

Skrift nr. 21

Recipientbelastning fra overløbsbygværker

Aalborg Universitetsbibliotek

530002331161



1984

DIF Spildevandskomiteen

Indholdsfortegnelse

	side
Rekommandation	5
Symbolliste	8
Forord	10
Resumé	12
1. Indledning	14
2. Baggrund	15
2.1 Systembeskrivelse	15
2.2 Afstrømningsbeskrivelse	16
2.2.1 Regn	16
2.2.2 Hydrologiske processer	17
2.2.3 Hydraulik	20
2.2.4 Forurening	21
3. Formål og fremgangsmåde	24
4. EDB-baserede beregningsmetoder	32
4.1 Regn	32
4.2 Hydrologi	35
4.3 Hydraulik	36
4.4 Forurening	42
4.5 Recipientbelastning	42
4.5.1 Årsbelastning	43
4.5.2 Ekstrembelastning	44
5. Manuelle beregningsmetoder	46
5.1 Årlig belastning	46
5.2 Ekstrembelastning	48
5.3 Forudsætninger for de manuelle metoder	50
5.3.1 Regn	50
5.3.2 Hydrologi	50
5.3.3 Hydraulik	51
5.3.4 Forurening	51

6. Eksempel	52
7. Konklusion	62
8. Litteratur	63

Til dette skrift hører en bilagsrapport, indeholde to bilag:

Bilag 1: Diagrammer over årlig belastning

Bilag 2: Tabeller over ekstrembelastning

Rekommandation fra Spildevandskomitéen, Dansk Ingeniørforening, vedrørende beregning af recipientbelastning fra overløbsbygværker

Baggrund

I Spildevandskomitéens skrift nr. 21: Recipientbelastning fra overløbsbygværker, er der beskrevet en række beregningsmetoder til bestemmelse af recipientbelastningen fra overløbsbygværker. Metoderne har deres udgangspunkt i anvendelsen af historiske regn og EDB-modeller. Med en række beregningsniveauer, stigende fra simpel anvendelse af diagrammer og tabeller til avancerede EDB-modeller, er det muligt at bestemme både den årligt akkumulerede belastning og de ekstreme overløbshændelsers belastning på en recipient.

Med de foreliggende beregningsalternativer er det i praksis muligt at benytte den løsning, der økonomisk og nøjagtighedsmæssigt er passende til den aktuelle problemstilling. Specielt må fremhæves, at valget af beregningsniveau afhænger af betydningen af den afløbstekniske problemstilling, og af hvor sikkert kendskabet er til afløbssystemet og dets opland.

På denne baggrund bringes følgende rekommandationer:

Rekommandation vedrørende beregning af årlig belastning

Beregning af den årlige belastning foretages principielt med en avanceret EDB-model og en historisk regnserie. En statistisk analyse af den beregnede overløbsserie giver en beregnet belastningsværdi. Da der er store omkostninger forbundet med denne principielt korrekte fremgangsmåde, anbefales det at benytte en af følgende to simplificerede beregningsniveauer:

- Niveau I: Bestemmelse af belastningen med diagrammer. (Optegnet ud fra beregnet recipientbelastning for standard oplandsdata og en retlinet tid-areal kurve)
- Niveau II: Beregning af recipientbelastningen for det aktuelle opland med en historisk regnserie, og en tid-areal model, (hvor oplandets aktuelle tid-areal kurve er beregnet med en avanceret model).

Den simple niveau I metode anbefales benyttet i tilfælde, hvor der ønskes overslagsmæssige beregninger, eller hvor kendskabet til opland og afløbssy-

stem er så utilstrækkeligt, at det vil være uberettiget at benytte mere avancerede metoder. Metoden anbefales benyttet under nøje iagttagelse af dens forudsætninger, specielt hvad angår beregningen af recipientbelastningen fra koblede bygværker. Findes forudsætningerne i den aktuelle situation ikke at være opfyldte, må man benytte den EDB-baserede niveau II metode.

Rekommandation vedrørende beregning af ekstreme overløbshændelser

Beregningen af de ekstreme overløbshændelser har det samme avancerede principielle udgangspunkt, som beregningen af den årlige recipientbelastning. Det anbefales at benytte et af fire følgende niveauer af beregningsmetoder, med hvilke det med stigende detaljeringsgrad er muligt at bestemme belastningen.

- Niveau 1: Aflæsning af de ekstreme hændelser i en forudberegnet tabel.
- Niveau 2: Et antal udvalgte hændelser omkring den ønskede gentagelsesperiode fra ovennævnte tabel gennemregnes med en avanceret model for det aktuelle opland. Den ønskede belastningsværdi findes ved rangordning af de gennemregnede hændelser.
- Niveau 3: Bestemmelse af de ekstreme overløbshændelser ud fra en gennemregning af en historisk regnserie (eller en udvalgt regnserie som repræsenterer de ekstreme regnhændelser) med det aktuelle opland og en tid-areal model, (hvor oplandets aktuelle tid-areal kurve er beregnet med en avanceret model).
- Niveau 4: Et antal udvalgte hændelser omkring den ønskede gentagelsesperiode (fra en rangordnet tabel fra niveau 3) gennemregnes med en avanceret model for det aktuelle opland. Den ønskede belastningsværdi findes ved rangordning af de gennemregnede hændelser.

For den simple niveau 1 metode gælder samme bemærkninger, som anført under beregningen af den årlige belastning. Niveau 2 til 4 vælges alt efter de afløbstekniske omstændigheder i oplandet. Specielt for niveau 3 og 4 gælder, at disse skal benyttes, hvis tid-areal kurven for det aktuelle opland afviger meget fra en ret linie (ex.: hvis dele af hovedledningsnettet ligger uden sidetilløb, vil tid-areal kurven få vandrette eller kun svagt stigende dele).

Ved niveau 1 og 3 foreligger der rangordnede belastningstabeller for hhv. standardoplande og aktuelt opland. Disse tabeller er dannet ud fra beregning-

ger med en simpel lineær metode, hvor evt. væsentlige fænomener (specielt opstuvning og oversvømmelse) er udeladt. Det anbefales i givet fald, at inddrage disse fænomener ved at anvende niveau 2 eller 4, idet der her anvendes mere avancerede beregningsmetoder. Derved opnås en væsentlig forøget beregningsnøjagtighed for de specifikke hændelser, men tilsvarende må bemærkes, at nøjagtigheden af den tilknyttede gentagelsesperiode formindskes, idet denne er bestemt ud fra den simple model. Er problemstillingen væsentlig, anbefales det at udvælge et betydeligt antal regnhændelser til gennemregning med den avancerede metode.

Symbolliste

a :	Afløbstal for bygværk	$[L \cdot T^{-1}]$
C_o :	Stofkoncentration i overvand	$[M \cdot L^{-3}]$
C_s :	Stofkoncentration i spildevand	$[M \cdot L^{-3}]$
F :	Oplandets geometriske areal	$[L^2]$
F_{red} :	Oplandets reducerede areal	$[L^2]$
i :	Regnintensitet	$[L \cdot T^{-1}]$
i_m :	Middelintensitet af en regnhændelse	$[L \cdot T^{-1}]$
i_f :	Dimensionsgivende regnintensitet for udløbsledningen fra et opland til et bygværk	$[L \cdot T^{-1}]$
k :	Antal regn i regnserien	
m_s :	Opspædingsgrad når overløbet træder i funktion	
m_a :	Opspædingsgrad i det aflastede vand	
M :	Rang	
M_v :	Rang for det aflastede vandvolumen	
M_p :	Rang for den aflastede stofmængde	
n :	Overløbsfrekvens	$[T^{-1}]$
N :	Antal år som dækkes af regnserie	$[T]$
P :	Aflastet stofmængde	$[M]$
q_s :	Intensitet af spildevandsafstrømning ($= \frac{Q_s}{F_{red}}$)	$[L \cdot T^{-1}]$
Q_a :	Vandføring i videreførende ledning	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
Q_i :	Indløbsvandføring til bygværk	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
Q_o :	Overløbsvandføring fra bygværk	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
Q_s :	Middelspildevandsstrøm	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
Q_u :	Vandføring i udløbet fra bygværk	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
R :	Regndybde	$[L]$
S_v :	Spredning i serien af årsbelastninger	
S_b :	Initialtab for befæstet del af oplandet	$[L]$
S_u :	Initialtab for ubefæstet del af oplandet	$[L]$
t :	Tid	$[T]$
t_a :	Varighed af aflastning	$[T]$

t_c :	Koncentrationstid svarende til en given regnintensitet	$[T]$
t_f :	Fuldtløbende afløbstid for et opland	$[T]$
T :	Gentagelsesperiode	$[T]$
v :	Hastighed	$[L \cdot T^{-1}]$
$\bar{V}$:	Middelårsbelastning	$[L^3 \cdot T^{-1}], [M \cdot T^{-1}]$
V_a :	Aflastet vandmængde pr. arealenhed	$[L]$
V_{as} :	Aflastet spildevandsmængde pr. arealenhed	$[L]$
V_b :	Basisvolumen pr. arealenhed	$[L]$
$V_{\max}$:	Maksimalt bassinvolumen	$[L^3]$
V :	Volumen. (evt. pr. arealenhed $[L]$)	$[L^3]$
V_i :	Belastning fra år i	$[L^3], [M]$
α_b :	Brøkdelen af befæstede flader, som afvander til kloak	
α_u :	Brøkdelen af ubefæstede flader, som afvander til kloak	
φ_b :	Afløbskoefficient for befæstede flader	
φ_u :	Afløbskoefficient for ubefæstede flader	

Forord

Spildevandskomitéens indsats siden 1973 til belysning af de problemer, som knytter sig til regns afledning fra byer, har især været baseret på udviklingen af EDB-beregningsmetoder, hvormed opstuvningsproblemer og forureningsproblemer kan løses væsentligt bedre end med de traditionelle metoder. Dette er skrift nr. 21 i rækken af skrifter fra Spildevandskomitéen og et led i den specielle serie, som handler om regnaflledning, nr. 16 til 23.

Med EDB-teknikken er der åbnet mulighed for at beregne overløb og forurening fra overløbsbygværker i fællessystemer under væsentligt mere realistiske forudsætninger og for nye tilfælde. Denne teknik danner grundlag for dette skrift, som vejleder i brug af historiske regnserier og EDB-programmer, samt angiver generelle resultater fra brug af EDB-beregninger på almene tilfælde. Dette giver den praktiserende ingeniør mulighed for at benytte simple metoder, hvor omstændighederne taler for det, og mere kompliceret EDB-teknik, hvor individuelle forhold og problemets betydning motiverer det. Skriftet erstatter Spildevandskomitéens Skrift nr. 4 om manuelle beregningsmetoder til løsning af samme problem. Det er en væsentlig udvidelse, at dette skrift foruden beregning af gennemsnitlige, årlige hændelser også omfatter beregning for de sjældne overløbshændelser, som indtræffer f.eks. hvert 5. år. Dette er specielt relevant for afledning til vandløb. Om denne problemstilling forventes et skrift udgivet i 1984.

Dette skrift er baseret på erfaringer og beregningsmetoder, opnået og udviklet som led i Hovedstadsrådets projekt: »Regnafstrømning i Mølleåsystemet«, som er udført ved Laboratoriet for teknisk Hygiejne, DTH, som forskningsprojekt og videreført i et licentiatprojekt; begge ved civilingeniør Niels Bent Johansen, som med stor energi har gennemført projekterne, udviklet metoderne og skrevet udkastet til dette skrift. Tegningerne er udført af stud. polyt J. Strårup. Desuden vil jeg som Komitéens formand og projektleder for projekterne vedrørende regnaflledning gerne takke medlemmer af Laboratoriets arbejdsgruppe vedrørende urban afstrømning, som alle har ydet bidrag til metodernes udvikling.

Skriftet har i udkast været forelagt Spildevandskomitéen og Komitéens udvalg vedrørende regnafledning. Begge har bidraget med ændringer og godkendt skriftets konklusioner og metodeforslag. Den udarbejdede rekommendation fra Spildevandskomitéen baseres primært på resultaterne fra nærværende skrift.

Dette skrift skal ses i sammenhæng med etablering af Spildevandskomitéens programsystem (SVK-systemet), som gennem Kommunedata stilles til rådighed for projektering. Med dette system og indholdet i skriftserien er grunden lagt til en radikal ændring af praksis for dimensionering og analyse af afløbssystemer. Ni års indsats for at nå dette mål er kulmineret med systemet og skrifterne, som hermed stilles til rådighed for alment brug.

Laboratoriet for teknisk Hygiejne,
DtH, februar 1983
Poul Harremoës
Professor
Formand for Dansk
Ingeniørforenings Spildevandskomité
i perioden 1973-1983

Resumé

Igennem mange år har det været praksis at benytte Skrift nr. 4, Spildevandskomitéen (1953) ved beregning af den årlige recipientbelastning fra overløbsbygværker. Med den hér præsenterede metode er det muligt at opnå mere detaljerede informationer om årsbelastningen, og som noget nyt at kunne beregne de ekstreme overløbshændelser.

Det principielle forløb af beregningerne hviler på, at hver regn i en lang regnserie gennemregnes med en EDB-model, hvori forholdene for de individuelle oplande og bygværker tages i regning. Resultatet af denne beregning er en serie af overløbshændelser. Fra denne serie kan der med statistiske metoder uddrages information om såvel årsbelastning som ekstreme hændelser.

Denne principielle fremgangsmåde er bevaret ved en opdeling i forskellige beregningsniveauer, hvor de indgående modeller og regndata afpasses til den aktuelle problemstilling.

Årsbelastning

Til beregning af den årlige recipientbelastning er opstillet to alternative fremgangsmåder, niveau I og niveau II.

Niveau I er en håndregningsmetode, hvormed man ud fra diagrammer kan beregne belastningen. Indgangen til disse diagrammer er afløbstallet for overløbsbygværket og den fuldtløbende afløbstid (ledningsdel + overfladedel) for oplandet.

Den simple manuelle metode kan ikke tage alle fænomener i regning, specielt er det kun på tilnærmet vis muligt at regne på koblede bygværker og koblede regnhændelser (af hensyn til bassiner). Ved problemstillinger, hvor disse effekter er væsentlige må anvendes niveau II. Ved denne metode benyttes en modificeret tid-areal model, hvor de aktuelle tid-areal kurver for oplandene benyttes. Gennemregningen foretages for en serie af regnhændelser, som dækker 33 års nedbør (≥ 3 mm).

Ekstremlastning

Til beregning af ekstrem belastning findes 4 niveauer af beregningsmetoder. Niveau 1 er den manuelle metode, hvor man med udgangspunkt i afløbstal, fuldtløbende afløbstid og gentagelsesperiode for overløbshændelsen, kan finde belastningsværdierne af en række tabeller. Ved niveau 2 udvælges en række hændelser fra disse tabeller. Disse hændelser gennemregnes for det aktuelle opland med en avanceret model, hvor man eventuelt kan tage opstuvnings- og oversvømmelsesproblemer i regning. I niveau 3 er udgangspunktet helt og holdent de aktuelle oplande og bygværker. Med en modificeret tid-areal model kan gennemregnes en af to regnserier. Enten en regnserie, som kun indeholder de ved en analyse af tabellerne fundne ekstreme regnhændelser, eller en komplet serie dækkende 33 års nedbør (≥ 3 mm). Den sidste serie skal især anvendes, når det er væsentligt at tage i regning, at et regnvandsbassin ikke er tomt inden næste regn starter. Ud fra den dannede overløbsserie kan enten direkte findes de ønskede ekstreme hændelser, eller (i niveau 4) vælges der et antal hændelser, som kan gennemregnes med en avanceret model, analogt med niveau 2.

Den grundlæggende model i beregningerne er en modificeret tid-areal model. Med denne model er det muligt at arbejde med tid-areal kurver, som passer til hver individuel regnhændelser. Til brugen skal beregnes en basis tid-areal kurve med en mere avanceret model. I tid-areal modellen kan der anvendes flere niveauer af hydrologiske delmodeller. Sædvanligvis vil det være en rimelig antagelse, at befæstede arealer bidrager til afstrømningen, og at en del af regnen i starten af hændelsen udnyttes til befugtning af overfladerne og opfyldninger af ujævnheder (vandpytter). Men i specielle situationer kan det være nødvendigt, at anvende en mere avanceret hydrologisk model, hvormed de permeable fladers bidrag kan beregnes. Forureningen beregnes med en simpel opblandingsmetode, hvor stofbidragene fra hhv. overvand og spildevand lægges sammen.

Den angivne niveauopdeling af metoderne gør det muligt for den praktiserende ingeniør, at vælge den fremgangsmåde der økonomisk og omfangsmæssigt er passende til den givne problemstilling.

1 Indledning

De beregningsmetoder til beregning af recipientbelastningen fra overløb i fællessystemer, som præsenteres i dette skrift, er udviklet ved Laboratoriet for teknisk Hygiejne, DtH. Udviklingsarbejdet er foregået ved et samarbejdsprojekt med Hovedstadsrådet, Johansen (1983), og integreret hermed, i et licentiatprojekt.

Nærværende skrift er en afløser for Spildevandskomitéens skrift nr. 4, som udkom i 1953, Spildevandskomitéen (1953). I dette skrift blev der opstillet en metode til beregning af den årlige recipientbelastning fra overløbsbygværker. Denne metode blev opstillet på grundlag af 5 års regnobservationer, og de daværende, meget begrænsede, muligheder for at udføre omfattende numeriske beregninger. Med EDB-teknikkens indførelse er mange grænser flyttet, og ny viden etableret. Det er nu således muligt at præsentere en beregningsmetode, hvilende på 33 års regnobservationer, hvor langt større hensyntagen til de individuelle regn og oplandes indvirkning på recipientbelastningen er mulig.

Paste

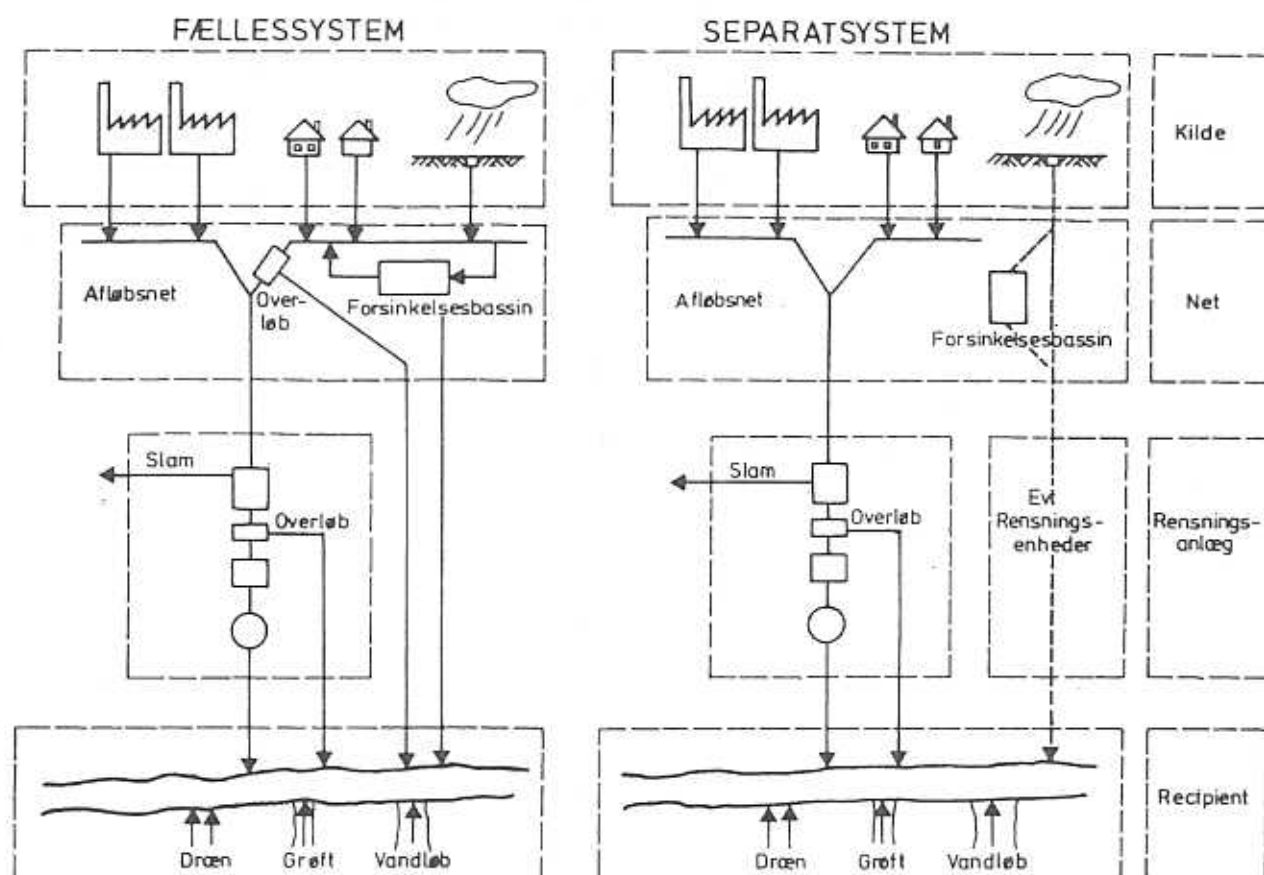
2 Baggrund

2.1 Systembeskrivelse

I Danmark er kloakanlæg hovedsageligt opbygget som hhv. fælles- eller separatsystemer. I figur 2.1 er vist en principskitse af de to systemudformninger. I fællessystemer ledes både regn- og spildevand i samme ledningssystem, hvorimod man i separatsystemer leder regn- og spildevand i hvert sit ledningssystem.

Disse forhold fører til, at ved et separatsystem vil der ved hver regnhændelse, hvor regndybden er over en vis størrelse (se afsnit 2.2), ledes vand til recipienten. Dette gælder, uanset om der er indskudt bygværker i afløbssystemet. Forureningen fra separatsystemer kan beregnes simpelt ved at gange den afledte vandmængde med gennemsnitskoncentrationen for de betragtede stoffer i regnafledning fra separatkloakerede oplande, se f.eks. Johansen (1983).

Dette skrift omhandler beregning af forurening fra fællessystemer. Ved et fællessystem skulle principielt enhver blanding af regn- og spildevand ledes til renseanlægget. Da det vil give store anlægs- og driftsudgifter, når selv de sjældne og store regnhændelser skal transporteres og renses, er det blevet praksis at indskyde overløbsbygværker i kloaksystemet. Disse bygværker fungerer på den måde, at når vandføringen overstiger en vis fastsat grænse, ledes det overskydende vand bort fra ledningssystemet. Dette kan enten ske i form af en direkte udledning til en recipient eller i form af en magasinering i specielle regnvandsbassiner, hvorfra vandet igen kan ledes tilbage til ledningssystemet. Selvom regnvandsbassiner kan bygges meget store, vil der dog altid kunne komme en regnhændelse, som giver mere vand end bassinet kan rumme. Dette vand ledes sædvanligvis til recipienten over en nødoverløbskant. Da et bassin således rummer en del af det vand og stof, som ellers ledes ud i recipienten, yder det en beskyttelse af recipienten mod forurening. Endeligt kan nævnes, at i de tilfælde, hvor det ikke er muligt at lede overløbsvandet til en recipient, kan der indbygges bassiner, som således virker som midlertidig recipient for overløbsvandet. Da disse ikke er forsynede med nødoverløbskant, stilles der store krav til deres sikkerhed mod overbelast-



Figur 2.1 Principskitse af hhv.fælles- og separatsystem. Efter Bahl-Andersen (1976).

ning. Bassiner af denne type, deres dimensionering og funktion, behandles i skrift 18, Spildevandskomiteen (1984). I nærværende skrift behandles såvel sædvanlige overløbsbygværker som bassiner med nødoverløb, med henblik på at bestemme recipientbelastningen fra disse bygværker.

2.2 Afstrømningsbeskrivelse

2.2.1 Regn

Regnen er den givne klimatiske parameter, som betinger systemets formål og virkning. Det er karakteristisk for regn, at den er stokastisk i sin optræden. Dette vil sige, at dens variation er resultatet af så mange små påvirkninger, at dens optræden bliver præget af elementer af tilfældighed. Dette medfører, at det ikke er muligt at matematisk vej at forudsige, regn med den opløsning i tid og intensitet, som er nødvendig til kloakberegninger. Udgangspunktet for beregningerne må da være lange serier af historiske regn (virkelige regn,

målt gennem en lang periode). Dette blev allerede tidligt erkendt, og fremsynede stadsingeniører tog i 1930'erne initiativ til, at der flere steder i Danmark blev opsat automatisk virkende regnmålere. Måleresultaterne fra to af disse regnmålere, Odense og Gentofte, er i dag overført til EDB. Disse serier er detaljeret beskrevet i skrift nr. 18, Spildevandskomitéen (1984).

I fremtiden vil det i højere grad være muligt at basere beregningerne på lokale data fra den region, hvor kloakområdet er beliggende. Dette skyldes det omfattende regnmålersystem, som Spildevandskomitéen og en række kommuner idriftsatte ved starten af 1979 (skrift nr. 17, Spildevandskomitéen (1980)). Systemet tjener til afløsning og udbygning af det gamle målersystem fra 1930'erne, og med 46 målere vil der i løbet af få år være et omfattende materiale til rådighed.

2.2.2 Hydrologiske processer

Læren om hydrologi omfatter generelt læren om vandets kredsløb, fra global målestok til mikroskopisk målestok. Ved den urbane hydrologi forstås vandomsætningen i bysamfund, og herunder falder også teknikken for afledning af regnvand. De væsentligste hydrologiske elementer indenfor denne gren er de hydrologiske tab, d.v.s. de dele af regnen som ikke kommer til afstrømning.

Følgende processer bevirker tab:

- Befugtning
 - Lavningsmagasinerings
 - Interception
 - Fordampning
 - Infiltration
- } Initialtab

Resultatet af de tre første processer benævnes ofte tilsammen: initialtabet. Dette skyldes disse tre processers væsentligste fællestræk, at de finder sted ved starten af en regnhændelse, inden afstrømningen for alvor er kommet i gang. Disse tre processer er ansvarlige for, at jord og vegetation bliver våde, og at der dannes vandpytter.

Fordampningen er sædvanligvis ubetydelig under en regnhændelse, men dens virke mellem regnhændelserne tjener til at tørre fladerne, og dermed danner den basis for initialtabet ved næste hændelse.

Infiltrationen er den proces, ved hvilken vandet passerer gennem jord-

overfladen og giver dermed ikke anledning til overfladeafstrømning.

For visse fladetyper kan infiltrationen være meget stor, det er f.eks. sjældent, man får afstrømning fra græsplæner, til gengæld er infiltrationen nul ved tætte flader, som f.eks. asfaltflader. Dette bevirker, at disse fladetyper bidrager med relativt store andele af afstrømningen.

Som antydnet kan overfladetyperne klassificeres efter de hydrologiske processer, som er de dominerende på fladerne. Der kan opstilles tre hovedgrupper, Jacobsen (1980):

- | | |
|------------------------|--------------------|
| ○ Impermeable flader | } Befæstede flader |
| ○ Semipermeable flader | |
| ○ Permeable flader | Ubefæstede flader |

Ved impermeable flader er infiltrationen nul, og den del af regnen, som ikke tabes ved initialtabet, vil give afstrømning. Semipermeable flader giver mulighed for en vis infiltration, men den er dog ikke større, end at der jævnlige fås afstrømning. De største værdier for infiltrationen findes ved de permeable flader, og afstrømningen er tilsvarende lille. Processernes virke for et udsnit af et afstrømningsområde er illustreret i figur 2.2.

Detaljerede undersøgelser, Jacobsen (1980), har resulteret i en klassifikation af de beregningsmetoder, som kan finde anvendelse til bestemmelse af det afstrømmede vandvolumen fra et givet opland. Disse metoder rækker fra anvendelse af simpel volumenafløbskoefficient til kontinuert simulering af alle processer, både under regnhændelsen og i perioden mellem hændelserne. Ved de niveauer, som benytter afløbskoefficient og initialtab som parametre, kan opstilles følgende vandbalanceligning:

$$V = \varphi_b \alpha_b (R - S_b) + \varphi_u \alpha_u (R - S_u)$$

V : afstrømmet regn

R : regndybde

φ_b : afløbskoefficient for befæstede flader

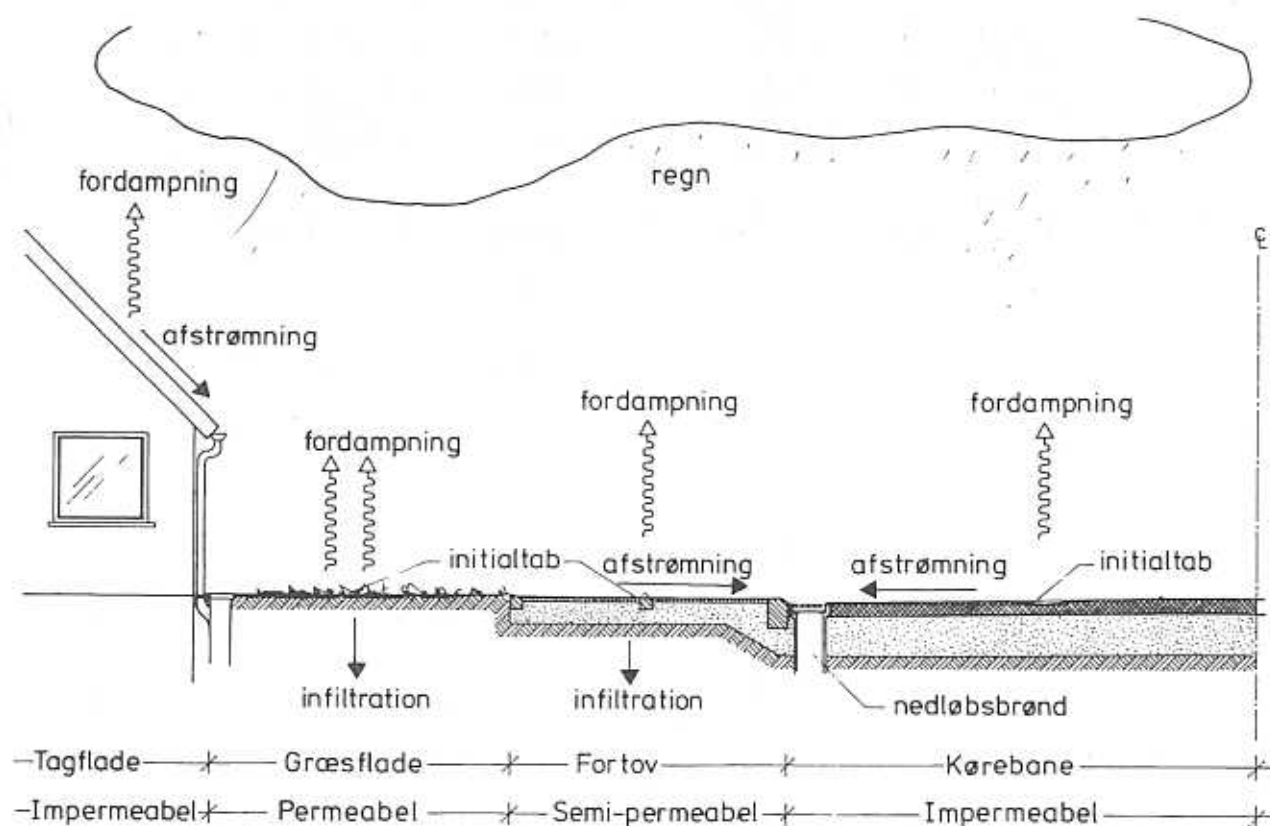
α_b : brøkdelen af befæstede flader

S_b : initialtab for befæstede flader

φ_u : afløbskoefficient for ubefæstede flader

α_u : brøkdelen af ubefæstede flader

S_u : initialtab for ubefæstede flader



Figur 2.2. Hydrologiske delprocesser ved regnafstrømning fra byer.

Ved denne opstilling er de impermeable og de semipermeable flader sammenlagt under betegnelsen befæstede flader, og analogt betegnes alle permeable flader som ubefæstede flader. For at korrigere for infiltrationen gennem de semipermeable dele af de befæstede flader indføres en afløbskoefficient, φ_b . Ved fastsættelsen af denne forudsættes, at initialtabet, S_b , er udnyttet. Denne afløbskoefficient gælder kun for den geometriske brøkdel, α_b , af oplandet, hvor der findes befæstede flader. Ved de ubefæstede flader, som findes i den geometriske brøkdel, α_u , af oplandet, afstrømmer mængder svarende til afløbskoefficienten φ_u og initialtabet S_u .

Man må ved anvendelsen skelne skarpt mellem de her definerede afløbskoefficienter, og den traditionelle volumenafløbskoefficient, som alene udtrykker forholdet mellem regn- og afstrømningsdybder, uden hensyntagen til de hydrologiske tab.

På grundlag af de angivne størrelser og det toale oplandsareal, F , kan man definere oplandets reducerede areal, F_{red} :

$$F_{red} = (\varphi_b \alpha_b + \varphi_u \alpha_u) F$$

2.2.3 Hydraulik

Med de hydrologiske processer kan man bestemme den nettoregn, som kommer til afstrømning fra en given flade. Med de hydrauliske redskaber er det muligt at beregne tidsvariationen af afstrømningen efter, at den har passeret overfladen eller ledningen. De hydrauliske beregningsmetoder kan opdeles i følgende klasser, Jensen (1981):

- Tid-areal metoder
- Kinematisk bølge metoder
- Dynamisk bølge metoder

Tid-areal metoden hviler på en antagelse om, at superpositionsloven gælder for de individuelle oplandes hydrografer. Derved bliver metoden meget simpel at anvende, men dermed kan den også kun beskrive et enkelt af de hydrauliske fænomener, forsinkelsen. Ved disse metoder kan tid-areal kurven benyttes (en kurve, som sammenknytter afstrømningstid og bidragende areal, også kaldet S-hydrograf eller afløbsdiagram). Af tidarealkurven kan oplandets koncentrationstid, t_c aflæses (den tid, det tager, inden oplandets fjerneste punkt bidrager til afstrømningen). Koncentrationstiden er afhængig af regnintensiteten, og når rørene er fuldtløbende bliver koncentrationstiden lig med den fuldtløbende afløbstid for den længste ledningsstrækning + afstrømningstiden for den fjerneste overflade. Denne specielle koncentrationstid (ledningsdel + overfladedel) kaldes i det følgende for oplandets fuldtløbende afstrømningstid, t_f . For hver ledning svarer hertil, ifølge den rationelle metode, en regnintensitet i_f som giver en vandføring netop lig ledningens kapacitet.

Ved den kinematisk bølge metode forlades superpositionsprincippet. Metoderne er ikke-lineære og kan både beskrive forsinkelse og den udjævnede effekt af det vandvolumen, som er i ledningerne.

En komplet løsning af de styrende differential ligninger for strømningen giver metoder efter dynamisk bølge princippet. Med disse metoder kan de fleste hydrauliske fænomener tages i regning, specielt interessant er, at der kan regnes på kældeversvømmelser, etc.

Svarende til den stigende kompleksitet i metoderne, kræver de også større indsats af EDB-maskinen for at kunne benyttes. Hvis en tid-areal metode antages at benytte 1 sek. i EDB-maskinen til at gennemregne et opland, vil en kinematisk bølge metode benytte ca. 10 sek. og en dynamisk bølge me-

tode ca. 1000 sek. Det er således væsentligt, at man i en given problemstilling får valgt en beregningsmetode, som svarer til dels den ønskede nøjagtighed af resultatet og dels til de hydrauliske fænomener, som problemstillingen indebærer.

De hydrauliske metoder benyttes også ved gennemregning af bygværkerne i oplandet, og på ganske tilsvarende vis som ved ledningsberegningerne kan dette gøres med varierende grader af kompleksitet. En række fundamentale parametre, der beskriver bygværkets funktion, skal her kort gennemgås.

Bygværket deler den indgående strøm i en del, som føres videre i systemet mod renseanlægget og en del, som ledes til recipienten. Den første løber i den videreførende ledning. Den del, som ledes til recipienten, løber i overløbsledningen. For afløbet fra bygværket til den videreførende ledning, kan knyttes en maksimal tilladelig vandføring, Q_a . Fra oplandet (med det reducerede areal F_{red}) ledes tørvejrsvandføringen Q_s . Med disse kan *afløbstallet* a defineres for bygværket.

$$a = \frac{Q_a - Q_s}{F_{red}}$$

F_{red} : reduceret areal for oplandet.

a : afløbstal.

Q_a : maksimal vandføring i videreførende ledning (regnet konstant under hændelsen).

Q_s : tørvejrsvandføring.

Afløbstallet har enhed som en intensitet og betegner netop også intensiteten af den største, langvarige kasseregn, hvis afstrømning kan passere bygværket, uden det træder i funktion. Heri forudsættes, at afløbstallet kan anses for at være konstant gennem hændelsen.

I tilfælde af, at bygværket er udformet som et regnvandsbassin, skal yderligere benyttes bassinets volumen, V_b .

2.2.4 Forurening

På regnens vej fra atmosfære til udløbet i recipienten underkastes den mange påvirkninger, som ændrer dens stofindhold. Der udvaskes stoffer fra atmosfæren, der eroderes i aflejret materiale på overfladerne og i ledningerne, og en del af materialet kan atter aflejres i regnvandsbassinerne. Endeligt mod-

tager det afstrømmede vand også stofbidrag fra tørvejr safstrømningen (spildevand + indsivningsvand, i det følgende omtalt under ét som spildevand).

Flere forsøg på at beskrive stofafstrømningen deterministisk (matematisk beskrivelse af hver enkelt delproces i forløbet) er slået fejl. Dette skyldes sandsynligvis, at stofafstrømningen fremkommer som resultat af mange små uafhængige påvirkninger. I så tilfælde kan man forlade den deterministiske beregningsmetode og benytte statistiske metoder. Blandt disse er den mest simple at anvende middelværdier for stofkoncentrationerne. For at kunne lægge en rimelig grad af generalitet i disse middelværdier indføres begrebet overvand. Overvandet er den del af afstrømningen, som ligger over den daglige spildevandsstrøm, Lindholm (1977). Dette er illustreret i figur 2.3. Stoftransporten med overvandet er differensen mellem den totale stoftransport og stoftransporten med spildevandet. Det er heraf muligt at beregne koncentrationen i overvandet, C_o , den koncentration der ville have været i afstrømningen, hvis der ikke havde været tilskud af spildevand. Tilsvarende benyttes koncentrationen, C_s , for spildevandet.

Til karakterisering af blandingsforholdet mellem overvand og spildevand i det øjeblik bygværket træder i funktion indføres opspændingsgraden m_s :

$$m_s = \frac{Q_a - Q_s}{Q_s}$$

m_s : Opspæding, når bygværket træder i funktion.

Q_a : Maximal vandføring i den videreførende ledning (regnet konstant under hændelsen).

Q_s : Tørvejrsvandføring (regnet konstant under hændelsen).

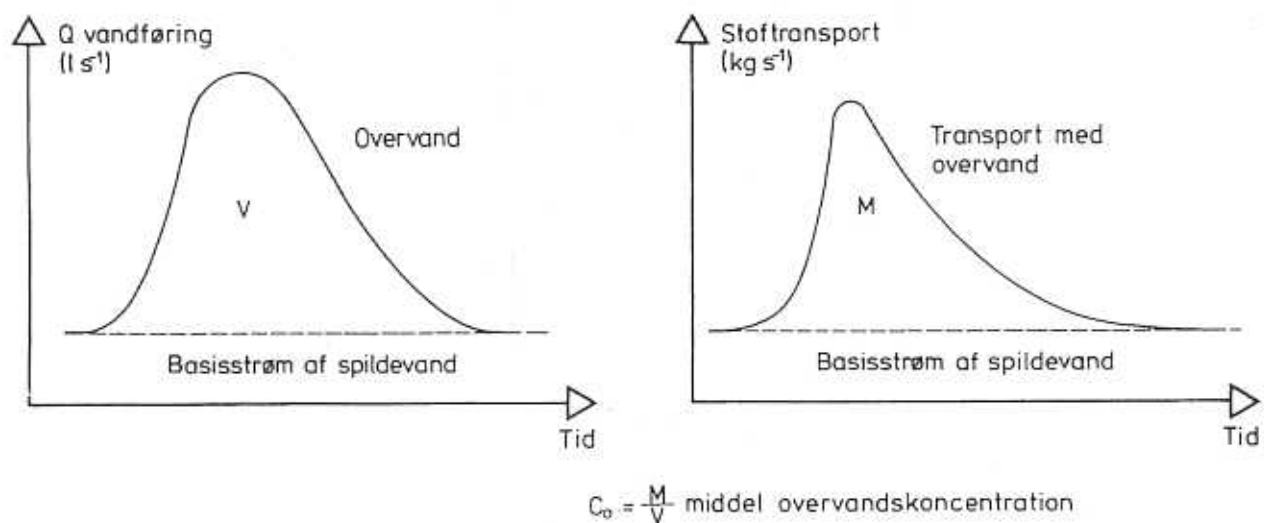
På årsbasis kan beregnes blandingsforholdet i overløbsvandet mellem aflastet overvand og spildevand:

$$m_d = \frac{V_a - V_{as}}{V_{as}}$$

m_d : Blandingsforhold i overløbsvandet mellem udledt overvand og spildevand på årsbasis.

V_a : Aflastet total vandmængde på årsbasis.

V_{as} : Aflastet spildevandsmængde på årsbasis.



Figur 2.3 Definition af overvand og den dertil knyttede stofkoncentration.

3 Formål og fremgangsmåde

Ved fastlæggelsen af formålet med beregningen af recipientbelastningen fra overløbsbygværker må udgangspunktet findes i de skadevirkninger, som udledningen har for recipienten. Disse skadevirkninger kan opdeles i to grupper:

- skader fra momentane udledninger
- skader fra akkumulerede udledninger

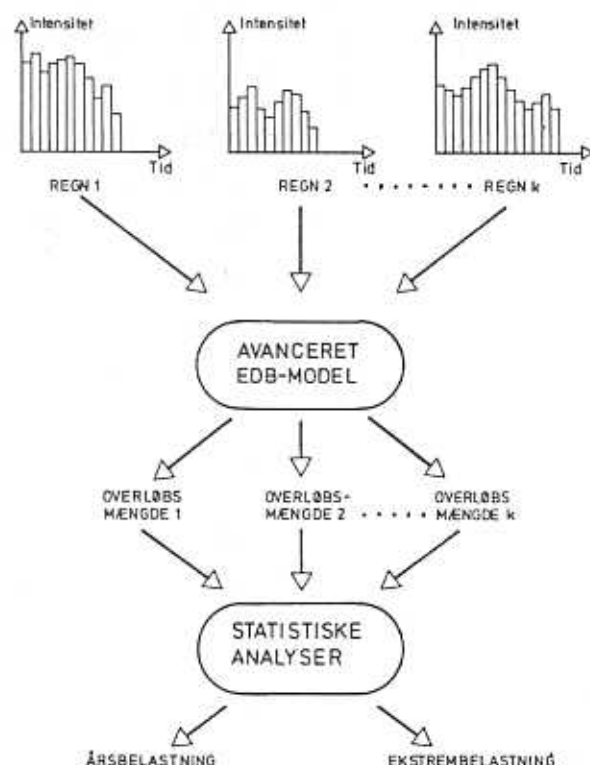
De momentane udledninger betyder i denne sammenhæng udledte overløbsmængder fra enkelte hændelser, modsat de akkumulerede udledninger, hvor skadevirkningen først opstår, når der er foregået udledning gennem en vis periode.

Et eksempel på skadevirkningen af momentane udledninger er udledningen af organisk stof til vandløb. Ved en overløbshændelse tilledes et vist mål organisk stof til vandløbet, og ved nedbrydningen forbruges der ilt, således at iltkoncentrationen bliver så lav, at fiskene eventuelt dør. Det er i denne situation vigtigt at kende såvel belastningen, som den sandsynlighed med hvilken den optræder. Specielt knytter interessen sig til de sjældne og store hændelser, de ekstreme hændelser. (Se Skrift 22, Spildevandskomitéen, 1984).

Ved udledning til søer (eller andre recipienter med stor opholdstid) ophobes bidraget fra hver udledning. I tilfælde af at der udledes næringssalte, kan dette føre til, at søen overgødskes (bliver eutrof). Dermed forøges algeproduktionen, og vilkårene for det øvrige dyre- og planteliv forringes. Et godt billede af de akkumulerede udledte mængder fås ved opgørelse på årsbasis.

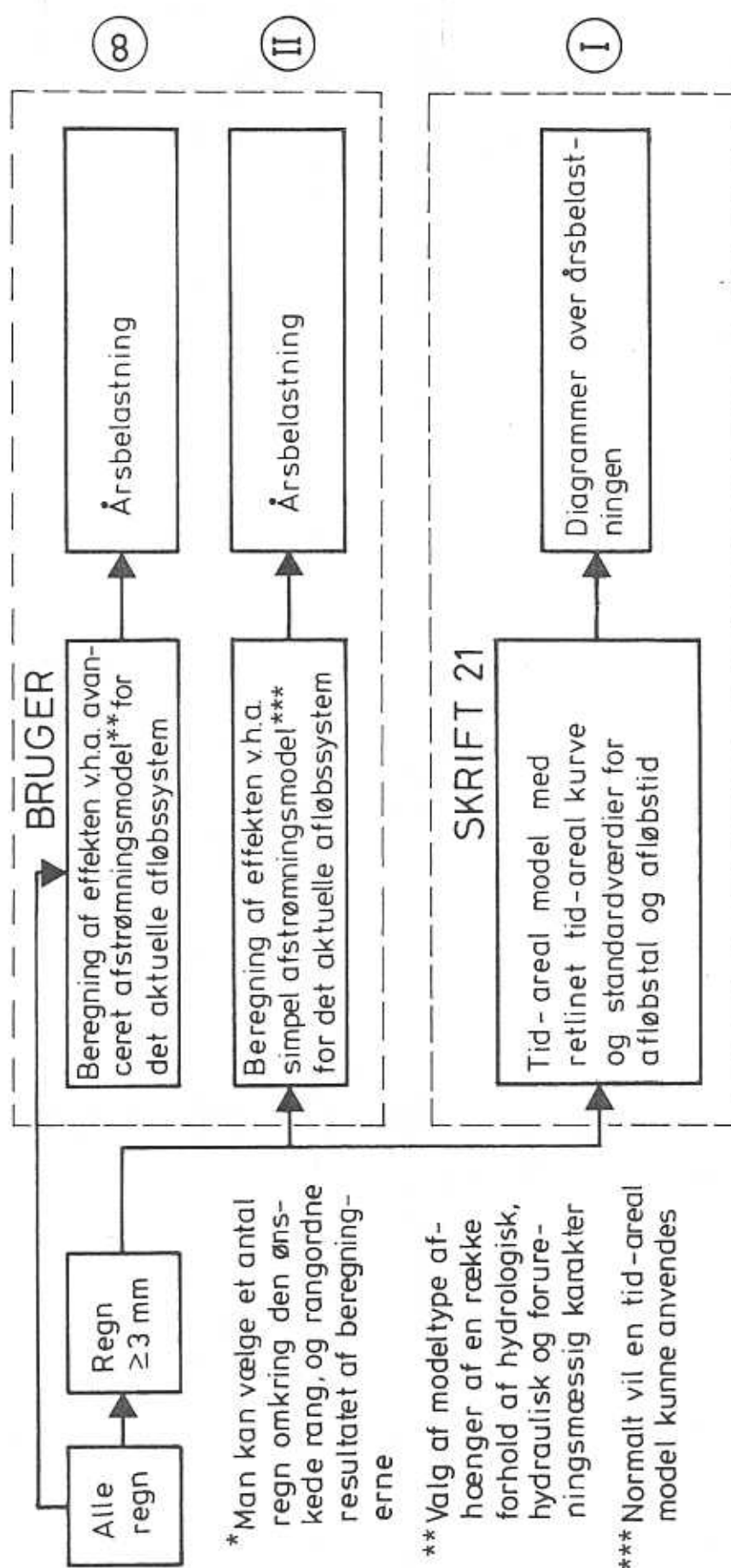
Beregningerne på overløbsbygværkerne skal altså føre til, at både belastningen fra de ekstreme hændelser og belastningen på årsbasis skal kunne bestemmes.

Disse formål kan nås ved at anvende hele den historiske regnserie og en avanceret modeltype. Hver regn gennemregnes, således at de individuelle oplande og bygværkers udformning afspejles. Som resultat fås en serie af

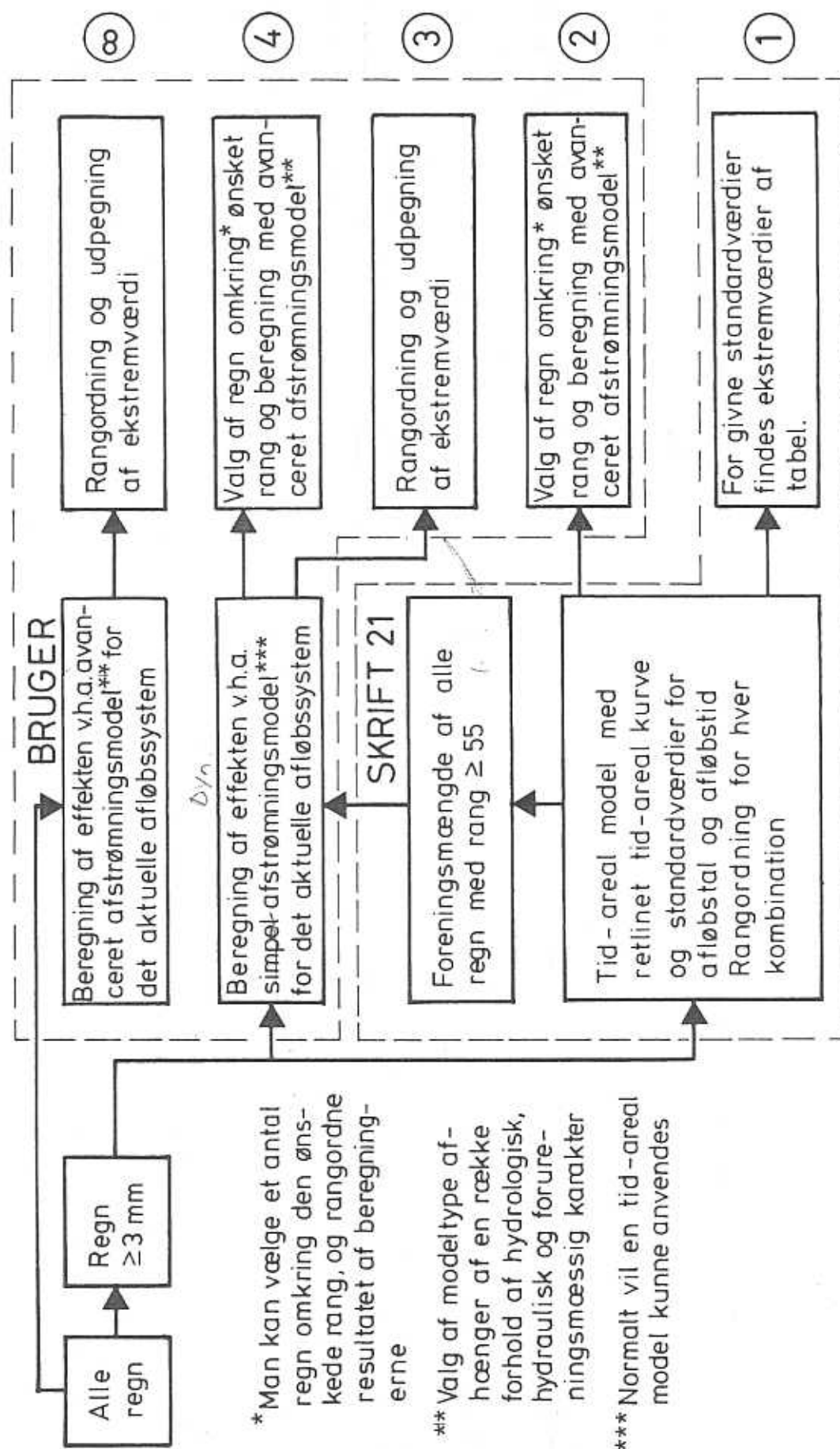


Figur 3.1 Principielt beregningsforløb ved bestemmelse af recipientbelastning. Regnserien omfatter alle hændelser og modellen skal kunne tage hensyn til alle fænomener i afstrømningsprocessen.

aflastningshændelser. På grundlag af denne kan man både finde de ekstreme hændelser og den årlige belastning. I figur 3.1 er vist det principielle forløb af en sådan fremgangsmåde. I praksis vil anvendelsen af hele den historiske regnserie og den mest avancerede modeltype kun finde begrænset anvendelse, idet beregningerne vil være meget kostbare at gennemføre. Man må derfor bevare den principielle fremgangsmåde og vælge redskaberne (regn og model) under hensyntagen til formålet med beregningerne. I figur 3.2 og 3.3 er fremdraget en række kombinationer af regndata og modeltyper. Opstillingen gør ikke krav på at være komplet, mange flere muligheder eksisterer, men de beskrevne giver et udvalg, hvor der er rimelig sammenhæng mellem beregningsøkonomi og nøjagtighed af resultaterne. For begge diagrammer gælder, at den ultimativt bedste metode er angivet som niveau ∞ . Dermed indikeres, at den – som ovenfor beskrevet – næppe vil finde stor anvendelse i praksis. Derefter kan gennemløbes en række niveauer, hvor man sluttelig ender ved niveau 1 (eller I), hvor de enkleste beregningsmetoder uden anvendelse af EDB hører hjemme. Generelt gælder at de laveste niveauer indeholder de simpleste metoder, hvor også usikkerheden på beregningsresultaterne er størst. De højere niveauer byder på større kompleksitet og større nøjagtighed af resultaterne.



Figur 3.2 Anbefalet niveaudeling til beregning af årsbelastning.



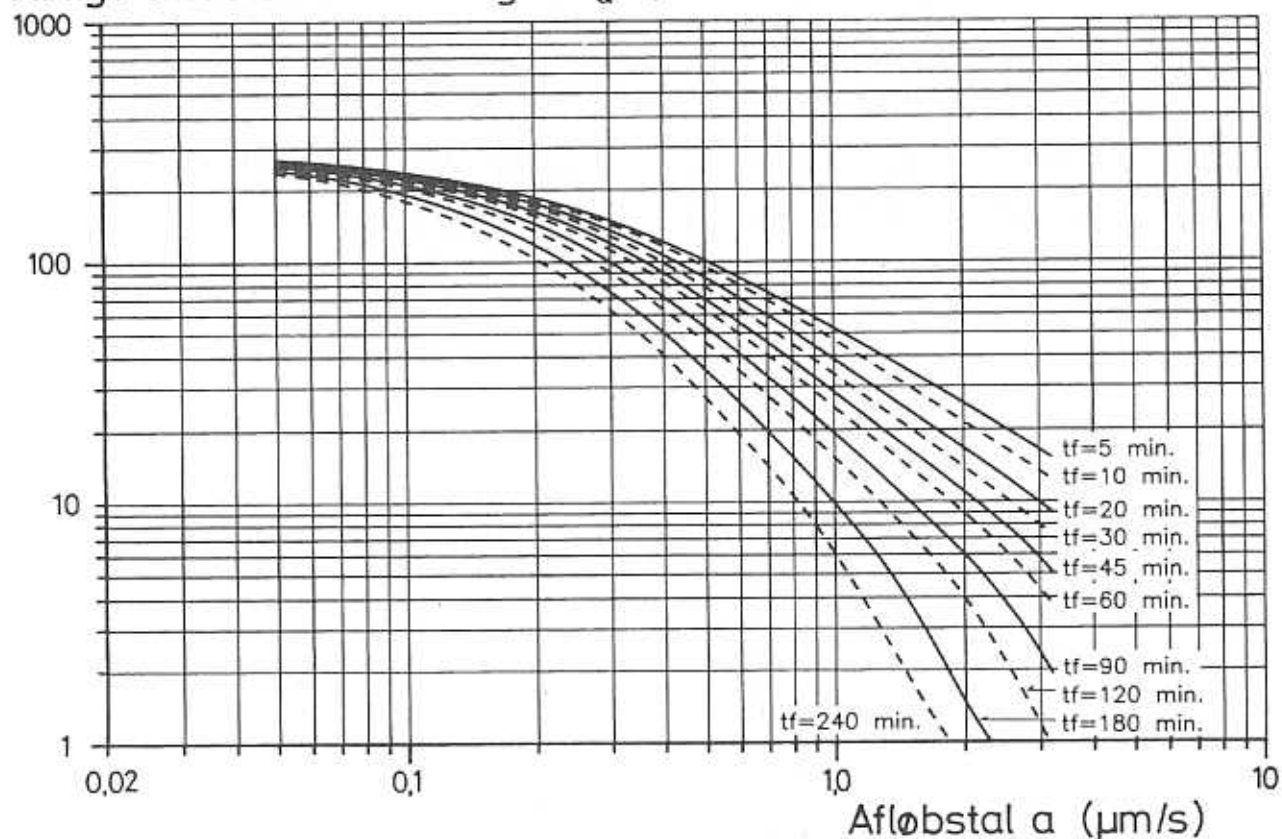
Figur 3.2 er vist de anbefalede kombinationer til beregning af årsbelastningen. Der findes 3 niveauer – inklusiv niveau ∞ . Til brug ved niveau I og II benyttes regn ≥ 3 mm i modsætning til niveau ∞ , hvor alle regn benyttes. I niveau I er beregningerne foretaget én gang for alle og præsenteres i bilag I i bilagsdelen til nærværende skrift. Med en retlinet tid-areal kurve er gennemregnet en række kombinationer af fuldtløbende afløbstid og afløbstal. På grundlag af disse beregninger er der opstillet en række diagrammer, se figur 3.4, hvorfra årsbelastning – antal overløb pr. år – samlet varighed af aflastningerne pr. år – blandingsforhold mellem aflastet overvand og spildevand, kan aflæses. Niveau I er velegnet til indledende overslagsberegning af aflastningsmængderne. Det må pointeres, at i diagrammerne er der ikke taget hensyn til effekten af, at et bassin ikke er tomt før næste regn starter (koblede regn). Dette medfører, for små afløbstal og store specifikke bassinvolumener (V_b/F_{red}), at overløbsmængderne underestimeres. Desuden er det i niveau I kun muligt at tage tilnærmet hensyn til effekten af koblede bygværker (flere bygværker langs en afskærende ledning, hvor afløbet fra det opstrøms bygværk bliver indløb i det nedstrøms bygværk).

Disse effekter kan tages i regning med niveau II. Med en avanceret model (kinematisk eller dynamisk bølge) beregnes den aktuelle tid-areal kurve for oplandet. Denne benyttes i en tid-areal model, sammen med alle regn ≥ 3 mm. Ved summation af de beregnede aflastningsmængder og division med det antal år, regnserien dækker, findes årsbelastningen. Denne metode kan benyttes, hvis niveau I ikke yder tilstrækkelig nøjagtighed, eller de aktuelle oplande ligger udenfor parameterområdet i niveau I eller der i oplandet indgår sådanne bygværker, at der må tages beregningsmæssigt hensyn hertil. Ved anvendelse af niveau II vil det også være muligt at opgøre belastningen over en vilkårlig periode, f.eks. kunne man opgøre belastningen på månedsbasis.

I figur 3.3 er anskueliggjort de anbefalede metoder til beregning af ekstreme overløbshændelser. Ud over niveau ∞ findes der niveau 1 til 4, hvor den simpleste metode findes under niveau 1.

Analogt til årsbelastningens niveau I er én gang for alle – med en retlinet tid-areal kurve – gennemregnet en række kombinationer af fuldtløbende afløbstid og afløbstal. I bilag 2 er resultaterne af disse beregninger opstillet i tabelform, og det aflastede vandvolumen – svarende til en ønsket gentagelsesperiode – kan direkte findes. Dette er illustreret i figur 3.5, som viser den aflastede vandmængde som funktion af gentagelsesperioden. Den største forureningsmængde kommer imidlertid ikke nødvendigvis med det største

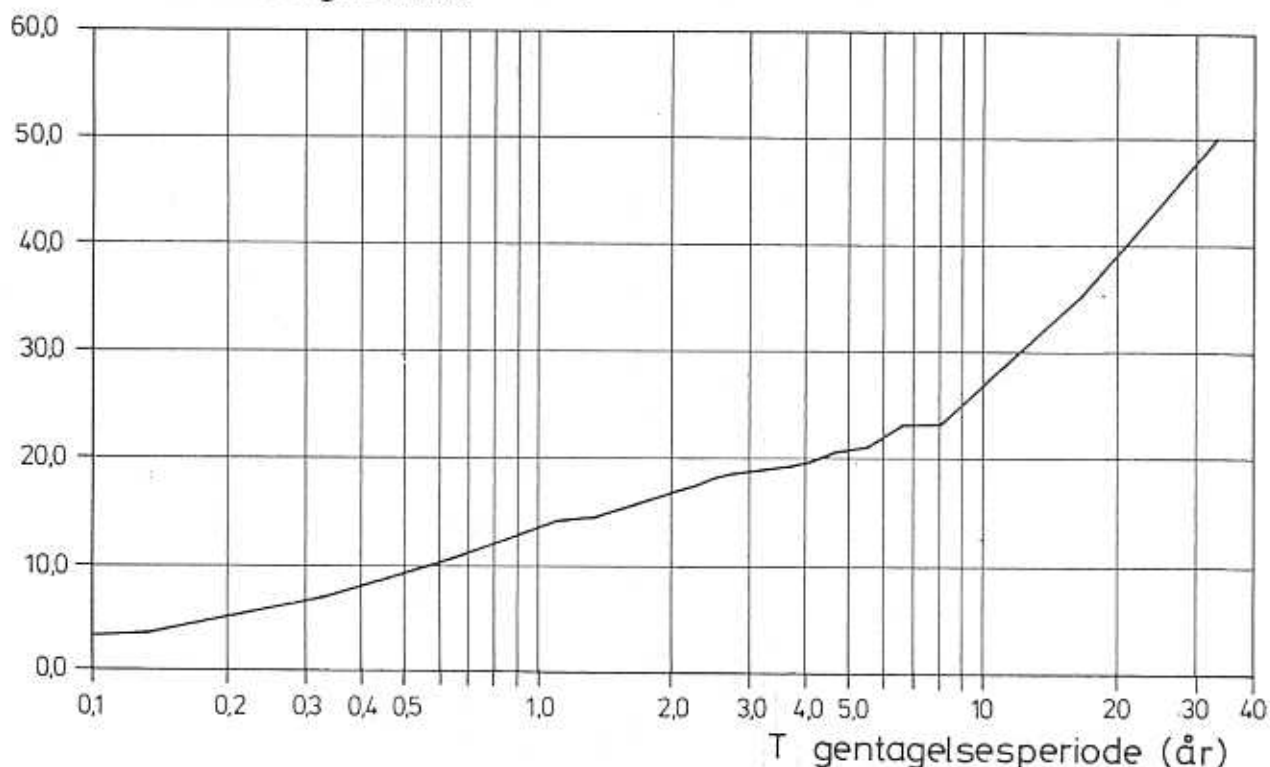
Årligt aflastet vandmængde V_a (mm/år)



Figur 3.4 Årligt aflastet vandmængde som funktion af afløbstal og fuldtløbende afløbstid.

vandvolumen, men enkle og manuelle beregninger giver herefter den aflastede stofmængde. I niveau 2 er vist, at disse tabeller kan danne udgangspunkt for beregninger for det aktuelle opland. Fra tabellen kan vælges en eller flere regnhændelser, som gennemregnes med de virkelige oplandsdata. Der kan benyttes en kinematisk bølgemodel eller, hvis der er opstuvning, en dynamisk bølgemodel. Regn kan vælges enten som den ene regnhændelse, der svarer til den ønskede gentagelsesperiode, eller som et antal regnhændelser i et bånd omkring denne regnhændelse. Efter at disse regn er gennemregnet med det aktuelle opland, findes det ønskede overløbsvolumen ved rangordning af de beregnede overløbsvolumener. Ved denne metode baserer man sig på, at den i tabellerne opstillede rangorden ikke vil ændres dramatisk ved det aktuelle opland. Denne forudsætning kræver, at den aktuelle tid-areal kurve ikke er atypisk, f.eks. har vandrette dele etc., eller hvor der i oplandet indgår sådanne bygværker, at der må tages beregningsmæssigt hensyn hertil. Brydes disse forudsætninger, kan man anvende niveau 3. I dette niveau er udgangspunktet, at man anvender den aktuelle tid-areal kurve

Aflastet vandmængde (mm)



Figur 3.5 Aflastet vandmængde som funktion af gentagelsesperioden.

sammen med de øvrige aktuelle parametre for oplandet. Den aktuelle tid-areal kurve konstrueres med en avanceret model, hvorved opnås en tilnærmet hensyntagen til den udjævnende effekt af ledningsmagasinet.

Som regnserie kan enten benyttes den basale serie af regn ≥ 3 mm, eller en reduceret regnserie. Den reducerede regnserie er fremkommet som forningsmængden af alle ekstremregn (rang ≥ 55) fra de beregninger, som danner grundlaget for niveau 1 og 2. Ved at anvende den reducerede regnserie kan man imidlertid ikke tage hensyn til effekten af koblede regn (denne effekt tages der heller ikke hensyn til i niveau 1 og 2). Dette skyldes, at de mindre regn, som ligger mellem ekstremhændelserne, ikke er medtaget i den reducerede serie. Er der mange regnvandsbassiner i oplandet, må man benytte den basale regnserie for at sikre de mest nøjagtige resultater. Stadig tages der dog ikke fuldt ud hensyn til ledningsmagasinet's udjævnende virkning. I niveau 4 kan man udvælge (i beregningstabellen fra niveau 3) en eller flere regn (analogt med niveau 2), om den ønskede gentagelsesperiode, og benytte en avanceret model til at beregne overløbsmængderne. I tilfælde af, at ledningssystemet ligger med ringe fald, og der kan være stuvning, evt. oversvømmelser, er det specielt velegnet at vælge en dynamisk bølgemodel.

Endeligt resterer niveau ∞ , hvor alle effekter kan inddrages i beregningerne.

I tabel 3.1 og tabel 3.2 er opregnet de enkelte niveaus hensyntagen til fænomenerne i afstrømningsprocessen.

Fænomen	Niveau		
	I	II	∞
Forsinkelse	X	X	X
Koblede bygværker	(X)	X	X
Oplandets individuelle form		X	X
Udjævning fra ledningsmagasin		(X)	X
Koblede regn		X	X
Opstuvning			X

(X): Kun delvis hensyntagen til fænomenet.

Tabel 3.1 Omfang af anbefalede niveauer til beregning af årlig belastning.

Fænomen	Niveau				
	1	2	3	4	∞
Forsinkelse	X	X	X	X	X
Koblede bygværker	(X)	(X)	X	X	X
Oplandets individuelle form		X	X	X	X
Udjævning fra ledningsmagasin		X	(X)	X	X
Koblede regn			X ¹	X ¹	X
Opstuvning		X ²		X ²	X

(X): Kun delvis hensyntagen til fænomenet

1 : Kun såfremt alle regn (≥ 3 mm) benyttes

2 : Kun såfremt der anvendes dynamisk bølgemodel i sidste model.

Tabel 3.2 Omfang af anbefalede niveauer til beregning af ekstremoverløb.

4 EDB-baserede beregningsmetoder

De EDB-baserede beregningsmetoder omfatter alle andre niveauer end niveau 1. Disse metoder er karakteristiske ved, at et antal regnhændelser benyttes som indgang til en model, hvori det aktuelle opland og bygværk gennemregnes. Resultatet er da en beregnet overløbsserie for hvert bygværk. På grundlag af denne serie kan de ønskede belastningsværdier beregnes.

I beskrivelsen henvises der ikke til bestemte EDB-programnavne, idet den opdeles efter de væsentligste beregningselementer. Beskrivelsen tager udgangspunkt i fænomenerne og er en beskrivelse af metoder til beregning af fænomenerne. I forhold til kapitel 3 er det altså en beskrivelse af de grundlæggende beregningsmetoder, fremfor en EDB-mæssig »opskrift« på fremgangsmåden ved hvert niveau. Sådanne opskrifter vil fremkomme, når metoderne er gjort tilgængelige på EDB-centre.

4.1 Regn

De to regnserier, som Spildevandskomitéen har foranlediget indlæst på EDB, er Odense serien og Gentofte serien. Serien er indgående beskrevet i Skrift nr. 18. Til nærværende problemstilling anvendes Odense serien. Dette skyldes primært, at i en lang række år har denne måler været i drift hele året, hvilket er nødvendigt, når serien skal benyttes til at bestemme årsbelastninger. Måleresultaterne stammer fra perioden 1933-1980, og i de 47 år har måleren fungeret som helårsmåler i 33 år. I disse år er der registreret 4686 regnhændelser, hvorom det gælder, at deres dybde er større end eller lig med 0,6 mm. I henhold til kapitel 3 opfattes denne serie som »alle regn«. Regnhændelserne under 3,0 mm er registreret som kasseregn, d.v.s. med angivelse af regndybde og varighed. For de øvrige regnhændelser foreligger der en fuld beskrivelse af regnens tidsmæssig variation. I de 33 år er der i alt registreret 1571 regnhændelser over 3,0 mm.

Disse 1571 regnhændelser er det primære udgangspunkt for beregningerne, idet det forudsættes, at regn mindre end 3 mm ikke giver noget væsentligt bidrag til hverken års- eller ekstrembelastningen. I tabel 4.1 er op-

regnet en række karakteristiske tal for dels serien af alle regn og dels regn ≥ 3 mm. Desuden er opgjort den karakteristiske afstrømning, når der fra hver regnhændelse fratrækkes 0,6 mm i initialtab.

	Regndybde ≥ 0.6 mm	Regndybde ≥ 3.0 mm
Antal regn pr. år	142	48
Middel årlig nedbør	464 mm	331 mm
Middel årlig afstrømning med initialtab på 0.6 mm	379 mm	302 mm

Tabel 4.1 Karakteristiske tal for Odense serien.

Fra denne serie er udtrukket en serie på 114 regn til beregning af ekstrembelastning. Disse regn er fundet som foreningsmængden af regn med rang ≤ 55 for i alt 1440 kombinationer af fuldtløbende afløbstid – afløbstal – opspædingsgrad ved start af overløb og forholdet C_s/C_o mellem stofkoncentrationerne i overvand og spildevand. De benyttede værdier er:

- t_f : 5-10-20-30-45-60-90-120-180-240 minutter
- a : 0,05-0,1-0,2-0,3-0,4-0,6-0,8-1,2-1,6-2,0-2,6-3,2 $\mu\text{m/s}$
- m_s : 1-6-11-16
- C_s/C_o : 1-3-5

For hver af disse 1440 kombinationer blev de 55 regn, som gav størst recipientbelastning fundet. Ved analyse af de 1440 serier på hver 55 regn kunne erkendes, at kun 114 regnhændelser indgik. Denne serie kan benyttes som alternativ serie til de 1571 regnhændelser på niveau 3 og niveau 4 ved beregning af ekstremhændelser. Er de aktuelle oplandsparametre indenfor rammerne af de gennemregnede kombinationer, vil man, ved anvendelse af de 114 hændelser, altid kunne bestemme de 55 største overløbshændelser. Disse vil være de samme som kunne findes, hvis man benyttede serien på 1571 regn (med de forbehold angående koblede regn, som er angivet i kapitel 3). Serien på 114 regn er angivet i tabel 4.2.

REGN - NR	VARIGHED	REGN-DYBDE	REGN - NR	VARIGHED	REGN-DYBDE
	min	mm		min	mm
360202 1708	958	22	620721 1350	122	18
360522 0126	286	19	630610 1422	112	15
360719 0207	416	22	630618 1743	148	15
370608 0119	135	11	630815 0639	522	22
370912 0502	692	20	630921 0129	179	15
380701 1205	738	20	640602 0753	687	21
390617 0522	224	15	640607 1523	312	30
390721 1130	14	10	640908 0704	127	16
390830 1755	129	21	650505 1605	81	24
391028 0753	667	20	650721 1541	61	22
400527 0929	492	19	651209 1036	855	18
400627 0906	42	8	670529 2050	591	27
400712 0632	148	13	670720 1216	126	11
400726 1516	35	8	670802 1809	135	19
410611 0513	399	19	670810 0809	183	19
410723 0804	245	22	670917 2328	88	17
410805 0604	187	18	670918 2218	93	22
410821 1321	45	11	670921 2302	860	31
410828 1844	151	12	671016 2219	446	23
520618 0743	28	8	680605 0720	143	9
521002 1151	1216	24	680627 1538	199	21
530516 1810	37	16	681009 0136	555	24
530609 2341	347	19	690820 0143	59	11
530618 2245	1005	35	691103 2042	849	26
530821 1518	166	13	700702 1520	29	8
540620 1452	53	12	700908 1813	49	11
540921 0234	131	9	700916 1807	406	23
550507 0147	264	21	701031 1959	400	18
550607 0414	627	17	710529 0221	775	34
550828 1124	32	8	710627 0814	619	25
550915 2104	769	23	710814 1639	49	9
560702 2347	556	25	710815 0731	92	17
560818 1418	304	20	710924 0234	216	26
570604 1428	93	18	710924 0736	143	13
570611 0914	42	9	720520 2259	883	26
570720 0939	544	24	720724 2348	131	22
570727 1609	37	13	720729 1756	406	59
571109 1002	987	28	720811 0250	642	30
580209 2327	938	23	730505 1511	57	10
580525 2111	208	29	730707 1914	98	13
580716 1304	933	17	730921 1307	423	28
590711 1857	100	12	730928 1449	132	21
590728 0622	94	10	731009 0243	269	17
590815 0936	61	14	740210 2110	759	20
590815 1321	159	24	740712 0716	66	21
590815 2017	535	28	740801 0736	191	18
591109 2248	1066	18	740805 0411	446	20
610406 2019	39	9	740809 1723	78	16
610613 1538	124	32	740811 1353	51	22
610713 0508	467	18	740924 1546	292	17
610822 0631	72	10	750712 0535	194	14
610905 1217	230	39	760530 1559	181	15
610924 2343	28	8	761130 1812	474	26
611231 1549	838	19	770930 1925	413	19
620212 2302	734	18	780111 1723	1301	28
620619 1218	207	15	780803 2037	29	11
620703 2024	96	11	790825 1258	112	17

Tabel 4.2 Kronologisk ordnet serie på 114 regnhændelser til beregning af ekstreme overløbsmængder.

Regnens identifikation, REGN-NR., udtrykker regnens starttidspunkt efter formatet:

år md dag time minut,

hvor tidsangivelsen følger GMT (Greenwich mean time).

4.2 Hydrologi

Som omtalt i kapitel 3 er de vigtigste hydrologiske tab:

- initialtab
- infiltrationstab

hvor initialtabet var summen af tabene til befugtning, lavningsmagasinering og interception.

En lang måleserie af sammenhørende regn- og afstrømning er blevet benyttet til at bestemme de årlige middelværdier af disse tab (Johansen, 1983). Det viste sig, at initialtabet for de befæstede flader, S_b , i tre oplande var beliggende i intervaller 0,5-0,8 mm. Dette er i overensstemmelse med tilsvarende udenlandske undersøgelser (Arnell, 1982), hvor initialtabet for befæstede flader fandtes at ligge i intervallet 0,4-1,0 mm. Tilsvarende fandtes, at afløbskoefficienten, φ_b , for de befæstede flader var i intervallet 0,7-0,9.

Af disse undersøgelser fremgik også, at initialtab sammenlagt med infiltrationstab for ubefæstede flader er så stort, at der kun meget sjældent kommer afstrømning fra ubefæstede flader. I det følgende vil det blive forudsat, at den afstrømmede del af regnen kan udtrykkes ved

$$V = \varphi_b (R - S_b)$$

V : Afstrømmet regn

φ_b : Afløbskoefficient for befæstede flader

S_b : Initialtab for befæstede flader

R : Regndybde

Det forudsættes også, at initialtabet fratrækkes den første del af regnen, og at afstrømningen først kan begynde, når initialtabet er opfyldt.

I de følgende år vil resultaterne fra en række igangværende målinger danne baggrund for en nøje fastsættelse af φ_b . Medmindre specielle forhold gør sig gældende vil man indtil da kunne sætte φ_b til 0,85 og S_b til 0,6 (Johansen (1983)). Der må dog gøres opmærksom på de store usikkerheder som er knyttet til disse tal.

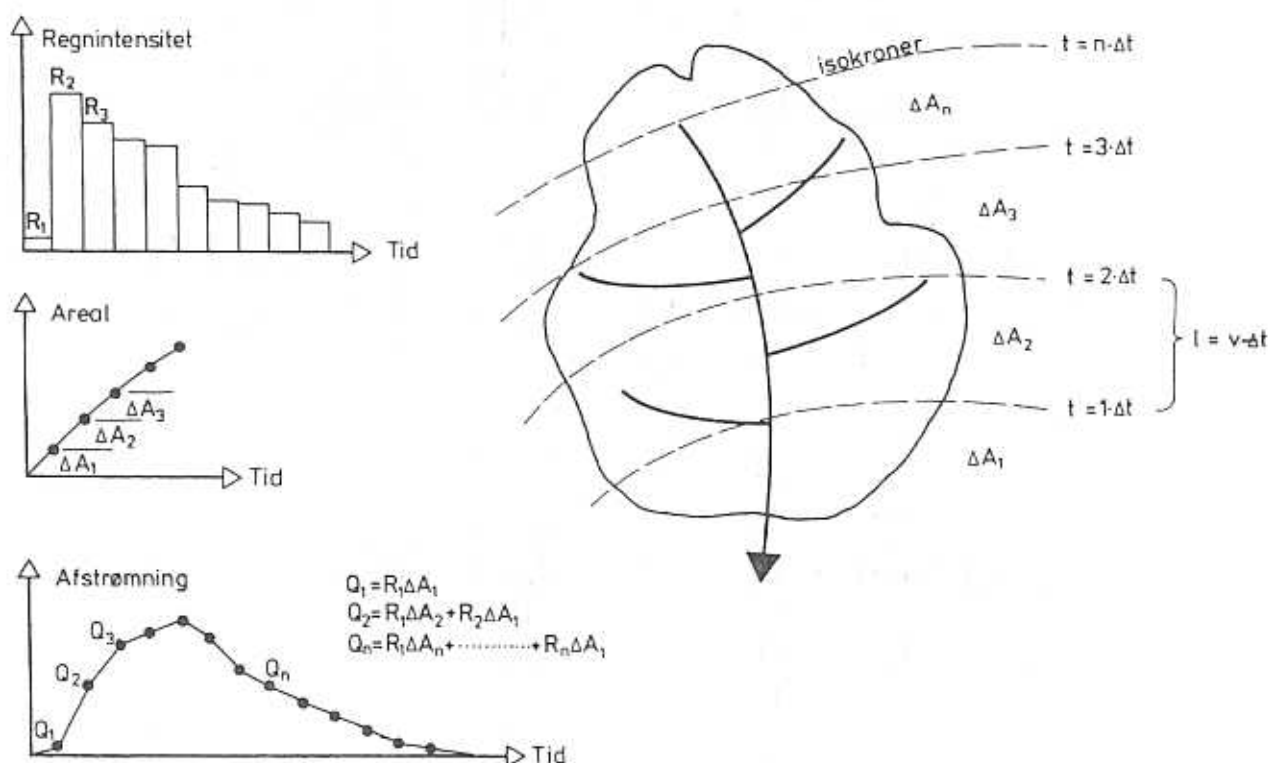
Ved mere avancerede beregningsmetoder vil det være formålstjenligt, at tage hensyn til de semi-permeable fladers særlige hydrologi. Udgør semi-permeable flader en væsentlig del af det befæstede areal vil φ_b ikke kunne

anses for at være konstant. Dette skyldes, at φ_b afhænger af infiltrationens relative andel og den vil variere væsentligt med tiden til foregående regn, og regnens varighed m.m. Ved de mindre intense, almindelige regn, som netop bidrager til den årlige forureningsbelastning vil disse tabsled fra semi-permeable flader kunne være betydningsfulde.

Hvor dette skønnes, at være tilfældet må der benyttes en særlig model for de semi-permeable fladers hydrologi, Jacobsen (1980). Brug af en mere avanceret hydrologisk beskrivelse ændrer ikke ved de principper, som omtales i det følgende.

4.3 Hydraulik

Som det fremgår af figur 3.2 og 3.3 indtager tid-areal metoden en central plads ved beregning af recipientbelastningen. Denne metodes basale forudsætninger er, at man kan regne afstrømningshastigheden konstant under hele afstrømningsforløbet. På grund af de varierende delfyldningsgrader, der findes i rørene under en afstrømningshændelse, er dette sædvanligvis ikke korrekt. Fordelen ved at benytte den konstante afstrømningshastighed ligger i, at beregningsmetoden bliver lineær. Dette vil sige, at man kan finde hydrografen i et givet punkt ved simpelt hen at addere og tidsforskyde de indgående hydrografer fra deloplandene. En yderligere simplifikation opnås ved indførelsen af tid-areal kurven (se kapitel 2). Denne kurve kendes også under navnet »afløbsdiagrammet«. Man kan konstruere og benytte kurven som vist i figur 4-1. For et givet opland vælges en afstrømningshastighed, v . Oplandet kan da opdeles efter isokroner (kurver, som går gennem punkter med samme afstrømningstid til udløbet). Når delarealerne mellem isokronerne kendes, er det simpelt at optegne tid-areal kurven. Denne fremgangsmåde er specielt velegnet ved dimensionering af ledningsnettet, hvor hastigheden v er lig den fuldtløbende hastighed. Til beregning af recipientbelastning, hvor mange regn skal benyttes, er det mest sandsynligt, at de fleste regn kun vil give delvist fyldte rør. Hastigheden v vil da variere fra hændelse til hændelse, som funktion af den middelfyldningsgrad (og dermed middelintensiteten af regnhændelsen), der findes i ledningerne under hændelsen. Når hastighed ændres, vil tid-areal kurven også ændres. Man skal altså benytte én specifik tid-areal kurve for hver regnhændelse i regnserien. Det er indlysende, at man ikke kan benytte det ovenfor beskrevne princip til konstruktion af hver af disse kurver. Kurverne konstrueres da i to trin:



Figur 4.1 Beregning af afstrømningsforløb efter tid-areal princippet. Isokroner dannes efter den konstante hastighed v . Arealtilvæksterne beregnes og derfra konstrueres tid-areal kurven.

1. Konstruktion af en basis tid-areal kurve
2. Konstruktion af en tid-areal kurveskare ud fra basis tid-areal kurven.

En basis tid-areal kurve konstrueres ud fra en valgt hastighed af strømmingen. Hastigheden fastsættes som den, der følger af en regn med konstant intensitet. Værdien for regnintensiteten vælges ud fra to kriterier:

- Der må ikke være nogen dele af ledningsnettet, som bliver fuldt-løbende.
- Den skal være i rimelig størrelsesorden i forhold til middelintensiteten for hele serien.

Ved Odense-serien kan benyttes en intensitet på $1,75 \mu\text{m/s}$. Denne er en vægtet middelintensitet af serien, hvor de højintense regnhændelser er tillagt størst vægt. Med denne intensitet kunne man for et givet opland finde den

tilhørende hastighed, og konstruere basis tid-areal kurven manuelt som vist i figur 4.1. I praksis er denne fremgangsmåde dog tidsrøvende og indebærer mulighed for fejl. Man kan i stedet benytte en afstrømningsmodel til at danne tid-areal kurven. Modellen skal blot være således indrettet, at der fra hvert knudepunkt i ledningsnettet kan udskrives en hydrograf. Normalt vil man kunne benytte en model, der er af kinematisk bølge typen. I figur 4.2 er vist, hvorledes man med en kasseregn med intensiteten i og varigheden $t_r > 2 t_f$ samt en kinematisk bølge model danner en basis tid-areal kurve. Man skal indlæse oplandets data i afstrømningsmodellen, og detaljeringsgraden af oplandet skal mindst svare til en opdeling efter brøndene på hovedledningsstrækningen. Efter beregningen udlæses hydrografen ved indløbet til overløbsbygværket. Det er væsentligt, at denne beregning ikke inkluderer bidrag af videreført vand fra opstrøms bygværker. Desuden er det en forudsætning, at såvel initialtab som spildevandsstrøm er sat til nul.

Den resulterende hydrograf er en såkaldt S-hydrograf, der viser hvorledes vandføringen vokser mod en konstant værdi, når hele oplandet bidrager til afstrømningen. Denne kurve er ganske analog til tid-areal kurven, og i den er endda indbygget en vis hensyntagen til den udjævnende virkning, som ledningsmagasinet har på afstrømningen.

Denne beregnede basis tid-areal kurve skal benyttes som grundlag for bestemmelsen af tid-areal kurven svarende til en vilkårlig regnintensitet, i_m . Det punkt, hvor basis tid-areal kurven bliver konstant, er oplandets koncentrationstid, svarende til den valgte intensitet af kasseregnen. Når regnintensiteten ændres, ændres koncentrationstiden, ved små intensiteter fås længere koncentrationstid, og ved store intensiteter fås kortere koncentrationstid. Fra regnhændelse til regnhændelse vil tid-areal kurven hhv. blive »trukket« ud eller »skubbet« sammen. Sammenhængen mellem koncentrationstid og regnintensiteten er givet ved følgende formel (Jensen, 1981):

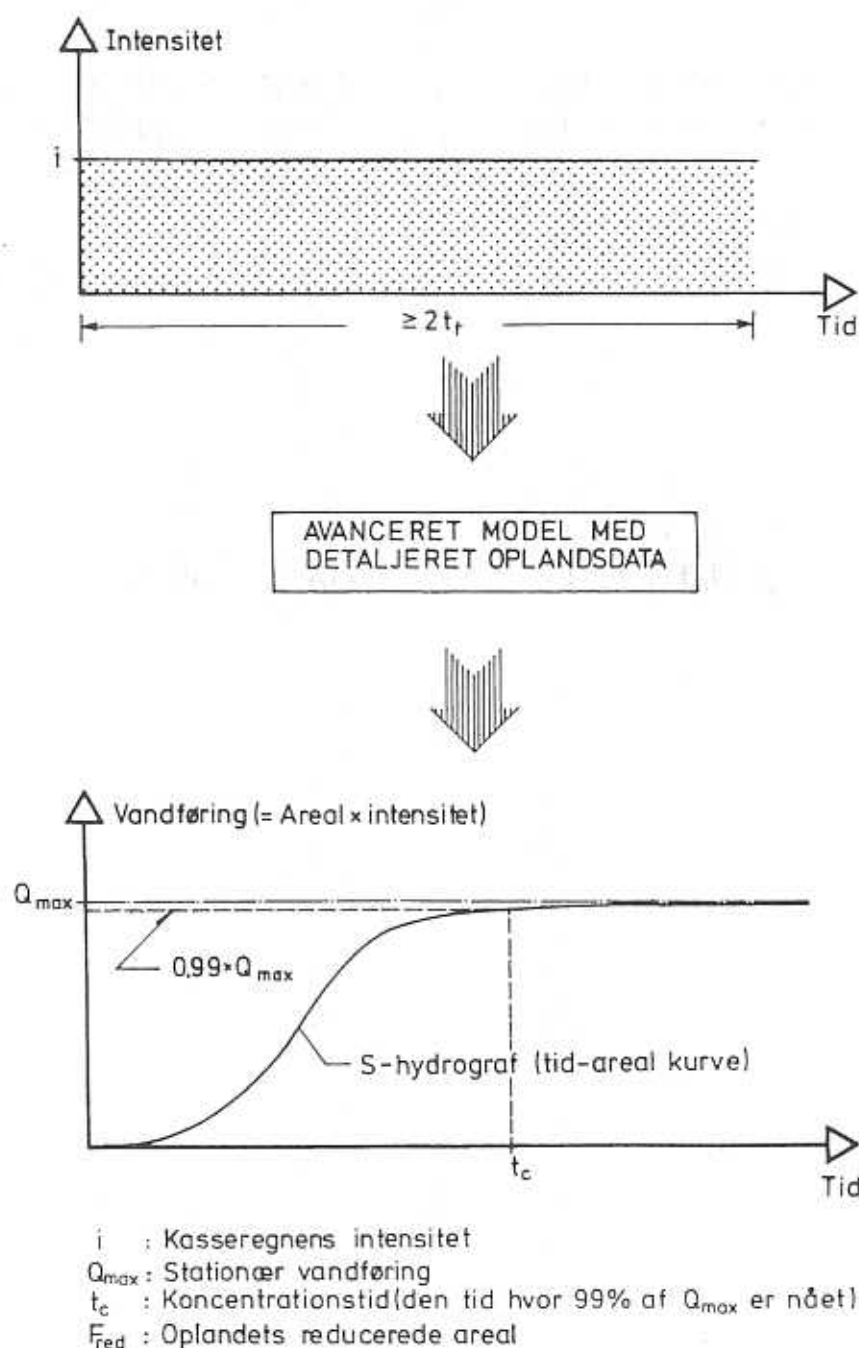
$$\frac{t_c}{t_f} = 2,58 - 10 \left(\frac{i_m}{i_f} \right) + 26,8 \left(\frac{i_m}{i_f} \right)^2 - 36,5 \left(\frac{i_m}{i_f} \right)^3 + 23,7 \left(\frac{i_m}{i_f} \right)^4 - 5,6 \left(\frac{i_m}{i_f} \right)^5$$

i_m : Middelintensitet af aktuel regn

i_f : Dimensionsgivende regnintensitet for tilløbsledningen til bygværket
(beregnet vha. den rationelle metode).

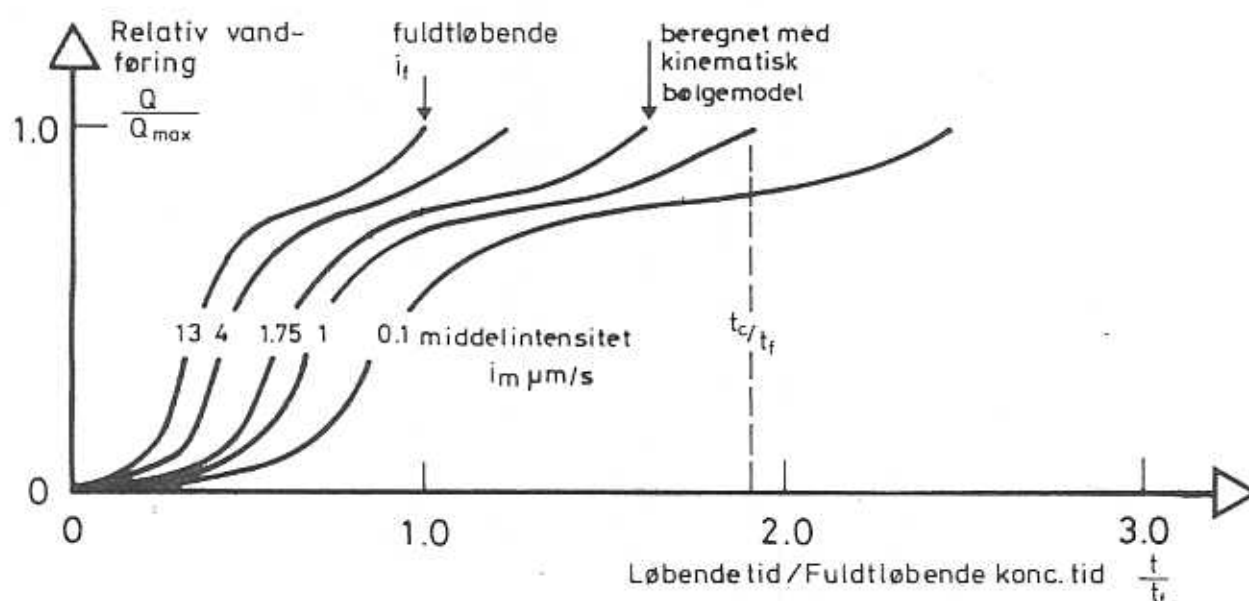
t_f : Fuldtløbende afløbstid for oplandet.

t_c : Koncentrationstid svarende til i_m .



Figur 4.2 Bestemmelse af koncentrationstiden og tid-areal kurve for et givet opland og en given regnintensitet.

Af basis tid-areal kurven kan koncentrationstiden findes svarende til den valgte intensitet af kasseregnen. Ved hjælp af ovenstående formler kan den fuldtløbende afløbstid da findes. Til hver ny middelintensitet af en regnhændelse, i_m , kan da findes den tilhørende koncentrationstid, t_c . Ved simpel forholdsregning på basis tid-areal kurven kan den aktuelle tid-areal kurve fastlægges. En sådan tid-areal kuveskare afledt fra en basis tid-arealkurve er vist i figur 4.3.



Figur 4.3 Den modificerede tid-areal model benytter tid-areal kurven, som er beregnet med en kinematisk bølgemodel. Koncentrationstiden justeres som funktion af den aktuelle regnhændelses middelintensitet.

På sædvanlig vis (se figur 4.1) kan man med den givne regnhændelse og den dertil tilpassede tid-areal kurve beregne afstrømningshydrografen. Denne hydrograf vil være indløb til aflastningsbygværket, for hvilket man ønsker, at bestemme den aflastede mængde.

Den hydrauliske beregning af ikke-liniære bygværker som aflastningsbygværker (evt. inklusiv bassin), pumpestationer etc. er ikke omfattet af den liniære beregningsmetode, og der må benyttes specielle metoder til gennemregning af disse. Den liniære beregningsmetode for rørerne begrænser dog beregningen af bygværkerne i den form, at der må regnes med en konstant kapacitet af den videreførende ledning. Grundlaget for beregningen er da kontinuitetsligningen for bygværket:

$$Q_i \leq Q_a: V = 0:$$

$$Q_u = Q_i$$

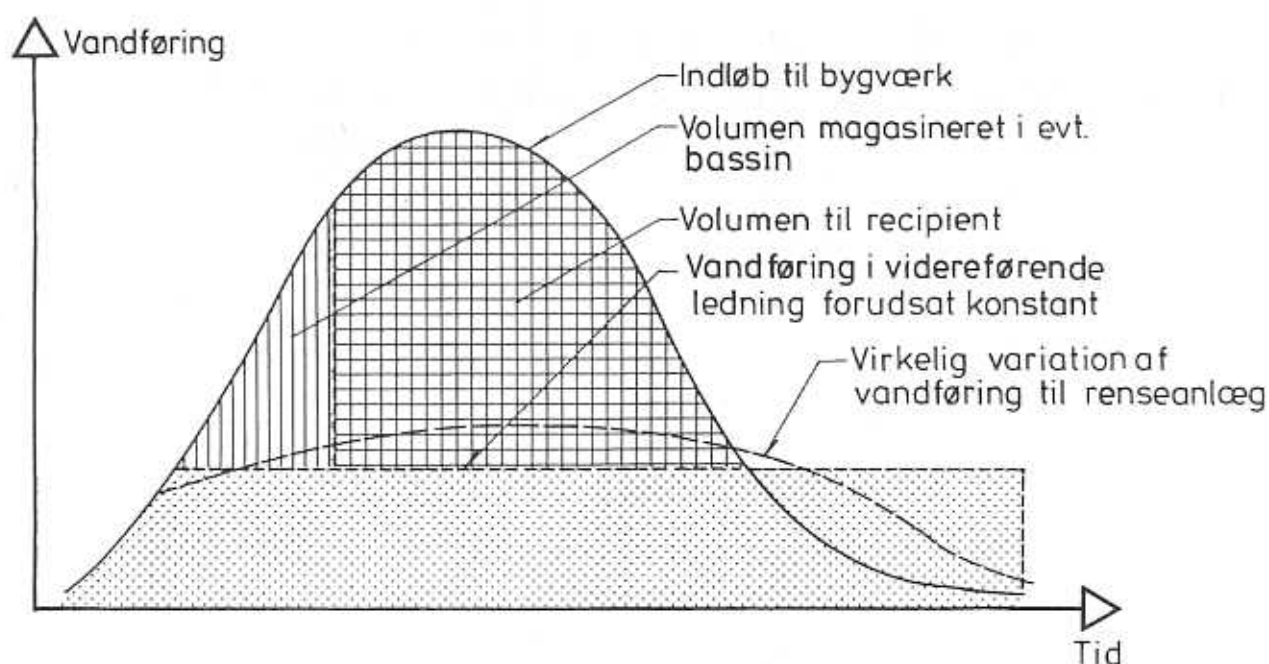
$$0 < V < V_{max}:$$

$$Q_u = Q_a = \frac{dV}{dt}$$

$$V = V_{max}:$$

$$Q_u = Q_a$$

$$Q_i - Q_u = Q_o$$



Figur 4.4 Deling af hydrograf med overløbsværk. En del af det aflastede vand kan evt. magasineres i et bassin.

Anvendelsen af dette ligningssæt er illustreret i figur 4.4. Så længe indløbsvandføringen (Q_i) er mindre end kapaciteten (Q_a) af den videreførende ledning løber vandet lige igennem bygværket. Når indløbsvandføringen vokser træder begrænsningen i udløbsvandføringen i kraft og et eventuelt bassinvolumen (V_{max}) bliver fyldt op. Den del af indløbsvandmængden, som ikke kan rummes i bassinet, aflastes direkte til recipienten (Q_o). Efter tilløbsvandføringen igen falder under kapaciteten af den videreførende ledning tømmer bassinet med den konstante rate Q_a . En integration af overløbshydrografen giver da den aflastede vandmængde, V_a .

Beskrivelsen hidtil har kun omfattet den mest simple hydrauliske model og beregningen af de tilknyttede bygværker. På højere beregningsniveauer benyttes kinematisk- og dynamisk bølgeteori, hvilket giver væsentligt mere komplicerede beregninger, men også potentiale for mere nøjagtige resultater. Disse avancerede metoder er detaljeret beskrevet i skrift nr. 20, Spildevandskomitéen (1982) og Jensen (1981), hvortil der henvises.

4.4 Forurening

Man har ikke noget stort kendskab til de enkeltprocesser, som styrer stoftransporten. Som omtalt i afsnit 2 findes der en række fænomener indenfor områderne, udvaskning – erosion – sedimentation – transport, hvor den detaljerede mekanik ikke er kendt. Man har endog kun et mangelfuldt kendskab til årsagssammenhængen mellem processerne. Meget tyder imidlertid på, at stoftransporten skal beregnes v.h.a. statistiske metoder. Den simpleste statistiske metode er at anvende middelværdier af koncentrationerne af de ønskede stoffer. Disse middelværdier findes ud fra målinger. Målingerne kan enten stamme fra det aktuelle overløbspunkt, hvor man ønsker at bestemme overløbsmængderne, eller der kan benyttes »typiske« værdier fra litteraturen (Johansen (1974), Harremoës (1977), Johansen (1983)).

Af hensyn til generaliteten af måledata er det vigtigt, at man udnytter overvandsbegrebet, således at der benyttes værdier for koncentrationerne af stofferne i dels overvandet og dels tørvejsafstrømningen. Ved beregningerne benyttes disse koncentrationer efter figur 2.3, i »omvendt« rækkefølge. Ved hvert tidsinterval under beregningerne findes dels den transporterede mængde stof med tørvejsafstrømning, (afstrømmet volumen multipliceret med koncentration) og dels den transporterede mængde stof med overvand. Den summerede transportkurve er da en pollutograf for den pågældende regnhændelse.

Ved overløbsbygværket kan man antage total opblanding, stofmængderne vil da kunne deles i samme forhold som vandmængderne. Ved regnvandsbassiner kan eventuelt tages hensyn til sedimentation gennem udnyttelsen af en sammenhæng mellem opholdstid og reduktion i stofindholdet, se f.eks. (Johansen (1983)).

4.5 Recipientbelastning

Med de i de tidligere afsnit beskrevne redskaber indenfor hydrologi-hydraulik-forurening kan en regnserie gennemregnes. Resultatet af denne gennemregning er en serie af overløbshændelser (jfr. figur 3.1), som må underkastes en statistisk behandling, før de ønskede resultater direkte nås, eller serien kan benyttes til de videre beregninger, afhængigt af de valgte beregningsniveauer. Behandlingen af overløbsserien afhænger af problemstillingen, om man ønsker at bestemme årsbelastning, eller ekstrembelastning.

4.5.1 Årsbelastning

Denne belastningsbestemmelse svarer til niveau II i figur 3.2. Man skal benytte hele regnserien (≥ 3 mm), da det for en korrekt middelårsbestemmelse er vigtigt at have så lang en overløbsserie som muligt. I det følgende forudsættes, at man ønsker at bestemme såvel middelbelastningen som spredningen i serien (til karakteriseringen af variationen fra år til år).

Gangen i beregningen er da:

- For hvert år findes summen af overløbsvolumen, stofmængde og overløbsvarighed samt antal overløbshændelser.
- På grundlag af årssummerne beregnes middelværdi og spredning.

Middelværdien beregnes efter følgende formel:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N}$$

$\bar{V}$: Middelårsbelastning

V_i : Belastning fra år i

N : Antal år i regnserien (33 år for Odense-serien)

Spredningen beregnes efter følgende formel:

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}{N-1}}$$

Denne beregning for overløbsvolumenet kan gentages for varighed af overløbshændelser – antal overløb og alle medtagne stofparametre.

Belastningen kan angives som $\bar{V} \pm S_v$. Tolkningen af det hermed definerede variationsområde afhænger ganske af fordelingstypen for serien V_i , $i = 1, N$. I tilfælde af at denne serie er normalfordelt, svarer variationsområdet

til, at ca. 66% af de beregnede årssummer findes heri. Angives intervallet $\bar{V} \pm 2 S_v$ fås, under samme forudsætning, at ca. 95% af de beregnede årssummer findes i intervallet.

Sædvanligvis vil man benytte de årligt aflastede mængder i forbindelse med recipientkvalitetsvurderinger for søer. I den henseende kan det være næringssalte, som er af interesse. Desuden er den årligt udledte vandmængde et nødvendigt led ved opgørelse af vandbalancen for sådanne systemer.

4.5.2 Ekstrembelastning

Ved årsbelastningen er belastningen fra den enkelte regnhændelse kun en del af helheden. Når man søger ekstremhændelserne, er det den individuelle hændelse, eller en serie af koblede hændelser, som det er vigtigt at identificere. Til det formål indføres begrebet *rang*, M . Den beregnede overløbsserie *rangordnes* efter værdien af den parameter, der ønskes bestemt (enten vand eller stof). Hændelsen med den største værdi tildeles rang nr. 1 ($M = 1$), hændelsen med næststørste værdi får rang nr. 2 ($M = 2$) og så fremdeles indtil den mindste hændelse får rang nr. k ($M = k$), hvor k er antal hændelser i overløbsserien. Tabellerne i bilag 2 er eksempler på overløbshændelser for standardoplande, rangordnet efter overløbsvolumen. Når rangen for en given hændelse er bestemt, kan gentagelsesperioden, T , for hændelsens optræden findes

$$T = \frac{N}{M}$$

T : Gentagelsesperiode

N : Det antal år overløbsserien dækker (33 år fra Odense-serien)

M : Hændelsens rang.

Ønsker man, på grundlag af beregninger med Odense-serien, at finde en hændelse, som har gentagelsesperioden 3 år, findes denne som rang 11.

Hvis man ved beregningen af ekstremhændelser ikke finder det nødvendigt at tage hensyn til effekten af koblede regn ved regnvandsbassiner, kan den reducerede regnserie benyttes (114 regnhændelser for Odense-serien, se afsnit 4.1). Hvis det er væsentligt at tage hensyn til disse fænomener, må serien af regn ≥ 3 mm benyttes.

Taler forholdene for det (evt. hvis der er mulighed for opstuvning og oversvømmelser i oplandet, hvilket ville nedsætte recipientbelastningen,

analogt med et regnvandsbassin), kan man benytte den rangordnede serie som grundlag for udvælgelse af enkelte regnhændelser. Disse gennemregnes derpå med en avanceret model. Man kan enten vælge *den* hændelse, som svarer til den ønskede rang, eller man kan vælge et *antal* hændelser omkring den ønskede rang. Der eksisterer ikke nogen fast praksis for valg af dette antal hændelser. Valget beror på et skøn og afhænger af problemstillingen. En mulighed er at vælge hændelserne indenfor et interval på $\pm 5-10\%$ af aflastningsvolumet fra hændelsen med den ønskede rang. Efter beregningerne findes den ønskede belastning ved rangordning af belastningerne fra de gennemregnede hændelser.

Det anbefales at medtage flere regnhændelser, såfremt der er markante afvigelser i de fænomener, som ligger til grund for udvælgelsen, i forhold til de fænomener, som tages i regning i den avancerede model. Dette gælder f.eks. såfremt effekten på afstrømningsforløbet af opstuvninger ønskes undersøgt. Dette skyldes, at metoderne hvormed rangserien er opstillet, ikke tager hensyn til denne effekt, og man dermed risikerer »rangordensombytninger« ved at inddrage effekten. Med den avancerede model er man i stand til at bestemme de aflastede mængder med stor nøjagtighed for de udvalgte regnhændelser. Når man benytter et udvalgt antal regnhændelser bliver usikkerheden på de enkelte hændelsers rang til gengæld større, idet en nøjagtig bestemmelse af rangfølgen ville kræve en gennemregning af hele serien.

De ekstreme aflastningshændelser benyttes i situationer, hvor der eksisterer en akut effekt i recipienten fra aflastningen. Af stofmæssig art kan nævnes udledningen af giftstoffer, eller udledningen af organisk stof. I sidste tilfælde vil det naturligt være udledningen til vandløbet interessen er knyttet til. Vandløbets reaktion på udledningen af organisk stof fra overløbsbygværker er beskrevet i skift 22.

Man kunne også ønske, at kende maksimalvandføringen for de ekstreme aflastningshændelser. Dette skyldes, at der ud for udløbspunktet kan forekomme erosion af såvel bund som bredder. Den ophvirvlede mængde kan eventuelt forøge iltsvindet, og under alle omstændigheder kan det være af praktisk betydning af hensyn til vandløbsvedligeholdelsen, at forhindre sådan erosion.

I den problemstilling må man af beregningerne uddrage maksimalvandføringen over overløbskanten, og rangordne disse efter samme principper som vand- og stofmængderne. I dette er der en parallel til bestemmelsen af maksimalvandføringen i ledningsnettet, således som det er beskrevet i skrift 18.

5 Manuelle beregningsmetoder

De her præsenterede manuelle beregningsmetoder er udarbejdet på basis af en række gennemregninger af forenklede oplande for regn ≥ 3 mm fra Odense-serien. De beregnede overløbsserier er behandlet statistisk (som angivet i afsnit 4.5) en gang for alle, og resultaterne præsenteres i diagram- og tabelform.

Ved alle beregningerne er benyttet et initialtab på 0,6 mm for hver hændelse. Der er benyttet en retlinet tid-areal kurve, idet overløbsmængderne ikke ændres væsentligt, når en anden kurvefacon benyttes. (Eriksen 1983), Boas og Poulsen (1983). Opland og bygværk er karakteriserede ved standardværdier for fuldtløbende afløbstid (ledningsdel + overfladedel) og afløbstal. Der er regnet på et rørsystem med kapacitetsoverskridelse hvert andet år, og der er taget hensyn til delfyldningskurven ved beregning af koncentrationstiden for intensiteter lavere end den dimensionsgivende. Ved større intensiteter er koncentrationstiden sat til den fuldtløbende afløbstid. Som fuldtløbende afløbstid, t_f , er benyttet værdierne 5-10-20-30-40-60-90-120-180-240 minutter. Som afløbstal, a , er benyttet værdierne 0,05-0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,8-1,2-1,6-2,0-2,6-3,2 $\mu\text{m/s}$.

Dette giver i alt 120 kombinationer af standardværdier. For hver kombination er beregnet årsbelastning og opstillet en tabel over ekstremhændelserne. I det følgende illustreres, hvorledes disse resultater kan benyttes.

5.1 Årlig belastning

Ved bestemmelse af den årlige belastning må man skelne mellem de sædvanlige overløbsbygværker og regnvandsbassiner med nødoverløb.

Til brug for de sædvanlige overløbsbygværker er udviklet de i bilag 1 placerede diagrammer. Diagrammerne er optegnede på basis af de omtalte gennemregninger med standardværdier. Der findes fire diagrammer:

B.1.1 Årligt aflastet vandmængde, V_a , (mm/år)

B.1.2 Antal overløb, n (år⁻¹)

B.1.3 Funktionstid af overløb, t_a , (minutter/år)

B.1.4 Blandingsforhold mellem overvand og tørvejrsvand, m_d/m_s

Den fælles indgang til diagrammerne er afløbstallet, a for bygværket og den fuldtløbende afløbstid, t_f for oplandet. Med et afløbstal, $a = 0,4 \mu\text{m/s}$ og en fuldtløbende afløbstid, $t_f = 45 \text{ minutter}$ fås af B.1.1, at overløbsvolumet er 90 mm/år . Af B.1.2 findes, at overløbet træder i funktion 38 gange om året og af B.1.3 findes, at overløbet er i funktion 67 timer pr. år .

Når det gælder beregningen af de udledte stofmængder benyttes diagram B.1.4. Dette diagram afbilder $\frac{m_d}{m_s}$, blandingsforholdet mellem overvand og spildevand i det udledte vand (m_d), i forhold til opspædningen, når bygværket træder i funktion (m_s). Kendes m_s , kan m_d findes. Kendes stofkoncentrationerne C_s og C_o i hhv. tørvejrsvandet og overvandet kan opstilles:

$$P = \frac{V_a}{1 + m_d} (C_s + m_d C_o)$$

P : Udledt stofmængde

V_a : Udledt vandvolumen

m_d : Blandingsforhold mellem overvand og tørvejrsvand

$$\left[= \left(\frac{m_d}{m_s} \right) \cdot m_s \right]$$

C_s : Stofkoncentrationer i tørvejrsvand

C_o : Stofkoncentrationer i overvand.

Antages m_s at være 5, $C_s = 500 \text{ mg/l}$ og $C_o = 100 \text{ mg/l}$ findes, med de ovenfor anførte data, at $\left(\frac{m_d}{m_s} \right) = 1.9$.

Dermed er $m_d = 9.5$.

Af ovenstående formel findes $P = 124 \text{ kg/(red} \cdot \text{ha} \cdot \text{år)}$ (middelkoncentrationen i overløbsvandet er da

$$\frac{124 \cdot 10^6}{90 \cdot 10^4} = 138 \text{ mg/l}$$

I tilfælde af, at der er et regnvandsbassin ved overløbsbygværket, skal de her fundne udledte mængder korrigeres for det vand som forbliver i bassinet. Dertil benyttes tabellerne over ekstremværdier i bilag 2. Dette skyldes, at det er nødvendigt at identificere den del af regnhændelserne, som giver et over-

løbsvolumen, der er større end bassinvolumenet. Antages, at bassinvolumenet svarer til 10 mm, kan man med de ovenfor angivne værdier gå ind i bilag 2, tabel B2.45 og finde, at overløbsvolumenet overstiger 10 mm ved rang 53. Dette svarer til, at overløbsfrekvensen for bassinet bliver

$\frac{53}{33} = 1,6 \text{ gange pr. år}$. I kolonnen for ΣV_a kan aflæses, at i de 53 hændelser udledes der i alt 846 mm, derfra skal dog trækkes det vand som bliver tilbage i bassinet i de 53 hændelser. Dette udgør $53 \cdot 10 = 530 \text{ mm}$. Overløbsvolumenet er da $(846 - 530)/33 = 9,6 \text{ mm/år}$.

Ved anvendelse af den tidligere fundne middelværdi for stofkoncentrationen i det udledte vand fås $P = 13 \text{ kg/(red} \cdot \text{ha} \cdot \text{år)}$. Heri er der ikke taget hensyn til eventuel sedimentation i bassinet. Det er heller ikke muligt at beregne funktionstiden for nødoverløbet. Der er endeligt ikke taget hensyn til effekten af koblede regn, som for små afløbstal kan bevirke, at overløbsmængderne underestimeres med denne metode. Hvis det er nødvendigt at inddrage disse fænomener i beregningerne, må niveau II benyttes.

5.2 Ekstremlastning

For hver af de 120 kombinationer af fuldtløbende afløbstid, t_f , og afløbstal, a , findes i bilag 2 en tabelside. I denne er opstillet de rangordnede overløbsmængder, V_a , varighed af overløbshændelsen, t_a og regnens identifikation. For rangen $M_v \leq 55$ er de enkelte hændelser angivet direkte. For $55 < M_v \leq 605$ er angivet middelværdierne for serier på 10 hændelser. Ved opslag i disse tabeller kan man for en given kombination af afløbstid og afløbstal direkte finde den aflastede vandmængde, svarende til en ønsket rang. Med de angivne data kan man desuden beregne den aflastede stofmængde, P :

$$P = C_s V_s + C_o V_o$$

Ved antagelse om total opblanding mellem overvand og spildevand, mens overløbet er i funktion, kan ovenstående ligning omformes til:

$$P = F_{red} (V_a - V_b) \left(C_o + \frac{t_a q_s}{V_a + t_a (a + q_s)} (C_s - C_o) \right)$$

P : Aflastet stofmængde

F_{red} : Oplandets reducerede areal

- V_a : Aflastet vandmængde
- V_b : Bassinvolumen
- t_a : Varighed af aflastning
- q_s : Spildevandsintensitet
- a : Afløbstal
- C_s : Stofkoncentration i spildevandet
- C_o : Stofkoncentration i overvandet

Det fremgår, at leddene i parantesen udgør koncentrationen af aflastningsvandet.

På grund af den store variation af t_a gennem en serie er det ikke givet, at P vil få samme rang som V_a . Af ovenstående ligning fremgår, at P vokser, når t_a vokser (for $C_s > C_o$). Ønsker man at bestemme den aflastede stofmængde svarende til en given rang, må man beregne P for hver af de i tabellen angivne hændelser. Dernæst må serien rangordnes efter P .

I tabel 5.1 er givet et eksempel. For en afløbstid $t_f = 30$ minutter, en spildevandsstrøm, $q_s = 0.1 \mu\text{m/s}$ og afløbstallet, $a = 0.3 \mu\text{m/s}$, kan på grundlag af tabel B2.34 i bilaget bestemmes den mængde COD der aflastes for en gentagelsesperiode $T = 1$ år. Koncentration af COD i spildevandet, C_s , er 250 g/m^3 og koncentrationen i overvandet, C_o , er 100 g/m^3 .

En gentagelsesperiode på 1 år svarer til en rang for aflastet stofmængde, M_p på 33. Da rangen M_p kan afvige fra rangen M_v vælges et antal regnhændelser i et interval om $M_v = 33$. I tabel 5.1 er valgt 10 hændelser som ligger i et 5% interval om den værdi for V_a , som svarer til $M_v = 33$. For $M_v = 33$ er $V_a = 154 \text{ m}^3$ (15,4 mm for $F = 1 \text{ ha}$). Den øvre intervalgrænse er da 162 m^3 og den nedre interval grænse er 146 m^3 . Dette giver, at hændelserne med M_v i intervallet 26-35 skal medtages. For hver af disse hændelser beregnes P , den aflastede mængde COD, og ved rangordning af disse værdier findes den ønskede belastning til 16.5 kg. Det kan nævnes, at valgte man, at beregne P for alle 55 hændelser, rangordne efter P og derefter vælge hændelsen med $M_p = 33$ fik man en belastning på 16.6 kg, en acceptabel afvigelse fra den tidligere beregnede værdi.

Maksimalvandføringen over overløbskanten kan ikke bestemmes manuelt efter nærværende skrift. Man må i denne problemstilling benytte Skrift nr. 18. I dette er etableret en niveau 1 beregning af maksimal vandføringen i afløbsledninger. Vandføringen over overløbskanten fås da ved at trække vandføringen i den videreførende ledning fra den derved bestemte værdi.

M_v	REGN - ID	V_a m^3	t_a min	P kg COD	M_p
26	670802 1809	161	140	17.14	30
27	670529 2050	160	490	18.54	26
28	670810 0809	159	125	16.85	32
29	570604 1428	157	105	16.51	33
30	710627 0814	155	350	17.54	27
31	570720 0939	155	295	17.32	29
32	550507 0147	155	245	17.09	31
33	700916 1807	154	360	17.48	28
34	710815 0731	149	100	15.74	35
35	620721 1350	149	110	15.67	34

Tabel 5.1 Beregning af aflastet mængde COD for gentagelsesperioden $T = 1$ år.

5.3 Forudsætninger for de manuelle metoder

Ved anvendelsen af de manuelle metoder til bestemmelse af de aflastede vand- og stofmængder er det væsentligt, at man til stadighed holder sig metodernes forudsætninger for øje. Disse forudsætninger gennemgås i den rækkefølge, de er knyttet til de involverede fænomener.

5.3.1 Regn

Ved beregningerne er benyttet serien på 1571 regnhændelser fra 33 helår fra Odense. Hertil er knyttet følgende forudsætninger:

- Regnhændelser med regndybde mindre end 3 mm giver ikke overløb.
- Regnen er jævnt fordelt over oplandet.
- Ingen regnhændelser er koblete til hinanden.
- At Odense-serien er repræsentativ for hele landet.

5.3.2 Hydrologi

For de hydrologiske tabsled er forudsat følgende:

- Initialtabet for alle befæstede flader er 0,6 mm.
- Initialtab og infiltrationstab for ubefæstede flader er så store, at der ikke fås afstrømning.

5.3.3 Hydraulik

Til de hydrauliske beregninger er anvendt tid-areal metoden. Her er benyttet følgende forudsætninger:

- Tid-areal kurven er retlinet.
- Ledningsnettet er dimensioneret for en gentagelsesperiode på 2 år.
- Ved intensiteter større end den dimensionsgivende, antages at ledningsnettet transporterer vandet bort med den fuldtløbende hastighed.
- Bygværkerne er ikke koblete. Ethvert bygværk antages at være bygværk på topstrækningen af den videreførende ledning.
- Vandføringen i den videreførende ledning regnes konstant under hændelsen.
- Spildevandsafstrømningen regnes konstant under hændelsen.

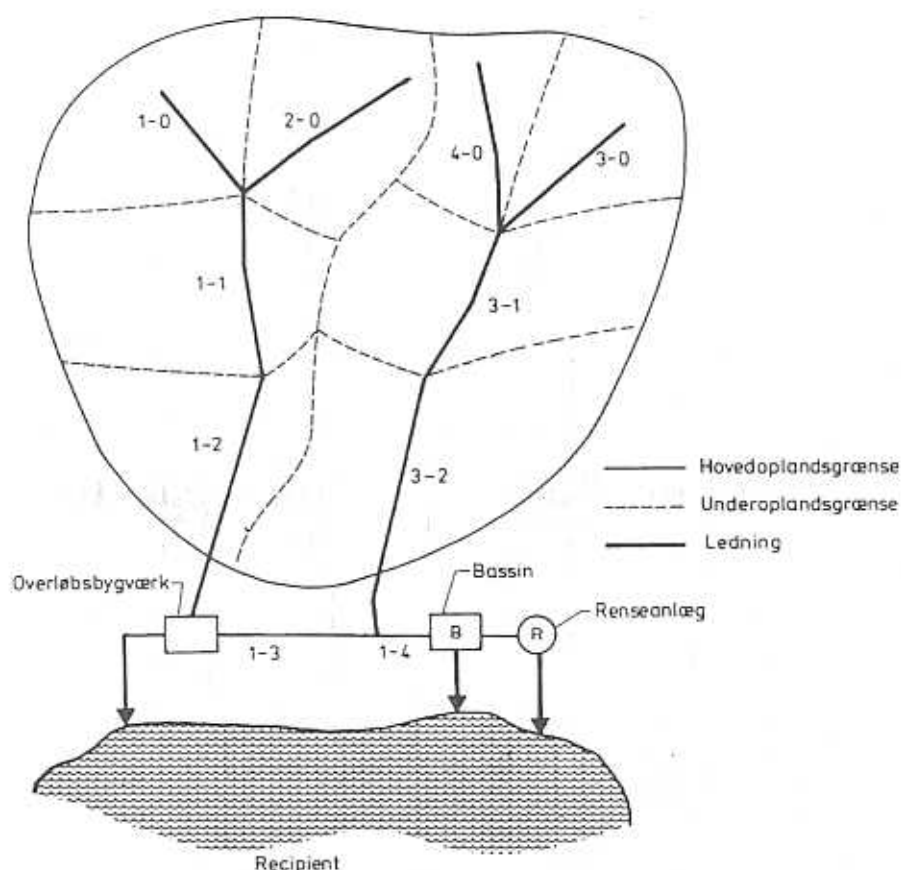
5.3.4 Forurening

Til beregningen af de aflastede stofmængder anvendes en simpel opblandingsmodel. Herunder er forudsat følgende:

- Der er total opblanding under overløbets funktionstid.
- Stofkoncentrationen i overvandet er konstant.
- Stofkoncentrationen i spildevandet er konstant.
- Der tages ikke hensyn til sedimentation i regnvandsbassiner.

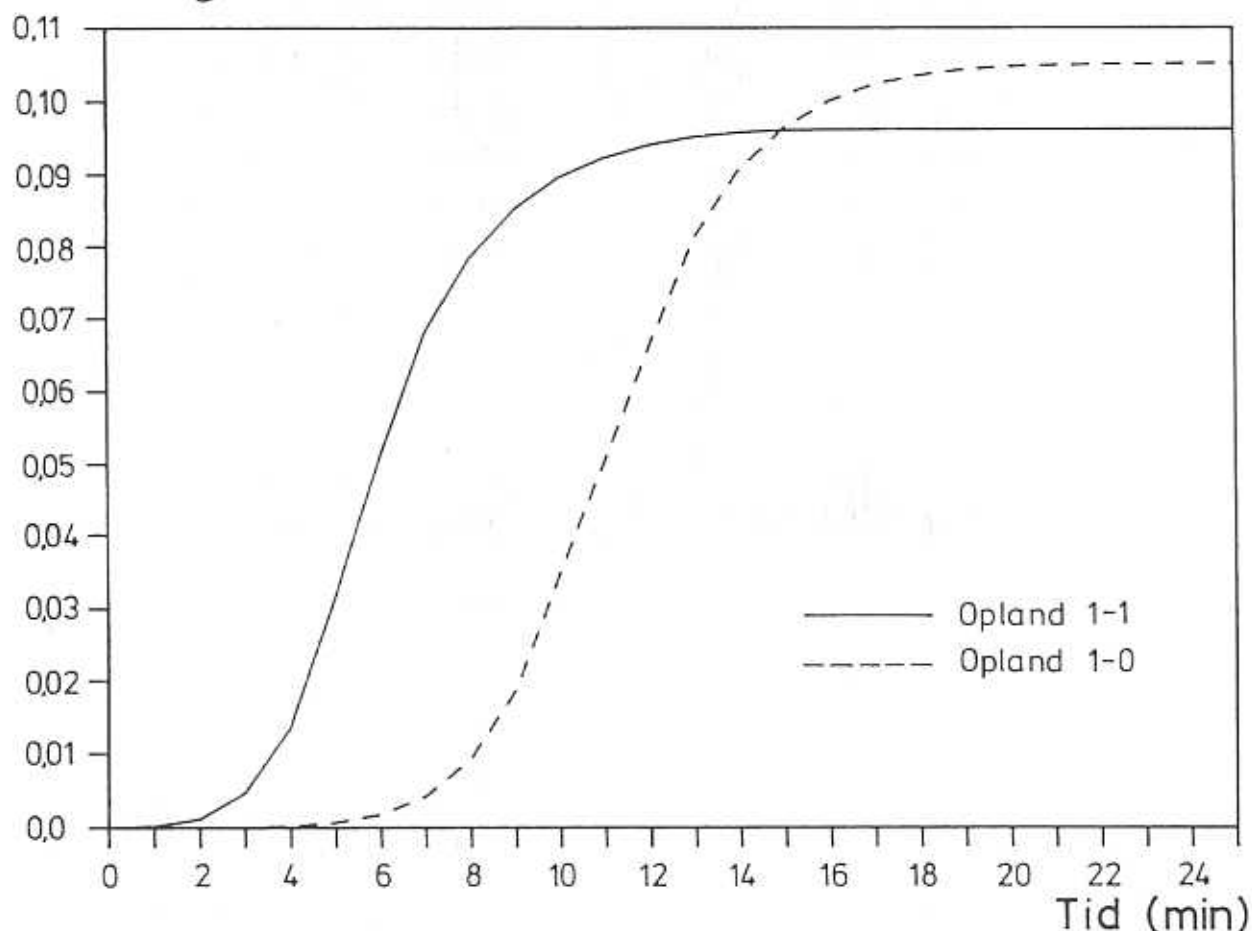
6 Eksempel

I det efterfølgende eksempel belyses anvendelsen af de i skriftet opstillede metoder til beregning af aflastede vand- og stofmængder. Der tages udgangspunkt i det opland, som er vist på figur 6.1. Recipientbelastningen fra overløbsbygværkerne beregnes både med EDB-baserede metoder og manuelle beregningsmetoder. Endeligt bestemmes årsbelastningen ud fra skrift 4. Spildevandskomitéen (1953) og resultatet sammenlignes med beregningsresultaterne efter nærværende skrift.



Figur 6.1 Opland benyttet i eksempel.

Vandføring (m^3/s)



Figur 6.2 S-hydrografer for de to oplande. Nummerering jfr. figur 6.3.

Oplandets geometriske data er vist i tabel 6.1. Disse indlæses i en kinematisk bølgemodel (ILLUDAS, Sjöberg (1979)). Med en kasseregnintensitet på $1,75 \mu\text{m/s}$ og en varighed af kasseregnen på 20 min., kan eksempelvis beregnes de S-hydrografer, der er vist i figur 6.2.

Disse S-hydrografer og et simplificeret sæt oplandsparametre (tabel 6.2 og 6.3) benyttes som inddata til en tid-areal model (SAMBA, Johansen (1983)). Med denne model gennemregnes alle 1571 regn $\geq 3 \text{ mm}$ i Odense-seriens 33 helår. (Dette svarer til fremgangsmåden ved niveau II for årsbelastningen og niveau 3 ved ekstrembelastningen). På basis af denne beregnede overløbs-serie kan både års- og ekstrembelastningen bestemmes. I det følgende beregnes de samme parametre med de manuelle metoder og resultaterne sammenlignes.

GREN	STRÆK- NING	TOTALT AREAL ha.	IMPERME- MEABELT AREAL ha.	PERME- ABELT AREAL ha.	TA * KURVE IMPER.	TA * KURVE PERME.	FLYDELGD. IMPER. OVERFL. m.	FLYDELGD. PERME. OVERFL. m.	LEDNINGS LÆNGDE m.	LEDNINGS DIAMETER m.	LEDNINGS FALD	INDSIV.+ SPILDE- VAND $\frac{m^3}{s}$	Q_a $\frac{m^3}{s}$	BASSIN VOL. m^3
1	0	3.0	0.5	2.5	4	4	100	200	100	0.3	0.005	0.00045	0.0	0
2	0	2.5	0.5	2.0	4	4	50	50	100	0.4	0.005	0.0003	0.0	0
1	1	4.0	1.5	2.5	3	3	100	150	75	0.5	0.005	0.0012	0.0	0
1	2	4.0	3.0	1.0	2	2	150	200	100	0.9	0.0012	0.0024	0.0	0
1	3	0.0	0.0	0.0	0	0	0	300	150	0.3	0.003	0.0	0.05	0
3	0	3.0	1.0	2.0	4	4	100	175	100	0.4	0.007	0.00045	0.0	0
4	0	1.5	0.5	1.0	4	4	50	75	100	0.5	0.003	0.0002	0.0	0
3	1	4.0	1.5	2.5	3	3	200	300	100	0.7	0.002	0.0012	0.0	0
3	2	4.0	3.0	1.0	2	2	100	200	200	0.9	0.002	0.0024	0.0	0
1	4	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	100	1.0	0.0015	0.0	0.0	0
1	5	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	100	0.3	0.005	0.0	0.03	480

* Klassifikation. ifølge kinematisk bølge model: ILLUDAS, (Sjöberg et. al, 1979)

Tabel 6.1 Data for opland benyttet i eksempel. (Impermeabelt areal = reduceret areal).

Gren		1	1
Strækning		0	1
Totalt areal	ha	13.5	12.5
Reduceret areal	ha	5.5	6.0
Ledningslængde	m	0	100
Ledningsdiameter	m	0	0.03
Ledningsfald		0	0.005
Afstrømningstid	min	5	0
Indsiv.+ spildevand	m ³ /s	0.00435	0.00425
Q _a	m ³ /s	0.05	0.03
Bassinvolumen.	m ³	0	400

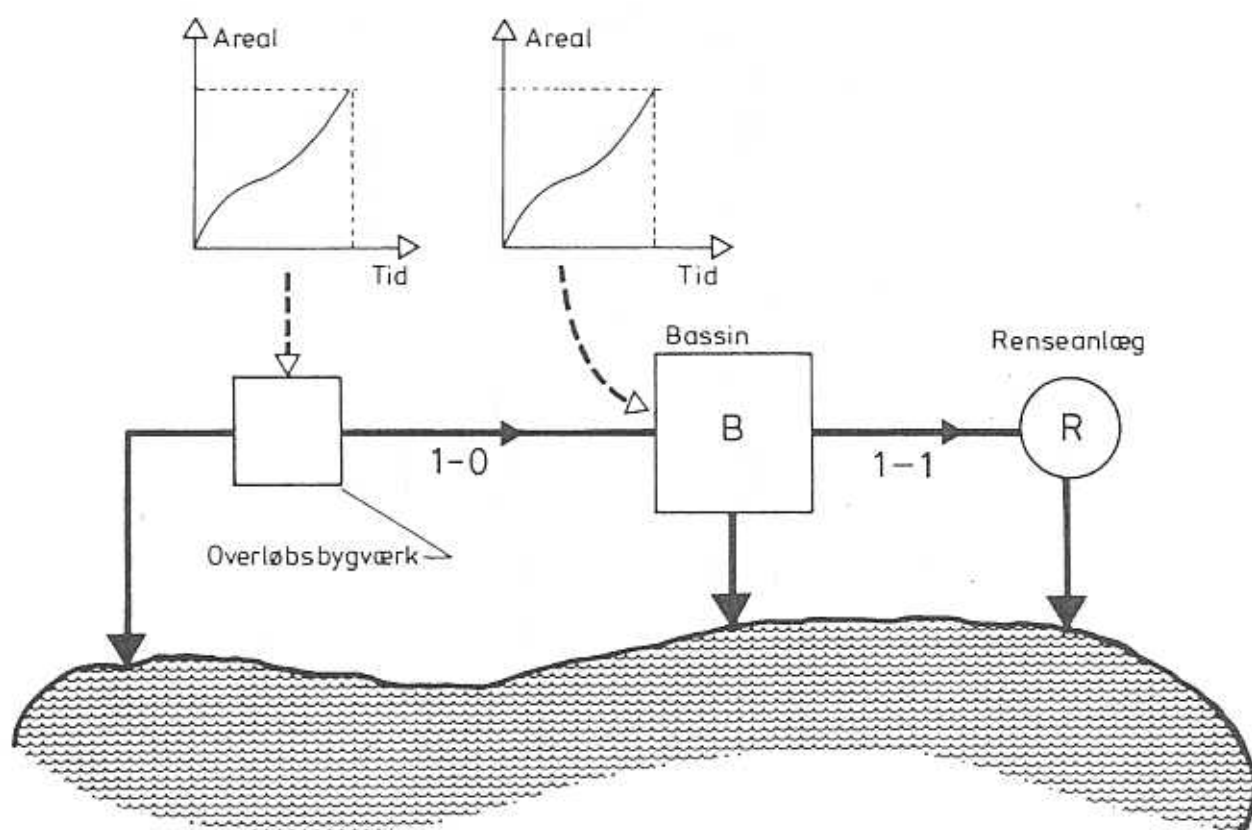
Tabel 6.2 Data for simplificeret opland.

STOF		KONCENTRATIONER	
		OVERVAND	SPILDEVAND
SS	mg/l	199	138
Total fosfor	mg/l	2.3	10.2
Opløst fosfor	mg/l	1.2	7.8
Total kvælstof	mg/l	9.0	31.6
Opløst kvælstof	mg/l	3.6	27.6
Total COD	mg/l	116	246
Opløst COD	mg/l	28 <i>176%</i>	127 <i>48% punk</i>

Tabel 6.3 De benyttede værdier for stofkoncentrationerne.

Årsbelastning

Med den manuelle fremgangsmåde kan årsbelastningen bestemmes. Da der findes to koblede bygværker, må der anvendes en metode, der på tilnærmet vis inddrager dette. Med den basale manuelle beregningsmetode kan man kun bestemme belastningen fra u-koblede bygværker. Ved anvendelsen må man da omdanne det samlede opland til to uafhængige oplande med hver sit bygværk: (bygværks- og oplandsidentifikation henviser til figur 6.3):



Figur 6.3 Simplificeret opland.

1. Opland og bygværk 1-0.
2. Det samlede opland 1-0 + 1-1 som ét opland til bygværk 1-1.
(D.v.s. bygværk 1-0 er fjernet).

Den reelle udledte mængde ved 1-1 findes da som differencen mellem de udledte mængder for de to oplande.

ad 1:

For dette opland fås $a = 0,83 \mu\text{m/s}$, $t_f = 6$ minutter og $m_s = 10$. Af diagrammerne bilag 1 aflæses:

Overløbsvolumen:	$62 \text{ mm/år} \sim 3410 \text{ m}^3/\text{år}$
Funktionstid:	$1200 \text{ min./år} \sim 20 \text{ timer/år}$
Antal:	$\sim 31 \text{ år}^{-1}$
Blandingsforhold (m_d/m_s) = 2	$\sim m_d = 20$

Forurening (efter formel side 47).

SS : 669 kg/år
total-P : 9 kg/år
opløst-P : 5 kg/år
total-N : 34 kg/år
opløst-N : 16 kg/år
total-COD : 417 kg/år
opløst-COD: 112 kg/år *77% opløst*

ad 2:

For det samlede opland ($\div$ bygværk 1-0) fås $a = 0,19 \mu\text{m/s}$, $t_f = 10$ minutter og $M_s = 2.5$. Da bygværket er et bassin benyttes tabellerne i bilag 2. Bassin-volumenet svarer til $400/11.5/10 \text{ mm} = 3,5 \text{ mm}$. Under tabellen for $a = 0,2 \mu\text{m/s}$ og $t_f = 10$ minutter findes den rang, der svarer til et overløbsvolumen lige under 3,5 mm (rang 580):

Antal: $580/33 \sim 18 \text{ år}^{-1}$
Overløbsvolumen: $(4250-580 \cdot 3.5) \cdot 10 \cdot 11.5/33 = 7736 \text{ m}^3/\text{år}$
Blandingsforhold $(m_d/m_s) = 3 \sim m_d = 7,5$

Forurening:

SS : 1484 kg/år
total-P : 25 kg/år
opløst-P : 15 kg/år
total-N : 90 kg/år
opløst-N : 50 kg/år
total-COD : 1016 kg/år *40% opløst*
opløst-COD: 307 kg/år

Den endelige belastning fra bygværk 1-1 fås da som differensen i belastning mellem den beregnede belastning med bygværk 1-1 og hele oplandet, minus belastning fra bygværk 1-0:

Overløbsvolumen: $7736-3410 = 4326 \text{ m}^3/\text{år}$
Antal (uændret): 18 år^{-1}

SS : 1484-669 = 815 kg/år
 total-P : 25-9 = 16 kg/år
 opløst-P : 15-5 = 10 kg/år
 total-N : 90-34 = 56 kg/år
 opløst-N : 50-16 = 34 kg/år
 total-COD : 1016-417 = 599 kg/år
 opløst-COD: 307-112 = 195 kg/år

I tabel 6.4 er disse resultater sammenstillet med EDB-beregningen af årsbelastningen. Det fremgår, at der findes maksimalt en forskel på 20% mellem resultaterne af de to beregningsniveauer. Forskellene er overalt mindst for bygværk 1-0, som er bygværket på topstrækningen af den afskærende ledning, hvor forudsætningerne for den manuelle metode er bedst opfyldt.

PARAMETER	NIVEAU	BYGVÆRK	
		1-0	1-1
Vand m ³ /år	II	3513 ±1476	5686 ± 2112
	I	3410	4326
Antal overløbs-hændelse pr. år	II	31 ±6	16 ± 5
	I	31	18
SS	II	693± 291	822 ± 339
	I	669	815
Total-P kg/år	II	9 ±4	15 ±5
	I	9	16
Opløst-P kg/år	II	5 ±2	10 ±3
	I	5	10
Total- N kg/år	II	34 ±14	55 ± 20
	I	34	56
Opløst-N kg/år	II	15 ±6	32 ± 11
	I	16	34
Total-COD kg/år	II	422 ±175	591 ± 226
	I	417	599
Opløst-COD kg/år	II	109 ±44	210 ± 72
	I	112	195

Tabel 6.4 Sammenligning mellem de årlige overløbsmængder beregnet ved hhv. niveau I (manuelt) og niveau II (EDB).

Ved bygværk 1-1 er der foretaget mellemregninger af hensyn til koblingen af bygværkerne. Derved er usikkerhederne forøget og det må forventes, at ved et større antal koblede bygværker vil usikkerhederne vokse p.g.a. det voksende antal mellemregninger på fiktive oplande.

Ekstremlastning

Til bestemmelse af de ekstreme hændelser benyttes her i eksemplet hhv. niveau 1 og niveau 3. Niveau 1 er den manuelle beregningsmetode, som baseres på tabellerne over ekstremhændelserne i bilag 2. I tabellerne er angivet de rangordnede aflastningshændelser, hvor rangen, M_v , er bestemt ud fra det aflastede vandvolumen. Med den simple formel, som er vist i afsnit 5.2, kan heraf beregnes den aflastede stofmængde, P . I det følgende vil beregningerne blive eksemplificeret for COD, hvor der med hhv. den manuelle og den EDB-baserede metode bestemmes den mængde COD, som ledes til recipienten for gentagelsesperioden $T = 2$ år (rang ~ 16). I tabel 6.5 er vist fremgangsmåden ved den manuelle beregning for bygværk 1-0, hvor de nødvendige øvrige data er fundet i tabel 6.2 og 6.3. Med de tidligere fundne værdier for afløbstal og fuldtløbende afløbstid fås, at tabel B2.61 skal benyttes. I denne tabel opsøges rang 16. Man kunne da direkte for denne hændelse beregne den aflastede mængde COD. For at imødegå eventuel ændret rangfølge for COD vælges at benytte i alt 5 hændelser, idet der suppleres med to hændelser på hver side af rang 16. For alle 5 hændelser beregnes den aflastede mængde COD efter formelen side 48. Den ønskede belastning findes da som medianværdien for de 5 hændelser. I dette tilfælde bliver det aflastede vandvolumen 792 m^3 og den aflastede mængde COD 93 kg . Efter EDB-beregningerne findes, at der aflastes 782 m^3 vand og 93 kg COD. Uoverensstemmelsen er så lille, at resultaterne af de to metoder kan betragtes som værende ens.

Ved anvendelse af en tilsvarende fremgangsmåde ved bygværk 1-1 (inklusive mellemregning for det samlede opland, hvor differencen dannes for samme regnhændelse) nås grænsen for den manuelle metodes ydeevne. Den manuelt beregnede recipientbelastning fås til ca. 109 kg COD og ca. 1000 m^3 vand. EDB-beregning giver her 146 kg COD og 1449 m^3 vand. Uoverensstemmelsen skyldes, at det ved den manuelle metode ikke er muligt at tage fuldt hensyn til koblingen af bygværkerne. Det er to forskellige typer af regnhændelser, som giver de ekstreme aflastningshændelser, for hhv. over-

M_v	REGN - ID	V_a mm	m^3	t_a min	P_{COD} kg	M_p
14	390830 1755	16.7	919	25	107	14
15	730928 1449	15.2	836	85	98	15
16	680627 1538	14.4	792	105	93	16
17	670802 1809	13.9	765	50	89	17
18	670810 0809	13.6	748	75	87	18

Tabel 6.5 Bygværk 1-0. Niveau 1 beregning af aflastet mængde COD, P_{COD} , svarende til gentagelsesperioden 2 år, eller rang ≈ 16 . Udgangspunktet er tabel B2.7.

løbsbygværket 1-0 og bassinet 1-1. Rangordningen i mellemregningsfasen (bygværk 1-1 med hele oplandet) er ikke gældende for rangordningen for den reelle aflastningsmængde fra bygværk 1-1. Man kunne lave mellemregninger for alle 55 regnhændelser, som er individuelt angivne i tabellen i bilag B2.22. Derfra skulle så trækkes aflastningsmængderne ved bygværker 1-0 for de samme hændelser og differensen rangordnes. Herefter kunne man endeligt udpege rang 16. man vil imidlertid opdage, at en del af de 55 hændelser, som er angivet for bygværk 1-1, ikke er angivet som individuelle ekstreme hændelser i tabel B2.61 for bygværk 1-0. Dette skyldes det førømtalte forhold, at det er regn af forskellig type som giver de ekstreme overløb for de to bygværker. I tilfælde af at bygværk 1-1 havde været et simpelt overløbsbygværk skulle metoden nok have givet rimelige resultater, men nu må man være henvist til at benytte EDB-beregningerne, niveau 3 eller 4 for at opnå de ønskede ekstreme belastningsværdier.

Sammenligning med skrift 4

En beregning af de aflastede mængder efter skrift 4 giver følgende resultater for bygværk 1-0:

Antal overløb: 45 år⁻¹
 Overløbsvolumen: 560 mm · 220 ‰ ~ 6776 m³/år
 Aflastet spildevand: 560 mm · 16 ‰ ~ 185 m³/år
 Funktionstid af overløb: 673 timer · 60 ‰ ~ 40 timer.

Forurening:

SS	:	1373 kg/år
total-P	:	17 kg/år
opløst-P	:	10 kg/år
total-N	:	67 kg/år
opløst-N	:	29 kg/år
total-COD	:	832 kg/år
opløst-COD	:	213 kg/år

Ved sammenligning med tabel 6.4 ses, at skrift 4 overvurderer belastningen med ca. 100%.

Dette er i overensstemmelse med den i praksis gjorte erfaring, at beregninger efter skrift 4 giver for store belastningsværdier.

Beregningerne for bygværk 1-1 er ikke sammenlignet med tilsvarende resultater fra skrift 4, idet at regne på koblede regnvandsbassiner går betydeligt ud over grænsen for skrift 4.

7 Konklusion

I nærværende skrift er fremlagt en række metoder til beregning af recipient-belastning fra overløbsbygværker. Med metoderne kan både beregnes den gennemsnitlige årlige belastning og de ekstreme aflastningshændelser. Med disse metoder er det muligt for den praktiserende ingeniør at vælge et beregningsniveau, som er passende til den konkrete problemstilling. Med de EDB-baserede metoder er det med varierende detaljeringsgrad muligt at tage hensyn til en lang række af de processer, som styrer afstrømningsforløbet. De manuelle metoder giver udmærkede resultater for sædvanlige tid-areal kurve former og simple bygværker, og overskrides forudsætningerne er man henvist til at benytte de EDB-baserede metoder.

8 Litteratur

- Arnell, V. (1982): Estimating runoff volumes from urban areas. *Water Resources Bulletin*, 18, (3), 383-387.
- Bahl-Andersen, E.; Linde-Jensen, J.J.; Jensen, H.T.; Winther, L.; Mikkelsen, I. (1976): *Afløbsteknik*. Polyteknisk Forlag, Lyngby.
- Boas, E.; Poulsen, P. (1983): Modeller til beregning af aflastende vand- og stofmængder. Eksamensprojekt. Laboratoriet for teknisk Hygiejne, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby.
- Eriksen, J. H. (1983): Bassiner og overløb. Afgangprojekt. DIAB Teknisk Hygiejne, Lyngby.
- Harremoës, P. (1977): Betydningen af forurening fra regnafstrømning for valg af urbane afløbssystemer – En oversigt over nordisk litteratur og vurdering af status. In: *Diffuse vannforurensninger – tilførsel og transport*. 13. nordiska symposiet om vattenforskning, Rørås 1977. NORDFORSK Miljövårdssekretariatet, Helsingfors. (Publikation 1977:2).
- Jacobsen, P. (1980): Urban surface runoff simulation. Vol. 1-2. Ph.D. Thesis. Department of Sanitary Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby. (Rep. 80-51).
- Jensen, M. (1981): Modeltyper til beregning af rørstrømning i afløbssystemer. *Stads- og Havneingeniøren*, 72, (6), 237-249.
- Jensen, M. (1981): Urban catchment simplification based on rational method design and kinematic wave analysis. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby. (Rep. 81-54).
- Johansen, L. (1974): Afledning af regnvand. Dansk Ingeniørforening – Spildevandskomitéen, København.
- Johansen, N. B.; Harremoës, P.; Dahi, E. (1983): Regnafstrømningsprojekt i Mølleåsystemet, Samlerapport. Hovedstadsrådet, København.
- Lindholm, O. (1977): Forurensninger i overvann. Projektkomitéen for rensing av avløpsvann, Oslo. (PRA brukerrapport nr. 7).
- Sjöbjerg, A.; Lundgren, J.; Asp, T.; Melin, H. (1979): Manual för ILLUDAS (version S2). Ett datorprogram för dimensionering och analys av dagvattensystem. Geohydrologiska Forskningsgruppen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. (Meddelande nr. 36).
- Spildevandskomitéen (1953): Nedbørens fordeling efter intensitet. Bearbejdelse af regnmålerdiagrammer fra Odense for årene 1936-41 med særligt henblik på den samlede årlige nedbørs fordeling efter intensitet. Teknisk Forlag, København (DIF – Spildevandskomitéen Skrift nr. 4).

- Spildevandskomitéen (1980): Spildevandskomiteens regnmålersystem. Teknisk Forlag, København. (DIF – Spildevandskomitéens Skrift nr. 17).
- Spildevandskomitéen (1982): Undersøgelse af dimensioneringspraksis for små afløbssystemer. Teknisk Forlag, København. (DIF – Spildevandskomitéen Skrift nr. 20).
- Spildevandskomitéen (1984): Maksimalafstrømninger og bassinvoluminer fra historiske regnserier. (DIF – Spildevandskomitéen Skrift nr. 18).
- Spildevandskomitéen (1984): Forurening af vandløb fra overløbsbygværker. Ved Thorkild Hvitved-Jacobsen og Poul Harremoës. ((Udkast til DIF Spildevandskomitéens skrift nr. 22).