de Prækvartære sedimenter, men er relative tynde og mange steder helt manglende. Lerede og sandede moræne dominerer de kvartære aflejringer, medens der lokalt findes smeltevandsaflejringer af ler, sand og grus. Større sammenhængende senglaciale aflejringer af smeltevandssand (Sandur) findes dels nord for Rønne og ved Arnager.

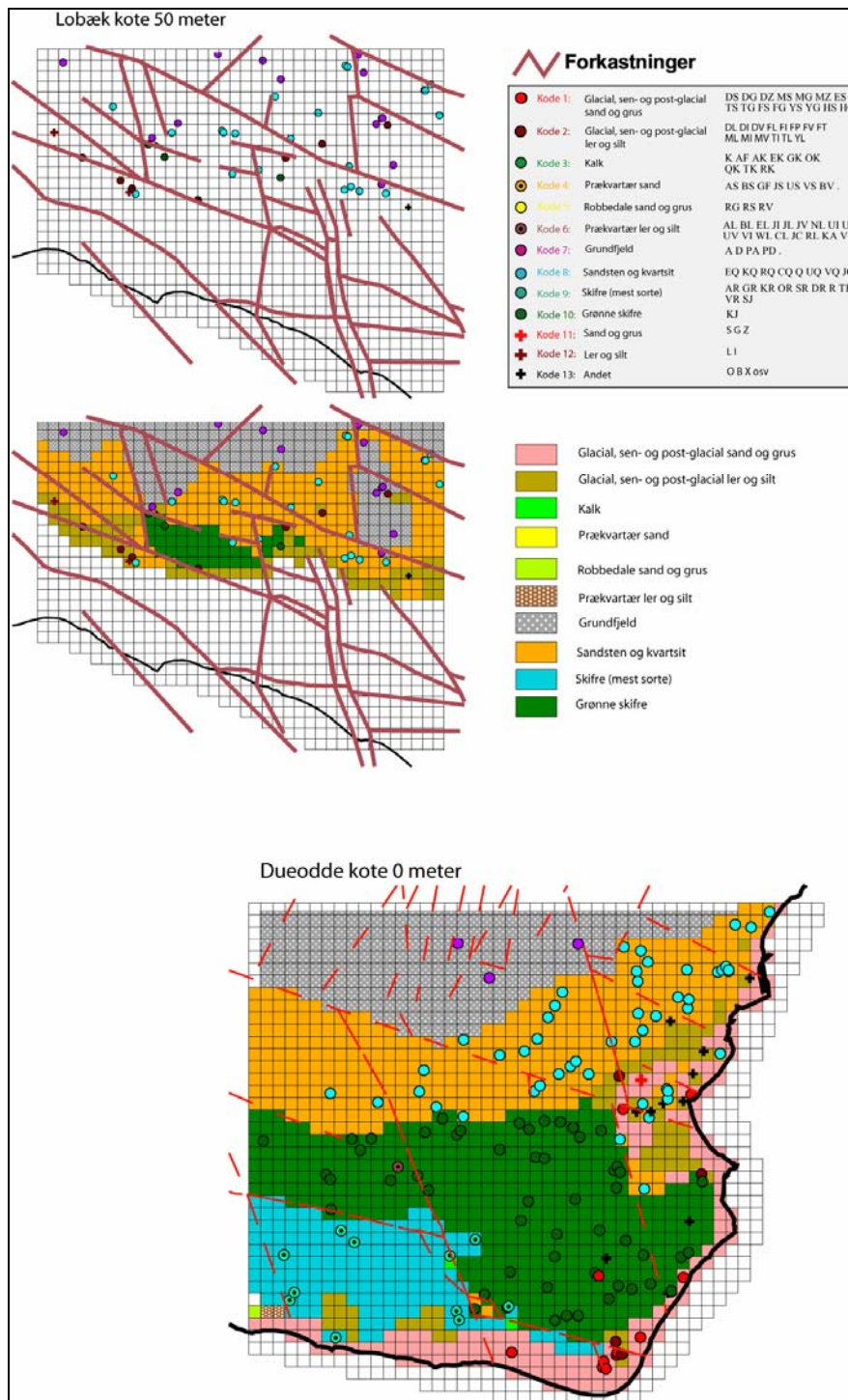
Det er valgt at benytte en grid-baseret tolkningsmetode for Bornholm. Gridmaskestørrelsen er på 250x250 meter og lagtykkelsen på 5 meter. Begrundelsen for den valgte tolkning for Bornholm (og Jylland) har været et ønske om en mere fleksibel tolkning, idet der ikke i samme grad som for Øerne træffes gennemgående lag med regional udstrækning (fx de øvre, mellemste og dybere regionale sandmagasiner på Sjælland og Fyn). De mange forkastningsblokke gør, at et ikke er muligt at lave sammenhængende lag for hele Bornholm. Men det er klart en anden måde at tolke geologien på, når man tolker i faste 5 m intervaller, end når man søger at forbinde sandlag mellem forskellige borer med udgangspunkt i geologiske profiler og evt. filterplaceringer der indikerer vandførende lags beliggenhed.

Dat er først udtrukket fra Jupiter-databasen til en flad tekstfil med DGUnr, x og y koordinater, kote samt top og bund af lagene med angivelse af et DGUsymbol. Sedimenterne er opdelt i 13 kodegrupper: *Kvartært ler* (primært moræneler, men også smeltevandsler og –silt, postglaciale ler og silt), *kvartært sand* (primært smeltevandssand og –grus, samt postglaciale sand og grus), *kalk* (primært Komstad kalk og Arnager kalk), *prækvartært sand* (sand fra Mesozoikum, undtagen Robbedale sand), *prækvartært ler* (ler fra Mesozoikum samt kaolin), *Robbedale sand*, *Grønne skifre*, *skifre* (primært alun skifer og 'sorte' skifre fra Ordovicium og Silur), *sandsten* (primært Balka kvartsit og Neksø sandsten), *grundfjeld* (gnejs og granitter), *sand, ler og andet* (fyld, brønd og ingen oplysninger).

Tabel 1 Hydrologiske enheder anvendt i tolkning af DK-model Bornholm

Kode	Betegnelse	DGUsymboler
1	Q-sand ('Kvartær sand og grus')	DS DG DZ MS MG MZ ES TS TG FS FG YS YG HS HG
2	Q-ler ('Kvartært ler og silt')	DL DI DV FL FI FP FV FT ML MI MV TI TL YL
3	Kalk	K AF AK EK GK OK QK TK RK
4	Præ-sand	AS BS GF JS US VS BV .
5	Robbedale sand og grus	RG RS RV .
6	Præ-ler	AL BL EL JI JL JV NL UI UL UV VI WL CL JC RL KA VV
7	Grundfjeld	A D PA PD .
8	Sandsten og kvartsit	EQ KQ RQ CQ Q UQ VQ JQ
9	Skifre	AR GR KR OR SR DR R TR VR SJ
10	Grønne skifre	KJ
11	Sand	S G
12	Ler	L I
13	Andet	Symboler som ikke indgår i øvrige grupper.

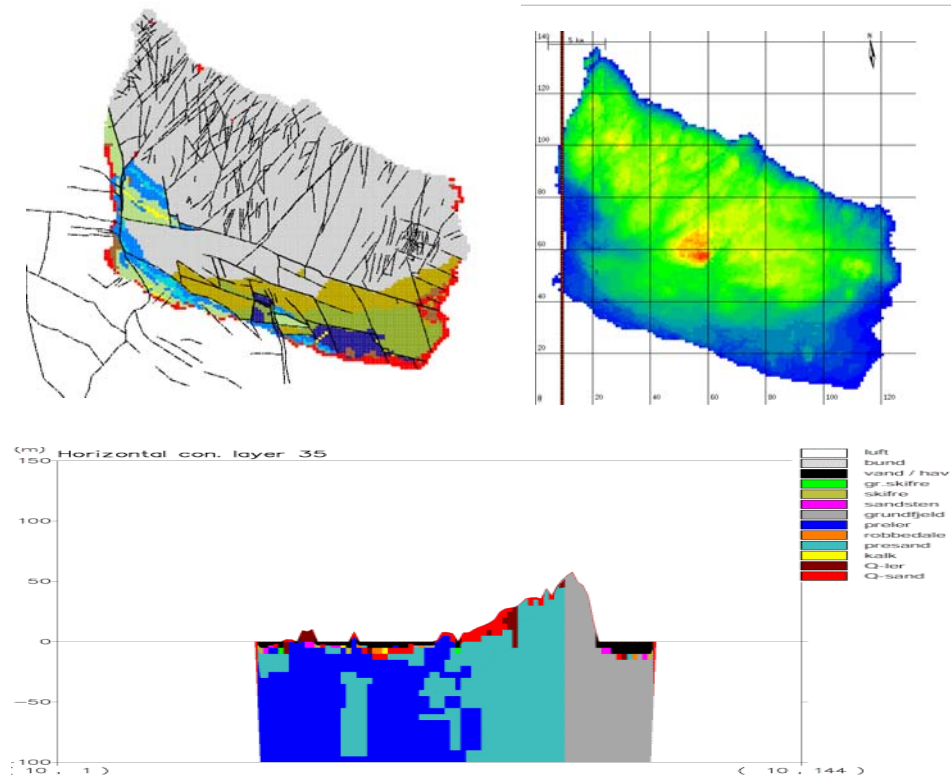
Kodningen er så foretaget i SAS[®] hvor borerne er opdelt i 5 meter stykker ud fra kote og top og bund af lagene. Stykkerne er derpå kodet efter den dominerende sedimenttype $\geq 50\%$. Denne metode kan betyde at tynde lag ikke kommer med i modellen (se fig). Data er derpå importeret i ArcView[®], hvor tolkningen af geologien er foretaget interaktivt på 52 temaer fra kote -100 meter op til kote 145 meter. Foruden boringsoplysningerne er jordartskortet i 1:25.000, det prækvartære kort over Bornholm, havbundssediment kortet samt diverse georefererede publicerede kort benyttet i tolkningen. Efter tolkningen af de mange kort, er data fra ArcView eksporteret som punkter til en database (SAS[®]), hvorfra der til slut er dannet T2-datafiler til MIKE SHE grundvandsmodellen. Som eksempler på tolkningen er vises et område fra Lobæk, kote 50 – 55 meter, dels med kun borer og forkastningsblokke og dels med det tolkede resultat, hvor kasser uden borer er tolket bl.a. ved brug af det Prækvartære kort og Jordartskortet. Desuden er vist en tolkning af Dueoddeområdet, kote 0-5 meter.



Figur 1 Tolknings metodik

Der er en klar større fleksibilitet i kassemodellen, der betyder, at det er let at udskifte et tolket kasse element (5 m x 250 m x 250 m), når der foreligger ny viden fx fra geofysisk kortlægning, eller en ny boring, end det er at re-tolke et geologiske lag. Det er således også relativt let at justere en tolkning, fx på baggrund af foreløbige kalibreringsresultater. Kassemodellen tolkes direkte i GIS (ArcView), og ved successivt at tolke lag for lag fx fra bunden og op, opnås en god, struktureret arbejdsgang, med en indbygget "rumlig" tolkning som er attraktiv for geologen.

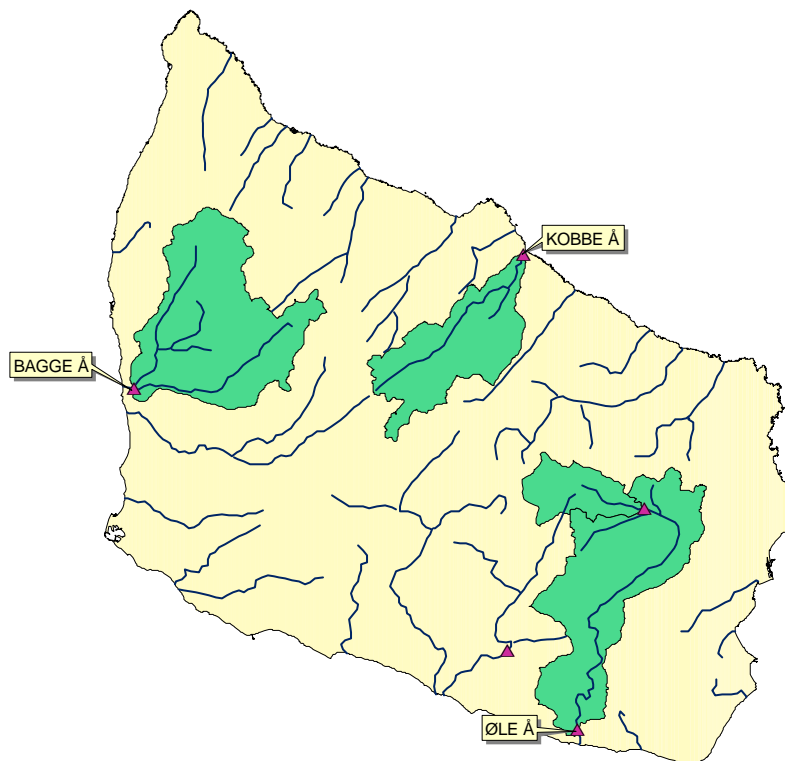
Som supplement til den tolkning er der lavet en overflade afgrænsning af større sprække systemer indenfor de faste sedimenter på Bornholm. Disse medtages i modellen som selvstændige enheder, således at den geologiske tolkning "overskrives" i de afgrænsede områder (vertikalt 20-30 meter). Sprækkesystemet er opdelt i to grupper, der skelnes mellem sprækker i grundfjeldet og sprækker i sandstens formationer.



Figur 2 Eksempler på modelsetup for Bornholm. Øverst til venstre: forkastnings- og sprækkezoner. I øverst til højre: topografi og placering af snit. Nederst: geologisk tværsnit

2.1 Vandbalance

Vandbalancen for Bornholm er tidligere vurderet af Bornholms Amt (Bornholms Amt, 1994) i forbindelse med en vandindvindingsplan for Bornholm, på baggrund af oplandene Bagge å, Kobbe å samt Øle å hvor der i en årrække er indsamlet systematiske vandføringsmålinger og vandstandsregistreringer (Figur 3).



Figur 3 Placering af målte vandløbsoplande Bagge å (Vest), Kobbø å (Nord) og Øle å (Syd)

I den forbindelse blev der opstillet detaljerede vandbalancer for nedbør, fordampning, afstrømning og vandindvinding for perioden 1982-91 (Kobbø å), 1986-91 (Øle å) og 1984-91 (Bagge å). Arealanvendelse og højdevariationer er indgået i vurderingen vedr. fordampning og nedbør. Disse data skal kort beskrives i nærværende afsnit.

Arealnedbøren for de tre oplande varierer (Bornholms Amt, 1994) mellem 610 og 920 mm med de højeste værdier for oplandet til Kobbø å og de laveste værdier for Bagge å. Forskellen kan forklares af højdeforholdene. Selvom de indsamlede nedbørsdata må anses som repræsentative for Bornholm, bør de ikke anvendes ukritisk til vurderinger af gennemsnitsnedbør på Bornholm.

Data vedrørende fordampning (aktuel fordampning) er beregnet på grundlag af viden om klima, jordtype og arealanvendelse. For skovarealer regnes (Bornholm, 1994) med, at fordampningen er lig den potentielle fordampning plus 15 %.

Fordampningen er størst for Øle å's opland, hvor den varierer fra 502-551 mm/år. For hhv. Kobbø å og Bagge å varierer den mellem 460-520 og 423-475 mm/år. Forskellen kan forklares ved forskellen i arealanvendelse, idet Øle å's opland har ca. 41 % skov, Kobbø å har 24 % skov og Bagge å blot 9 % skov (Bornholms Amt, 1994).

Afstrømningen for de tre oplande varierer fra ca. 120 mm/år (1989) til ca. 400 mm/år (1988). Afstrømningen er størst for Kobbø å og mindst for Bagge å, hvilket også svarer til den fundne nedbørsfordeling.

De estimerede vandbalanceforhold kan kortfattet sammenstilles i tabellen nedenfor (Bornholms Amt, 1994):

Tabel 2 Vandbalanceestimer i mm/år (Bornholms Amt, 1994)

Opland/ År	Nedbør mm	Fordampning mm	Afstrømning mm	Indvinding mm	Restled mm
Kobbe å / 1982-91	803	490	295	3	15
Øle å / 1986-91	773	533	229	11	0
Bagge å / 1984-91	710	442	216	18	34
Gennemsnit bedømt udfra de tre oplande	762	488	247	5	22

Restledet udtrykker såvel effekten af magasinering som evt. underjordisk afstrømning fra oplandet til havet (eller evt. nabovandløb). Grundvandsstanden er ifølge det datamateriale der foreligger i (Bornholms Amt, 1994) svagt faldende i oplandet til Bagge å.

Ud fra ovenstående undersøgelse af vandbalancen kan det konkluderes, at der sker en underjordisk afstrømning og/eller magasinændring på mellem 15-30 mm/år.

Nettonedbøren for tre oplande og for Bornholm kan opgøres til (nettonedbør = nedbør – fordampning) hhv. 313 mm/år (Kobbe å), 240 mm/år (Øle å), 268 mm/år (Bagge å) og 274 mm/år (simpelt gennemsnit af tre oplande / Hele Bornholm).

I VD model Bornholm er nettonedbøren beregnet ud fra DK-modellens rodzonemodul. For perioden 1990-1996 er anvendt nettonedbørsværdier for Bornholm på 350 mm/år, baseret på nye nedbørskorrektioner og modificeret Penmann fordampning. Fra andre DK-model oplande (se Ferskvandets kredsløb) er det vurderet at denne nettonedbør typisk er 10-30 % for høj, men det har ikke været muligt at bestemme en korrektionsfaktor for Bornholm i kalibreringsforløbet (idet to stationer Bagge å og Kobbe å giver for stor afstrømning mens en station Øle å giver for lille afstrømning i forhold til observerede data; endelig giver den øverste station i Øle å samme afstrømning som observeret).

I oktober 2005 er der foretaget en beregning af nettonedbøren med et 'justeret' rodzone-modul for hele landet, altså også Bornholm, hvor der er anvendt de nyeste anbefalinger (Plauborg et al., 2003), dog med et forsøg på forfining af nedbørskorrektionsfaktorerne så der i stedet for nye håndtal (1961-90) anvendes temperaturafhængig månedskorrektion der afhænger af daglig middeltemperatur (korrektion for fast nedbør når $T > 1$ grad C, og flydende nedbør når $T < 1$ grad C). I denne seneste beregning, hvor der også er introduceret anbefalede afgrødekoefficienter for skov, vådområder og landbrugsområder, og Makkink fordampning jf. Plauborg et al. (2003) er der for perioden 1991-1996 bestemt en nettonedbør for Bornholm på i alt 296 mm/år, altså lidt højere end fundet i ovenstående vandbalance (Bornholms Amt, 1994).

Afstrømningen i perioden 1991-1996 er stort set i samme størrelse som i perioden 1984-91 (i Bagge å hhv. 213 mm/år og 216 mm/år)

Konsekvenserne af ovenstående usikkerheder på klimainputtet er betydelige, idet modellen 'søger' at kompensere for evt. fejl i inputtet ved den inverse kalibrering (både stationær og dynamisk). Hvis man således fodrer modellen med for stor nettonedbør, vil modellen forsøge at estimere de hydrauliske parametre så den underjordiske afstrømning 'absorberer' fejlen i inputtet (hvilket kan resultere i en overvurdering af den underjordiske afstrømning).

Antages det, at nettonedbørsinputtet benyttet i den kalibrerede model er korrekt (= 350 mm/år), fås dermed en underjordisk afstrømning i størrelsesordenen 90 - 110 mm/år, hvil-

ket må siges at være ret højt sammenlignet med de 15-30 mm/år estimeret af Bornholms Amt (1994).

Antages det, at de nye tal fra oktober 2005 (med "forfinet" nedbørskorrektion) i stedet er de mest gyldige (nettonedbør = 296 mm/år) fås her en underjordisk afstrømning på i størrelsesordenen 40 - 50 mm/år.

2.2 Hydrauliske parametre

Tabel 3 Estimerede startværdier og forventet 'range' for parametre for Bornholm

Parametre i mættet zone (SZ)	Startgæt (range)	
Tidskonstant, dræn	$1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)	
Hydraulisk ledningsevne	Horisontal	Vertikal
Kvartært sand	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$1/10 \times K_x$
Kvartært ler	$1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Kalk	$1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Prækvartært sand	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Robbedale	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ($5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Prækvartært ler	$1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Grundfjeld	$1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Sandsten	$1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Skifre	$1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Grønne skifre	$1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Forkastningszoner	$1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	1/10
Magasintal	Frit magasintal	Artesisk magasintal
Kvartært sand	0,25 m/m (0,05 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Kvartært ler	0,25 m/m (0,01 - 0,30)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Kalk	0,2 m/m (0,10 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Prækvartært sand	0,2 m/m (0,05 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Robbedale	0,2 m/m (0,10 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Prækvartært ler	0,2 m/m (0,01 - 0,18)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$)
Grundfjeld	0,1 m/m (? - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)
Sandsten	0,1 m/m (0,01 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)
Skifre	0,1 m/m (0,01 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)
Grønne skifre	0,1 m/m (0,01 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)
Forkastningszoner	0,2 m/m (0,01 - 0,35)	$0,0001 \text{ m}^{-1}$ ($1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$)
Udveksling mellem grundvand og vandløb	1×10^{-9} ($1 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1} - 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	
Lækagekoefficient, vandløbsbund	2 (dels et vertikalt tryk-tab gennem vandløbsbunden og dels et horisontalt tryk-tab i magasinet)	
Interaktionstype		
Overlandflow (OC)		
Overfladeruhed, Manning (M)	3 (2 - 5)	
Overflademagasiner	0,01 (dog 0 i stationære kørsler)	
Vandløbsruhed, Manning (M)	20 (10 - 30)	

3 Modelopstilling

3.1 Modelområdet

Modellen er opsat i forhold til UTM 32 ed50 koordinatsætning. Koordinatsætningen er derigennem i overensstemmelse med den resterende del af den nationale vandressource model, som ligeledes er opsat i forhold til UTM 32 koordinater. Modelområdet dækker hele Bornholm og det er afgrænset ved:

UMT Øst: 861.000 - 894.000

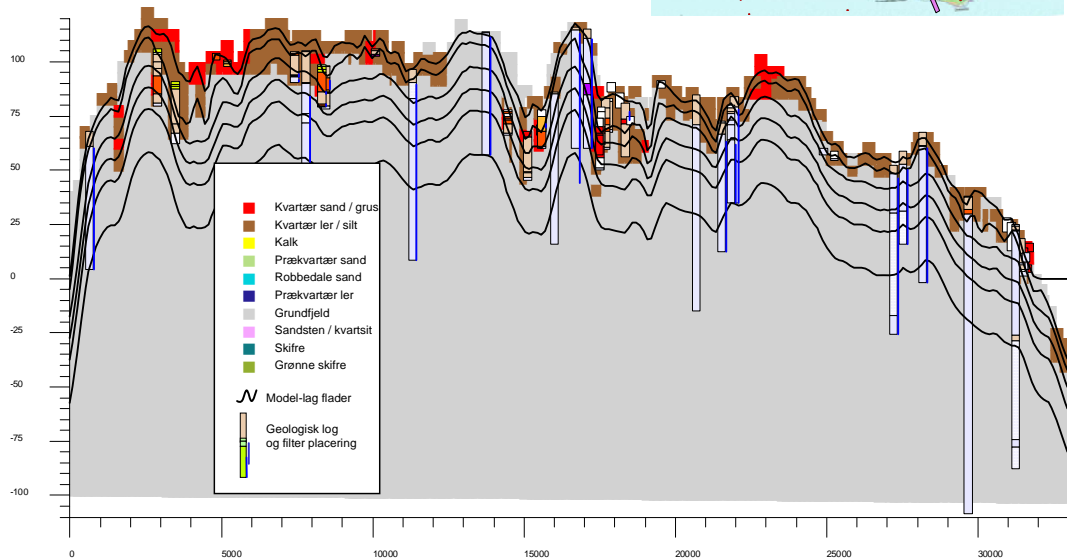
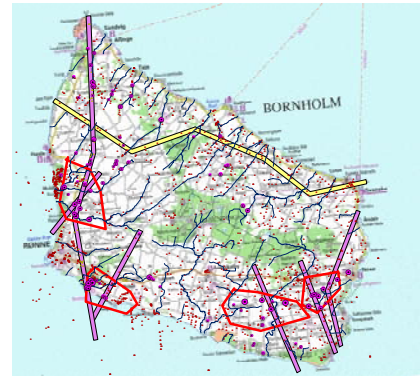
UTM Nord: 6.109.000 - 6.145.000

Modellen er opsat i 250x250m celle-størrelse, herved er det samlede gridstørrelse på 132x144, hvoraf de 10.912 grid er aktive. Modellen er opløst i 6 beregningslag, hvilket sammenlagt giver 114.048 beregningskasser, hvoraf de 65.472 beregningskasser er aktive.

Modeltopografien er baseret på KMS's 25 meter grid, som er midlet til det i modellen anvendte 250 meter grid. De topografiske variationer indenfor griddet kan være ganske store, og de indgår indirekte i beregningen af nedbørsandelen som afstrømmer på overfladen (se under kapitlet "overflade afstrømning – dummy").

Modellens seks beregningslag er fastsat således at de approksimativt følger de administrativt vigtige magasiner. De approksimativt bestemte afgrænsninger blev fundet ved et mini seminar mandag den 10 januar 2005 mellem GEUS og Bornholms region kommune. Ved mødet deltog Kurt Klitten og Lars Trolborg (GEUS), Hans Peter og Kim Dan Jørgensen (BRK) og Kim Sørensen (Niras). Magasin forståelsen af hydrogeologien på Bornholm kan groft set opdeles i tre typer:

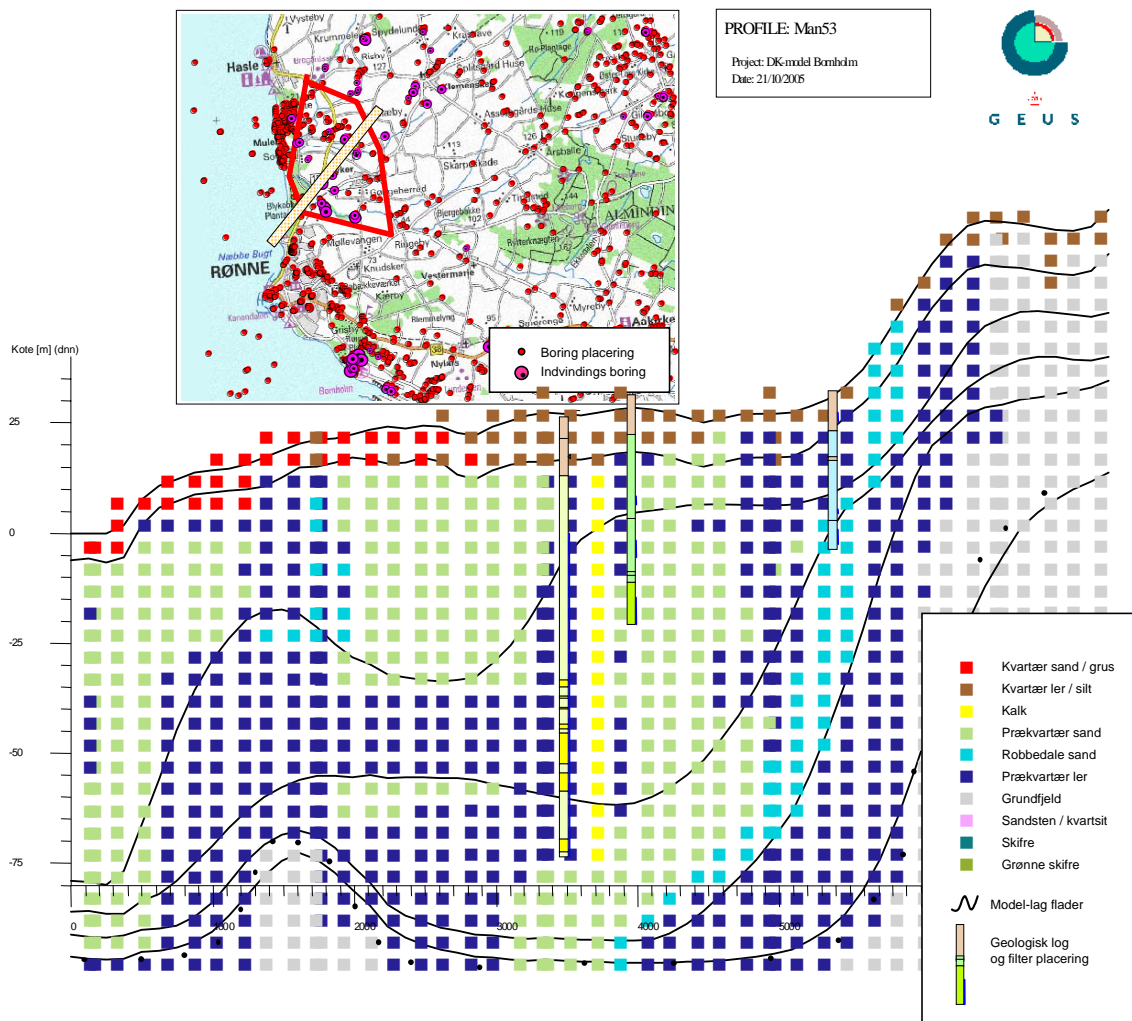
- 1) Grundfjelds- / kvartære magasiner (Figur 4)
 - a) Konceptualisering: Større sprækkesystemer/dale af opsprækket grundfjeld og fyldt ud med kvartært sand/ler. Disse magasiner fødes af større oplande hvor vandet strømmer i de øverste 10-30 meter opsprækkede meter grundfjeld eller tyndere dæklag af Kvartært oprindelse.
 - b) Modelopsætning: Første modellag indeholder de kvartære materialer med undtagelse af de dybere dalstrukturer, herefter følger 3 modellag á ca.10 meters tykkelse, svarende til de øverste opsprækkede meter af grundfjeldet. Femte modellag er 20 meter tykt og dækker derved dybden af de fleste dalstrukturer. Bunden af modellen ligger godt 100 meter under dette lag (hvor der ikke forventes strømning af betydning under denne dybde).



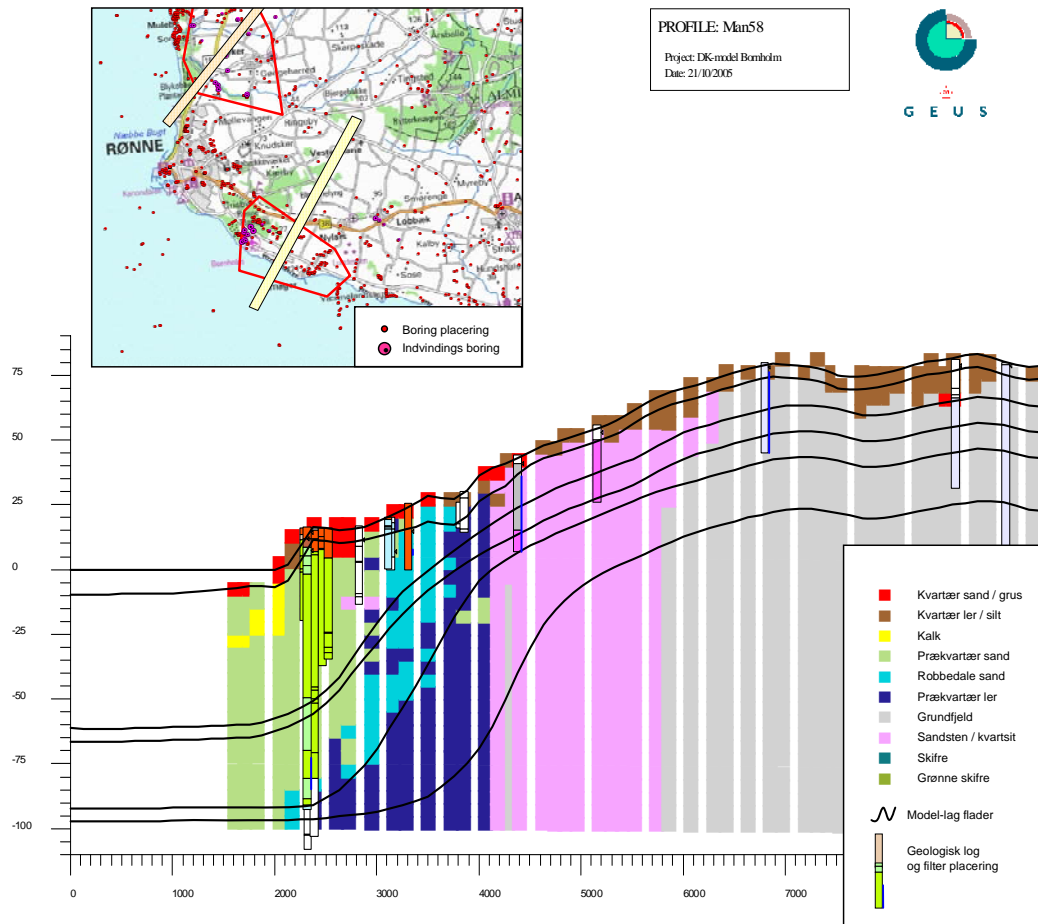
Figur 4 Tværsnit gennem grundfjeldsområde (geologisk model og numeriske lag)

2) Prækvartære sandmagasiner (fx Robbedale; Figur 5, Figur 6)

- Konceptualisering: Skråt liggende formationer af prækvartært sand og ler, ofte med indslag af kalk. Formationerne er dækket af kvartært materiale og de er typisk liggende i direkte kontakt med grundfjeldsmateriale. Grundvandsdannelsen til magasinerne sker dels gennem kontakten til de kvartære magasiner og dels indirekte gennem de over(skråt)liggende magasiner.
- Modelopsætning: Første modellag indeholder kvartære materialer. Bunden af andet modellag følger kystnære prækvartære magasiner. Bunden af tredje modellag følger overfladen af robbedale magasinerne, hvor bunden af fjerde modellag følger bunden af Robbedale magasinerne. Bunden af modellag fem følger toppen af grundfjeldet og bunden af modellen ligger igen godt 100 meter herunder.



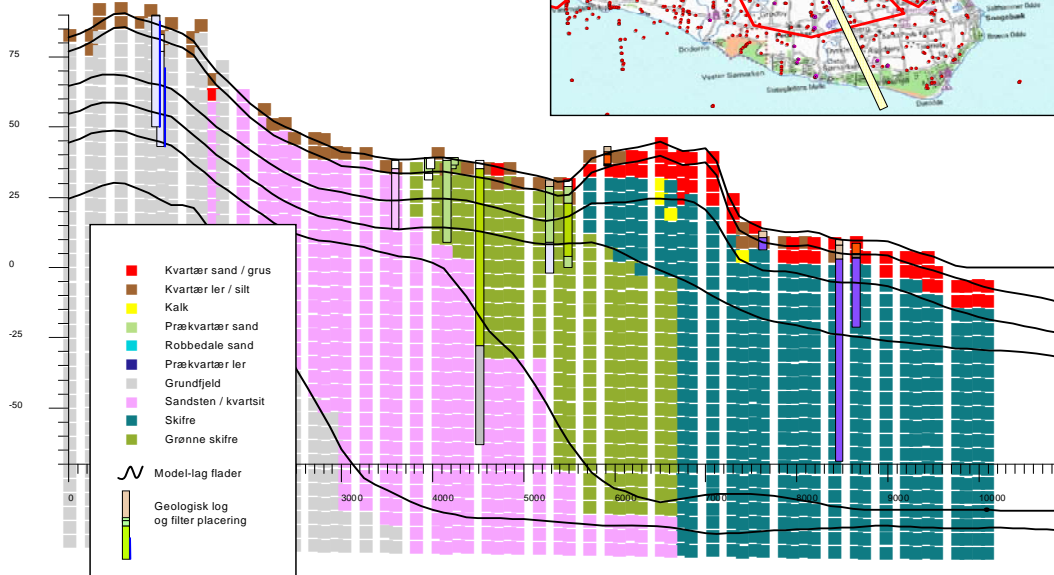
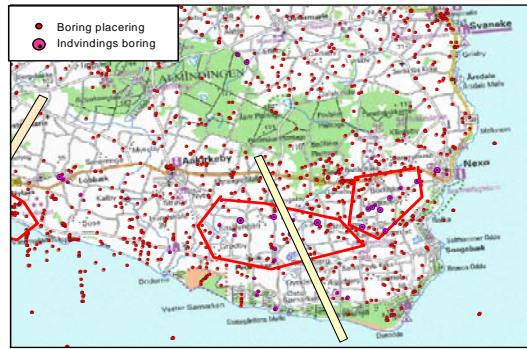
Figur 5 Tværsnit gennem Prækvartære sandmagasiner (geologisk model og beregningslag)



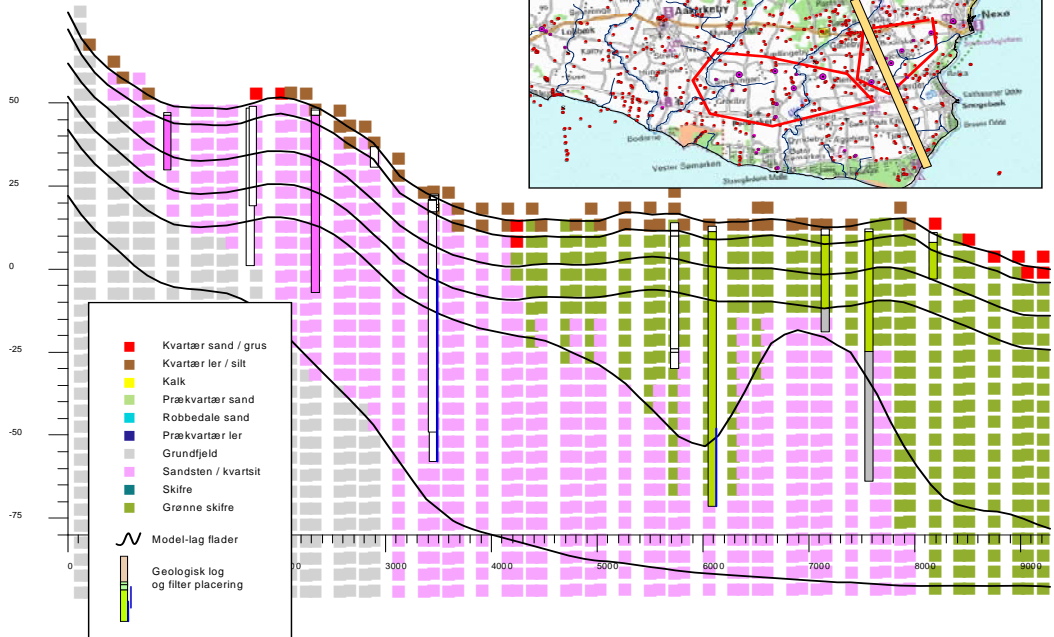
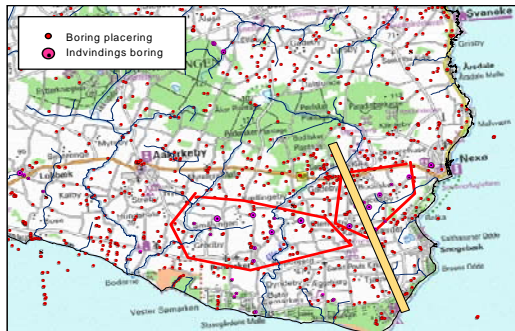
Figur 6 Tværsnit gennem område med Prækvartære sandmagasiner (geologisk model og beregningslag)

3) Sandstens og skifer magasiner (fx. Balka og Nexø sandsten - Figur 7, Figur 8)

- konceptualisering: Skråtliggende formationer af skifre og sandsten, typisk dækket af kvartære materialer og beliggende i direkte kontakt med grundfjeldet. Grundvandsdannelsen til magasinerne sker primært gennem kontakten til de kvartære magasiner og sekundært gennem de over(skråt)liggende magasiner. Det forventes af den største del af strømningen foregår i de øvre opsprækkede dele sandstens formationerne og i overalt i skifrene.
- Modelopsætning: Første modellag indeholder kvartære materialer. Herefter følger modellagene i 3 faste 10 meters intervaller gennem sandstens formationen, således af bunden af enkelte lag i nogen grad følger bunden af de enkelte formationer når de skråner nedad. Bunden af modellen ligger igen godt 100 meter under bunden af lag 5.



Figur 7 Tværsnit gennem sandsten og skifre magasin (geologisk model og numeriske lag)



Figur 8 Tværsnit gennem sandstens og skifre magasiner (geologisk model og beregningslag)

3.2 Randbetingelser

Et centralt element i opstillingen af den numeriske grundvandsmodel er definitionen af randbetingelserne. Da hovedformålet med den nationale vandressource model for Bornholm er at styrke mulighederne for vandressourcebetragtninger er der ved modelopstillingen lagt særlig vægt på en god beskrivelse af de randbetingelser, der styrer nedsivningen til grundvandet.

Randbetingelsen for modellernes øverste lag er defineret af grundvandsdannelse størrelse, som beregnes med et simpelt rodzonemodul på daglig basis ud fra 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 markkapaciteten kun antages en mere begrænset nedsivning. Ved et vandindhold under 70% af markkapaciteten antages ingen nedsivning fra rodzonen. Der ses bort fra en evt. forsinkelse og magasinering i umættet zone.

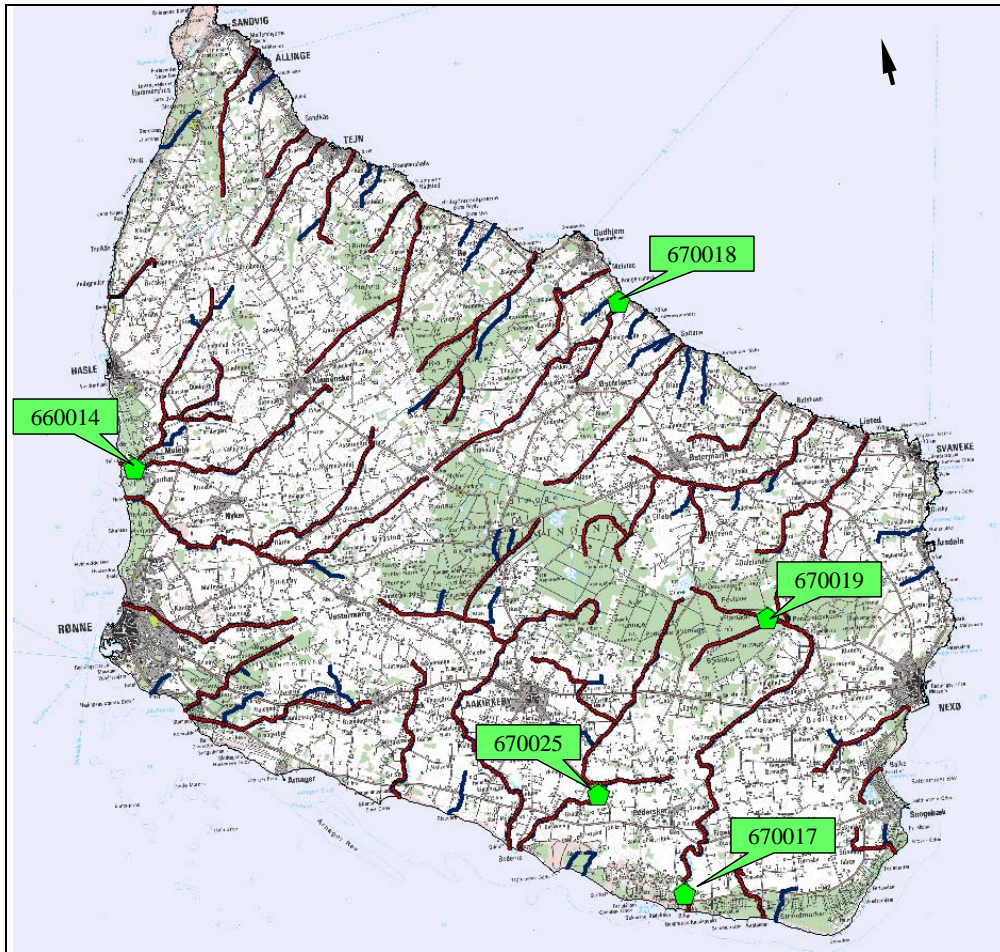
Afhængigt af nedsivningens størrelse, potentialet i det øverste lag og de hydrauliske parametre for grundvandsmodellerne, kan der genereres overfladisk afstrømning (afstrømning på terræn mod vandløb) eller drænvandsafstrømning (afstrømning gennem de øverste jordlag til dræn eller vandløb). Den anvendte topografi er baseret på Kort & Matrikelstyrelsens digitale 50 m grid. Dette datagrundlag er behæftet med nogen usikkerhed som følge af de anvendte interpolationsrutiner og selve datagrundlaget.

3.3 Vandløb

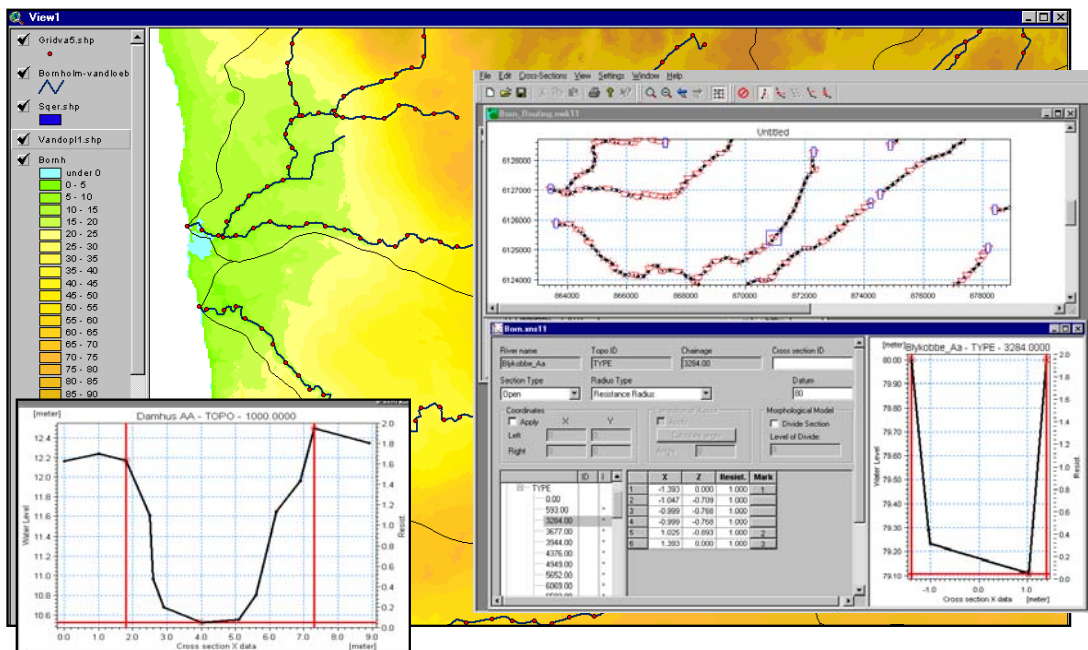
Ved den digitale repræsentation af vandløb er anvendt en rutine hvor vandløbspunkter er interpoleret med en maksimums ækvidistance på 5 meter ud fra Kort & Matrikelstyrelsens digitale 50 m grid og den digitale vandløb repræsentation fra AIS databasen. Kun højereordens vandløb er repræsenteret (1. og 2. ordensvandløb), det vil sige at lavere ordens vandløb ofte ikke er repræsenteret (bl.a. mindre private vandløb og drængrøfter/systemer osv.).

Figur 9 viser de implementerede vandløb. Tværsnit for de enkelte vandløbs strækninger er enten fastlagt ud fra direkte opmålinger eller ud fra forenklede trapezformede tværsnit. . Figur 10 viser eksempler på opmålte og forenklede tværsnit.

Vandet bliver routet gennem vandløbene med kinematisk routning (muskingum-Cunge routing). Nederst i vandløbene er de repræsenteret med en randbetingelse om fastholdt tryk (skal svare til havniveau). Øverst er de indsat en randbetingelse med fast vandføring på 5 l/s (modelteknisk begrundet, så vandløbene ikke løber tørre).



Figur 9 Vandløbssetup - vandløbs punkter (rød), vandføringsstationer (grøn) og strækninger som ikke er inkluderet (blå). Station 670025 har ikke tilknyttet en vandførings tidsserie, og indgår derfor ikke i kalibreringen.

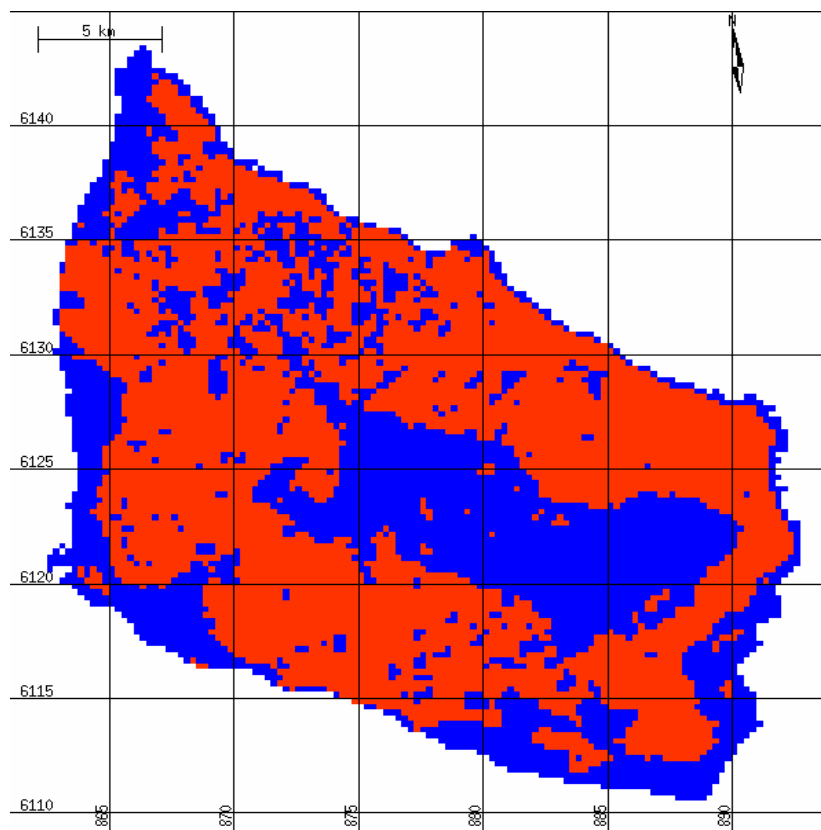


Figur 10 Eksempel på vandløbs setup

3.4 Drænafstrømning

Drænvandsafstrømning, som den er repræsenteret i modellerne, dækker såvel kunstig afdræning som naturlig afdræning. Et detaljeret kendskab til drænsystemer for Bornholm findes ikke på let tilgængelig elektronisk form. Det er derfor nødvendigt at indføre betydelige simplificeringer i beskrivelsen af drænafstrømningen. Det er vurderet, at de afløbsløse dræn, som ifølge modeltopografien og det benyttede vandløbssystem er introduceret i modelopsætningen, enten i praksis afdrænes til vandløb (på grund af intensivt jordbrug) eller skal tilskrives usikkerheder på interpolationen af topografien. 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.

Drænafstrømning beskrives i modellerne 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 og der drænes fra alle områder hvor den gridmæssige lerdækning er på mere end 50% (Figur 11, fundet ud fra jordartskortet 1:25.000). Tidskonstanten for dræn er typisk i størrelsesordenen $1e^{-6}$ til $1e^{-8} s^{-1}$, men den afhænger bl.a. af modelskalaen, og indgår derfor som kalibreringsparameter i den inverse kalibrering (fase 2, kalibrering af dynamiske parametre).

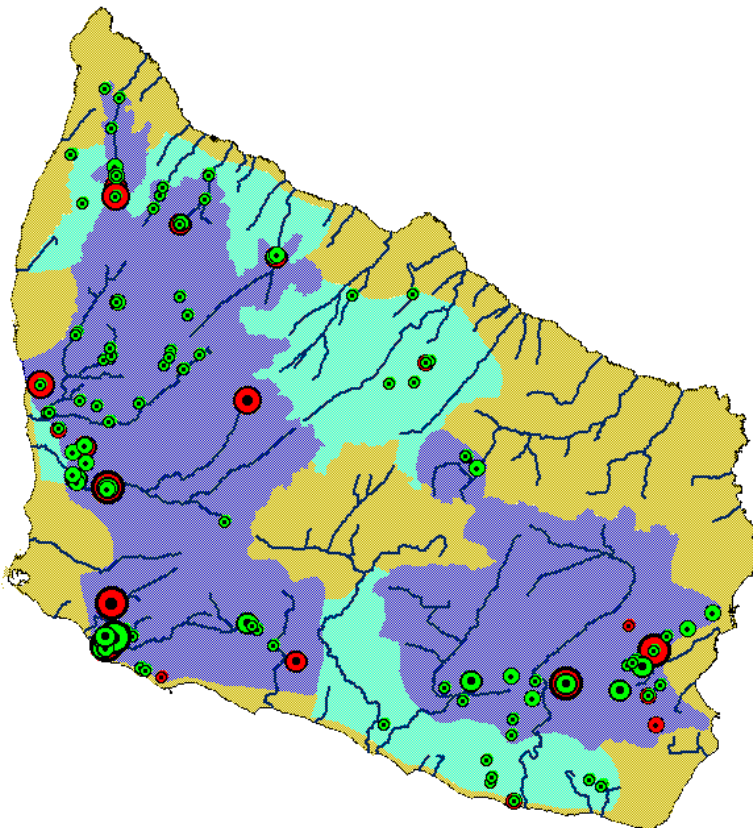


Figur 11 Drænedede områder i modellen (rød)

3.5 Indvindinger

Alle anlæg med indvinding større end 5000 m³/år er medtaget i DK-model Bornholm. Fordelingen af indvindingerne foregik i to omgange. I første omgang foretoges et udtræk fra den indberettede mængde fundet i GEUS databaser, hvor fordelingen blev koblet til de enkelte anlægs nærmeste boring (første udkast til indvindingsfordelingen er angivet med rødt på Figur 12 (diametere på cirklerne er proportional med den indvundne mængde knyttet til boringen). Denne fremgangsmåde er parallel til metoden anvendt for resten af landet.

Efter en revision af indvindingsstrukturen på et projektmøde mellem GEUS og BRK blev det besluttet at forsøge at fordele anlæggenes indvindinger ud på de enkelte boringer tilknyttet til de respektive anlæg. Den enlige spatiale fordelingen af indvindinger medtaget i modellen fremgår af Figur 12 (angivet med grønt, diameteren på cirklerne er proportional med den indvundne mængde knyttet til boringen).



Figur 12 Indvindinger medtaget i DK-model Bornholm (grøn) samt oprindeligt udkast til indvindingsfordeling (rød)

3.6 Nedbørsfordeling - klimakoder

På baggrund af AIS-data for arealanvendelse er der ved hjælp af GIS-bearbejdning foretaget en opdeling af samtlige beregningsgrid i arealtypene skov og åbent land. For de grid hvor mere end 50 % af arealet udgøres af skov er arealanvendelsen skov tillagt disse grid.

For de resterende grid er arealanvendelsen åbent land antaget. Det åbne land er delt op i lerede og sandede områder. Opdelingen er foretaget på baggrund af GIS-bearbejdning af jordartskortet, således at de grid hvor arealet udgøres af mere end 70% ler er tillagt arealanvendelsen leret åbent land, det resterende område er tillagt sandet åbent land. På baggrund af modeltopografien er det vurderet, hvilke områder der har en terrænkote over kote 100 og hvilke der ligger lavere end kote 100. Endelig er det forsøgt vurderet hvilke områder den aktuelle fordampning kan antages at være tilnærmelsesvis lig den potentielle fordampning (vådområder). Ud fra disse betragtninger er modelområderne inddelt i 6 forskellige areal typer (Tabel 13)

Arealtype fordeling	Skov (1)	Åbent land, >100m, sandet (2)	Åbent land, >100m, leret (3)	Åbent land, <100m, sandet (4)	Åbent land, <100m, leret (5)	Vådbund (6)
Antal grid	1658	282	1049	1581	4453	409
i alt km ²	104	18	66	99	278	26
%	18	3	11	17	47	4

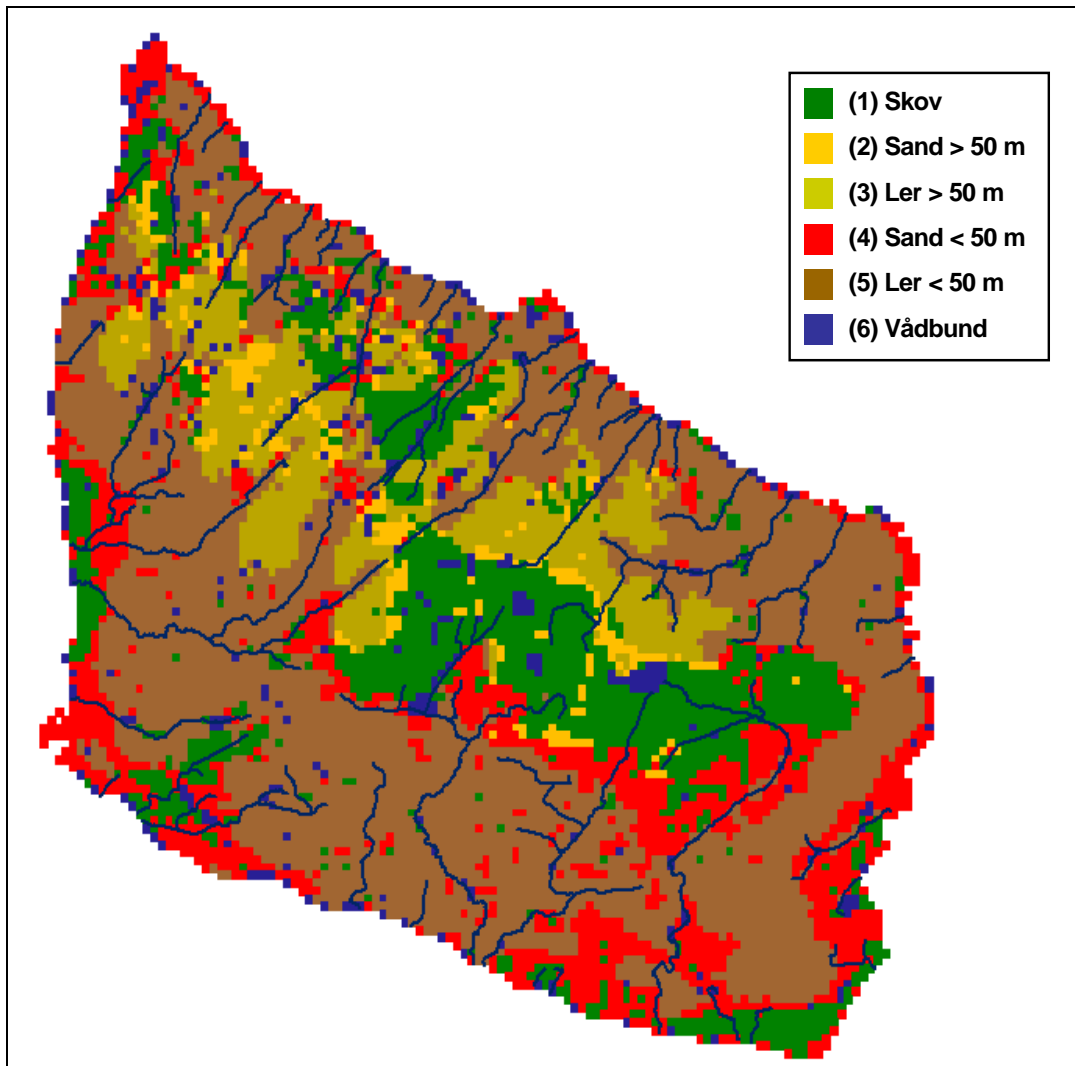
Tabel 13 Arealtypefordeling for DK-modellerne Bornholm (arealkode i parentes)

For DK-modellen for Bornholm blev det antaget, at vådbundsarealer kan afgrænses som de grid hvor grundvandsspejlet i tørre perioder ligger mindre end en given dybde under terræn, dvs. vådbundsarealer er defineret som arealer, der har aktuel fordampning som med god tilnærmelsesvis kan antages at være tæt på den potentielle fordampning året rundt.

Betegnelsen vådbundsarealer må ikke forveksles med vådområder som f.eks. ånære områder. Vådbundsarealer er 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. Foretages vurderingen ud fra AIS-databasen (AIS kategorierne: strandeng, eng, mose, sø og hav er slået sammen) udgør vådområderne knap 1,5 % af det samlede landareal. Grid hvor arealet udgøres af mere end 25% vådområde (AIS-datasættet) er tillagt arealanvendelsen vådbundsarealer. Udfra denne definition udgør vådbundsarealet knap 5 % af det samlede landareal.

Afgrænsningen af vådbundsarealer er påvirket af skala-problematikken. For den øvrige del at den Nationale vandressource Model er celle størrelsen 1x1 km, hvorfor det ikke giver nogen mening at vurdere vådbundsareal problematikken ud fra jordart data. Afgrænsningen af vådbundsarealer skete derfor ud fra modelkørsler. Områder med opad rettet gradient i det øverste beregningslag blev tildelt betegnelsen vådbundsarealer. Vådbundsarealet udgjorde med denne definition for DK-model Fyn knap 10-15 % af det samlede landareal.

I DK-modellerne for Bornholm indgår i alt 6 forskellige kombinationer af arealtype og klimagrid nummer. Til hver type er beregnet daglig nettonedbør, som er anvendt som input til DK-modellen. Fordelingen af kodeværdier for Bornholm fremgår af Figur 14. Endelig er til brug for havområder introduceret en klimakode nr. 7 svarende til en nedsivning på 0 mm.



Figur 14 Distribuering af arealtypekoder (1-6)

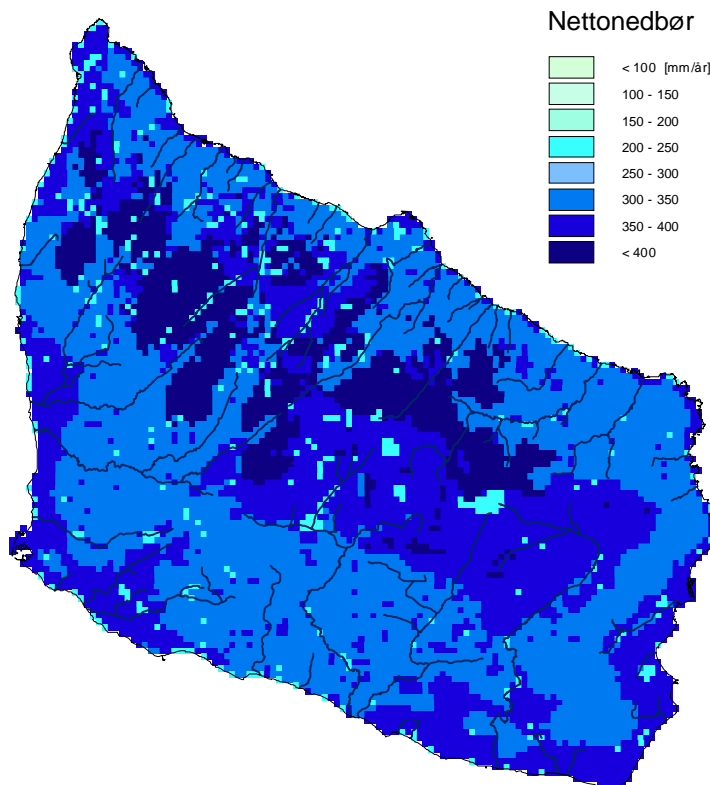
I beregningen af nettonedbøren indgår korrektionsfaktorer til vurdering af korrigeret nedbør (vind- og befugtningstab). Der er benyttet inputdata i form af daglig nedbør og daglig potentiel fordampning fra DMI klima-grid nr. 45 og fra DJF klimagrid nr. 44. Tabel 4 viser værdierne af de parametre, der er anvendt til beregningen af aktuel fordampning og nedsivning fra rodzonen

Tabel 4 Anvendte parametre ved beregning af nettonedbør i rodzonemodulet

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	0.9706 *)	70 mm
Åbent land, ler < 50 m	1.0	0.9706 *)	140 mm
Vådbund	1.0	0.9706 *)	-

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

Den endelige fordeling af nettonedbør afspejler naturligvis arealtypefordelingen og kan ses herunder. De højeste nettonedbørs intensiteter genfindes på de højtbeliggende arealer hvor der ikke er skov, mens de laveste intensiteter genfindes ved arealer med vådbund.



Figur 15 Fordeling af nettonedbør

3.7 Overflade afstrømning - dummy faktor

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-dummy koefficient, 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):

$$\text{Dummy - koefficient}[i, j] = \lambda[i, j](1 - \beta[i, j] - \chi[i, j])$$

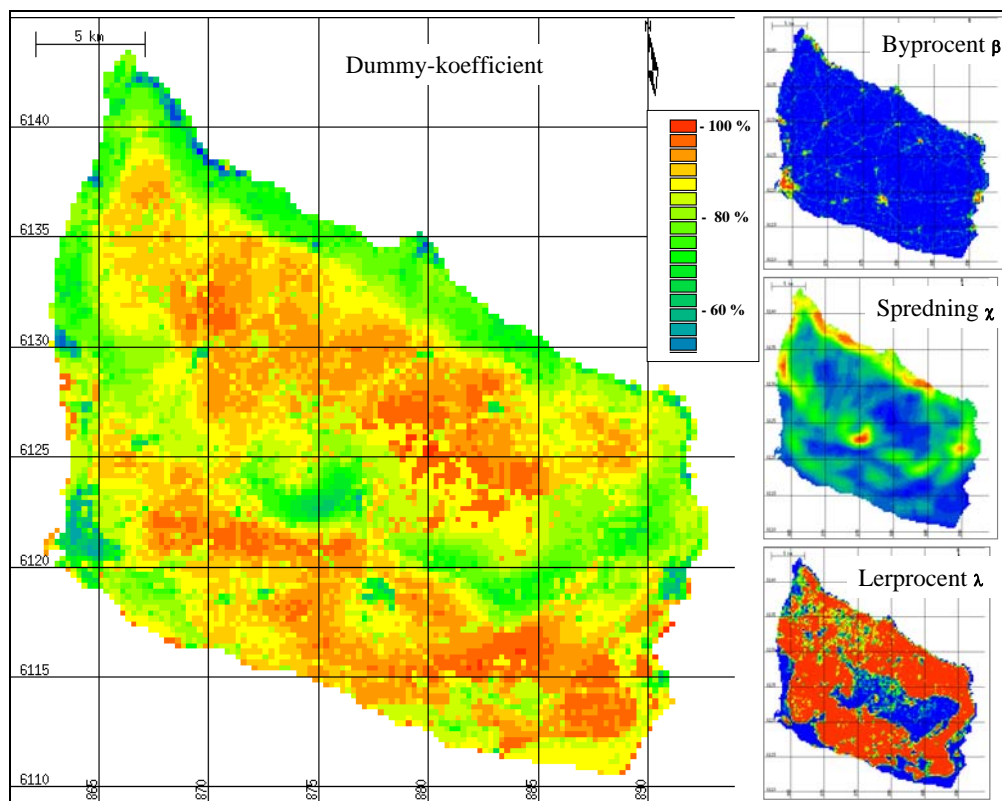
Byfaktor β : Befæstede arealer i forbindelse med byområder (normalt antages at ca. 33 % af byområderne udgøres af befæstede arealer) afleder regnvandet direkte til vandløb. By-faktoren findes ved at multipliceret byprocenten af det enkelte grid med 33%.

Terrænhældningsfaktor χ : Lokalspecifik topografisk variation bevirker, at modelopstillingen vil undervurdere overfladisk/overfladenær afstrømning. Terrænhældningsfaktoren relate-

res til den GIS beregnede topografiske spredning indenfor hvert modelgrid og kompenserer for undervurdering af overfladisk/overfladenær afstrømning. Terrænhædningsfaktoren findes ved at multiplicere den normaliserede [0; 1] topografiske spredning af det enkelte grid med 33%. Den topografiske variation findes ved at sammenligne en 25m højdemodel (Top10DK datasæt) med model topografien (250 m grid).

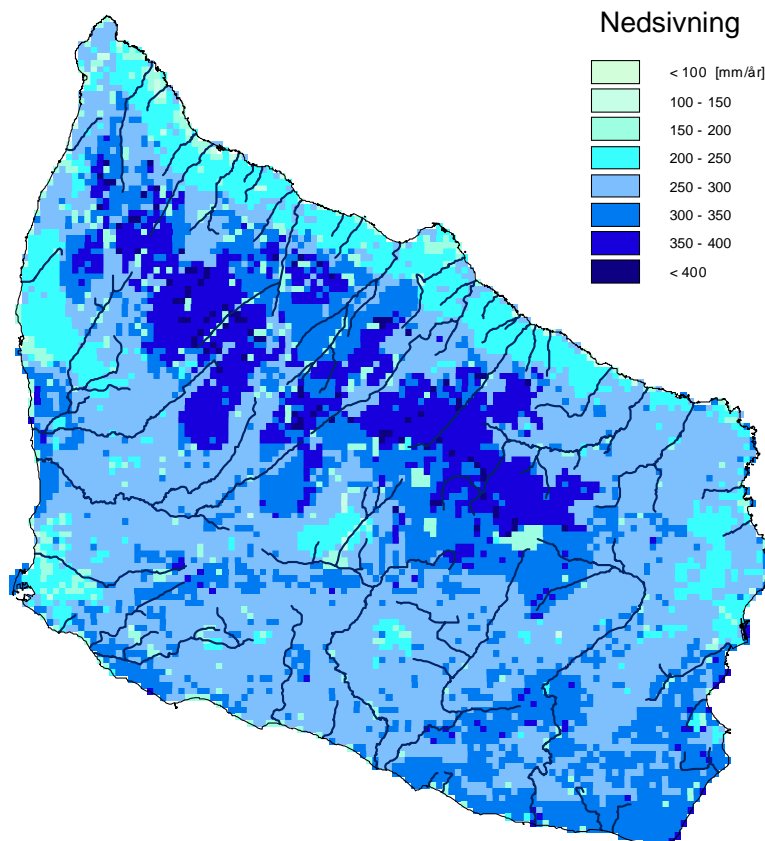
Jordartsfaktor λ : Lokalspecifik (hvor jordarten for mere end 70 % af det enkelte modelgrid består af ler antages det at den samlede vurderede brøkdæl af nettonedbøren som føres til grundvandet reduceres yderligere ved multiplikation med en faktor $\lambda = 0.9$)

Antagelsen vedr. byområder og anvendelsen af nettonedbøren frem for nedbøren i den direkte routing til overfladisk afstrømning er en forenkling af systemet, og det vil potentielt medføre en vandbalance fejl i forhold til den målte afstrømning. I alt 5324 grid har i en del af griddet byområder, men da det ofte kun er en lille del af gridet, dvs. lav procent, så er den samlede by-procent for disse grid 11%. De 5324 grid udgør ca. 56 % af modelområdets areal svarende til en procentvis byområdeandel på 6 %. Dette areal er koncentreret omkring de kystnære områder. Et resultat af denne fordeling er, at den procentvise andel af byområder opstrøms de vandføringsstationer der indgår i kalibreringen er relativt lille. Anvendelsen af nettonedbøren i den direkte routing fra byområder frem for direkte routing af nedbør forventes derfor ikke at få betydning for den samlede vurdering af grundvandsressourcen. Figur 16 viser den resulterende dummy-koefficient og de enkelte faktorer.



Figur 16 Beregning af dummy-koefficient for Bornholm

Dummy koefficienten bruges til at beregne nedsivningen (Figur 17), dvs. den del af netto- nedbøren, som fordeles til SZ. Nedsivningen til SZ vil 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).



Figur 17 Årlig middel nedsivningen til den mættede zone (sz)

4 Kalibrering

4.1 Kalibreringsmetodik

I princippet kan rumligt distribuerede modeller regne på parameterværdier for hvert grid element eller beregningsknudepunkt. I praksis, på grund af heterogenitet i parameterværdier, forskelle mellem observationsskala og model grid skala, og eksperimentelle begrænsninger, så er specifikationen af parameterværdier vanskelig (Rosso 1994, Beven 1996). Derfor blev det som et vejledende princip besluttet at konstruere en model med få frie parametre som muligt. Dvs., der blev så vidt muligt antaget ensformige parameterværdier over hele modelområdet for de geologiske enheder så vel som for de fleste overfladekomponent-parametre.

De hydrauliske parametre kan underinddeles i 3 grupper:

- parametre der styrer fordelingen af nedbør mellem evapotranspiration, grundvandsdannelse og overfladisk afstrømning fra bl.a. befæstede arealer (rodzone modul)
- parametre der styrer grundvandsstrømning, drænastrømning og udveksling mellem grundvand og vandløb (mættet zone model), og
- parametre der styrer overfladisk afstrømning og kanalstrømning (overland og kanalstrømningsmodel)

Bornholms modellen blev inverst kalibreret med fokus udelukkende på de sidste to grupper af parametre, som styre grundvandsstrømningen og overflade strømning, dvs. den første gruppe af parametre indgår ikke i kalibreringen. Udvalgte parametre indenfor disse to grupper hvilede indledningsvist på erfaringer fra kalibrering af DK-model Fyn, hvor der var foretaget en formaliseret sensitivitets analyse af styrende parametre. Til den inverse kalibrering blev anvendt parapy koden, UCODE (Poeter og Hill, 1999), udviklet af USGS (en universel kalibrerings ramme for bl.a. grundvandsmodeller. Kalibreringen af DK-model Bornholm forløb i to faser. I første fase blev modellen inverst kalibreret baseret på en stationær model og som kalibreringstargets blev der anvendt trykniveau observationer. I anden fase blev modellen inverst kalibreret baseret på en dynamisk model og som kalibreringstargets anvendtes tryk observationer og vandløbsafstrømninger. Hvor der i første fase kun indgik hydrauliske ledningsevner fra de geologiske enheder, blev der i anden fase udelukkende fokuseret på magasin, overflade- og drænaparametre. Forud for de enkelte faser blev der gennemført en basis kørsel, som angav modellens evne til at simulere tryk og vandløbsafstrømning baseret på dels initiale bud på hydrauliske parametre (fase et) og dels part-optimerede parametre fra første fase (fase to). Hertil kommer to sensitivitets analyser. Den første er lavet på baggrund af initialkørslerne og den sidste er foretaget før fase 2 kalibrering af de "dynamiske" parametre. Sensitivitets-analyserne forud for de to faser er en del af grundlaget for udvælgelse af parametre indenfor de enkelte parameter grupper.

4.2 Numeriske parametre

Ved de dynamiske simuleringer er der i Mike She pakken anvendt følgende tidsskridt- og iterations parametre:

▪ max. tidsskridt for SZ	24 timer
▪ max. nettonedbørsmængde (P)	1 mm
▪ SZ løsningsrutine	PCG solver
▪ max. antal SZ iterationer	100
▪ SZ iterations stop kriterium (PCG dh iter. Tol)	0,01
▪ max. antal OC iterationer	99
▪ OC iterations stop kriterium	1 e-5
▪ max. antal vandløbs iterationer	100
▪ vandløbs iterations stopkriterium	0,025

Data er gemt med følgende tidsintervaller:

- vandløb: 24 timer (svarende til 1 dag)
- overland flow: 720 timer (svarende til 30 døgn)
- grundvand (SZ): 720 timer (svarende til 30 døgn)

Til de stationære simuleringer er anvendt følgende tidsskridts- og iterations parametre:

▪ Tidsskridt	8760 timer (ca. 1 år)
▪ max. nettonedbørsmængde (P)	5000 mm
▪ SZ løsningsrutine	PCG solver
▪ max. antal SZ iterationer	2000
▪ SZ iterations stop kriterium (PCG dh iter. Tol)	0,25

4.3 Observationer anvendt under kalibrering

Pejleobservationerne stammer dels fra Jupiter databasen, hvorfra observationer foretaget efter 1980 er anvendt, og dels fra data modtaget direkte fra BRK's databaser. I alt er der medtaget data fra 472 filtre svarende til 3561 observations tider. Af de 472 filtre var UTM koordinater tilgængelige for de 463 af dem, heraf er der 76 filtre med mere end 3 observationstider (dvs. egentlige tidsserier).

Den initiale bearbejdning af trykobservationer bestod dels i at bestemme gennemsnit, maksimum og minimum værdier for de enkelte filtre, og dels i at sammenholde filter koter med model-lagfølgen, således at det var muligt at sammenligne simuleret trykniveau for de enkelte modellag med observations værdier (maks., min og middel samt enkeltværdier i en tidsserie). Bearbejdningen af tidsserier, positioner, filterkoter og sammenholdning med modellag blev foretaget i GIS (Geoeditor fra DHI) med trækning af data fra Jupiter.

I den efterfølgende bearbejdning blev data fra initial-bearbejdningen sammenlignet med initialkørsels resultater hvorved det var muligt at fange åbenlyse fejl ved enten lagtildeling eller i forhold til tidsserie-bearbejdningen. I denne fase blev godt 10-15% af tidsseriedata rettet og maks 5% er flyttet til andre lag. Den enlige fordeling af pejleobservationer fordelt efter modellag er opgjort i nedenstående tabel.

Tabel 5 Datagrundlag ved beregning af RMS værdier ud fra bearbejdede observationer af trykniveau

Beregningslag	Anvendte observationer	Procentvis fordeling (%)
1	135	29%
2	251	53%
3	53	11%
4	22	5%
5	12	3%
i alt	473	

Udvælgelsen af hvilke vandføringsstationer der skal kalibreres efter sker primært under hensyntagen til at den anvendte modelskala. Det vurderedes for DK-model Sjælland (Henriksen et al., 1998), at afstrømningssimuleringer af stationer med et opland mindre end 50 km² er usikker. Dette er dog ikke indlysende sikkert at det kan overføres til Bornholms modellen, idet der anvendes et noget finere grid, der er derfor som udgangspunkt benyttet alle stationer med tidsserier af afstrømning uanset om oplandene var under 50 km².

Anvendeligheden af afstrømningsdata kan være begrænset for vandløb der er påvirket af regulering og store spildevandsudledninger. Spildevandstilledninger simuleres ikke i modellen. Regulerede vandløb er mindre anvendelige, da reguleringen ikke er indarbejdet i modellen. Ofte forårsager reguleringen imidlertid kun ændringer af den tidsmæssige fordeling af vandføringen over kortere perioder, hvorved stationerne stadig kan bruges i vurderingen af den samlede afstrømning over længere perioder.

Tabel 6 Observeret vandføring for faste vandføringsstationer som anvendes i kalibreringen

Stationsnavne og oplandsstørrelser				
<i>DMU stnr</i>	660014	670017	670018	670019
<i>Vandløb</i>	Bagge å	Øle å	Kobbe å	Øle å
<i>Stations navn</i>	Hasle klinker	S. F. Boesgård	Kobbedal	V. Vibebakke
<i>Opland</i>	42 km ²	39 km ²	24 km ²	9 km ²
Statistik [l/s] for perioden 1990-2000				
<i>Middel</i>	292	380	250	95
<i>Min</i>	5	0	1	0
<i>10% fraktil</i>	14	3	7	1
<i>25% fraktil</i>	38	24	27	8
<i>50% fraktil</i>	128	168	104	54
<i>75% fraktil</i>	386	532	304	140
<i>90% fraktil</i>	778	1056	635	260
<i>Maks</i>	4300	9042	5042	1333

Det skal bemærkes at de faste vandføringsstationer har meget små minimums vandføringer (min. og 10% fraktil), som det med nuværende vandløbssetup ikke vil kunne nås, idet der modelteknisk er lagt randbetingelser (med fast tilløb på 5 l/s) ind i toppen af vandløbene.

4.4 Kalibreringsmål

De tre statistiske størrelser som kalibreringen blev målt efter var:

(1) Et mål for afvigelse mellem simuleret og observeret trykniveau:

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

(2) Et mål for modellens evne til at simulere gennemsnitlig afstrømning for en bestemt vandføringsstation:

$$F_{Bal} = 100 \frac{\overline{Q_o} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_o}} \quad , \quad (\%)$$

(3) Et mål for evnen til at simulere variation i afstrømningshydrografen for en bestemt vandføringsstation (Nash and Sutcliffe, 1970):

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

hvor

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

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

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

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

$\overline{Q_o}$: gennemsnitlig observeret afstrømning i test perioden (l/s)

$\overline{Q_s}$: gennemsnitlig simuleret afstrømning i test perioden (l/s)

Under opbygningen af DK-model Bornholm blev der primært lagt vægt på at de geologiske enheder skulle repræsenteres rumligt korrekt og at beregningslagene skulle følge laggrænserne, dels fordi de geologiske lag antages at være sammenhængende i større områder og dels fordi det herved blev muligt at trække resultater ud som således har gyldighed på magasin niveau. Performance kriterier blev udvalgt så de afspejler formålet med modelleringen, som er simulering af udnyttelig ressource, der afhænger af påvirkninger af trykniveau og vandløbsafstrømning ved et antal lokaliteter. RMS værdier beregnes for hvert beregningslag, hvorimod R^2 værdien og F_{bal} beregnes for de udvalgte vandføringsstationer.

Den indledende grove kalibrering af modellerne handler i udpræget grad om at få elimineret de væsentligste numeriske problemer. De fysiske love, som Darcy's lov om sammenhængen mellem flow, hydraulisk ledningsevne og tryk, bliver strakt til en ydergrænse ved at ekstrapolere dem fra mikroskala til 250x250m² grid. Tilsvarende er modelkoden skrevet til et pænt rektangulært verdensbillede, som ikke nødvendigvis følger de foretrukne sprækketretninger. Vi ved således på forhånd at der er modsætning mellem rektangulære beregningskasser sprækketransport og at det skal give anledning til agtpågivenhed når vand-

transport i ikke opsprækket klippemateriale skal repræsenteres ved Darcy's lov. Derfor vil det forventede kalibreringsmål til dels afhænge af de initiale resultater.

Erfaringer med R^2 værdier for nedbør-afstrømningsmodeller (Nielsen og Hansen, 1973; Refsgaard, 1997) og for internationale vandløb (Harlen, 1991; Andersen et al., 2001) foreslår R^2 værdier mellem 0.50 og 0.95, mens F_{bal} for vandbalancen skal være så tæt på nul som muligt. Tilsvarende skal RMS ligge så tæt på nul som muligt.

Der er i forbindelse med Bornholmsmodellen anvendt følgende nøjagtighedskriterier:

- Performancekriterier for RMS , R^2 , F_{bal} (Tabel 8)
- Et krav om realistiske parameterværdier, dvs. at de optimerede parametre falder indenfor den rang der er opstillet (Tabel 3)
- Der er foretaget en testkørsel med udtræk af værdier for performancekriterier. Det skal vurderes, hvor meget numerisk støj der er f.eks. på RMS værdier som følge af 'skala'. En test af interpoleret trykniveau i 250 x 250 m gridskala gav således en beregnet RMS ved sammenligning med trykniveau observationsdata på 4,61 m, dvs. 'at den absolut optimale RMS' derved ikke kan blive meget lavere end denne værdi

Tabel 7 Opstillede performance kriterier for DK model (Henriksen og Sonnenborg, 2003)

Performance indikator	Fremragende (5 points)	Meget god (4 points)	God (3 points)	Ringe (2 points)	Meget ringe (1 point)
RMS (m)	< 4	4–6	6–8	8–10	> 10
R^2	> 0.85	0.65–0.85	0.50–0.65	0.20–0.50	< 0.20
F_{Bal}	< 5%	5–10%	10–20%	20–40%	> 40%
Aggregeret score	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆

Selvom Bornholms modellen repræsenterer en modellering på mindre skala, så er forventes ikke væsentligt bedre RMS værdier end jf. ovenstående tabel. Bruger man håndbog i grundvandsmodellering (Sonnenborg og Henriksen, 2005) og kravet til RMS herfra vurderet i forhold til trykniveauvariationen i området som er ca. 130 m, fås et krav på

$$\frac{RMS}{\Delta h_{max}} \leq 0,05$$

Fås til sammenligning et krav til RMS på: $RMS < 6,5$ m, og benytter man data fra Jakob Kudsk's eksamensprojekt (Kudsk, 2005 p. 59) er RMS kravet her vurderet til henholdsvis 6,9 m for grundfjeldsområdet og 4,9 m for sedimentområdet, altså i gennemsnit et krav til RMS værdien på ca.: $RMS < 6$ m for Bornholm som helhed. Konkluderende vurderes dette som performancekravet til Bornholmsmodellen, dvs. **$RMS < 6,0$ m** for hele Bornholm.

Erfaringer med R^2 værdier for afstrømning anbefaler værdier mellem 0.50 og 0.95 (Sonnenborg og Henriksen, 2005). For små oplande kan det være vanskeligt at opnå helt så god performance på denne værdi som for de større oplande, eksempelvis har DHI for Lolland anvendt kravværdier der afhænger af oplandsstørrelsen varierende fra et krav på $R^2 > 0.0$ for vandføringer under 50 l/s, $R^2 > 0.2$ for vandføringer på 50-100 l/s (øverste station i Øle å har en middelvandføring på 95 l/s), $R^2 > 0.5$ for vandføringer på 100-200 l/s og $R^2 > 0.6$ for vandføringer på 200-500 l/s (Kobbe, Bagge å og nederste station i Øle å).

Kravet til R2 er derfor fastsat til følgende:

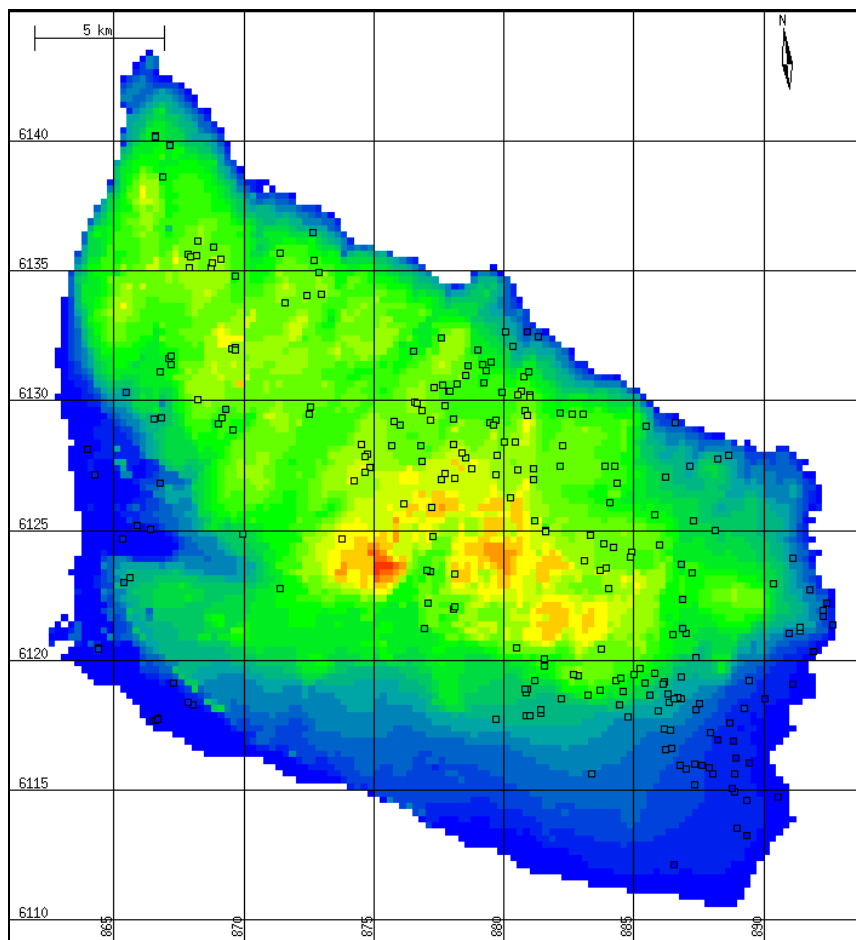
Øverste station i Øle å: $R^2 > 0.4$
De tre øvrige stationer (Bagge å, Kobbe å og Øle å): $R^2 > 0.6$

Værdierne for Fbal er baseret på oplande af størrelsesordenen 100-1000 km². For små oplande kan det være nødvendigt at operere med mindre restriktive performancekrav. Benyttes samme kriterier som for Lolland, som er baseret på en model med samme maskevidthe, kan følgende kravværdier opstilles for de to kategorier (Sonnenborg og Henriksen, 2005):

Øverste station i Øle å: $F_{bal} < 35\%$
De tre øvrige stationer (Bagge å, Kobbe å og Øle å): $F_{bal} < 15\%$

4.5 Udgangspunkt for kalibrering – fase 0

Modellens evne til at simulere tryk og afstrømning vurderedes forud for kalibreringen med parameter set der ansås for bedste bud på repræsentative parametre. Disse bedste bud stammer til dels fra erfaringer gjort under kalibreringen af DK-modellen for resten af landet. For enkelte parametre (hydraulisk parametre for sandsten, skifre og granit) var der ikke gjort nogen erfaringer a priori i DK-model regi.



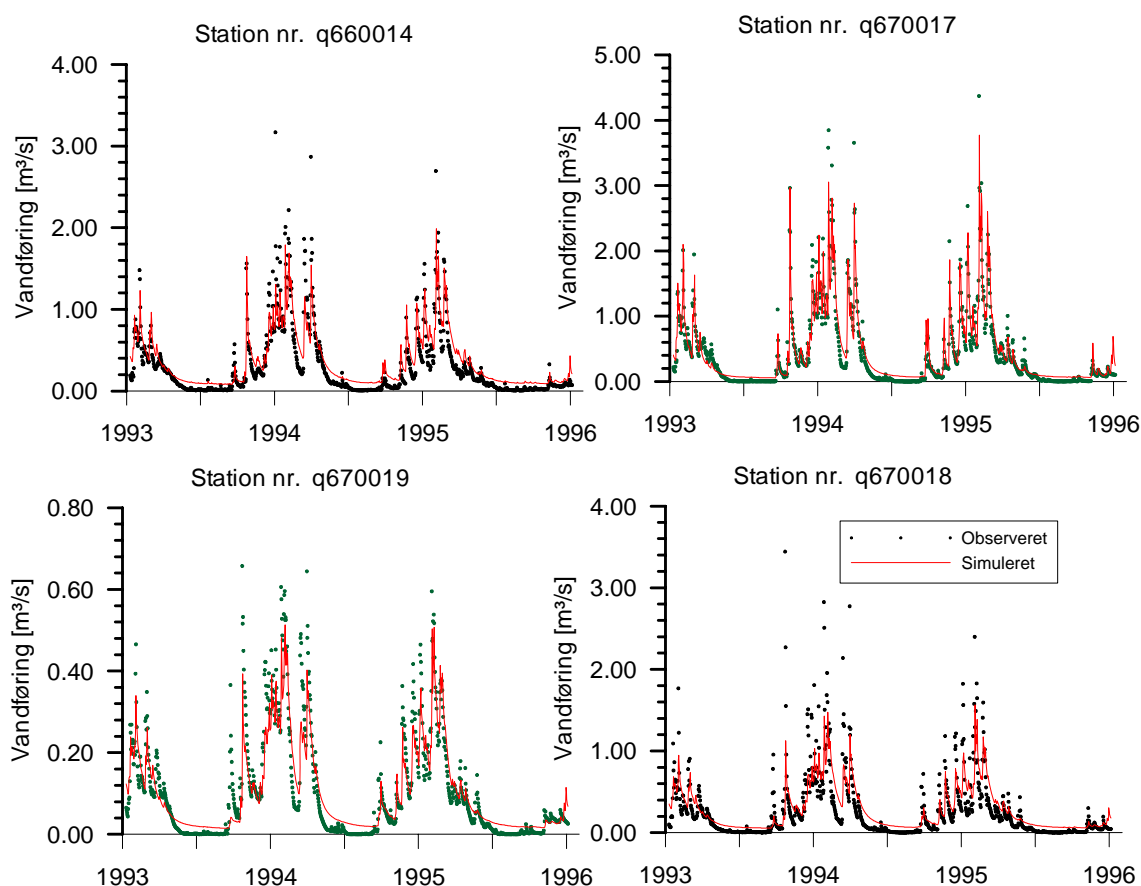
Figur 18 Initiel simulering af trykniveau (lag 2 i modellen)

Tabel 8 Statistik for modellens initiale evne til at simulere tryk (RMS) (før kalibrering)

Lag	vægt	RMS
1	29%	6.32
2	53%	6.18
3	11%	6.67
4	5%	7.88
5	3%	7.89
Vægtet		7.19

Tabel 9 Afstrømnings statistik – a priori - dvs. med ukalibrerede dynamiske parametre (bedste bud – fase 0)

Vandløb	Areal (km ²)	Stationer	Fbalance	F_low	R ²
Bagge å	42	660014	-0,218	1.11E+04	0,78
Øle å	39	670017	-0,070	1.68E+10	0,87
Kobbe å	24	670018	-0,111	7.72E+05	0,62
Øle å	9	670019	0,026	1.44E+16	0,83



Figur 19 initiale vandføringssimuleringer (fase 0, før optimering af hydrauliske ledningsevner)

4.6 Kalibrering af hydrauliske ledningsevner – fase 1

Under fase 1 kalibrering af hydrauliske ledningsevner, blev modellen optimeret under stationære betingelser (middel for perioden 1991-2000) i forhold til de bearbejdede trykniveau observationer. Det ville være muligt at inddrage middelvandafstrømninger for samme periode i kalibreringsmålene, men det blev fravalgt idet de reelle vandføringsmålinger ville indgå direkte i kalibreringsmålene for fase 2 alligevel, hvor der blev kalibreret efter en dynamisk model. Det er desuden fravalgt at forsøge at fitte minimum-afstrømningsmålinger dels pga. konceptuelle vanskeligheder med at oversætte minimumsmålinger til at stationært afstrømningsbidrag og dels fordi der har været påvist reelle forskelle mellem det modeltekniske grundvandsbidrag og en sommervandføring i vandløb (Henriksen og Trolborg 2003).

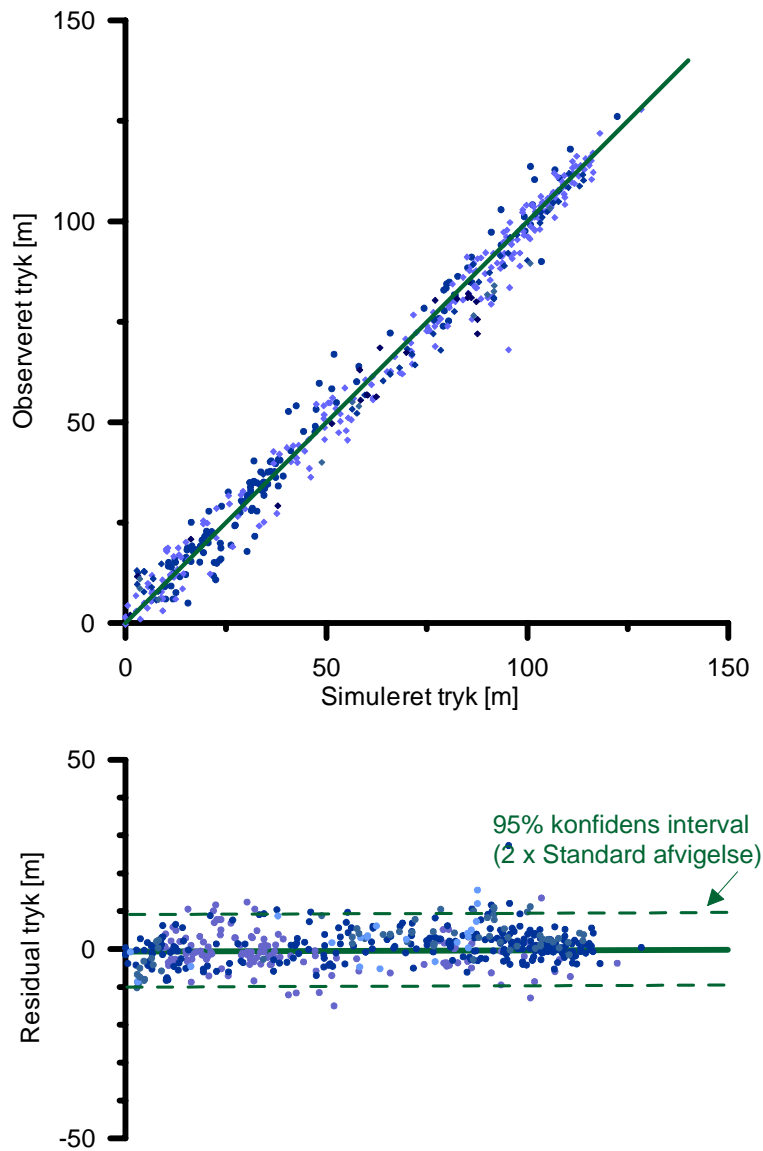
Forud for kørslerne blev der gennemført en sensitivitets analyse af de hydrauliske ledningsevner. Det blev antaget, bl.a. på baggrund af erfaringer fra kalibrering DK-model Fyn, at modellen kunne kalibreres på plads med et fast ledningsevne-anisotropi forhold inden for de enkelte geologiske enheder (1:10 mellem lodret og vandret retning og isotrope forhold i vandret retning). Sensitivitets analyse viste at næsten alle de geologiske enheder, som er medtaget i modellen, kan påvirke trykniveau billedet i et omfang der gør at de kunne medtages i denne kalibrerings fase. Kun kalkenheden syntes at have så lille påvirkning i forhold til observationerne at den ikke blev medtaget i denne kalibreringsfase.

Tabel 10 Statistik for modellens evne til at simulere tryk (RMS) efter fase 1 kalibrering

Lag	vægt	RMS
1	29%	4,99
2	53%	4,36
3	11%	4,91
4	5%	6,33
5	3%	7,23
Vægtet		5,76

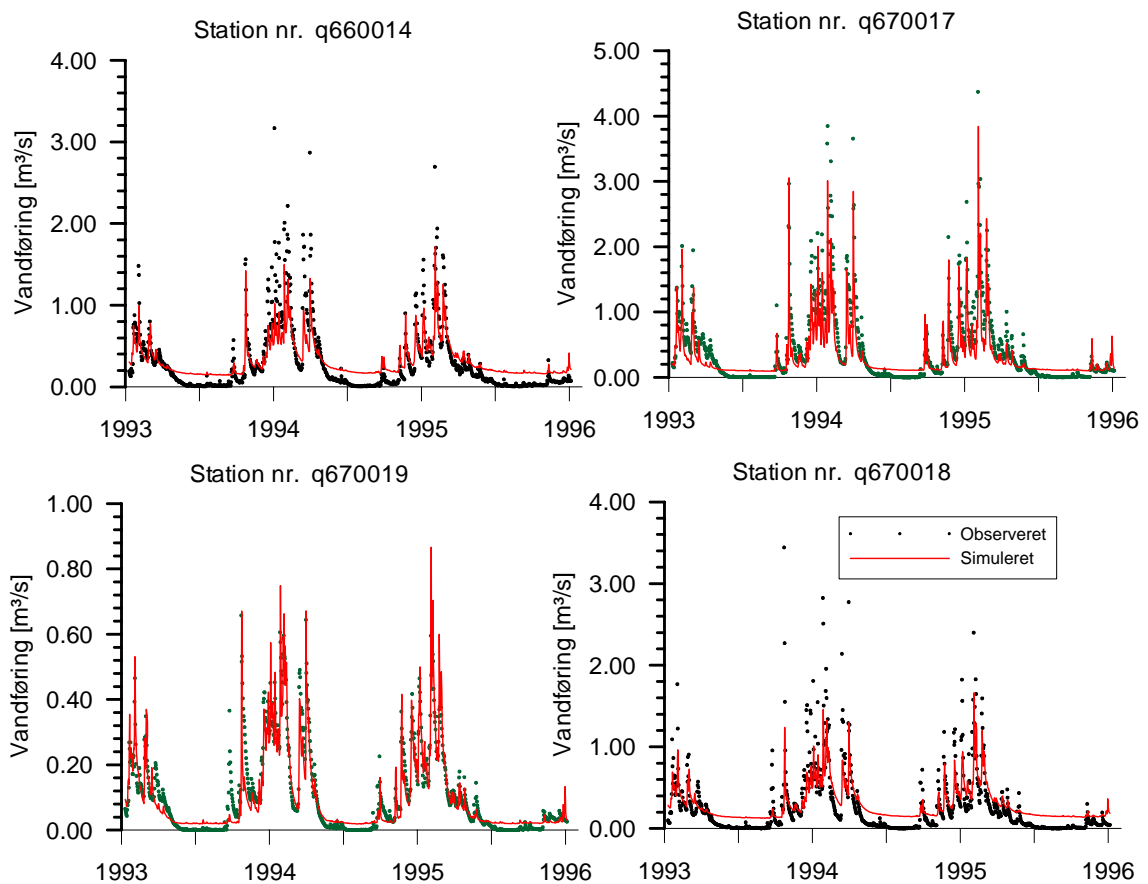
Tabel 11 Afstrømnings statistik efter fase 1 - dvs. efter den stationære kalibrering men med ukalibrerede dynamiske parametre

Vandløb	Areal (km ²)	Stationer	Fbalance	F_low	R ²
Bagge å	42	660014	-8%	3.40E+04	0,67
Øle å	39	670017	25%	3.91E+10	0,71
Kobbe å	24	670018	-14%	3.79E+06	0,59
Øle å	9	670019	5%	1.17E+16	0,84



Figur 20 Trykniveau afvigelser efter fase 1 kalibrering

Resultaterne af den første kalibreringsfase viser at RMS'en forbedres for alle lag og samlet med gennemsnitligt 1-1,5 m. (Tabel 10). Figur 20 Trykniveau afvigelser efter fase 1 kalibrering viser to grafer over de simulerede og observerede trykniveauer. Figuren viser at der er tilsyneladende ingen alvorlige afvigelser er og at kun ca. 10-15 observationer ud af godt 473 (eller under 5%) falder uden for 95% konfidens intervallet. Desværre forværres modellens evne til at simulere de observerede vandføringer samtidigt noget, hvilket også ses ved sammenligning af initial performance og fase 1 performance (Figur 19 og Figur 21 samt Tabel 9 og Tabel 11).



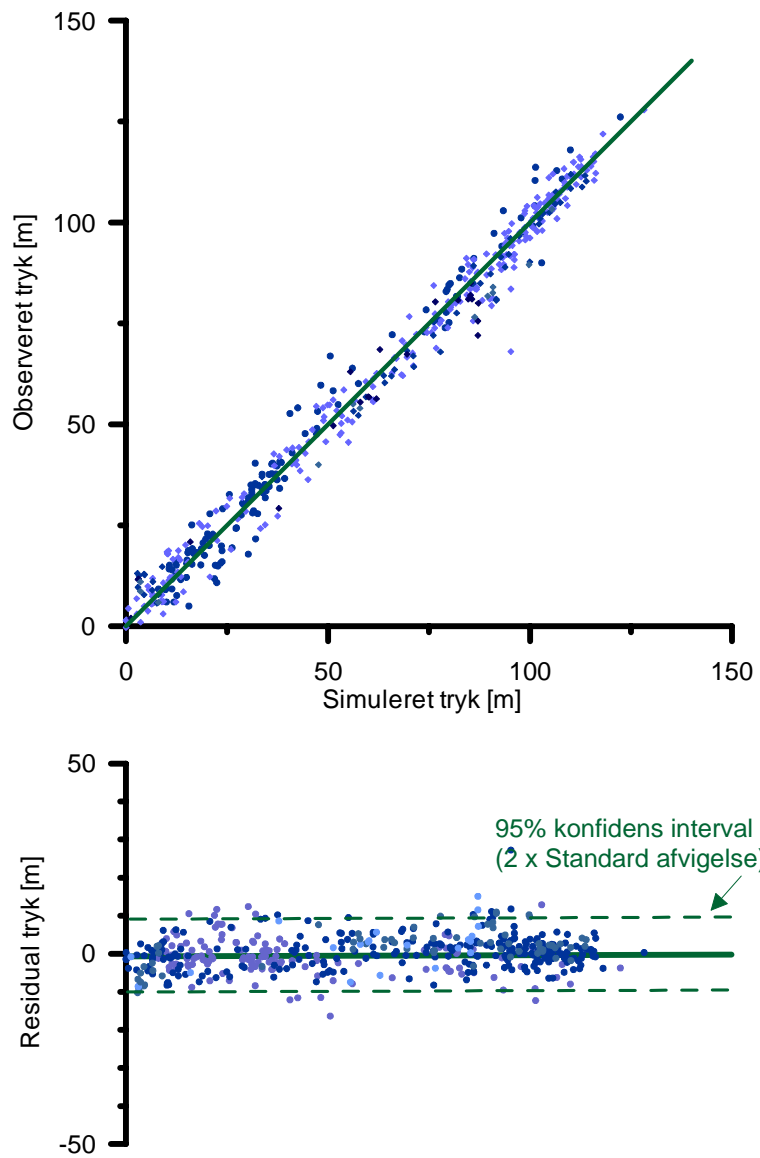
Figur 21 Simulerede og observerede vandføringer 1993-1996, efter fase 1 kalibrering, men før fase 2, dvs. før kalibrering med dynamiske påvirkninger

4.7 Kalibrering af dynamiske parametre – fase 2

Under fase 2 kalibrering er der fokuseret på de dynamiske variationer. Modellen er startet med en hotstarts fil baseret på fase 1 optimerede parametre kørt i en periode på 5 år. Herefter laves de enkelte kørsler med en opvarmingsperiode på 3 år, hvorefter R^2 , F_{bal} og RMS udregnes for de efterfølgende 3 års kalibreringsperiode. Kalibreringsmålene er således opgjort for perioden 1993 – 1995. Forud for fase 2, blev ligeledes gennemført en sensitivitets analyse af den udvalgte gruppe af parametre som forventedes at kunne indgå i kalibreringen.

Tabel 12 RMS for færdig kalibreret model (middel for år 1993-1995)

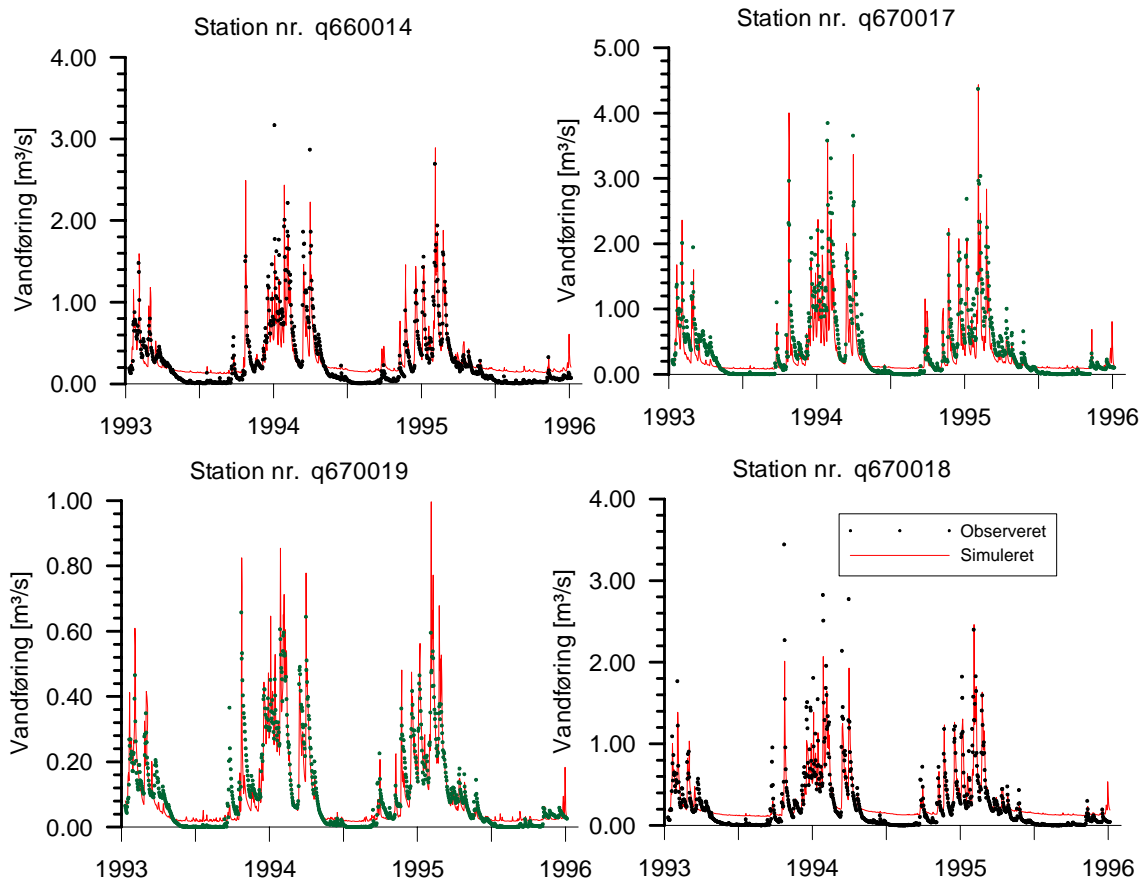
Lag	vægt	RMS
1	29%	5,05
2	53%	4,33
3	11%	4,76
4	5%	6,32
5	3%	6,70
Vægtet		5,63



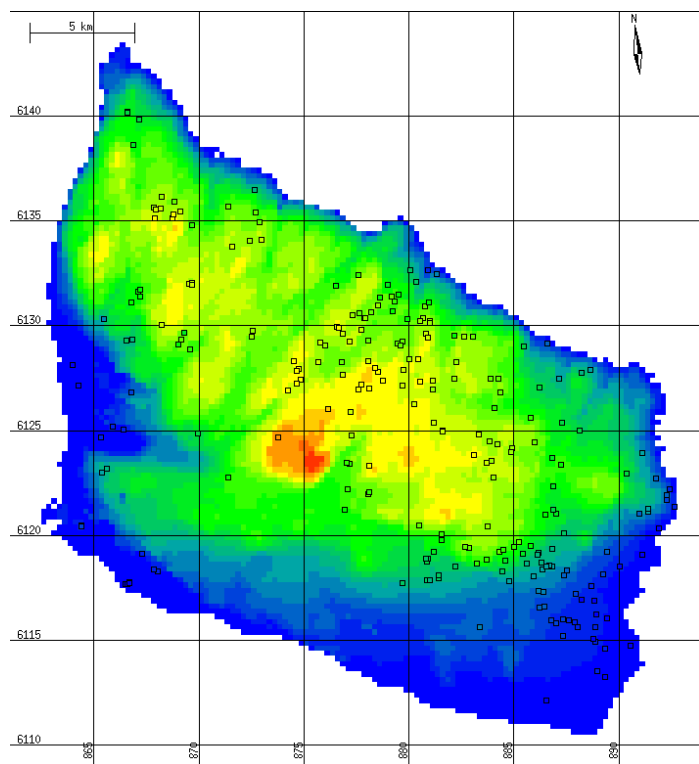
Figur 22 Simuleret og observeret tryk + tryk residual (obs-sim)

Tabel 13 Afstrømnings statistik efter fase 2 – kalibreret model

Vandløb	Areal (km ²)	Stationer	Fbalance	F_low	R ²
Bagge å	42	660014	-10%	2.57E+04	0,75
Øle å	39	670017	24%	2.93E+10	0,73
Kobbe å	24	670018	-15%	2.91E+06	0,68
Øle å	9	670019	4%	1.01E+16	0,81

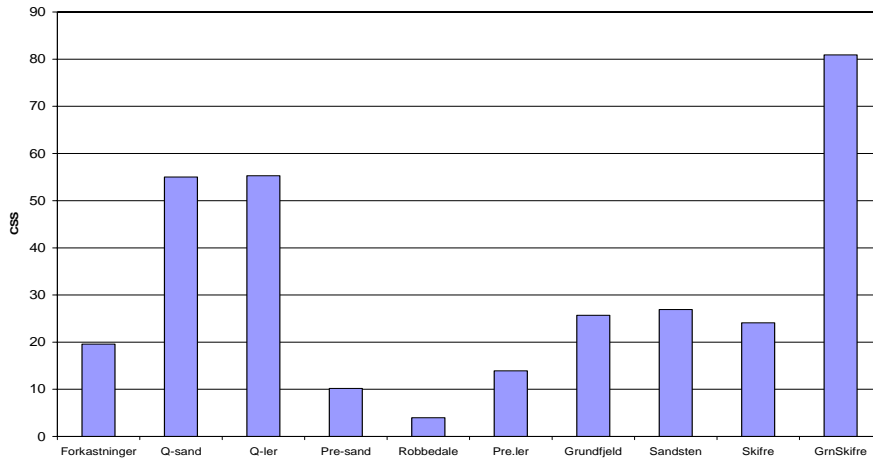


Figur 23 Simuleret og observeret afstrømninger - kalibreret model



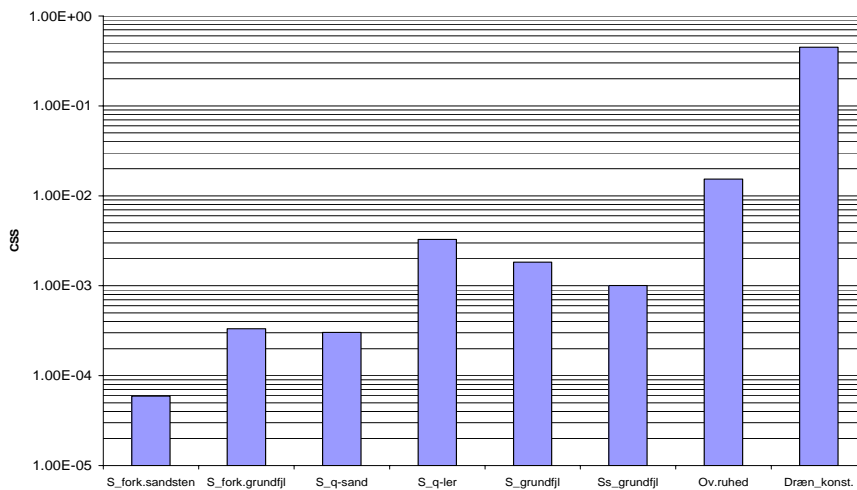
Figur 24 Trykafvigelse i lag 2 for den færdig kalibrerede model

Sensitivitets beregningerne viser dels beregnede sensitiviteter for de fase 1 kalibrerede hydrauliske ledningsevner (Figur 25) forud for fase 2 kalibrering. De afbillede sensitiviteterne i Figur 26 viser at specielt drænkosten og overflade ruheden påvirker den dynamiske models objektive funktion, bemærk at de afbillede sensitiviteter er beregnet efter fase 2 kalibrering. Objektiv funktionen er sammensat så den vægter RMS for de enkelte lag og R^2 og Fbalance på enkelte vandløbs afstrømninger.



Figur 25 Sensitiviteter for de hydrauliske ledningsevner. NB! Kun geologiske enheder som indgik i kalibreringen er medtaget

Sensitivitets beregninger forud for fase 2 kalibreringen medvirkede til at fem parametre blev udvalgt til dynamisk kalibrering. Disse var dræn-konstanten, overflade ruheden, frit magasintal for ler og grundfjeld samt artesiske magasintal for grundfjeld. I den endelige kalibrering viste det frie magasintal for ler at være for vanskelig at bestemme i forhold til den valgte objektive funktion, hvorfor denne parameter er fastsat a priori, se Tabel 14



Figur 26 Sensitiviteter på udvalgt dynamiske parametre. S=frit magasintal, Ss=artetisk magasintal, overflade ruhed (ov_ruhed) og dræn_konst (l/s/grid). NB! logaritmisk skala

Tabel 14 initiale og kalibrerede parametre (med fed indgik i kalibreringen)

	Initiale parametre			Endelige parametre		
Dræn konstant	1,00E-07			5,07E-07		
Overflade ruhed	3,00			3,51		
Lækage vandløbsbund	2,00E-08			2,00E-08		
	<i>Kh [m/s]</i>	<i>Sfrit</i>	<i>Ss</i>	<i>Kh [m/s]</i>	<i>Sfrit</i>	<i>Ss</i>
Forkastninger i Sandsten	1,00E-05	0,20	1,00E-04	3,86E-05	0,20	1,00E-04
Forkastninger i grundfjeld	1,00E-05	0,20	1,00E-04	3,86E-05	0,20	1,00E-05
Q-sand	1,00E-03	0,25	1,0E-04	1,73E-03	0,25	1,0E-04
Q-ler	1,00E-08	0,25	1,0E-04	4,51E-07	0,19	1,0E-04
kalk	1,00E-05	0,20	1,0E-04	1,00E-04	0,20	1,0E-04
Presand	1,00E-03	0,20	1,0E-04	3,04E-03	0,20	1,0E-04
Robbedale	1,00E-03	0,20	1,0E-04	7,14E-03	0,20	1,0E-04
Pre-ler	1,00E-08	0,20	1,0E-04	1,38E-07	0,20	1,0E-04
Grundfjeld	1,00E-07	0,10	1,0E-04	2,62E-07	6,0E-04	1,0E-05
sandsten	1,00E-05	0,10	1,0E-04	1,48E-05	0,10	1,0E-04
Skifre	1,00E-05	0,10	1,0E-04	6,20E-05	0,10	1,0E-04
GrnSkifre	1,00E-05	0,10	1,0E-04	1,13E-04	0,10	1,0E-04

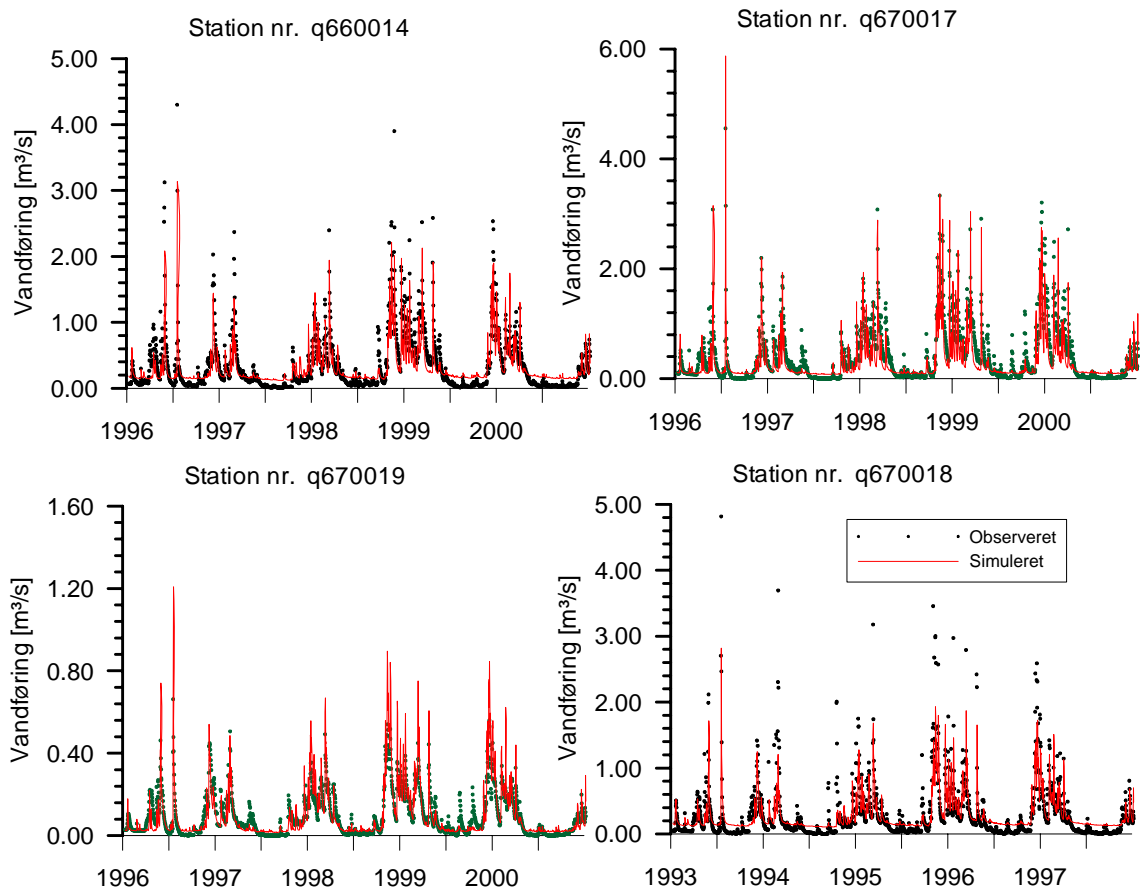
5 Valideringsresultater

5.1 Metodik

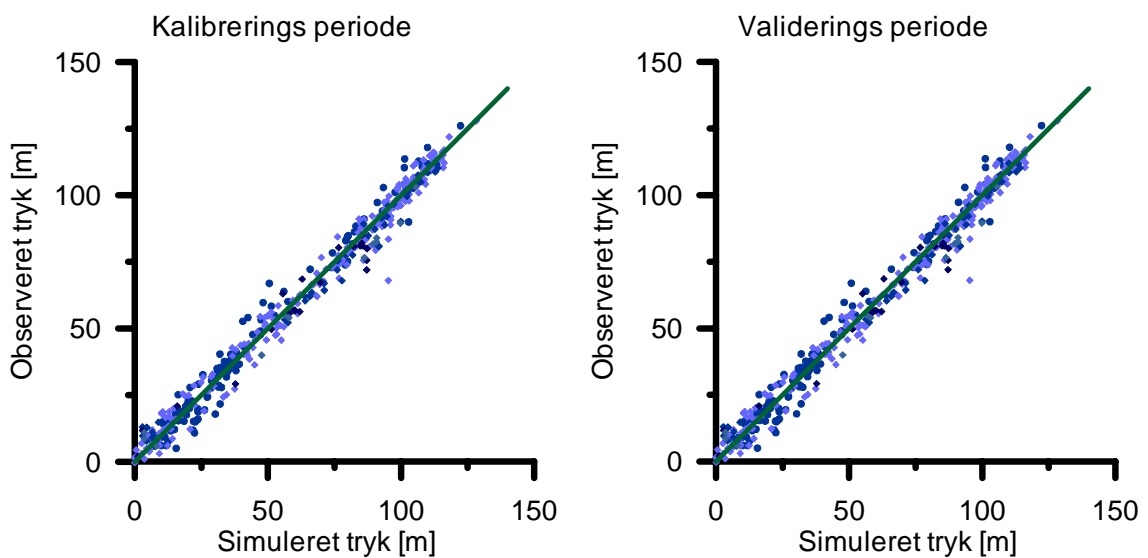
Til validering af modellen blev anvendt en 'differentiel split sample test' (Klemes, 1986), hvor der som kalibreringsperiode blev benyttet data fra 1993-1995 bliver der i valideringsperioden anvendt data fra 1996 - 2000. Formålet med en split-sample test er at afklare modellens robusthed overfor andre nedbørs hændelser (modellens drivkraft) end de hændelser som modellen er kalibreret til at kunne simulere, og herved teste modellens evne til at simulere et vilkårligt (fremtidigt) tidspunkt.

Split-sample testen foregår dels ved at udregne kalibreringsmål (RMS, R², Fbal og Flow) statistikken for valideringsperioden og sammenligne med målene for kalibreringsperioden, og dels ved at lave visuelle sammenligninger af afstrømnings hydrograferne. Testen siges at være bestået såfremt forskellene er små.

5.2 Resultater



Figur 27 Simulerede og observerede afstrømninger - valideringsperiode



Figur 28 sammenligning af tryk-simulering under kalibrerede forhold henholdsvis valideringsperiode

Tabel 15 Sammenligning af vandafstrømnings mål i "split-sample" test - kalibreringsperiode (1993-95) og valideringsperiode (1996-2000)

Vandløb	Areal (km ²)	Stationer	Kalibrerings periode			Validerings periode		
			Fbalance	F_low	R ²	Fbalance	F_low	R ²
Bagge å	42	660014	-10%	2,57E+04	0,75	7%	3,51E+03	0,72
Øle å	39	670017	24%	2,93E+10	0,73	24%	1,97E+07	0,69
Kobbe å	24	670018	-15%	2,91E+06	0,68	-1%	2,69E+06	0,60
Øle å	9	670019	4%	1,01E+16	0,81	-2%	1,69E+08	0,67

Tabel 16 Sammenligning af RMS i "split-sample" test - kalibreringsperiode (1993-95) og valideringsperiode (1996-2000)

Lag	vægt	Kal-RMS	Val-RMS
<i>h1</i>	29%	5,05	5,04
<i>h2</i>	53%	4,33	4,33
<i>h3</i>	11%	4,76	4,79
<i>h4</i>	5%	6,32	6,33
<i>h5</i>	3%	6,70	6,76
Vægtet		5,63	5,65

5.3 Kvantitative performance kriterier

Resultatet af valideringstest viser at DK model Bornholm for samtlige stationer Bagge å, Kobbe å, Øle å inkl. øverste vandføringsstation i Øle å giver R^2 værdier der opfylder de opstillede kriterier (se side 30), idet $R^2 > 0,6$ for samtlige stationer. Vandbalancekriteriet ($F_{bal} < 0,2$) er opfyldt for Bagge å, Kobbe å og øverste station i Øle å, men er IKKE opfyldt for nedre station i Øle å (her er $F_{bal} = 0,24 > 0,20$). Der er dog tale om en begrænset overskridelse af vandbalancekriteriet. Kravet til trykniveauafvigelse (RMS) ses at være opfyldt: $RMS = 5,65 < 6,0$.

5.4 Kvalitative performance kriterier

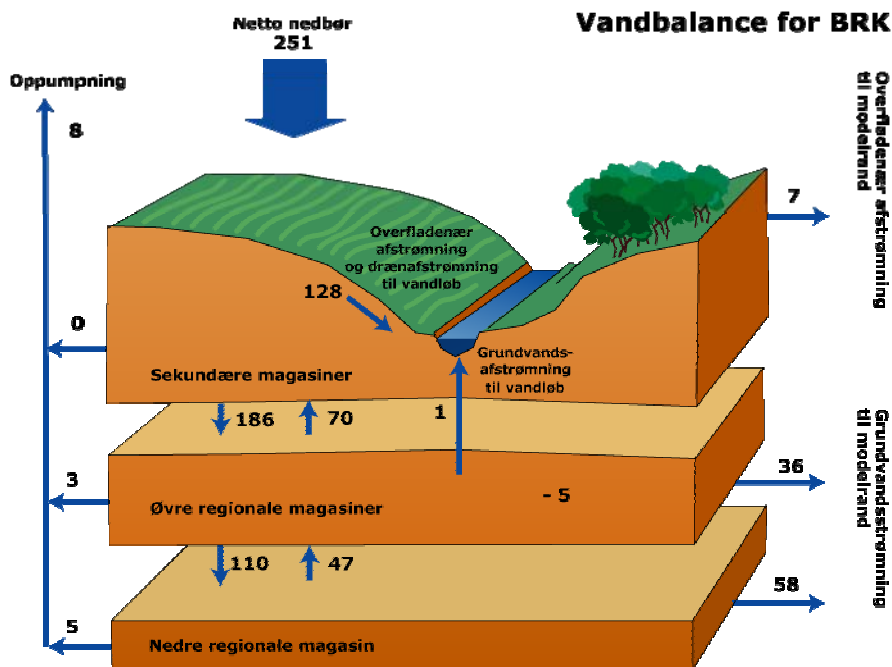
De kvalitative kriterier udgøres dels af kravet om at de estimerede parametre skal falde indenfor de opstillede intervaller (range, jf. tabel 3) og dels om hvorvidt simuleret trykniveauafordeling, afstrømningsdynamik og vandbalance ser fornuftige ud.

Det fremgår at de optimerede parameterverdier alle ligger indenfor den forud fastlagte 'range' jf. tabel 3. Dette kriterium er derfor opfyldt. Herudover har det simulerede trykniveau rumlige variationer, der ser fornuftige ud.

De simulerede vandføringer (jf. figur 23) viser en god dynamik. Når det gælder modellens simulering af minimumsvandføringen ses dog at modellen simulerer for meget vand specielt for Bagge å og Kobbe å i perioder med minimumsvandføring, ligesom at Øle å også

simuleres med lidt for høj sommervandføring. Modellen følger dog 'godt med' når det gælder dynamikken i øvrigt f.eks. max-afstrømninger og retentionsforløb.

Den simulerede vandbalance har forholdsvis høj vandgennemstrømning mellem de primære magasiner og en forholdsvis lille direkte grundvandsudstrømning til vandløb, men vandbalancen er ellers overordnet set uden andre kommentarer.



Figur 29 Vandbalance for DK-model Bornholm perioden 1990-2000

5.5 Konklusion på validering

Det kan konstateres at modellen opfylder samtlige kvantitative kriterier bortset fra vandbalancekriteriet for Øle å (nedre station som er svagt overskredet), og at de kvalitative kriterier er opfyldte, med undtagelse af modellens evne til at simulere de allermindste vandføringer i sommerperioden.

Modellen har været genstand for omfattende (både teknisk og tidsmæssigt) invers kalibrering, først i form af en stationær kalibrering i forhold til trykniveau, og dernæst en dynamisk kalibrering i forhold til vandløbsafstrømning (R2 og Fbal) og trykniveau (RMS). Disse kørsler har været ganske omfattende mht. kørselstid, en stationær invers kalibreringskørsel tager ca. 3 dage, mens en invers dynamiske kalibrering med tre optimeringsparametre kan afvikles på ca. 3 uger (en kørsel med flere parametre varede adskillige måneder). At modellen ikke optimerer bedre i forhold til minimumsafstrømningen kan skyldes at der ikke indgår et optimeringskriterium der direkte sigter på denne afvigelse (hverken R2 eller Fbal er særligt fokuserede på minimumsvandføringen).

Ved den rene inverse kalibrering der har været anvendt, vil modellen automatisk forsøge at 'kompensere' evt. strukturelle fejl i fx den konceptuelle model eller i nettonedbørsinputtets størrelse, ved at justere på hydrauliske parametre, hvilket kan forklare overestimeringen af minimumsvandføringen. Nettonedbøren er ikke korrigeret som det er sket for Sjælland og Fyn med en faktor 0,7 – 0,8, idet der er for få afstrømningsstationer og modsatrettede tendenser mellem simuleret og målt vandføring for de 3 større oplande på Bornholm.

Man kunne evt. forsøge at kalibrere vandløbslækagen og på den måde optimere i forhold til minimumsafstrømninger, men det vil kræve recalibrering af en række parametre (f.eks. drænkostant, -areal mv.). Modellen er desuden opsat med et kunstigt vandføringstilskud på 5 l/s i alle opstrøms spidser, hvilke er med til at give en overestimering af specielt den simulerede minimumsvandføring.

Bedømt i forhold til tabel 7 (antal stjerner-> her 'glade ansigter') giver Bornholms modellen følgende resultat:

Kriterier	Antal 'glade ansigter' (max. 5)
RMS	☹ ☹ ☹ ☹ ☺
R ²	☹ ☹ ☹ ☹ ☺
F _{bal}	☹ ☹ ☹ ☹ ☺

Det vil sige at modellen samlet set opnår 4 glade ansigter (= stjerner), hvilket er på niveau med DK model Sjælland Nord, altså et samlet resultat som er noget bedre end kravet på minimum 3 stjerner. Den del af forklaringen på det gode resultat skal ses i detaljeringen i 250 x 250 m net, og den systematiske og grundige kalibrering af modellen (som har været tidskrævende i regnetid).

6 Diskussion

6.1 Vurdering i forhold til formål

Der er færdiggjort en model i MIKE SHE / MIKE 11 som efterfølgende vil kunne anvendes til dynamiske simuleringer af ferskvandskredsløbet. Modellen kræver en betydelig modelle-ringsekspertise at benytte. Det vil sige at det første formål jf. afsnit 1.2 er opfyldt.

Modellen har en detaljeringsgrad (detaljeret geologi, 6 beregningslag og 250 x 250 km grid) så den kan bruges som den model BRK skal opstille i forbindelse med det modelleringsar-bejde, der skal udføres i forbindelse med Vandrammedirektivet til simulering af vandkreds-løbet (vandbalance og strømningsforhold). Modellen kan ikke umiddelbart anvendes til stof-transport, og simulering af stoftransport vil forudsætte et modelkoncept for sprækkestrøm-ning er eksplicit håndteret (både for granitten men også for geologiske forhold på den syd-lige del af øen). Det vil sige at det andet formål jf. afsnit 1.2 er opfyldt.

Modellen vil kunne benyttes til simulering af indvindingsoplande (f.eks. til en sammenlig-ning af resultater fra den MODFLOW model der blev opstillet for Sydbornholm til nærmere vurdering af indvindingsopland og grundvandsdannende områder til GRUMO-Smålyngen. Det vil sige at det tredje formål jf. afsnit 1.2 er opfyldt.

Model anbefales ikke tilpasset MODFLOW. Denne opgave var i øvrigt ikke indeholdt i nær-værende budget. Det giver ikke mening, at konvertere modellen til MODFLOW, idet der er en række strukturelle ting der er forskellige i hhv. MIKE SHE og MODFLOW, og idet DK model Bornholm er et meget stærkere værktøj til dynamisk og integreret modellering af grundvand og overfladevand.

6.2 Mulige forbedringer (checkliste)

Kalibreringsmetodik

- middelvandføring inddrages i stationær invers kalibrering (så ikke kun trykniveau benyttes til optimering)
- kriterium for afvigelse i forhold til minimumsvandføring inddrages i dynamisk invers kalibrering (f.eks. ved at benytte logaritmiske værdier af R^2) eller alternativt kriteri-um

Vandbalance input

- korrigerig af nettonedbør og test af betydning (f.eks. forsøg med 0,8 x nettoned-bør) => kan give et forbedret 'minimumsresultat' og en mere 'realistisk samlet vandbalance'
- forsøgsvis nedjustering af vandføringsinput i vandløbsspidser (fra 5 l/s til 1 l/s) => herved gøres simuleret vandføring i minimumssituation mere realistisk
- udstrækning af vådområder, altså områder med potentiel fordampning året rundt, forøges fra ca. 4-5 % til ca. 10-15 % af arealet (som benyttet for øerne) => vil bety-

de at både max. og min. afstrømninger ændres; max. afstrømning vil forøges og min. afstrømning reduceres (en sådan ændring vil derfor kræve manuel dynamisk kalibrering)

- fordampningen i områder med sprækkestrømning er et pionerområde under danske forhold; der foretages en revurdering af fordampning fra 'detention storage' (overflader f.eks. i granitområdet og sandstens-områder) for de forskellige arealtyper

Model struktur

- der foretages en manuel dynamisk fin-kalibrering af overflade-struktur-forhold og vigtige dynamiske parametre: f.eks. vådområde- og dræn-udstrækninger, dummy koefficienter og drænkostant, ålækagefaktor og frie magasintal med henblik på bedre kalibrering i forhold til synkronmålinger / enkeltobservationer for forskellige strækninger
- den geologiske model opdateres med evt. data fra detailkortlægningen
- forbedret rodzonemodul

Parameterværdier

- distribuering af ålækagefaktor i to eller tre zoner

Observationsdata

- etablering af forbedret datagrundlag ved vandføring; de 3-4 vandføringsstationer giver, som vist, ikke et tilstrækkeligt godt grundlag for at vurdere vandbalancen for Bornholm og for at 'fange' evt. systematiske fejl på nedbørskorrektion og fordampning, der er behov for flere stationer med kontinuert registrering
- synkronpejlerunde og vandføringsmålinger for strækninger f.eks. fra det sydlige Bornholm indsamlet i forbindelse med eksamensprojektet inddrages i validering og kalibrering af modellen
- den underjordiske afstrømning vurderes ved hjælp af håndberegninger ('ukendt faktor')

6.3 Mulige scenarier

- Der foretages en simulering af grundvandsdannelse og vandløbsafstrømning for 0, 50, 100 og 150 % af nuværende oppumpning => vurdering af bæredygtig ressource ud fra indikatorer fra Ferskvandets kredsløb og vurdering af nuværende udnyttelsesgrad
- Der gennemføres en simulering af konsekvenser af ændret klima (hypotesen er her at ændret klima vil betyde dels større vinternedbør, men samtidig en mindre sommervandføring og en længere periode hvor vandløb kan være tørlagte)
- Simuleringer af indvindingsoplande for vandværker med større indvindinger og evt. sammenligning med model for Sydbornholm

6.4 Fremtidigt samarbejde

Der etableres en kontrakt så DK model Bornholm bliver en del af NOVANA modelleringen. Modellen vil herefter indgå i det systematiske arbejde med indbygning af ny geologi og forbedring af vandbalanceinput til modellen.

7 referencer

- Andersen, J.A., Refsgaard, J.C. and Jensen, K.H. (2001) Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247, 200-214.
- 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.
- Bornholms Amt (1994) *Vandbalancer*. Vandplan Bornholm. Baggrundsnotat 2. Bornholms Amt. Teknisk Forvaltning. N&R consult A/S.
- Harlin, J. (1991) Development of a process oriented calibration scheme for the HBV hydrological model. *Nordic Hydrology*, 22, 15-36.
- Henriksen, HJ., Sonnenborg, A. (eds) (2003), *Ferskvandets kredsløb*, NOVA 2003 Temarapport, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, GEUS, DMU, DJF og DMI. www.vandmodel.dk
- Henriksen, HJ., Trolborg, L. (2003), *Anvendelse af vandføringsdata i integreret hydrologisk modellering*, Præsentation på ATV møde marts 2003, GEUS
- Henriksen, HJ., Trolborg, L., Knudby, C.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R., Rasmussen, P. (1998), *National Vandressource Model – Sjælland, Lolland, Falster og Møn*, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelses rapport 1998/109, GEUS
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *J.Hydrol.*, 10, 282-290.
- Nielsen, S.A. and Hansen, E. (1973) Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, 171-190.
- Poeter, E. and Hill, M.C. (1999) UCODE, A computer code for universal inverse modeling. *Computer in Geosciences*, 25(4), 457-462.
- Refsgaard, J.C. (1997) Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- 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.
- Sonnenborg, TO., Henriksen, HJ., (2005) *Håndbog i grundvandsmodellering*, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse rapport 2005/80, GEUS