

NPo-forskning fra Miljøstyrelsen

Nr. C12 1990

Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

NPo-forskning fra Miljøstyrelsen
Nr. C12 1990

Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer

Bent Hasholt, Henrik Breuning Madsen,
Hans Kuhlman
Københavns Universitet
Anders C. Hansen
Det Danske Hedeselskab
Steen W. Platou
Statens Planteavlsvforsøg

MILJØSTYRELSEN
BIBLIOTEKET
Strandgade 29
1401 København K

Miljøministeriet
Miljøstyrelsen



INDHOLD

	<u>Forord</u>	5
	<u>Sammendrag</u>	6
<u>Kapitel 1</u>	<u>Oversigt over undersøgelsesprogrammet</u>	9
	1. Indledning	9
	2. Undersøgelsesprogram	10
<u>Kapitel 2</u>	<u>Jorderosion og transport af suspenderet sediment og fosfor i udvalgte nedbørsområder</u>	13
	1. Indledning	13
	2. Metodik	13
	2.1 Måletekniske problemer og måleprogram	13
	2.2 Målestationer ved basinudløb	14
	2.3 Registrering og måling af vanderosion	15
	2.4 Registrering og måling af vinderosion	16
	2.5 Laboratorieanalyser	16
	2.6 Beregning af transport og erosion	17
	2.7 Målingernes nøjagtighed	18
	3. Resultater	18
	3.1 Koncentration af sediment og fosfor	18
	3.2 Koncentrationsrelationer	21
	3.3 Transport af sediment og fosfor	25
	3.4 Erosion	28
	3.5 Årsoversigt og sammenfatning	33
	4. Diskussion	36
	5. Konklusion	40
<u>Kapitel 3</u>	<u>Jorderosion og fosfortransport fra erosionsfelter</u>	41
	1. Indledning	41
	2. Materialer og metoder	41
	2.1 Markfelter	41
	2.2 Opsamlingsssystem	44
	2.3 Afstrømningsmålinger	44
	2.4 Klimamålinger	46
	3. Resultater	47
	3.1 Rabis	47
	3.2 Langvad	52
	3.3 Erosion af jord og fosfor fra alle felter	60

	4. Diskussion og konklusion	62
<u>Kapitel 4</u>	<u>Erosionsrisiko og fosfortransport i Danmark</u>	65
	1. Indledning	65
	2. Problemstilling og valg af metodik	65
	3. Metodik	68
	3.1 Kort over erosionsrisiko	68
	3.2 Risiko for sedimenttilførsel til vandløb	74
	4. Resultater	75
	4.1 Erosionsrisiko	75
	4.2 Erosionsrisikokort over detailområder	80
	4.3 Feltobservationer af erosion	82
	5. Diskussion	85
	5.1 Forekomst af erosion	85
	5.2 Retningslinier for vurdering af erosionsrisiko	87
	5.3 Erosionsrisiko og vandløbstransport	89
	5.4 Måleperiodens repræsentativitet	91
	6. Konklusion	93
	6.1 Erosion i Danmark	93
	6.2 Risikoevaluering	94
<u>Kapitel 5</u>	<u>Diskussion af jorderosionens betydning</u>	95
	1. Indledning	95
	2. Diskussion	95
	2.1 Kildeopgørelser	95
	2.2 Faktorer der har betydning for erosion	99
	2.3 Sammenligning med andre undersøgelser	102
	2.4 De undersøgte områders repræsentativitet	104
	2.5 Den undersøgte periodes repræsentativitet	106
	2.6 Praktiske konsekvenser og opfølgende undersøgelser	109
	3. Konklusion	111
	<u>Litteratur</u>	113

FORORD

Da viden om bidraget af fosfor til overfladevand som følge af vand- og vinderosion i Danmark var meget begrænset, blev det besluttet at iværksætte et undersøgelsesprogram inden for NPO-forskningsprogrammet. På grund af emnets tværfaglige karakter blev der nedsat en projektgruppe til at udrede problemets forskellige aspekter. En væsentlig del af arbejdet har bestået i tillempling og udvikling af metoder til registrering og måling af erosionen. På grund af erosionens sporadiske og episodiske forekomst har det været nødvendigt at opretholde et omfattende beredskab for at være sikker på at få resultater i hus.

Projektgruppen bestod af følgende:

- B. Hasholt, H. Breuning Madsen og H. Kuhlman
Geografisk Institut, Københavns Universitet.
- A. C. Hansen
Det Danske Hedeselskab, Forsøgsvirksomheden.
- S. W. Platou
Statens Planteavlsforsøg, Afdeling for
Arealdata og Kortlægning.
- B. Hasholt har fungeret som projektkoordinator,
været medlem af koordinationsgruppe C og redigeret rapporten.

Projektgruppen skal her rette en varm tak til studenter og personale ved institutionerne, som har medvirket ved udførelsen af det omfattende feltarbejde og udarbejdelsen af rapporten. Endvidere rettes en tak til de landmænd, som villigt har stillet arealer til rådighed for undersøgelsen.

SAMMENDRAG

Rapport C12

Denne rapport, NPO-forskning C12, består af 5 kapitler, som er udarbejdet på grundlag af 4 delrapporter, som redegør for de deltagende institutioners andel af arbejdet.

Kapitel 1 og 5 er udarbejdet af den samlede projektgruppe,

kapitel 2 af B. Hasholt og H. Kuhlman,

kapitel 3 af A. C. Hansen og

kapitel 4 af S. W. Platou, B. Hasholt og H.

Breuning Madsen.

Kapitel 1

Dette kapitel behandler undersøgelsens baggrund og giver en oversigt over undersøgelsesprogrammet.

Talrige udenlandske undersøgelser påviser, at jorderosion kan medføre en øget transport af fosforholdigt sediment til vandløb og søer. I Danmark var der kun foretaget få tilsvarende undersøgelser. Der var derfor et behov for at få belyst betydningen af jorderosion for tilførslen af fosfor samtidig med de øvrige NPO-undersøgelser.

Undersøgellesprogrammet omfatter sammenhørende målinger af erosion og sediment- og fosfortransport i to udvalgte nedbørsområder, Rabis og Langvad. I de to områder er der udført undersøgelser af overfladeerosionen fra i alt 4 erosionsfelter. Resultaternes arealmæssige repræsentativitet er vurderet sammen med en undersøgelse af erosionstruede arealer i Danmark.

Kapitel 2

I dette kapitel behandles transporten af suspenderet sediment og fosfor i vandløbene i de udvalgte områder: Rabis og Langvad. Resultater

af samtidige registreringer og målinger af vand- og vinderosion angives også. Tal for erosion beregnet ud fra transportmålingerne findes i afsnit 3.4 og 3.5.

Der er konstateret selektiv transport af fosforholdigt finkornet materiale i vandløbene. Erosionen fra både terrænoverflader og vandløbets bund og bredder bidrager til transporten. Erosionsbidragets størrelse varierer på grund af nedbørens variation; det er størst i 1987/88 og mindst i 1988/89. Vinderosionens bidrag viser ingen effekt på transporten i vandløbene på årsbasis i undersøgelsesperioden.

Kapitel 3

Kapitel 3 omhandler undersøgelserne af transporten af sediment og fosfor fra to erosionsfelter i Rabis og to i Langvad. I afsnit 3.3 findes en oversigt over tal for erosion af jord og fosfor. Overfladeafstrømningen i måleperioden var generelt meget lille i forsøgsfelterne, størst på lerjord (Langvad) og mindst på sandjord (Rabis). Der blev konstateret selektiv transport af finkornet sediment med stort fosforindhold.

Kapitel 4

I kapitel 4 undersøges risikoen for tab af jord fra et areal som følge af erosion samt risikoen for tilførsel af erosionsmateriale til vandløbene. En landsdækkende undersøgelse, som er vist på et kort i skala 1:400.000, er baseret på udnyttelse af jordprofildata ved hjælp af en modificering af USLE (Universal Soil Loss Equation). Mindst 3 % af arealet er potentielt erosionstruet; mest truede er arealer med stor hældning.

Feltobservationerne af erosionen blev sammenlignet med de teoretiske risikotal. Målingerne

viste, at erosionen har været lille i måleperioden. Ved rilleerosion, som kun er konstateret i 1987/88 og i 1989/90, er der konstateret flytning af jord på op til 2000 t/km²; op til 15 % af jordtabet er nået frem til vandløb.

Kapitel 5

En sammenfatning af resultaterne findes i kapitel 5. Størrelsen af transporten og dennes kilder er behandlet i afsnit 4.1. Det er sandsynligt, at regn på frossen jord og snesmeltning forårsager mere erosion end nedbør som regn alene. Betydning af terræn, afgrøder og jordbearbejdning for forekomst af erosion omtales. Det konstateres, at resultater fra Rabis er repræsentative for områder med den laveste forekomst af erosion i Danmark, mens resultaterne fra Gelbæk og Langvad er repræsentative for områder med moderat erosion.

Klimaforholdene i perioden var atypiske, idet vintrene var varme. De målte erosionsværdier må derfor forventes at være unormalt lave. Det ses, at en 3-årig måleperiode er meget kort i forhold til klimaparametrene variationsbredde.

Generelle praktiske konsekvenser er angivet. En evt. indsats bør koncentrerer om at identificere særligt truede arealer og iværksætte erosionsbegrænsende foranstaltninger her. En begrænset justering af dyrkningspraksis og undladelse af hårdhændet vandløbsoprensning er hensigtsmæssig for at undgå erosion. En talmæssig vurdering af erosionens reelle betydning kræver observationer, som dækker normale vinterforhold og en statistisk bearbejdning af de klimadata, som er relevante for forekomst af erosion.

KAPITEL 1

OVERSIGT OVER UNDERSØGELSESPROGRAMMET

1. INDLEDNING

Erosion

I bredeste forstand omfatter erosion nedbrydningen af jordoverfladen som følge af, at denne påvirkes af rindende vand, isbevægelser, bølger og vind. Begrebet jorderosion dækker normalt den del af erosionen i et nedbørsområde, som er forårsaget af rindende vand og/eller vinden. I det følgende undersøges jorderosionen med hovedvægt på vanderosion. Afhængigt af hvor i et vandløbs nedbørsområde vanderosionen finder sted, kan der tales om vandløbserosion (i vandløbets bund og bredder) eller overfladeerosion (på terrænoverfladen). Overfladeerosionen opdeles i fladeerosion (eng.: sheet erosion), rilleerosion (eng.: rill erosion) og kløfterosion (eng.: gully erosion). Inddelingen afspejler stigende erosionspåvirkning. En tilsvarende opdeling findes ikke for vinderosion.

Det er karakteristisk for jorderosion, at forekomsten er sporadisk, afhængig af terræn, jordfysiske forhold og vegetationsdække. De steder, hvor erosionen kan måles, skal derfor findes samtidig med, at erosionen opstår. Måleobjektet er uden fast lokalitet. Den episodiske forekomst af erosionen i forbindelse med ekstreme klimahændelser, som fx tøbrud og regnskyl, kræver et højt beredskab for at kunne iværksætte undersøgelser på det rette tidspunkt.

Viden om erosion

En række udenlandske undersøgelser (Morgan, 1986; Ulén, 1982; Yaksich, 1983) har påvist, at jorderosion kan have betydning for tilførslen af næringsstoffer til vandløb. Resultaterne varierer betydeligt fra sted til sted, hvilket

skyldes forskellige jordbundsforhold, klimaer og dyrkningsformer. I Danmark fandtes der forud for herværende undersøgelse kun få oplysninger om jorderosion og dens betydning i relation til vandløb. En vurdering findes i Hansen (1983), hvori det konkluderes, at vnderosion ikke frembyder noget problem, undtagen lokalt i forbindelse med kraftige regnskyl om sommeren. Det nævnes samtidig, at vnderosion forekommer på sandjorde i Vestjylland. Vnderosion er behandlet af Kuhlman (1986). Undersøgelser af transporten i vandløb (Hasholt, 1983) viser, at en del sediment må hidrøre fra jorderosion. En sammenligning mellem transport i vandløb og erosion er foretaget i Suså-området af Bojsen (1987) og Hasholt (1988a).

2. UNDERSØGELSESPROGRAM

Da der forelå meget lidt konkret viden i Danmark om erosionens størrelse, blev det besluttet at gennemføre et NPO-projekt, indsatsområde 3, med følgende formål:

Formål

- At kvantificere overfladeafstrømningen af fosfor i udvalgte afstrømningsområder.
- At redegøre for de faktorer, som styrer stoftransporten i forbindelse med overfladeafstrømning.
- At kvantificere vnderosionens bidrag til fosfortransporten.
- At udpege erosionstruede områder og vurdere erosionens bidrag til belastningen af vandløb og søer på landsplan.

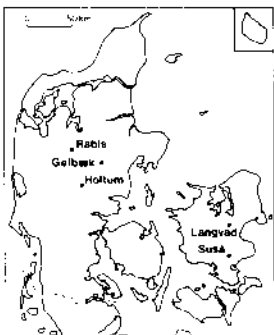


Fig. 1.1
NPO-områder og andre undersøgelseslokaliteter.

Projektdeltagere

På grund af emnets tværfaglige karakter blev en projektgruppe bestående af følgende institutioner dannet: Geografisk Institut, Københavns Universitet (GI), Det Danske Hedeselskab, Forsøgsvirksomheden (DDH) og Statens Planteavlsvirksomhed (ADK). Projektgruppen skulle opstille et undersøgelsesprogram til opfyldelse af de ovenfor angivne formål. Det var ligeledes besluttet, at erosionsundersøgelserne skulle finde sted i NPO-forsøgsområderne Rabis og Langvad samt i begrænset omfang i Gelbæk, se fig. 1.1.

Oversigt over program

I fig. 1.2 er vist en skematisk oversigt over undersøgelsesprogrammet i et opland, fx Langvad. Detaljerede beskrivelser af programmets komponenter findes i de følgende kapitler, i Hasholt (1988b) og i Hansen & Hasholt (1989). Se også fig. 1.3.

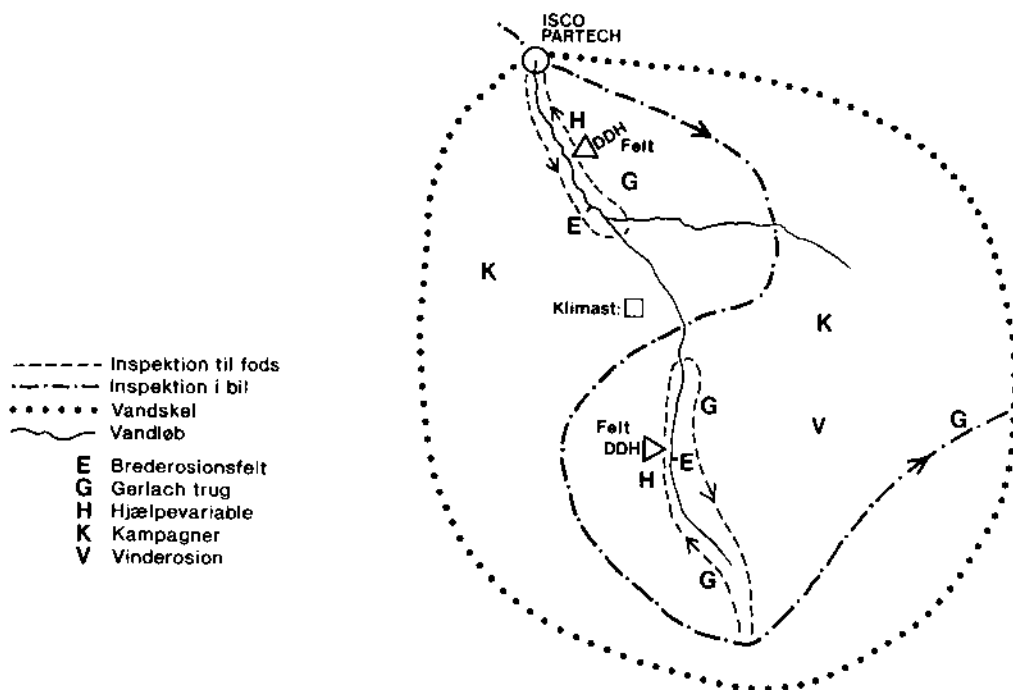


Fig. 1.2

Skematisk oversigt over undersøgelsesprogrammet i et forsøgsområde.

GI Der foretages en monitorering med stor tidsop-
løsning af transporten af suspenderet stof og
fosfor ved udløbet fra oplandet. På ugebasis
eller i forbindelse med kampagner i vinterpe-
rioden foretages registrering og måling af
vand- og vinderosion i oplandet. Disse undersø-
gelser udføres af Geografisk Institut.

DDH For at kunne kvantificere overfladeerosionen er
der etableret to erosionsfelter i hvert af de
to områder Rabis og Langvad. Disse undersøgel-
sesfelter er forsøgt placeret så tæt på vand-
løbssystemet, at den mængde erosionsmateriale,
som opsamles, svarer til den mængde, der ville
nå vandløbet. Disse undersøgelser varetages af
Hedeselskabet.

ADK ADK's omfattende databaser anvendes til en ud-
arbejdelse af en teoretisk baseret, landsdæk-
kende oversigt over erosionstruede arealer.
Erosionsobservationer i forsøgsområderne udnyt-
tes til feltkontrol.

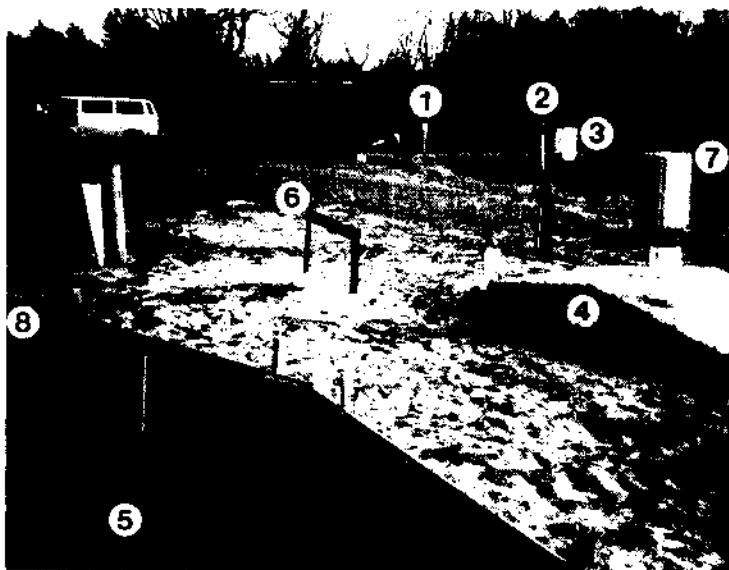


Fig. 1.3
Målestation og erosionsfelt ved Birthesminde, Rabis. 1.
Nedbørsmåler. 2. Vandstandsmåler. 3. ISCO Partech. 4.
Målebrønd. 5. Erosionsfelt. 6. Snemåler. 7. Vandstands-
måler til overfladeafstrømning. 8. Opsamlingsrende.

KAPITEL 2

JORDEROSION OG TRANSPORT AF SUSPENDERET SEDI- MENT OG FOSFOR I UDVALGTE NEDBØRSOMRÅDER

1. INDLEDNING

Formål

Formålet er at redegøre for erosionens bidrag til belastning af overfladevand med fosfor ved at måle transport af sediment og fosfor i vandløb i to nedbørsområder med forskellig geologi, Rabis (sandjord) og Langvad (lerjord). Transporten skal sættes i relation til samtidige observationer af vand- og vinderosion for at belyse årsagssammenhænge og vurdere erosionens betydning kvantitativt. Denne del af undersøgelserne, som er udført af Geografisk Institut, Københavns Universitet, blev iværksat oktober 1987 og afsluttet marts 1990.

2. METODIK

2.1 Måletekniske problemer og måleprogram

Måling af koncentrationen

En bestemmelse af partikulært bundet stoftransport stiller større krav til prøvetagningsudstyret og -teknikken end prøvetagning til bestemmelse af opløste stoffer. Bedst er det at anvende isokinetisk vandprøvetagning. Alternativt må indtagshastigheden være tilstrækkelig stor og rørsystemet udformet, så der ikke sker sedimentation på vej til opsamlingsbeholderen.

En række undersøgelser (fx Walling & Webb, 1981) har vist, at en hyppig, helst kontinuert prøvetagning er nødvendig for at sikre tilstrækkelig tidsopløsning og nøjagtighed. Automatisk prøvetagning kan delvis løse problemet, men kapaciteten er begrænset. Indirekte koncen-

trationsmålinger med IR-lysdæmpning kan anvendes, men kræver kalibrering. Da erosion oftest foregår i ekstreme vejr-situationer, er risikoen for apparatsvigt stor. Til sikring mod tab af observationer er to uafhængige systemer nødvendige.

Måleprogram

Måleprogrammet, som helhed er beskrevet i kapitel 1. I herværende kapitel omtales følgende del-komponenter:

1. Målestationer ved basinudløb.
2. Inspektionsruter (delvis).
3. Vinderosionsmålinger.
4. Kampagnemålinger (delvis).

En beskrivelse findes i Hasholt (1988a og 1988b).

2.2 Målestationer ved basinudløb

2 målestationer

Der er etableret en målestation ved udløbet af hvert af de to forsøgsområder. I Rabis er målestationen placeret ved Birthesminde, UTM-koordinat 32VNH082449 og i Langvad ved Syvbro UTM-koordinat 33UUB132628. Stationerne ligger så tæt på Hedeselskabets vandføringsmålestationer, at data fra disse kan anvendes uden korrektion.

Manuelle prøver én gang pr. uge

Vandprøver indsamles manuelt en gang om ugen med en dybdeintegrerende prøvetager (Nilsson, 1969). Prøvetagningen er isokinetisk. Der tages en prøve til bestemmelse af suspenderet sediment og en til fosforanalyse. Den manuelle prøve anvendes til beregning af fosfortransport, kontrol af den automatiske prøvetagning og til kalibrering af indirekte koncentrationsmålinger.

Automatiske prøver to gange pr. døgn

Der indsamles prøver to gange i døgnet, kl. 03 og kl. 15, med en automatisk prøvetager, ISCO

type 1680 og type 2700. Indtagsrøret er anbragt frit i strømmingen, hvor opblandingen er god, åbningen er 10 cm over bunden. Indtagsrøret er så stejlt som muligt for at undgå frysning om vinteren, og det kan svinge til side for at undgå grøde.

Indirekte målinger
hvert andet minut

Koncentrationen af suspenderet stof måles også indirekte hvert andet minut med en Partech suspended solids monitor. Apparatet registrerer dæmpningen af IR-lys over et målegab, som følge af sediment i vandet i målegabet. Data opsamles med en datalogger. Måleinterval er ca. 0-500 mg/l og opløsningen ca. ± 2.5 mg/l. Ved det ugentlige tilsyn tømmes ISCO-prøvetageren, og Partech sensoren renses.

2.3 Registrering og måling af vanderosion

Ugentlig inspektion af erosion

Formålet med målingerne er at registrere og i muligt omfang kvantificere erosion i de to forsøgsområder med en tidsopløsning på en uge. Der foretages ugentlig inspektion af en fastlagt rute i de to oplande. Ruten følger vandløbet og går desuden gennem områder i oplandet, som anses for at være udsatte for erosion. Alle tegn på erosion beskrives og registreres i en målebog. Erosion i vandløbets bredder måles i forhold til indsatte jernpinde og skred opmåles. På ruten besøges 4-5 Gerlach-trug pr. område, hvor det vand og sediment, som er eroderet fra 0.5 m² overflade, opsamles. Desuden registreres hjælpevariable som fx grundvandstand og frostdybde, og i tilfælde af rilledannelse måles rillernes dimensioner. Der udføres desuden 4-5 kampagner om vinteren, hvor der indsamles prøver og foretages mere detaljerede opmålinger.

2.4 Registrering og måling af vinderosion

Registrering af tegn på vinderosion

Det markareal, som er eroderet eller blot svagt vindpåvirket, fastlægges ved at se om markoverfladen er sorteret i sandpletter og har brolægning af jævnt fordelt sten og grus. Sandpletter kan vokse til egentlige driver, som ligger i markkanten eller på naboarealer. Disse aflejringshobes volumen skal bestemmes og deres oplandsareal fastslås. Det er væsentligt for bestemmelsen af omlejringens vægtmæssige størrelse og kemiske effekt at kunne finde sammenhørende aflejnings- og erosionsområder. Erosionsarealet kan være meget diffust. De fundne arealers udseende er præget af den salterende - overfladebundne - transport. I hvilket omfang, der er sket luftsuspenderet materialetransport, er vanskeligt at bestemme, fordi denne vandrer højt og langt med vinden. I denne undersøgelse er "støvtransporten" bestemt indirekte via ændring i tekstur og kemi i den eroderede mark.

Måling af vinderosion

For at kunne bestemme omfanget af vindens omlejring af markjorden er det nødvendigt at udtage topjordsprøver før vinderosionen og efter, både i erosionsfeltet og i drivearealet (hvis et sådant findes). Der skal bestemmes ændring i pakning (volumenvægt), tekstur og kemisk sammensætning. Der blev udtaget jordprøver med en 7.5 cm høj, 302 cm³ stor cylinder, som blev presset lodret ned i overfladen eller på langs ind i en eventuel drive.

2.5 Laboratorieanalyser

Sediment og glødetab

De indsamlede vandprøver filtreres gennem Whatman GF/F filtre med retentionsdiameter 0.7 μ . Filtrene tørres ved 65° og vejes med kontrolfiltre. Filtret afbrændes ved 550° og glødetab

bet beregnes. Der opdeles i total, uorganisk og organisk suspenderet sediment (mg/l).

P-analyse Prøver til fosforanalyse sendes til DDH's laboratorium i en termopose med is. Prøverne blendes, og der analyseres for total fosfor efter Dansk Standard. Dernæst filtreres gennem et GF/F filter og total fosfor bestemmes på filtratet. Der opdeles i total, partikulært og opløst fosfor ($\mu\text{g/l}$).

Jordprøver Jordprøverne udtaget til bestemmelse af vinderosion er analyseret for tør volumenvægt, tekstur ved sigtning, total C på Leco-apparat CR 12 og total fosfor efter Dansk Standard.

2.6 Beregning af transport og erosion

Beregning af vandløbstransport Døgntransporten af suspenderet sediment beregnes ved at multiplicere gennemsnits døgnkoncentration med døgnvandføring. Måned- og årstransport fås ved summering af døgnværdier. Transport af total fosfor (TP), Partikulært (PP) og opløst (OP) fås ved at multiplicere vandføring med koncentration fundet ved lineær interpolation mellem målte værdier.

Brederosion Direkte målinger af erosion (bred- og rilleerosion) omregnes til volumen og vægt ved at multiplicere med areal og rumvægt.

Erosionsbidrag i vandløbet Analogt med en opdeling af vandføringen i et flombidrag og et basisbidrag opdeles sedimenttransporten i vandløbet, når der er konstateret erosion i oplandet, i et erosionsbidrag og et basisbidrag. Erosionsbidraget, der er den del af transporten, som kan relateres til forekomst af erosion, findes efter subtraktion af basisbidraget. Dette kan findes som transportværdi-

en, umiddelbart inden transporten øges som følge af observeret erosion, eller som transportværdien efter længere tids recession om vinteren. Daglige værdier er summeret til månedsværdier.

2.7 Målingernes nøjagtighed

Døgnværdier er normalt nøjagtige ± 20 % (Hasholt, 1981). Beregnet årstransport afviger kun ± 2.6 % fra årstransporten fundet udfra enten kl. 03 eller kl. 15 koncentrationen (ISCO-sampler). Årstransport fundet ved lineær interpolation afviger fra -13 % til $+4$ % fra "sand" værdi. Analyser har vist, at en blanding kan øge koncentrationen af total fosfor ($5-20$ %), mens koncentrationen af partikulært fosfor er uændret. De direkte erosionsmålinger kan være behæftet med væsentligt større usikkerhed, mere end 100 %, når punktmålinger omregnes til areal.

3. RESULTATER

3.1 Koncentration af sediment og fosfor

Da partikulær transport i vandløb ikke kan måles direkte, er det nødvendigt at måle koncentration af sediment. Dennes variation giver værdifulde oplysninger om processerne i vandløbssystemet. Korttidsfluktuationer kan studeres ud fra de detaljerede, men indirekte målinger; her beskrives fortrinsvis resultater af vandanalyserne. I figurerne 2.1 - 2.6 ses koncentrationsvariationen af suspenderet sediment og fosfor sammen med vandføringen gennem måleperioden.

Fig. 2.1
 Suspenderet sediment
 (total og uorganisk).

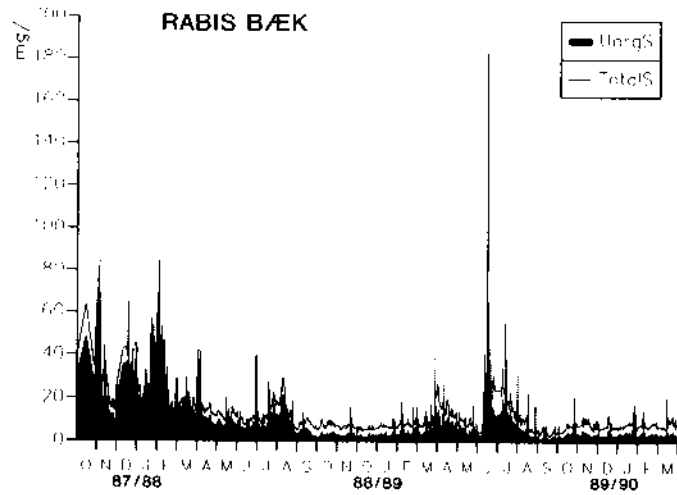


Fig. 2.2
 Vandføring og organisk
 suspenderet sediment.

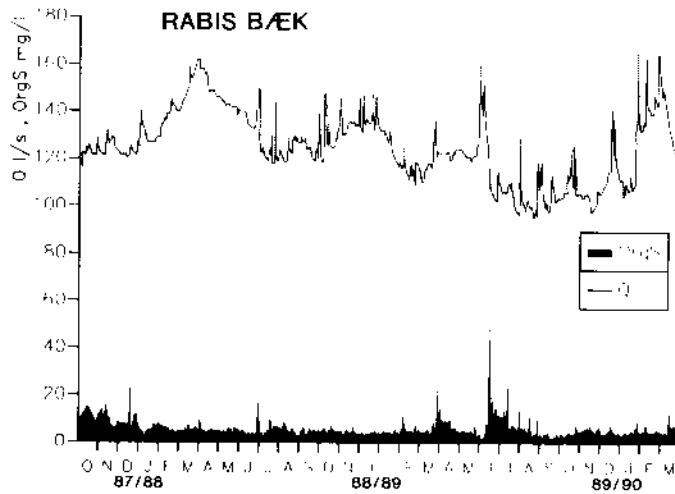


Fig. 2.3
 Total og partikulært
 fosfor.

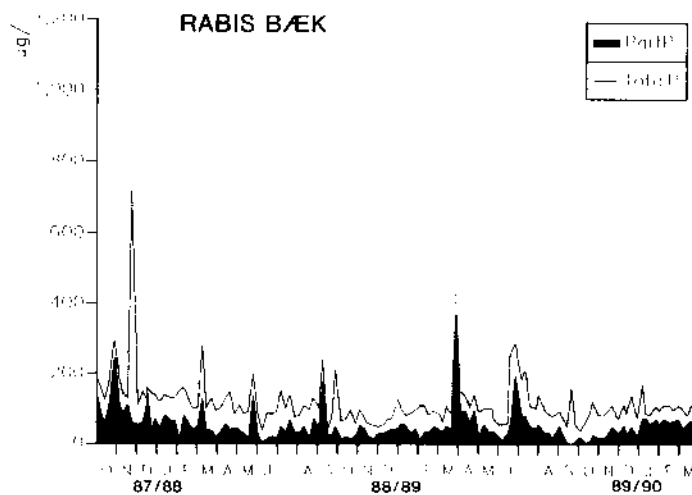


Fig. 2.4
 Suspenderet sediment
 (total og uorganisk).

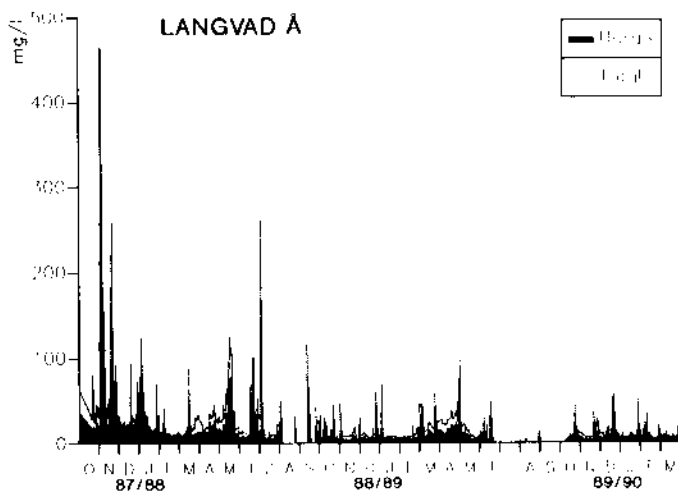


Fig. 2.5
 Vandføring og organisk
 suspenderet sediment.

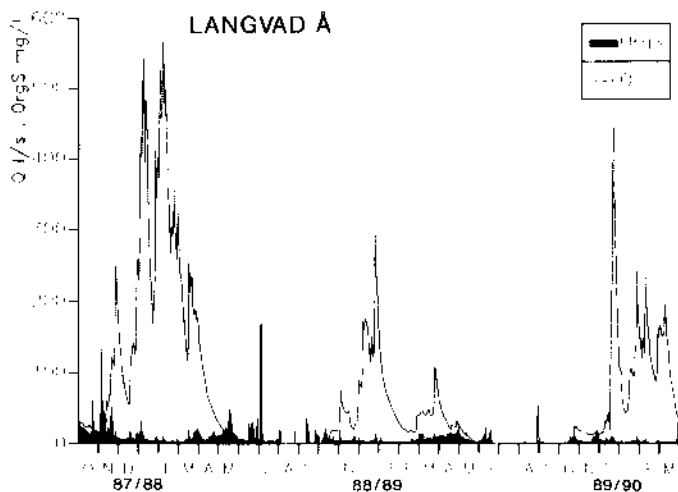
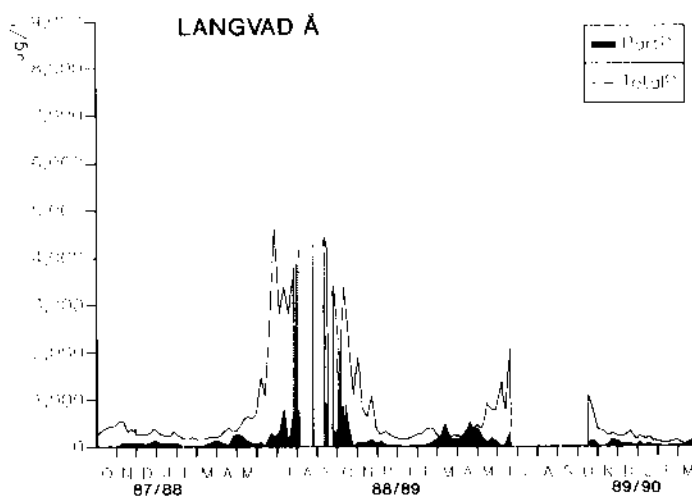


Fig. 2.6
 Total og partikulært
 fosfor.



Rabis

I Rabis viser de indirekte målinger, at koncentrationsmaksima er af kort varighed, oftest mindre end et døgn. Periodevis ses en døgnsvingning, også i kl. 03 og kl. 15 koncentrationen. Der ses ingen tydelig årstidsvariation i koncentrationen af suspenderet sediment, snarere et fald gennem perioden. Fosfor totalkoncentrationen viser en faldende tendens uden nogen tydelig årstidsvariation. Variationsbredden for suspenderet sediment er 5-102 mg/l, for total fosfor 36-720 µg/l og partikulært 0-367 µg/l.

Langvad

I Langvad ses det, at koncentrationsmaksima ofte varer længere end et døgn. Der kan iagttages en årstidsvariation. Maksima ses efterår og vinter, de største værdier i forbindelse med de første større vandføringer. Total fosfor har et tydeligt maksimum i sommerperioden. Maksima i koncentration af partikulært fosfor ses også i forbindelse med større vandføringer efterår og vinter. Variationsbredden for suspenderet sediment er 4-482 mg/l, total fosfor 70-4700 µg/l og partikulært fosfor 0-1100 µg/l.

3.2 Koncentrationsrelationer

Formålet med at bestemme koncentration som funktion af vandføring er at kunne beregne transporten udfra vandføringen, når prøvetagningsfrekvensen er lav. Tilsvarende kan transporten af partikulært fosfor beregnes mere nøjagtigt, hvis der kan findes en relation mellem suspenderet stof og indholdet af partikulært fosfor. Endelig giver studiet af koncentrationsrelationer oplysninger om erosion og transport i systemet.

Fig. 2.7
Vandføring og suspen-
deret sediment.

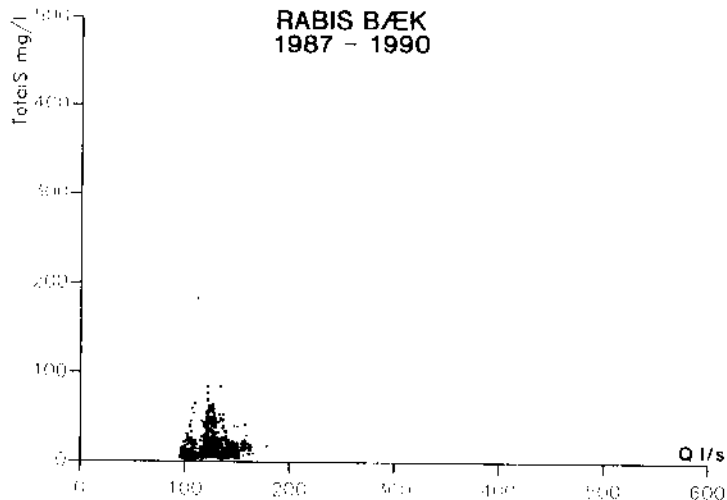
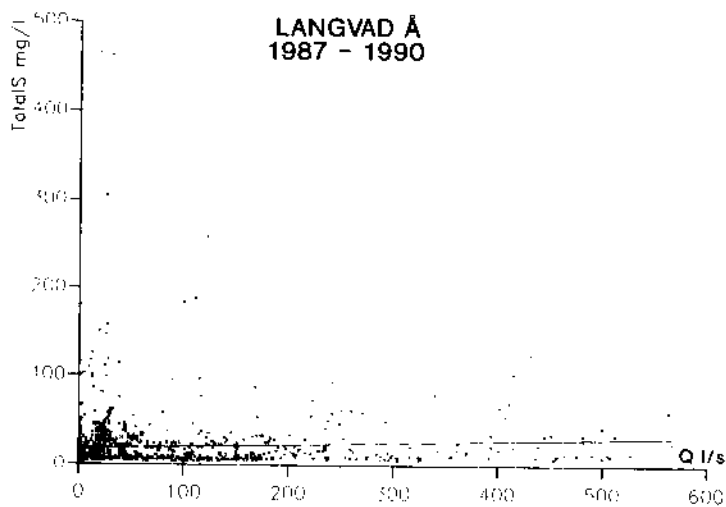


Fig. 2.8
Vandføring og suspen-
deret sediment.



Rabis

Eksempler på sammenhængen mellem vandføring og koncentration (Q, c) er vist for Rabis og Langvad i fig. 2.7, 2.9, 2.8 og 2.10. Der er ingen signifikant sammenhæng mellem koncentration af uorganisk, organisk og total suspenderet sediment og vandføring. Spredningen er meget stor. Det samme gælder koncentration af fosfor. Koncentrationen reagerer, som om tilførslen er begrænset.

Fig. 2.9
Vandføring og parti-
kulært fosfor.

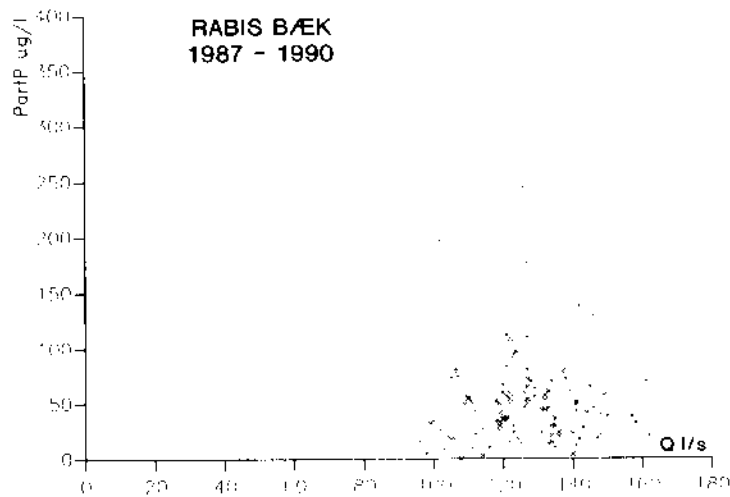
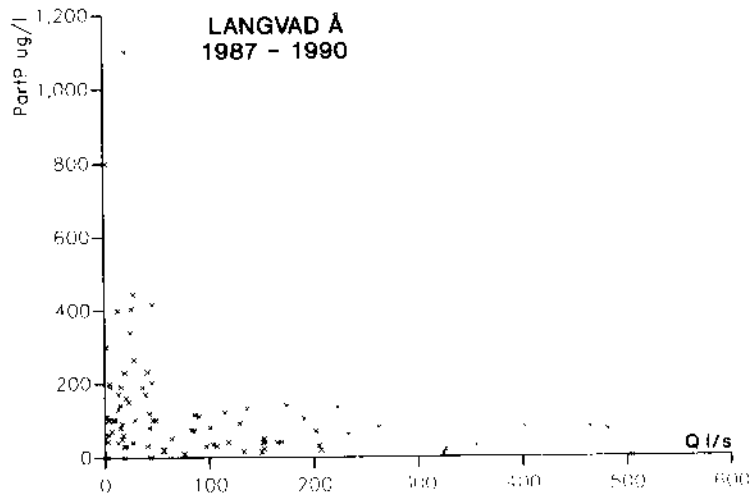


Fig. 2.10
Vandføring og parti-
kulært fosfor.



Langvad

For suspenderet sediment ses den samme generelle variation i Langvad; men undersøges koncentrationsvariationen i detaljer, fx med Par-tech, ses det, at der i kortere perioder er en tydelig sammenhæng. Koncentrationen har et hystereseagtigt forløb, som tidligere beskrevet i fx Hasholt (1981). De totale fosforkoncentrationer er meget høje ved lave vandføringer, men falder hurtigt til en næsten konstant værdi ved større vandføringer. For partikulært

Fig. 2.11
Total suspenderet sediment og partikulært fosfor.

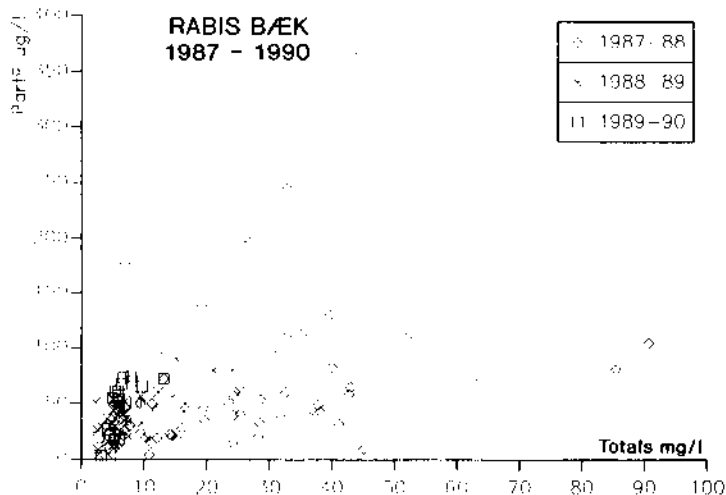
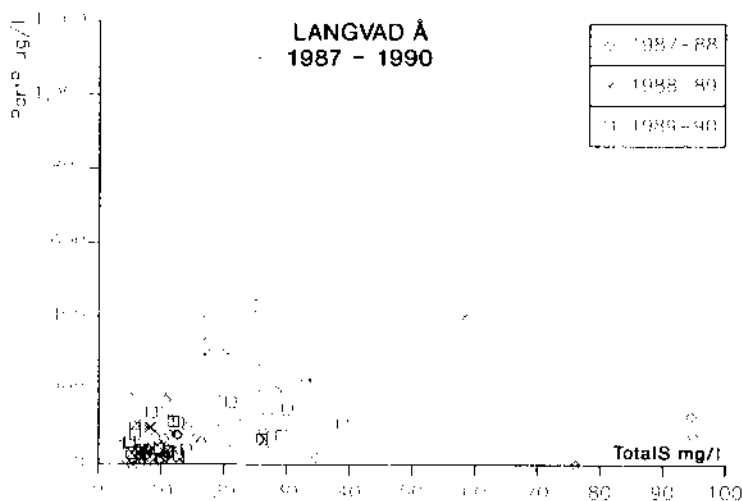


Fig. 2.12
Total suspenderet sediment og partikulært fosfor.



fosfor gælder det samme, dog er der en tendens til stigning for meget høje vandføringer. Forløbet afspejler effekten af den skiftende tilførsel fra spildevand og erosion.

Forekomst af selektiv P-transport

Sammenhørende værdier af koncentrationen af partikulært fosfor og suspenderet sediment er vist i fig. 2.11 og 2.12. Hverken i Rabis eller Langvad ses nogen entydig sammenhæng. For de største koncentrationer af suspenderet stof er der en tendens til konstant eller faldende

koncentration af fosfor. Beregnes mg P/kg suspenderet sediment for de største suspensionskoncentrationer, fås i overensstemmelse med Krogstad (1986) ca. 1 mg P/kg. Dette bekræfter forekomsten af selektiv transport af fosfor ved lavere koncentrationer.

3.3 Transport af sediment og fosfor

Rabis

Transporten af sediment og fosfor i Rabis i måleperioden er vist i fig. 2.13 - 2.15. Variationen følger i store træk vandføringen; der er et fald gennem perioden. Høje værdier af transport af total suspenderet sediment ses i vinteren 1987/88, men ikke i vintrene 1988/89 og 1989/90. Et sekundært maksimum kan erkendes i marts-maj, hvor vandføringen også har et maksimum. Algevækst er formodentlig her en medvirkende årsag. Kraftige, oftest kortvarige, maksima ses i sommermånederne - især juni-juli 1989. En sandsynlig årsag er oprensning i vandløb og dambrug samt grødeskæring. Øvrige mindre maksima skyldes kraftig nedbør, hvis effekt forstærkes af kreaturfærdsel på et fugtigt engareal nær åen. Variationen i fosfortransporten følger ikke noget tydeligt mønster.

Langvad

Sediment- og fosfortransporten i Langvad i måleperioden ses i fig. 2.16 - 2.18. Der ses en tydelig årstidsvariation for både sediment- og fosfortransporten med høje værdier i vinterhalvåret, hvor vandføringen er størst; de høje fosforkoncentrationsværdier om sommeren slår ikke igennem p.g.a. den lave vandføring. Det ses, at transporten i forhold til vandføringen er større i begyndelsen af efterår-vinterperioden end senere på vinteren. Dette afspejler den i afsnit 3.2 nævnte hysteresis-effekt.

Fig. 2.13
Total og uorganisk
suspenderet sediment.

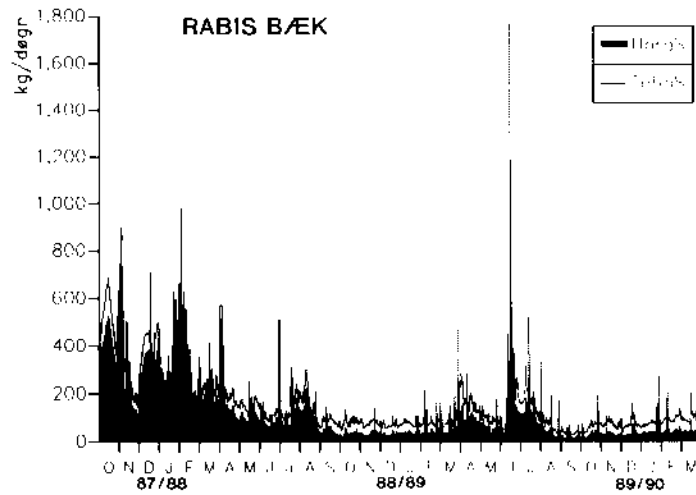


Fig. 2.14
Vandføring og organisk
suspenderet sediment.

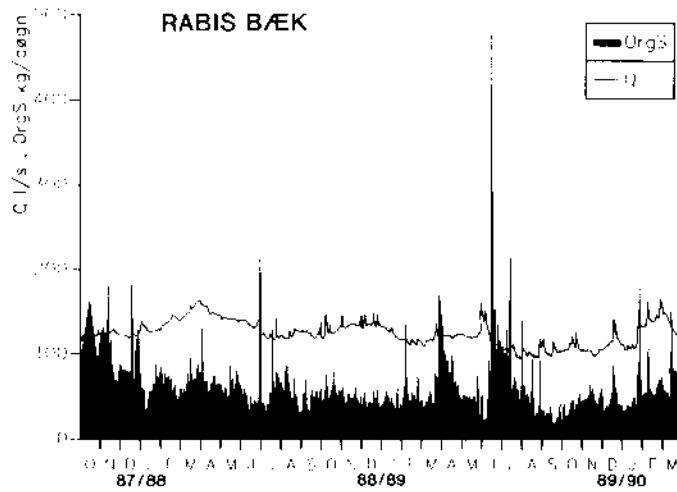


Fig. 2.15
Total og partikulært
fosfor.

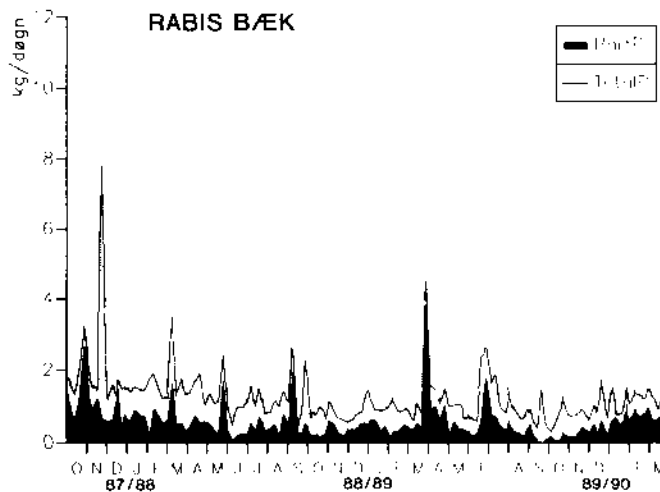


Fig. 2.16
Total og uorganisk
suspenderet sediment.

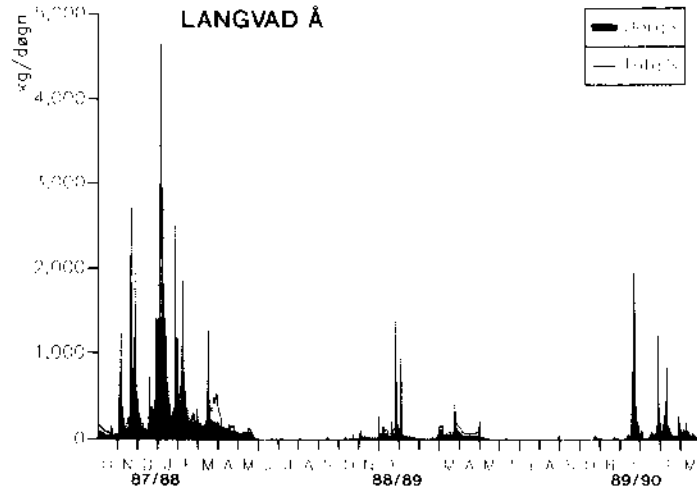


Fig. 2.17
Vandføring og organisk
suspenderet sediment.

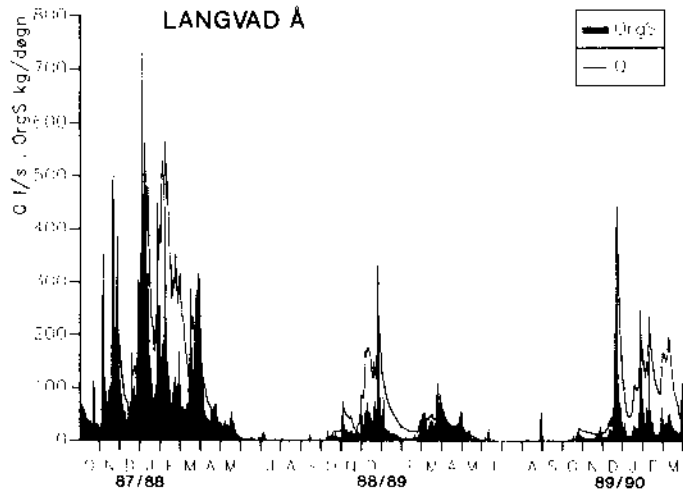
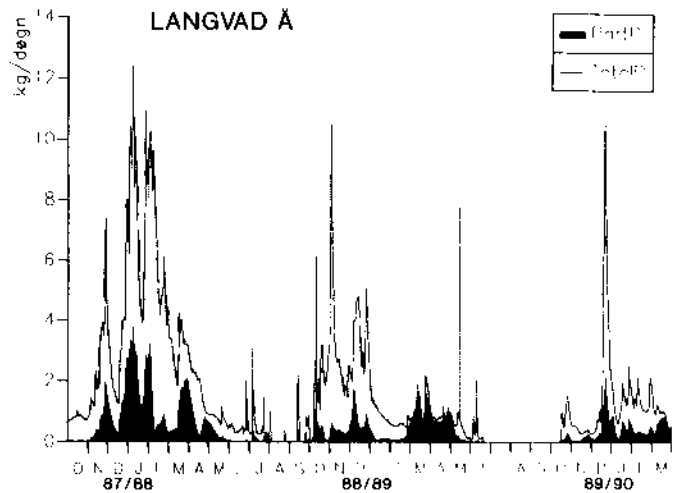


Fig. 2.18
Total og partikulært
fosfor.



Den første, eller de første, store vandføringer efter udtørringen om sommeren skyller - hvis de er store nok - alt det sediment ud, der er aflejret i vandløbet siden foråret. Der kan senere i roligere perioder igen opbygges et temporært sedimentmagasin. Det ses tydeligt, at transporten i 1987/88 var betydeligt større end i de følgende år 1988/89 og 1989/90. De kraftige maksima forekommer alle samtidig med, at der er konstateret erosion i området, og må derfor tilskrives effekten heraf.

3.4 Erosion

I dette afsnit behandles dels erosion fundet udfra transportmålingerne ved fradrag af et basisbidrag og dels oplysninger om erosion i selve vandløbenes bund og bredder; til sidst omtales resultater af observationer af vinderosion. Overfladeerosion og rilleerosion gennemgås i kapitel 3 og 4.

Erosionsbetinget transport, i bredeste forstand dvs. tilskud fra bund-, bred-, overflade- og rilleerosion, ses som det hvide felt over basisbidraget i fig. 2.19 og 2.20.

Rabis

Det ses, at basisbidraget er stort i Rabis, største erosionsbidrag fås i februar 1988, de usædvanligt store værdier i juni-juli 1989 tilskrives oprensning og evt. tilskud af bundtransport. Transporten af partikulært fosfor viser ingen tydelig relation til erosionen.

Langvad

I Langvad ses det, at en større del af transporten er erosionsbetinget. Erosionsbidraget er meget større i 1987/88 end i resten af måleperioden. Den største månedsværdi fås alle år i enten december eller januar. Transporten

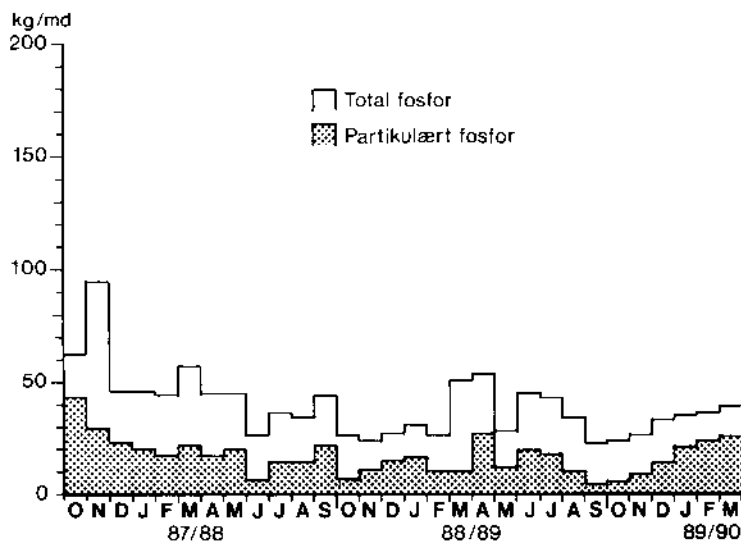
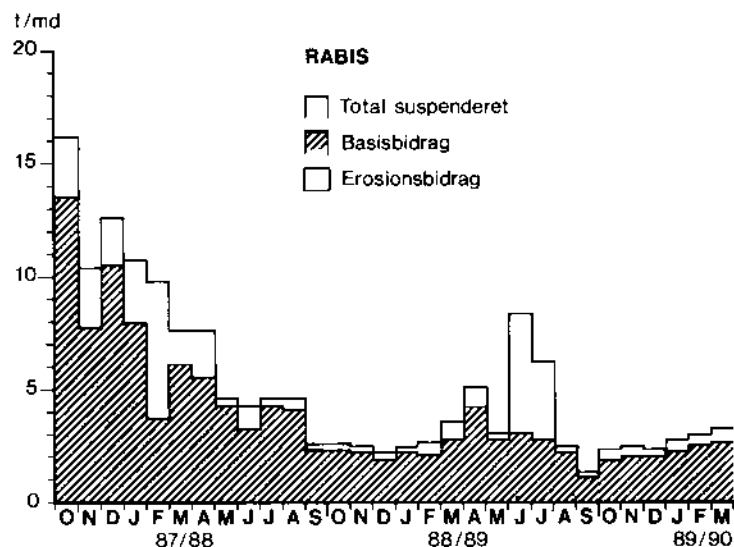


Fig. 2.19
Transport og erosion.

af partikulært fosfor og total fosfor er tydeligt relateret til erosionen.

Brederosion

Det samlede bund- og bredareal er i Rabis ca. 11.000 m² og i Langvad ca. 32.000 m² heraf udgør bundarealet henholdsvis ca. 8.000 m² og ca. 7.300 m². I Rabis var bund- og brederosionen skønnet ud fra profilmålinger i størrelsesordenen 5-10 t begge år. I Langvad var den-

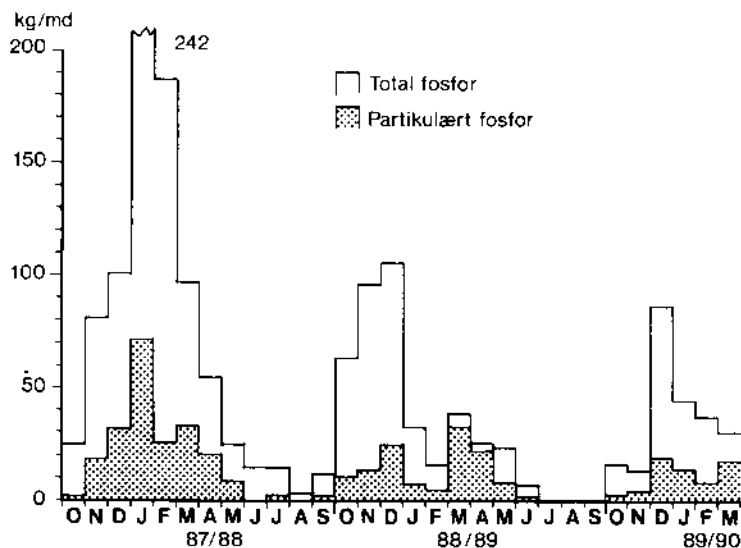
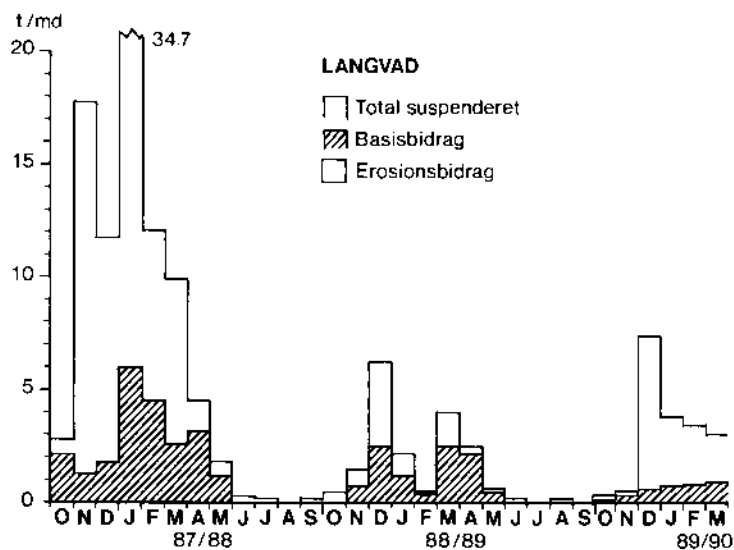


Fig. 2.20
Transport og erosion.

ne erosion i 1987/88 ca. 10 t og i 1988/89 ca. 4 t. I 1989/90 var der så store forskelle i erosion og aflejring, at det ikke var muligt at finde et repræsentativt målefelt. Det ses, at blot 1 mm erosion jævnt over bund- og bredarealet giver ca. 50 t sediment i Langvad.

Vinderosion
ved Rabis

I hele perioden fra november 1987 til april 1990 blev iagttaget forbavsende lidt vindero-

Prøve nr.	Beskrivelse	Kornstørrelser, %				Total Fosfor ppm	Total Carbon %
		< 63 μ	63-125 μ	125-500 μ	500-2000 μ		
882	"Udgangsmateriale" taget 20 m nord for vejen	14.5	5.6	63	17	-	1.61
901	Topjord, 7.5 cm dyb 25 m syd for vejen	11	4.5	46	38	653	1.06
902	Topjord 40 m syd for vejen	11	7.1	61	21	516	1.33
903	Topjord 55 m syd for vejen	9.2	5.7	61	24	495	1.28
904	Topjord 70 m syd for vejen	8.7	5.9	57	28	473	1.19
905	Topjord 85 m syd for vejen	6.3	5.5	64	24	449	1.05
906	Sandplet med strå sammenføjet ved DDH felt	8.3	6.1	61	25	331	0.98
907	Sammenføjet sandet jord ved DDH felt	6.6	5.4	65	23	373	1.04

Tabel 2.1

Analyser af jordprøver fra mark(er) øst for gården Birthesminde ved Rabis Bæk, marts 1990. Alle prøver, undtagen 882, er vindprægede.

sion og aldrig nogen egentlig drivedannelse. Først i februar og marts 1990 var det muligt at foretage rimelige målinger. Marken SØ for gården Birthesminde var da blevet svagt sorteret i overfladen. Der fandtes sandpletter og småsten i spredt brolægning. Der blev lagt en prøvelinje nord-syd startende ca. 25 m syd for landevejen. Derefter blev der taget prøver for hver 15 m indtil 4.5 m fra DDHs erosionsfelt.

Analyseresultaterne er vist i tabel 2.1. Desværre er udgangsværdien (prøver fra før vinderosionen, prøve 882) ikke taget fra denne mark, men lige nord for vejen. Prøve 906 og 907 er begge taget i tydelige aflejringspletter ved markens rand og ved erosionsfeltet og viser dermed også variationen i føjet jord. Tabel 2.1 viser tydeligt, at indholdet af materiale < 63 μ og fosfor er næsten halveret. Muligvis har tendensen været der før fygning, fordi det er mærkeligt, at carbonindholdet ikke viser variation af betydning.

Der kan forekomme betydeligt større forskelle end dem, der er vist i tabel 2.1. I forbindelse med en stor jordfygning ved Ribe 5/4 1989 målttes fx i sanddrive 156 ppm P mod 418 ppm P i markjorden og 0.66 % C i driven mod 3.2 % i markjorden.

Jordtab ved
fygning

Man kan lave et groft overslag over den formodede vindtransport på følgende måde: fra prøve 901 og 902 til middel af prøve 906 og 907 er indholdet af finjord (korn < 63 μ) faldet fra 11 % til 7.5 %. Udgangsmaterialet havde en tørvægt på 395 g (1.3 g/cm³). Heraf var ca. 10 % sten, dvs. 355 g < 2 mm. Vægten af korn < 63 μ var 39 g. Fygningsmaterialet havde en tørvægt på 453 g (1.5 g/cm³). Heraf var ca. 2.5 % sten, dvs. 442 g < 2 mm. Vægten af korn < 63 μ var 33 g. Vægtforskell i silt/ler fraktionen var 6 g, som rundes af til et tab på ca. 5 g finjord pr. prøvetagningscylinder eller 1.24 kg/m² eller ca. 1 mm højdereduktion.

Da kun den halve mark var alvorligt erosionspræget, giver det et totalt marktab på ca. 4 tons. Hvis dette er forsvundet i marts 1990, er det sket ved suspension i luften, som støvtransport. Dette er en langtgående transport, hvoraf kun en mindre del, tilfældigt, lander i åen. Denne kan også modtage støv fra steder længere væk end de nærliggende marker.

Jordfygning til
vandløb

Rabis Bæk har en 20 % stigning i sedimenttransporten fra 108 kg/døgn til 130 kg/døgn den 24/3 uden ændring i vandføringen. Det falder sammen med, at der den 23-24/3 1990 var en middelvind pr. døgn på 4 m/sek og en max.vind på ca. 20 m/sek efter 11 dage næsten uden nedbør (sum = 1 mm). Denne stigning tilskrives vinderosionens bidrag.

På årsbasis har vinderosionens bidrag til åens transport dog været ubetydeligt.

3.5 Årsoversigt og sammenfatning

Koncentration

Målingerne af koncentration i Rabis viser, at den kun øges lidt i forbindelse med kraftig nedbør; sammenholdt med de øvrige feltundersøgelser bekræfter dette, at jorderosion kun i ringe grad påvirker transporten i vandløbet. I Langvad derimod ses som oftest en tydelig stigning i koncentrationen i forbindelse med stor nedbør. Sammenholdt med observationer af erosionsfænomener bekræfter dette, at transporten påvirkes af erosion.

Koncentrationsrelationer

De undersøgte koncentrationsrelationer viser i Rabis, at der ikke er nogen tydelig øget koncentration med øget vandføring, fordi vandføringens årstidsvariation er meget lille. Dette understøtter observationer af, at erosionen i bund og bredder er af mindre betydning for transporten her. I Langvad viser koncentrationen en tydelig stigning, når vandføringen stiger, men denne stigning er ikke konstant over året. Dette bekræfter, at transporten påvirkes af tilførsel af erosionsmateriale og opbygning af temporære sedimentmagasiner, som kan spules helt ud. Koncentrationen af partikulært fosfor falder med stigende koncentration af suspenderet stof, hvilket viser tilstedeværelsen af selektiv transport, hvor det fine mere fosforholdige transporteres længere end det grove og derfor lettere når vandløbene.

Transport

Transport af sediment, fosfor og erosionsbidrag er opgjort for perioder af et års længde (1/10 - 30/9) "sedimenttransportår" analogt med et hydrometrisk år. De enkelte "års"

Tabel 2.2
Transportsummer.

	Rabis			Langvad		
	87/88	88/89	89/90*	87/88	88/89	89/90*
Total susp. t	96	42	15	96	18	18
Total susp. t/km ²	9.9	4.3	1.6	8.2	1.5	1.6
Org. susp. t	25	20	9	27	6	5
Org. susp. t/km ²	2.5	2.0	0.9	2.3	0.5	0.4
Erosion % af total susp.	24	29	17	76	45	82
Basis % af total susp.	76	71	83	24	55	18
Total P kg	584	413	188	853	405	219
Total P kg/km ²	60	43	19	73	35	19
Part. P kg	250	160	49	214	119	63
Part. P kg/km ²	26	16	10	18	10	5

*) Oktober-marts inkl.

transportsummer er vist i tabel 2.2. Det ses, at transporten i begge vandløb er størst i 1987/88 mindst i 1988/89, og resultaterne fra vinteren 1989/90 viser, at også dette år vil have en mindre transport end 1987/88. Opgjort på arealbasis falder transporten fra 9.9 t/km² total suspenderet sediment i 1987/88 til 4.3 t/km² i 1988/89 i Rabis. De tilsvarende tal for Langvad er henholdsvis 8.2 t/km² og 1.5 t/km². Bidraget fra "erosion" er 25-30 % i Rabis, dvs. konstant, mens det i Langvad falder fra 76 % til 45 %. Transporten af fosfor følger det samme mønster, men forskellen mellem årene er ikke så tydelig.

Transportbidraget fra bred- og bunderosion udgør både i Rabis og i Langvad ca. 10-25 % af totaltransporten i tabel 2.2, den relative andel stiger, når erosionen i oplandet falder.

Vinderosion

Vinderosion på marker afhænger af tilstrækkelig vind nær overfladen til at saltere "tørre", løse korn og små aggregater. Den kritiske vindhastighed for finsandet jord ligger på ca. 4 m/sek i 2 m højde (Kuhlman, 1960). Om kornene er tørre og løse, bestemmes af vejrudvik-

Døgn med middelvind ≥4.0 m/sek i 2 m højde	Bemærkning om nedbørsudviklin- gen dagene før og selve dagen	Observationer af tegn på jord- fygning
1987		
10/12: 4.1	9 dage næsten uden nedbør (sne) i alt 1 mm	Intet. Hård natte- frost binder jorden
1988		
10/4: 4.0	10 dage uden nedbør	Intet. Ingen nedbør i marts
16/5 ingen vind	11 helt tørre døgn, solvarmt: 14-23°C	Iagttaget svage spor (termisk turbulens, årsag?)
19/9: 4.4	i 5 dage før: ialt 0.5 mm	Intet. (Stubmarker)
9/11: 4.0	i 8 dage før: i alt 1 mm efter en med 7 mm slud	Intet
24/11: 4.0	slud og regn på dagen.	Intet
11/12: 5.6	Nogen nattefrost 5.2 mm regn i løbet af 4 dage	Intet
1989		
14-15/1: 4.6, 5.2	15 mm regn over 4 dage	Intet
17-18/1: 4.7, 4.3	1.5 mm regn siden 15/1	Intet
30/1: 4.9	3 mm regn 3 dage før	Intet
4-5/2: 5.0, 4.9	7 mm dagen før, 17 mm på dagene	Intet
14-16/2: 4.6, 4.0, 4.3	22 mm regn over 5 dage	Intet
19/2: 4.3	7 mm dagen før, 3 mm på dagen	Intet
13-14/3: 4.3, 4.5	9+2 mm regn på dagene	Intet
23-25/3: 4.8, 4.4, 7.1	regn og slud 4 dage før og på dagene, i alt 43 mm	Intet
5/4 ingen vind	slud og nogen nattefrost 4 dage før	Intet. (Men Søn- derjylland og Nord- sjælland havde kraftig jordfygning)
17/7: 4.0	småregn dagene før	(Afgrøde på markerne)
31/7-1/8: 5.0, 5.0	17 og 6 mm på dagene	(---- " ----)
2/10: 4.9	tørt på dagen og 5 dage før	Intet
6/12: 5.3	slud og sne, nattefrost de nærmeste dage	Intet
1990		
26/1: 5.6	41 mm regn de 3 dage inden, 34 mm regn på dagen	Intet, skønt stærke stormstød
28/1: 4.5	9 mm regn på dagen	Intet
7-8/2: 5.0, 6.5	30 og 12 mm regn på dagene	Intet
12/2: 4.0	9 mm regn over sidste 4 dage	Muligvis lidt spor fra SV-kuling
20/2: 4.3	9 mm regn dagen før og dagen	?
25-28/2: 4.6, 5.7, 5.2, 6.2	5 mm regn de 4 dage inden 1+18+5+10 på dagene	Tydelige små driver ved vej 27/2. orkan- agtige vindstød fra vest
8-9/3: 4.0, 5.4	22 mm regn de 4 dage inden	?
11-12/3: 5.0, 6.4	2+0.5 mm på dagene	Tydelige spor
23-24/3: 4.0, 4.1	Forud: 10 dage næsten tørre med varmere rekord ca. 20°C	Tydelige spor. (Markerne pløjet)

Tabel 2.3

Potentielle jordfygningsperioder ved Rabis Bæk fra 1/11-1987 til 1/4-1990 sammenholdt med observeret jordfygning og jordfygningspræg på nærliggende marker.

lingen og jordbehandlingen. Det skal erindres, at sand kan flygte, selv om det indeholder omkring 1 % fugtighed. Let nattefrost og stærk sol om dagen medfører stor og hurtig udtørring. Hvis det falder sammen med forberedelse af såbed, er erosionspotentialt størst. Marts og april er derfor de mest kritiske måneder. Ser man på perioden november 1987 - marts 1990, kan man ud fra de meteorologiske tabeller udpege kritiske perioder og sammenligne disse med reelle observationer af jordfygning. Dette er sket i tabel 2.3.

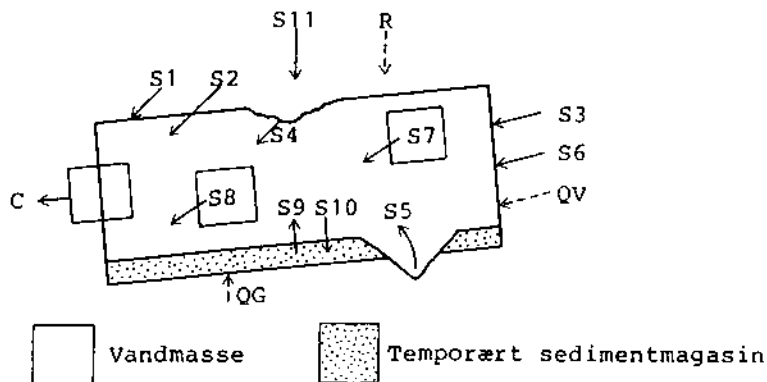
Det kan konkluderes, at perioden har været vindfattig, fugtig og usædvanlig vintermild. Jorden har været kohæsionspræget af fugt og biologisk aktivitet. Vinderosionsbidraget til vandløbene har været negligeabelt.

4. DISKUSSION

Transporten af sediment og opløste stoffer fremkommer som et produkt af en vandmængde pr. tidsenhed og en koncentration. Vandmængden er bestemt af de hydrologiske forhold (vandbalancen), mens koncentrationen bestemmes af såvel hydrologiske (vandets erosivitet) som kemiske, geologiske og biologiske forhold.

Kilder til suspenderet sediment

I fig. 2.21 (Hasholt, 1981) er vist kilder til koncentrationen af partikulært materiale. Den totale transport hidrører fra alle disse kilder, hvis bidrag varierer i tid og rum. Kun S1 er det egentlige bidrag fra jorderosionen, mens den samlede erosion omfatter S4 og S5, samt i nogen grad også S2 og S3. Bemærk, at koncentrationen kan påvirkes af et temporært sedimentmagasin, S9 og S10. Et jorderosionsbi-



Definitioner:

Sediment fra:

S1	Overfladeafspuling	S8	Biologisk Produktion
S2	Dræn og grøfter	S9	Bundsediment v. resuspension
S3	Øvrige vandløbssystem	S10	til bund v. sedimentation
S4	Brederosion	S11	fra luften
S5	Bunderosion	R	Vand fra nedbør
S6	Spildevand	QV	Vand fra overfladevand
S7	Kemisk Udfældning	QG	Vand fra grundvand
		C	Koncentration

Fig. 2.21

Lodret snit af element i vandløbets længderetning.

drag, S1, kan ikke forekomme alene, fordi den vandmængde, der forårsager jorderosion, også vil øge S4, S5, S9 samt evt. også S3 og S2.

Basisbidrag

Den del af transporten, som ikke kan relateres til specifikke hændelser, kaldes basisbidraget. En helt skarp afgrænsning af basisbidraget er ikke mulig. Det omfatter S6, S7, S8 og S11 samt en del af S2, hvis spildevand indgår, og den langsomme erosion (i geologisk tidsskala) fra S3. Totaltransporten minus basisbidraget angiver således et mål for det maksimale tilskud til transport fra jorderosionen. I det følgende diskuteres de to vandløb i relation til ovenstående.

Rabis

I Rabis er der et basisbidrag i samtlige måneder. I dette vandløb er bunden lettere at erodere, da materialet er kohæsionsløst, en del

af basistransporten stammer fra suspenderet bundmateriale. Selve bundtransporten måles ikke, da dens betydning for fosfortransporten anses for at være minimal p.g.a. det lave fosforindhold i sandet. Der foregår en betydelig kemisk udfældning, S7, af jernforbindelser (okker). Okker som suspenderet stof er tidligere påvist (Hasholt, 1984). I dette område forekommer intet bidrag fra S2, men et vist spildevandsbidrag, S6, fra bebyggelsen og et dambrug opstrøms målestationen må påregnes. Organisk produktion, S8, er udfra måling af areal og produktionstal fra lignende vandløb anslået til ca. 3 t tørstof/år.

Undersøgelserne har vist, at der i dette sandjordsområde kun i 1987/88 foregår en overfladeerosion i oplandet, og på grund af det flade terræn når kun en minimal del frem til vandløbet. Erosionsbidraget kan kun hidrøre fra nogle få skrænter og fra mættet overfladeafløb i selve dalbunden, S1, samt fra bund og bredder, S4 og S5. Et temporært sedimentmagasin kan opbygges i grøden i løbet af forår og sommer. Dette magasin kan nedbrydes i forbindelse med oprensning, hvilket delvis forklarer afvigelsen fra basisbidraget i juni og juli 89. En del af forklaringen kan også være, at bunden ved målestedet i den tørre sommer hævedes lidt på grund af aflejring, således at en større andel af suspenderet bundmateriale blev opsamlet af ISCO-prøvetageren.

Langvad

I Langvad er der ikke noget konstant månedligt basisbidrag, fordi vandløbet tørrer ud ved målestationen. Et formodentligt konstant spildevandsbidrag og en del biologisk produktion må aflejres i systemet i den del af året, hvor vandføringen er minimal; en aflejring i bunden

kan således iagttages om foråret. Dette temporære magasin kan så skylles ud om efteråret, hvis vandføringen er tilstrækkelig. En bekræftelse af forekomsten af en sådan udskylning fås af de høje koncentrationer i forhold til vandføringen tidligt om efteråret, og senere lavere koncentrationer ved samme vandføring, såkaldte hystereseloops med uret (Hasholt, 1981). Når systemet er skyllet igennem først på vinteren, og efter en længere recessionsperiode, giver transporten et mål for basisbidragets størrelse. Det bemærkes, at basisbidraget i 1987/88 er større end den samlede transport i 1988/89. Erosionsbidraget i 1988/89, som tydeligt kan relateres til vandføringshændelser, tages derfor primært fra det temporære magasin, S9. Egentlig erosion S1, S4 og S5 forekommer næsten udelukkende i 1987/88. Bidraget til fosfortransporten er formodentlig større på grund af selektiv transport af fine partikler med stort fosforindhold, som lettere når frem til vandløbet. Tilstedeværelsen af denne proces bekræftes af, at fosforindholdet i det suspenderede materiale er 3-5 gange større end i jord i oplandet. Organisk produktion er anslået som ovenfor til ca. 4 t tørstof/år.

Selektiv transport

Undersøgelserne viser, at det areal, som faktisk leverer erosionsmateriale til vandløbene i de to områder, kun udgør en mindre del af det samlede topografiske opland. I Rabis tilføres kun sediment fra dalbund og skrånter nær åen, det "effektive" areal er kun ca. 0.5 km². I Langvad vil en stor del af det sediment, der tilføres vandløbssystemet i den øvre del opfanges i søer og moser inden det når målestationen, i området findes også talrige afløbsløse lavninger, som opfanger erosionsmate-

Effektivt areal

riale. Det "effektive" opland er her ca. 8 km². Transporten og tilførslen af erosionsmateriale pr. arealenhed er derfor større end fundet ved den almindeligt anvendte beregningsmetode, der fordeler over topografisk opland.

5. KONKLUSION

- En oversigt over rapportens hovedresultater findes i fig. 2.19 og fig. 2.20 samt i tabel 2.2.
- De målte transportværdier angiver en absolut øvre grænse for erosionsbetinget tilførsel af sediment og fosfor.
- Det er konstateret, at erosion bidrager til transporten af sediment og fosfor i begge vandløb.
- Erosionsbidraget er mindst i Rabis (sandjord) og størst i Langvad (lerjord).
- Erosionsbidraget varierer på grund af nedbørens variation igennem måleperioden, det er størst i 1987/88 og mindst i 1988/89 og 1989/90.
- Brederosion bidrager til transporten i begge vandløb. Den relative andel af totaltransporten er størst i 1988/89 og mindst i 1987/88.
- Der er konstateret selektiv transport af finkornet fosforholdigt sediment.
- Vinderosion er kun forekommet i begrænset omfang i måleperioden og effekten på transporten i vandløbene er negligeabel.

KAPITEL 3

JORDEROSION OG FOSFORTTRANSPORT FRA EROSIONSFELTER

1. INDLEDNING

Formål

I dette kapitel kvantificeres overfladeafstrømningen af fosfor i 4 udvalgte markfelter, og der redegøres for de faktorer, som styrer erosionen, baseret på en karakteristik af markfelternes jordbund og overflade, dyrkningsform og afgrøde. Desuden gives en vurdering af klimaets indvirkning på erosionen. Projektet blev udført af Hedeselskabet. Arbejdet blev påbegyndt i oktober 1987 og afsluttet maj 1990.

2. MATERIALER OG METODER

2.1. Markfelter

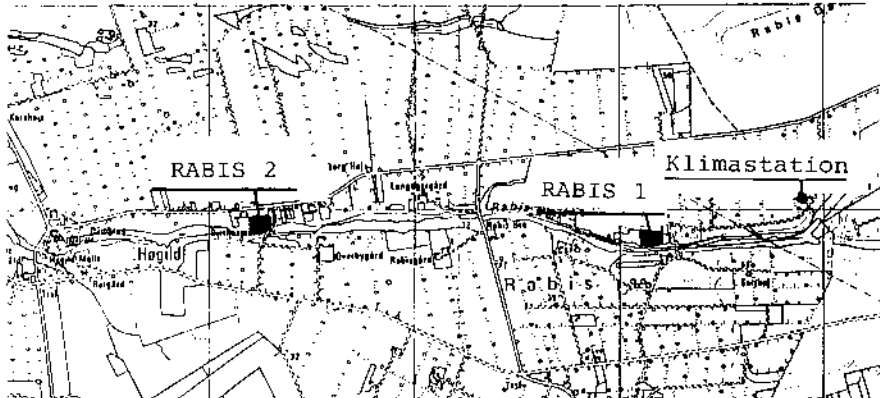
I efteråret 1987 blev der udvalgt 4 arealer til placering af markfelter på skrånende terræn, hvor afstrømningsmålingerne kunne foregå. 2 markfelter repræsenterer et sandjordsområde (Rabis) og 2 et lerjordsområde (Langvad). Markfelterne benævnes Rabis 1 og 2 samt Langvad 1 og 2 og er beliggende i UTM zone 32 på UTM koordinaterne:

R1: 510150/6244950, R2: 508250/6244900, L1:
693200/6160050, L2: 691700/6162550.

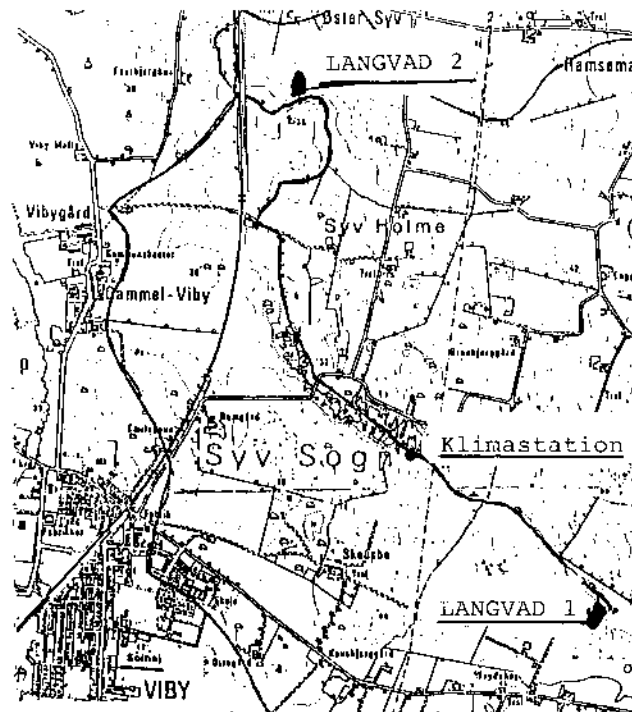
Markfelternes areal, hældnings-%, skråningslængde, jordbundstype, driftsform, vegetationsdække, kultiveringsretning og jordbehandling ses i tabel 3.1. Det fremgår heraf, at både Langvad 1 og Rabis 1 var uden vegetationsdække i vinterhalvåret men var bevokset i sommerhalvåret. Rabis 2 var i forsøgsperioden bevokset med vedvarende græs undtagen det sidste vinterhalvår 1989-90, hvor arealet lå pløjet og uden vegetation. Langvad

2 var hver vinter tilsæt med vinterafgrøder. P-gødskning blev i 3 felter tildelt alene i form af handelsgødning. På Langvad 2 blev P-gødningen hovedsageligt udbragt i form af ajle fra svin suppleret med handelsgødning.

Af følgende kortudsnit, figur 3.1 og 3.2 ses placeringen af de 2 markfelter i hhv. Rabis og Langvad.



Figur 3.1. Beliggenhed af markfelter i Rabis.



Figur 3.2. Markfelternes placering i Langvad.

Jordbunds-undersøgelser

For at karakterisere matrixjordens tekstur og fosforindhold blev der hvert efterår på hvert markfelt udtaget 3 jordprøver fra det øverste 5 cm jordlag. Disse jordprøver blev, for at kunne redegøre for en evt. partikeltransport ned ad bakken, udtaget parallelt med opsamlingsrenden repræsenterende 3 forskellige afstande fra opsamlingsrenden.

Tabel 3.1. Data for 4 markfelter til måling af overfladeafstrømning af fosfor

Station	År	areal ha	gns. hæld. %	skråningslangde, m	jordbunds-type	ADK-jb. nr.	driftsform	vegetationsdække	jordbearbejd. og lign.	retning
Rabis 1	87/88	0,46	4	55	grovsand	1	sædskifte	bar/ vårbyg	pløjet efterår 87	2
									kult. & såning 88	1
	88/89	sædskifte	bar/ kartofler	gødskning 88						
				vanding 3x30mm 88						
		høst 88								
		harvet efterår 88	1							
		pløjet forår 89	2							
		kartofler maj 89	2							
		gødskning 89								
		forsøget afsluttet pr. 11.10.89 (kartofl. endnu i jord)								
Rabis 2	87/88	0,45	4	70	grovsand	1	sædskifte	græs/græs	ingen kult. 87	
									gødning forår 88	
	88/89	sædskifte	græs/græs	ingen kult. 88						
				gødning forår 89						
	89/90	sædskifte	bar/vårbyg	pløjning 89	1					
				harvning 89	1					
				såning 90	1					
				gødning forår 90						
	forsøget afsluttet pr. 02.05.90									
	Langvad 1	87/88	0,60	12	100	grov sand-blandet ler	5	sædskifte	bar/vårbyg	pløjet efterår 87
kult. & såning 88										2
88/89		sædskifte	bar/vårbyg	gødning forår 88						
				høst 88						
		pløjet efterår 88	2							
		kult. forår 89	2							
		såning 89	2							
		gødning forår 89								
		høst 89								
		pløjet efterår 89	2							
kultivering 90	2									
gødning forår 90										
såning april 90	2									
forsøget afsluttet pr. 30.04.90										
Langvad 2	87/88	0,43	2	100	lerjord	7	sædskifte	vinterbyg	pløjet efterår 87	2
									kult. & såning 87	2
	88/89	sædskifte	vinterbyg	gødskning forår 88						
				høst 88						
		pløjet efterår 88	2							
		kult. & såning 88	2							
		gødskning forår 89								
		høst 89								
		pløjet efterår 89	2							
		kult. & såning 89	2							
sv.øjle efterår 89										
gødskning forår 90										
forsøget afsluttet pr. 30.04.90										

Retning
1: jordbearbejdning langs konturerne; 2: jordbearbejdning vinkelret på konturerne (op - ned).

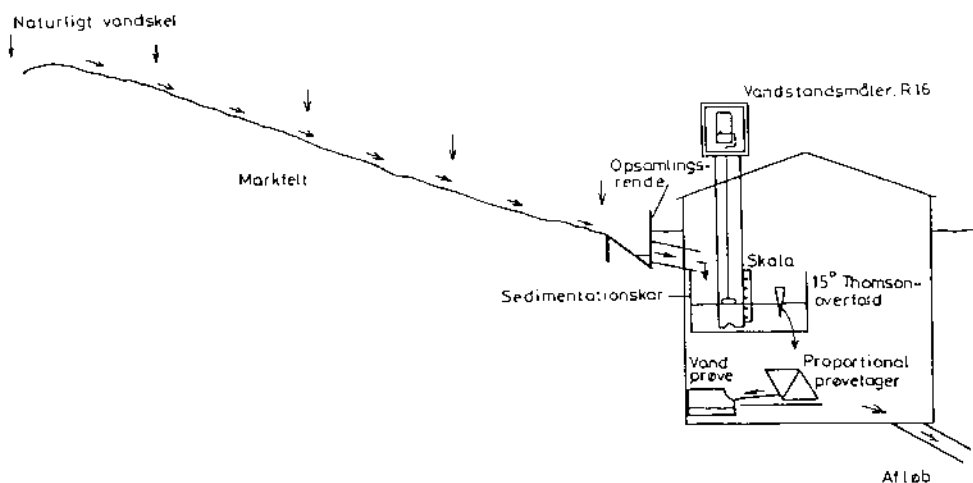
Analyser

Jordprøverne blev analyseret for pH, tekstur, adsorberet fosfor, Al og Fe-bundet fosfor, Ca-bundet fosfor og Total-fosfor.

2.2. Opsamlingsystem

Hvert markfelt på ca. 0.5 ha var placeret på en bakkeskråning. Overfladeafstrømmende vand og jord blev opsamlet for foden af bakken i en opsamlingsrende. Opsamlingsrenden var i hele feltets opsamlingsbredde en rende monteret med en 30 cm høj bagkant beklædt med PVC-dug. Opsamlingsrenden fulgte terrænet og var anlagt med et fald på $> 0,1\%$ ned mod et afløbsrør, som førte afstrømmende vand og jord ned i en nedgravet målebrønd.

I målebrøndens sedimentationskar var det, for at opnå maksimal funktion i alle afstrømningssituationer, nødvendigt at etablere to Thomson overfald. Afstrømningen blev beregnet ud fra en kontinuerlig måling af vandstanden. Ved afløbet fra sedimentationskarret var der etableret et vippekar monteret med udtagningsdyse, her blev der udtaget mængdeproportionale vandprøver. Opsamlingssystemet er skitseret i figur 3.3.



Figur 3.3. Skitse af opsamlingsanlæg.

2.3. Afstrømningsmålinger

Overfladevand

Via de ugentlige tilsyn i vinterperioden blev der, når der var opsamlet ca. 1 liter, hjemtaget

vandprøver til laboratoriet. Ved større afstrømninger blev der desuden manuelt udtaget kampagneprøver af afstrømningsvandet. Vandprøverne, opsamlet via vippekarsystemet, blev gennem hele perioden konserveret med formaldehydopløsning.

Analyser

De konserverede vandprøver blev filtreret gennem Whatman GF/F filter (0.7 μm) og analyseret efter Dansk Standard for følgende: pH, suspenderet stof, PO₄-P filtreret(A) = uorganisk P, Total-P(B), Total-P filtreret(C). Iflg. Rebsdorf og Thyssen (1987), beregnes organisk P som C-A og partikulært P som B-C. Til COD blev der udtaget ikke konserverede vandprøver i vippekarret.

Sediment

I sedimentationskarret blev der opsamlet eroderet materiale, som bundfældedes under opholdstiden i karret. I Rabis 1 var der ikke nok materiale til analyser. I Rabis 2 blev der opsamlet 2 sedimentprøver i forsøgsperioden. I begge kar i Langvad blev der løbende opsamlet materiale.

Analyser

Sedimentprøverne blev tørret ved ca. 55°C og vejjet. De blev analyseret for: Total-P, uorg.-P (Pt), Total-Fe og TOC. Sedimentets teksturfordeling blev bestemt, i de tilfælde der var nok materiale. Desuden blev der på enkelte prøver udført fosforfraktionsanalyser efter Chang & Jackson's metode (Jackson, 1958).

Beregning af fosfor- og jorderosion

Afstrømningerne fra de enkelte stationer er beregnet ud fra øjebliksvandføringer til døgnmiddelvandføringer af Hedeselskabets Hydrometriske Undersøgelser. Fra de daglige værdier subtraheres nedbøren, der er faldet på opsamlingsrenden, hvilket giver nettoafstrømningen, som er benyttet til de følgende afstrømningsberegninger. Opsamlingsrendens areal på hvert felt var ca. 18 m².

Vandprøver udtages mængdeproportionalt og analyseresultatet af en vandprøve er dermed et gennemsnit for afstrømningsvandet i perioden fra sidste prøveudtagning til dagen hvor prøveudtagning finder sted.

Erosionstab af fosfor og jord beregnes ved at multiplicere de målte analyseværdier for susp. stof, total-P, total-P filtreret og uorg.-P med de daglige nettoafstrømninger. De målte og beregnede værdier er sluttelig ekstrapoleret til gram pr. ha.

Målesikkerhed

I måleperioden forekom få større og mange mindre afstrømningshændelser. Målesikkerheden på de større hændelser vurderes til at være +/- 10%. På de små og erosionsmæssigt uvigtige hændelser vurderes måleusikkerheden at være større. Udfra samtidige registreringer af vippekarrenes antal vip vurderes de totale afstrømninger registreret med vandstandsmålerne til at være de maksimale afstrømninger fra hvert felt.

2.4. Klimamålinger

Data for nedbørsmængde, -intensitet, lufttemperatur, jordtemperatur i 10 og 30 cm dybde og potentiel fordampning kan findes i NPo-forskning nr. B17: Klimastationer i NPo-værkstedsområder. I opgørelsen af nettoafstrømningen er nedbørsmængderne pr døgn (kl. 0-0) anvendt.

Måleusikkerhed

Klimastationernes afstandsmæssige placering 1-2 km fra markfelterne betyder en måleusikkerhed på specielt nedbør under kraftige regnskyl.

Atypisk klima

Opsamlingsperiodens klima har i forhold til normal klimaet i DK været atypisk. I hele opsamlingsperioden fra oktober 1987 til maj 1990 har der været 3 meget milde vintre. Jorden har i

Rabis kun været frostbunden (0°C eller derunder) i 10 cm dybde i 2 korte perioder (03.12.87-18.-12.87 og 16.12.89-17.12.89). I Langvad konstanteredes der ikke på noget tidspunkt frost i 10 cm dybde. Der blev ikke registreret nævneværdig sne i perioden, jorden var dog i korte perioder i nov/dec 1987 og i nov. 89 hvid og sneklædt (< 1 cm). I 1987/88 faldt der ca. 100 mm mere end normalnedbøren og i 1988/89 ca. 100 mm mindre end normalnedbøren (landsgennemsnit). Der har i hele perioden været målt nedbørsintensiteter på mellem 0,0 og 0,9 mm pr 2 minutter. Dog i enkelte perioder op til 4,3 mm pr 2 min. (24.07.88 kl.8-9). I denne byge faldt der ialt 14 mm nedbør. Olesen (1988) har for årene 1984-1988 beregnet nedbørserosivitetsindeks (EI_{30}), som bla. indeholder nedbørsintensiteter. Der konkluderes, at de målte danske årssummer var meget beskedne og derfor ikke kunne forårsage nævneværdig erosion, dog kan der forekomme enkeltstående nedbørshændelser, der har erosionsgivende effekt.

3. RESULTATER

3.1. Rabis

De to markfelter var placeret på sydvendte skråninger, begge med 4% hældning. Jordbunden bestod på begge felter af grovsand til stor dybde.

Erodibilitetsfaktoren K , som indgår i USLE-modellen (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier & Smith, 1978), er et udtryk for, hvor let jorden eroderes. K er beregnet til 0.05 for Rabis 1 og 0.04 for Rabis 2. Begge værdier er meget lave og er dermed et udtryk for en lav erosionsrisiko. I samme model indgår længde og hældningsfaktoren LS . Den er beregnet til 0.51 for Rabis 1 og 0.56 for Rabis 2. KLS værdien er dermed 0.02 for både

Lille erosionsrisiko fra sandjord

Rabis 1 og 2. Arealerne kan derfor, som beskrevet i kap. 3, klassificeres i gruppen med laveste erosionsrisiko.

Markkarakteristik

Rabis 1

Rabis 1 har i de to vinterperioder 87/88 og 88/89 ligget bar og arealet var derved veleksporeret for erosion i vinterhalvåret. I sommerhalvåret var afgrøderne henholdsvis vårbyg og kartofler. Begge år blev der gødsket med handelsgødning. Fosfortilførslen var henholdsvis 30 og 32 kg P/ha. I 1988 blev der vandet 3 x 30 mm. Der blev ikke tilført fosfor på anden vis, dvs. via sprøjtemidler mv.

JB nr. 1

Grovsandet jord

Jorden er grovsandet med et indhold på ca. 3% ler, 4% silt, 19% finsand og 72% grovsand. Der er ca. 2% humus, gennemsnitlig reaktionstal er 6,8, og jordens indhold af total-P er på 685 ppm. Årlige teksturanalyser viste for begge forsøgsfelter, at der ikke var nogen berigelse af ler og silt fraktionerne i overfladejorden ned ad bakken.

Markkarakteristik

Rabis 2

Markfeltet var i de 2 første forsøgsår bevokset med græs til afgræsning. Ultimo september 1989 blev arealet pløjet, og arealet lå uden vegetation indtil såning af vårbyg ca. 15.03.1990.

Gødningstilførsel er sket i form af handelsgødning og i 1988 blev der tilført ca. 35 kg P/ha, i 1989 ca. 50 kg P/ha. Græsset blev ikke vandet i perioden.

JB nr.1

Grovsandet jord

Jorden er grovsandet med et indhold på ca. 3% ler, 4% silt, 16% finsand, 75% grovsand, og desuden ca. 2% humus. Jordens reaktionstal var i gennemsnit 6,5 og havde et total-P indhold på 593 ppm.

Overfladeafstrømning - Rabis 1
Næsten ingen afstrømning

Figur 3.4 viser, at der var en meget lille overfladisk afstrømning i hele måleperioden. Den relativt største afstrømning forekom 20.03.1988 med 324 liter, hvilket svarer til 0,2 mm nedbør fra hele arealet. Dagens nedbør var i alt 3,5 mm. Den kraftige nedbørsintensitet (4,3 mm pr. 2 min) den 24.07.1988 forårsagede ingen afstrømning.

Af tabel 3.2 ses, at afstrømningsvandets pH ligger generelt lavt med et gennemsnit på 5,2. COD-værdierne er på samme niveau som COD indholdet i drænvandsudledninger (Hansen, 1985). Koncentrationerne af PO₄-P og total-P ligger betydeligt over koncentrationerne målt i Rabis bæk (Hansen, 1990).

Tabel 3.2. Gennemsnitskoncentrationer af analyseresultaterne af afstrømningsvandet fra Rabis 1 i år 1988 og 1989.

Rabis 1	pH	SS mg/l	COD mg O ₂ /l	PO ₄ -P mg/l	Total-P mg/l	Tot P filt. mg/l
1988	5.9	11.1	18	0.154	0.241	0.192
1989	4.4	5.0	27	0.153	0.160	0.105

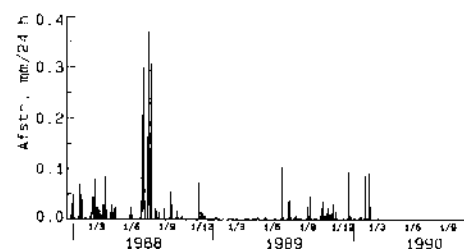
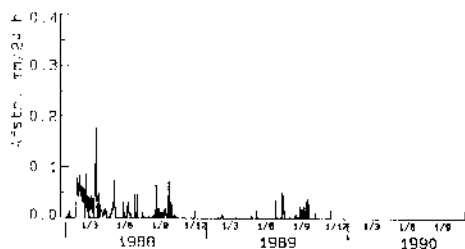
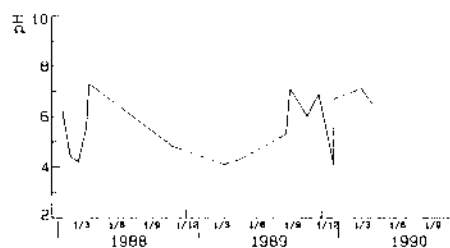
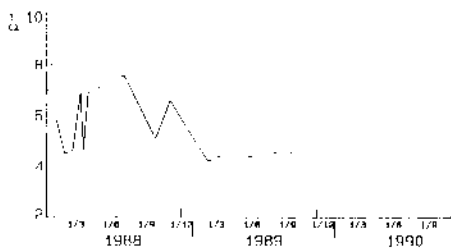
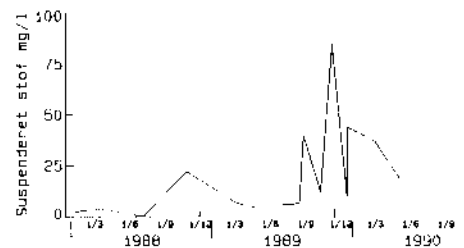
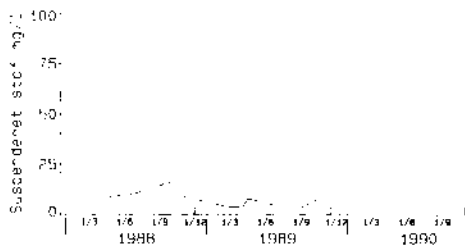
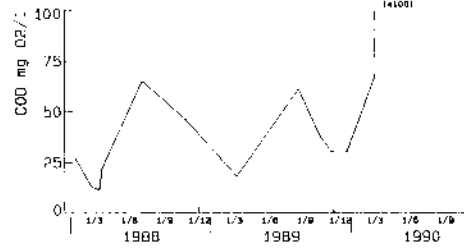
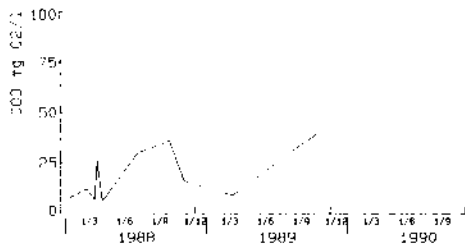
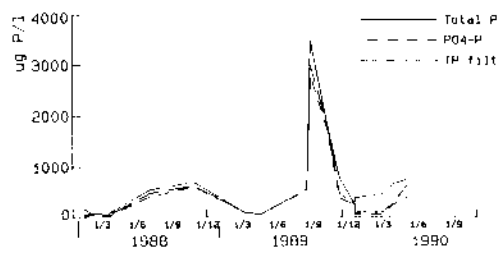
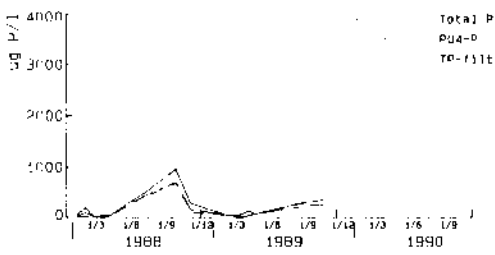
I figur 3.4 anes der en sammenhæng mellem koncentrationerne af suspenderet stof, COD og total-P. De højeste koncentrationer af P er generelt målt efter meget små afstrømninger.

Overfladeafstrømning - Rabis 2
Lille afstrømning gennem måleperioden

Den overfladiske afstrømning gennem måleperioden var lille (figur 3.4.). De største afstrømningshændelser fandt sted i juli 1988. Den 24.07.1988 målttes knap 2000 liter/døgn, hvilket svarer til en afstrømning på 0,3 mm nedbør fra hele arealet. Døgnets nedbør var i alt 28,4 mm, ca. 1% af nedbøren afstrømmede overfladisk. Nedbørsintensiteten (4,3 mm/2min) har her givet en mindre afstrømning.

RABIS 1

RABIS 2



Figur 3.4. Måleperiodens afstrømninger angivet som nettoafstrømninger i mm/døgn samt værdierne af de målte parametre.

De høje koncentrationer af fosfor (3,5 mg/l) er målt efter sommerafstrømningen 24.07.1988. Den høje koncentration af suspenderet stof (85 mg/l) er målt efter pløjning af arealet.

Afstrømningsvandets pH ligger lavt omkring 6 (4,1 - 7,3). COD er højere end fra Rabis 1, men stadig på samme niveau som COD fra drænvandsudledninger (Hansen, 1985). De højere værdier kan skyldes afstrømning af visnet plantemateriale.

Af tabel 3.3 ses, at de årlige gennemsnitskoncentrationer af PO₄-P var på 0,190 - 0,735 mg/l og total-P på 0,241 - 0,933 mg/l.

Tabel 3.3 Gennemsnitskoncentrationer af de målte parametre i afstrømningsvandet fra Rabis 2 i årene 1988-90.

Rabis 2	pH	SS mg/l	COD mg O ₂ /l	PO ₄ -P mg/l	Total-P mg/l	Tot-P filt. mg/l
1988	5.5	7.1	31	0.190	0.241	0.197
1989	5.3	26	35	0.735	0.933	0.793
1990	6.7	28	66	0.332	0.627	0.333

Niveauet er betydeligt højere end fosfor fra drænvandsudledninger og koncentrationerne i Rabis Bæk (Hansen 1985 og 1990). Den største del af fosforpuljen findes som PO₄-P (uorganisk fosfor). De højeste koncentrationer af fosfor er også her målt under relative små afstrømninger.

Ubetydelig P-transport til bækken.

Fosforbidraget til recipienten var gennem måleperioden ubetydelige for begge forsøgsfelter.

Sediment

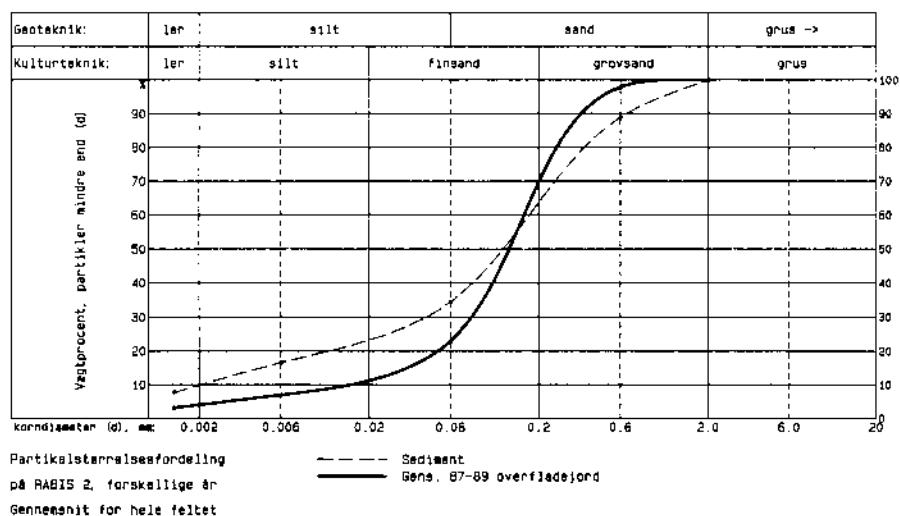
I Rabis 1 blev der ikke borteoderet jord i så stor mængde, at det kunne analyseres, mens der i Rabis 2 i måleperioden var 2 sedimenttømninger med efterfølgende analyser. Den 27.10.1988 og den 04.04.1990. De borteoderede jordmængder var i begge tilfælde meget små.

Næsten ingen jorderosion

Teksturanalyser af sediment fra den 04.04.1990 (figur 3.5) viser en gennemsnitlig berigelse af ler- og siltfraktionerne på henholdsvis 143% og 134%, en lille berigelse af finsand fraktionen på 11% og et dermed betydeligt mindre indhold af grovsand.

Total-P indholdet var 3700 mg/kg (27.10.1988) og 2400 mg/kg (04.04.1990). Fosforindholdet i sedimentet var i forhold til overfladejordens indhold beriget ca. 4-6 gange. Der fandtes i begge sedimentprøver relativt store indhold af organisk materiale, hvilket formodentlig skyldes afskylning af visent græs og andet plantemateriale.

TEKSTUR - SEDIMENT/OVERFLADEJORD



Figur 3.5. Sedimentets tekstur fra Rabis 2.

3.2. Langvad

Markfelt Langvad 1 var placeret på en nordvendt skråning med en gennemsnitlig hældning på 12%, enkelte steder dog med en hældning på op til 25%. Markfelt Langvad 2 var placeret på et sydvendt skrånende areal med en gennemsnitlig hældning på 2%.

Erosionsrisiko fra stejle skråninger	Erodibilitetsfaktoren K er for begge felter beregnet til 0,28. Længde/hældningsfaktoren, LS, til 3,26 for Langvad 1 og 0,29 for Langvad 2. KLS bliver derfor for Langvad 1: 0,91 og for Langvad 2: 0,08. Det betyder, at Langvad 1 mht. erosionsrisiko, jf. kapitel 3, klassificeres til gruppen over middel og Langvad 2 i gruppen med laveste erosionsrisiko.
Markkarakteristik Langvad	Af figur 3.2 ses placering af de 2 markfelter i Langvad. Af tabel 3.1 fremgår det, at begge arealer er almindelig agerjord, der dyrkes med sædskifte.
Langvad 1 pløjet hver vin- i retningen "op-ned"	Markfeltet har i de 3 vinterperioder været pløjet på tværs af højdekurverne (op-ned), og arealet har derfor været særdeles veleksporeret for erosion. I sommerhalvåret har afgrøden i måleperioden været vårbyg. I 1990 blev der den 01.04.1990 sået vårraps. Alle afgrøder blev gødsket med handelsgødning og er i de 3 år blevet tilført henholdsvis 12, 12 og 19 kg P/ha. Afgrøderne er desuden behandlet som i almindelig landbrugspraksis. Der er ikke anvendt P-holdige sprøjtemidler.
JB nr. 5 Grovsandblandet lerjord	Jorden er grovsandblandet lerjord og har et indhold på ca. 13% ler, 19% silt, 41% finsand, 26% grovsand og desuden ca. 2% humus. Jordens reaktionstal var i gennemsnit 7,0 og havde et gennemsnitligt total-P indhold på 460 mg P/kg jord.
Langvad 2 afgrødebevokset hver vinter	I de 2 første år 87/88 og 88/89 var afgrøden vintterbyg. I året 89/90 var afgrøden vinterraps. Afgrøderne er behandlet som i almindeig landbrugspraksis. Der blev ikke anvendt P-holdige sprøjtemidler. Arealet er blevet gødsket med handelsgødning og blev desuden tilført ajle (svin) 10 t/ha i foråret 1988, 10 t/ha i efteråret 1989 og 40 t/ha i foråret 1990. Ifølge LIK (1987) kan den

gennemsnitlige årlige tilførte fosformængde be-
regnes til 30 kg P/ha.

JB nr. 7
Lerjord

Jorden er karakteriseret som lerjord og har et indhold på ca. 16% ler, 19% silt, 37% finsand, 26% grovsand og har desuden et indhold på ca. 2% humus. Jordens reaktionstal var i gennemsnit 7,2 med et gennemsnitligt P-indhold på 778 mg P/kg jord.

Resultaterne af årlige teksturanalyser viste, at overfladejorden for foden af skråningen på Langvad 2 ikke var blevet beriget med ler og silt gennem forsøgsperioden, mens overfladejorden på Langvad 1 gennem måleperioden blev en anelse beriget med ler og silt for foden af bakken. Berigelsen var dog ikke signifikant.

Overfladeafstrømning - Langvad 1

De beregnede døgnværdier af afstrømningen og de målte koncentrationer af afstrømningsvandet ses i figur 3.6. Generelt var afstrømningen lille, dog størst i 1988 og meget lille i den resterende periode. I 1988 forekom der 3 relativt store afstrømninger, som vises i tabel 3.4.

Tabel 3.4. 3 afstrømningsperioder i 1987/88 fra Langvad 1. Afstrømning, periodens %-vise bidrag af den samlede 1987/88 P-afstrømning samt fordeling på uorganisk, organisk og partikulært fosfor.

Periode dato	Overflade karakter	Nedbør/Max.ned		Afstrømn. liter mm	% P-afstrømning				
		mm	mm/2min		87/88	uorg.	org.	part.	
060288 050788 +	Pløjet	12	0.7	2900	0.5	11	16	11	73
060788	Vårbyg	28.4	2.3	5630	0.9	5	83	11	6
130988	Stub	15.5	0.9	4059	0.7	13	58	6	36
1987/88	Ialt	497		45074	7.5	100	50	11	39

Det fremgår, at de 3 afstrømninger repræsenterer ca. 1/3 af 1987/88 afstrømningen.

Lille P-afstrømning fra vårbyg-dækket overflade

Fra både pløjet jord og stubjord afstrømmede der dobbelt så meget fosfor som fra en vårbygdækket jord. Dette skete på trods af mindre nedbør, mindre maksimal nedbørsintensitet og mindre afstrømning end fra perioden med vårbyg.

Stor koncentration af partikulært-P fra pløjet jord

Den gennemsnitlige fosforafstrømning fra 1987/88 indeholdte 50% uorganisk P, 11% organisk P og 39% partikulærtbundet P. P-afstrømningen fra pløjet jord adskilte sig væsentligt fra gennemsnitsafstrømningen ved at indeholde dobbelt så stor mængde partikulærtbundet P (73%). Afstrømningen fra stubjord lignede gennemsnitsafstrømningen, medens P-afstrømningen fra vårbyg indeholdte 83% uorganisk P.

Den højeste koncentration af fosfor (2.6 mg/l) blev målt 10.08.1989 efter forudgående kraftige nedbørsperioder. I samme prøve var koncentrationen af suspenderet stof meget høj (190 mg/l). Afstrømningen i samme periode var på trods af over 60 mm nedbør i løbet af 10 dage negligeabel med ialt ca. 0,1 mm afstrømning.

Tabel 3.5 Gennemsnitskoncentrationer af de målte parametre i afstrømningsvandet.

Langvad 1	pH	SS mg/l	COD mg O ₂ /l	PO ₄ -P mg/l	Total-P mg/l	Tot-P filt. mg/l
1988	6.9	67	30	0.280	0.485	0.362
1989	6.9	744	20	0.290	0.590	0.338
1990	7.0	28	14	0.117	0.198	0.125

Af tabel 3.5 ses, at afstrømningsvandets pH ligger på 7 og svarer til overfladejordens reaktionstal. Gennemsnitsværdierne for COD ligger på niveau med koncentrationerne målt i vandløbet Syv bæk og drænuvløbene dertil i samme periode (Hansen, 1990).

De årlige gennemsnitskoncentrationer af PO_4 -P var på 0,117-0,290 mg/l og total-P på 0,198-0,590 mg/l. Koncentrationerne af PO_4 -P i 1988 og 1989 ligger en faktor 1,3-4 højere end målingerne af PO_4 -P fra drænudløb og i vandløbet (Hansen, 1990). Koncentrationerne af total-P i afstrømningsvandet ligger ca. en faktor 2 over de i samme periode gennemsnitligt målte koncentrationer fra drænudløb til og koncentrationer i vandløbet Syv Bæk (Hansen, 1990).

I måleperioden er der forekommet nedbørsepisoder, som har forårsaget overfladisk afstrømning med fosforbidrag til følge. De højeste fosforkoncentrationer er målt under relativt små afstrømninger. De 3 største afstrømningsepisoder i 1988 har givet koncentrationer af fosfor over gennemsnitsniveauet. Disse afstrømninger har givet et fosforbidrag til recipienten.

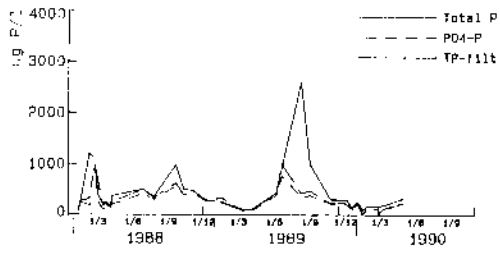
Overfladeafstrømning - Langvad 2

De beregnede døgnværdier af afstrømning fra Langvad 2 og de målte parameterværdier af afstrømningsvandet ses i figur 3.6. Afstrømningsresultaterne for perioden 03.12.1987-14.02.1988 indgår ikke pga. instrumentfejl i forsøgsopstillingen.

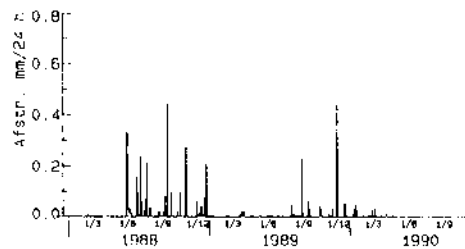
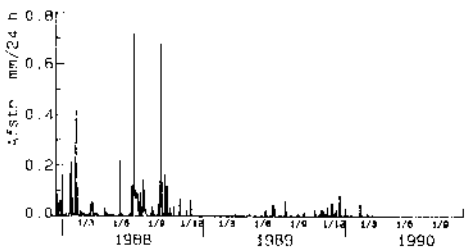
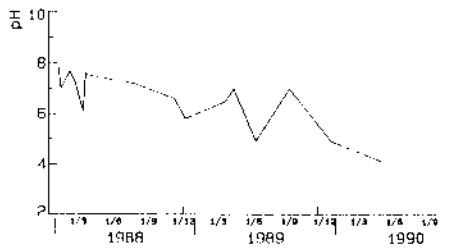
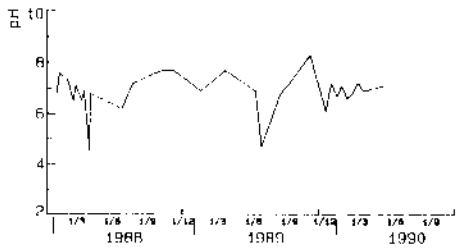
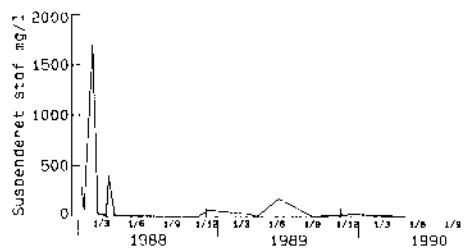
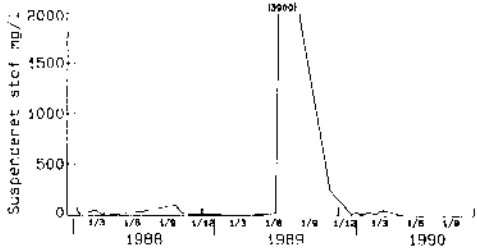
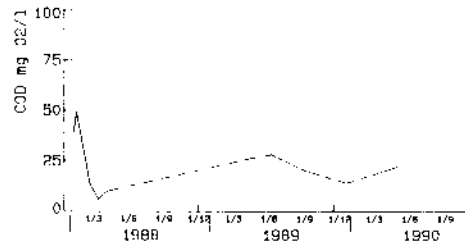
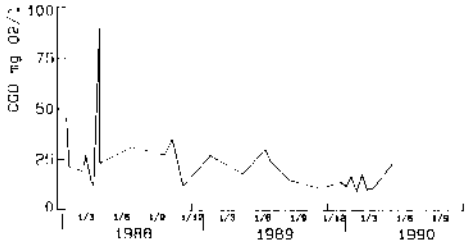
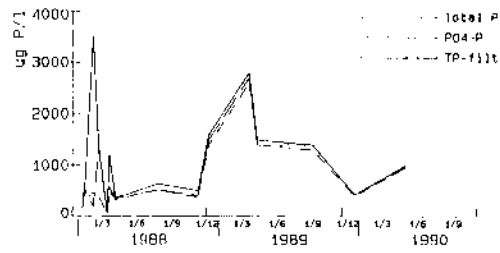
Lille afstrømning fra Langvad 2

Afstrømningen gennem måleperioden var generelt lille. De to relativt største afstrømninger forekom 13.09.1988 og 28.11.1989 begge gange med 0,4 mm (1890 l). Nedbørsintensiteten nåede den 13.09.1988 som maksimum op på 0,9 mm/2min. mellem kl. 12 og 13. Afstrømningen den 28.11.1989 formodes at være en tø-episode, da der kun registreredes 5 mm nedbør, og lufttemperaturen svingede fra under til over 0°C. Afsmeltningshændelsen skyldes, at skråningen hælder mod syd. På Langvad 1 med nordvendt hældning forekom samme dag kun en beskedent afstrømning på under 0,1 mm (233 liter). Den høje nedbørsintensitet på 2,3 mm/2 min. den 05.07.1988 og 06.07.1988 gav kun beskedent overfladeerosion på dette felt. I alt afstrømmede 0,3 mm (1440 liter).

LANGVAD 1



LANGVAD 2



Figur 3.6. Måleperiodens afstrømninger angivet som nettoafstrømninger i mm/døgn samt værdier af de målte parametre.

P-afstrømning
skete som uor-
ganisk P

Fosforafstrømningen fra Langvad 2 skete som uorganisk-P. Den 13.09.1988 fandtes ca. 75%, den 28.11.1989 ca. 93% og den 05-06.06.1988 ca. 82% af den afstrømmede fosfor som uorganisk P.

Højeste P-kon-
centrationer
fra lerjord

Den højeste P-koncentration, COD-værdi og susp. stof koncentration blev målt i perioden med instrumentfejl ved vandmængdemåling. Den næsthøjeste P-koncentration blev målt 21.03.1989 efter ganske små afstrømninger. P-koncentrationerne i afstrømningsvandet ligger betydeligt højere end resultaterne fra de øvrige 3 felter og kan ved relativt små erosionshændelser forårsage et betydeligt fosforbidrag.

Tabel 3.6. Gennemsnitskoncentrationer af de målte parametre i afstrømningsvandet.

Lang- vad 2	pH	SS mg/l	COD mg O ₂ /l	PO ₄ -P mg/l	Total-P mg/l	Tot-P filt. mg/l
1988	7.1	285	23	0.482	1.021	0.556
1989	6.1	49	22	1.425	1.533	1.482
1990	4.1	7.6	22	0.960	1.000	0.960

COD (indhold af organisk stof), tabel 3.6, ligger på niveau med de i samme periode målte koncentrationer fra drænuddøb til og i Syv Bæk, mens P-koncentrationen i overfladevandet ligger en faktor 2-5 højere end drænuddøbene (Hansen, 1990).

På grund af skråningshældningen på kun 2% og periodens milde klima har fosforbidraget fra dette felt i måleperioden været meget lille, men ved større afstrømninger kan de høje P-koncentrationer i afstrømningsvandet medføre et stort fosforbidrag.

Sediment -
Langvad 1

I figur 3.7 er vist teksturen af sedimentet i de 6 opsamlinger. Sedimentet opsamlet 18.09.89 er en rendetømning af overfladejord, der ikke er blevet transporteret videre til sedimentations-

Sedimentets ler og silt indhold ca. dobbelt så stor som i overfladejorden

karret. Teksturen og fosforindholdet af rendesedimentet ligner indholdet i overfladejorden. Sedimentets indhold af ler og silt er i gennemsnit forøget med hhv. ca. 78% og ca. 100%, og sedimentet har derved et betydeligt mindre fin- og grovsandindhold end overfladejorden.

Sedimentets indhold af totalfosfor var i forhold til overfladejordens i gennemsnit forøget med ca. 100%.

Ved fosforfraktioneringsanalyse af sediment opsamlet pr 30.04.90 var der en forøgelse af organisk bundet fosfor på ca. 570%, der skyldes sedimentets mere end dobbelt så store indhold af organisk materiale. En forøgelse af Fe/Al-P på 63% og Ca-P på 92% skyldes det større ler og siltindhold i sedimentet.

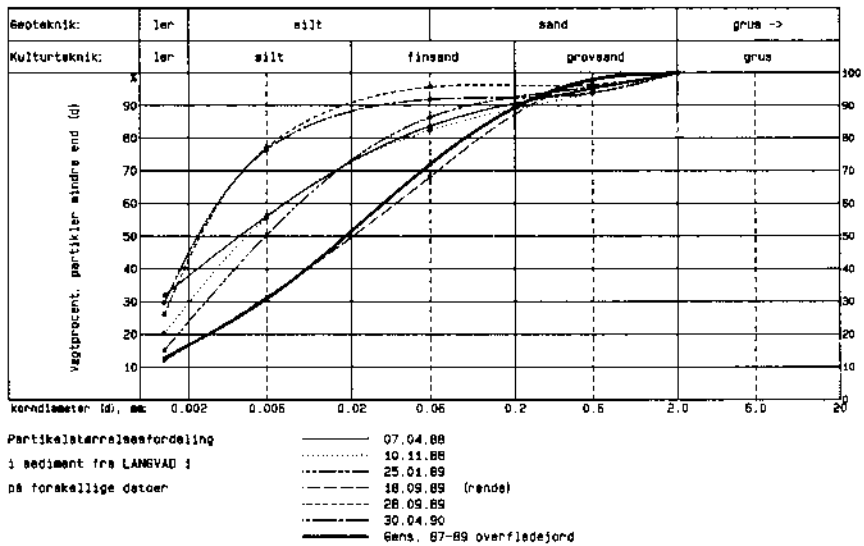
Sediment -
Langvad 2

Sedimentets ler- og siltindhold var mere end dobbelt så stor som i overfladejorden

I forsøgsperioden blev der opsamlet sediment 4 gange og teksturen i sediment og overfladejord er vist i figur 3.8. Sedimentet havde i gennemsnit 120% mere ler og 140% mere silt end overfladejorden, og indholdet af organisk stof var mere end fordoblet. Desuden var fosforkoncentrationen i sedimentet fordoblet i forhold til overfladejorden. Ved fosforfraktioneringsanalyse af sediment opsamlet 30.04.90 ses en forøgelse i sedimentet af Fe/Al-P fraktionen med ca. 420%, Ca-P fraktionen med ca. 185% og residual-P (organisk P) med ca. 175% i forhold til overfladejordens indhold i 1989. Den store forøgelse i Fe/Al-P fraktionen skyldes det høje ler- og siltindhold i sedimentet.

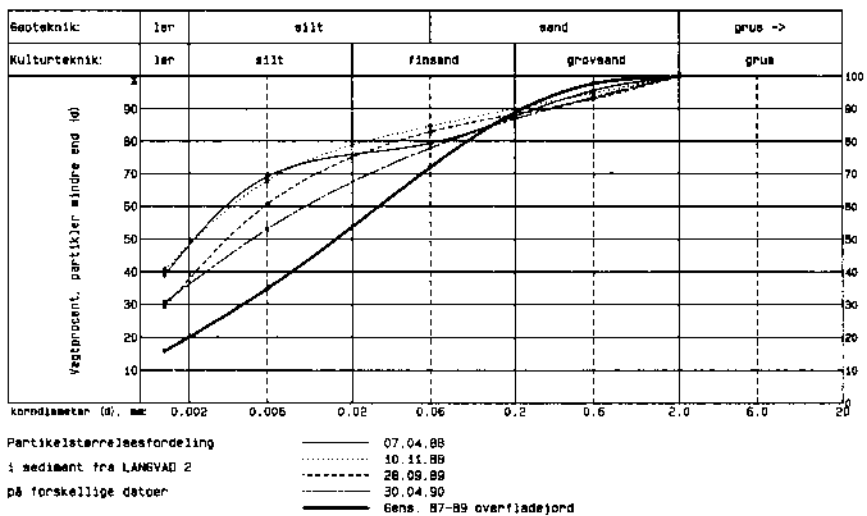
Høje fosforkoncentrationer i sedimentet

TEKSTUR - SEDIMENT/OVERFLADEJORD



Figur 3.7. Sedimentets tekstur Langvad 1.

TEKSTUR - SEDIMENT/OVERFLADEJORD



Figur 3.8. Sedimentets tekstur Langvad 2.

3.3. EROSION AF JORD OG FOSFOR FRA ALLE FELTER

I tabel 3.7. præsenteres de samlede erosionsbidrag af jord og fosfor fra de 4 markfelter. Årsopgørelserne er summeret pr. 30.09. i både

1988 og 89. Den sidste opgørelse 89/90 dækker perioden fra oktober 1989 til maj 1990.

Størst afstrømning i 87/88

Det fremgår, at afstrømningen af jord og fosfor igennem hele måleperioden var meget lille. Afstrømningen var relativt størst i 1987/88 med en afstrømningsprocent af den faldne nedbør på 1,5% fra Langvad 1 og 0,5% fra de øvrige 3 stationer. Ialt afstrømmede der fra Langvad 1 7,5 mm udaf en samlet nedbørsmængde på 497 mm. I den resterende periode var afstrømningsprocenten <0,5%.

Størst P-tab fra Langvad 1 i 87/88

Fosfortabet var relativt størst i 1987/88 og størst fra Langvad 1 med ca. 51 g P/ha. Fra de øvrige 3 felter målttes i samme periode et fosfortab fra 10 - 17 g P/ha.

Ubetydelige P-tab fra begge felter i Rabis

I perioden 1988/89 var det beregnede fosfortab relativt størst fra Langvad 2 med ca. 26 g P/ha. Fosfortabet fra Langvad 1 på ca. 17 g P/ha skyldes i høj grad den opsamlede sedimentmængde fra rennen den 18.09.89. Fosfortabet dette år fra begge felter i Rabis var ubetydelige.

I sidste måleperiode vinteren 89/90 med kun 3 stationer var fosfortabet meget lille. Relativt største bidrag kom fra Rabis 2 med 9.0 g/ha. Årsagen var formodentlig, at arealet blev pløjet i efteråret 1989 og dermed kunne bidrage med et sedimenttab. Som det fremgår af tabel 3.7, bidrog sedimentet med ca. 50% af det samlede fosfortab. Generelt var der en meget lille afstrømning fra alle felter i denne sidste måleperiode.

4. DISKUSSION OG KONKLUSION

Overfladeafstrømningen i mm/døgn fra de 4 markfelter og værdierne af de målte parametre analogt til afstrømningshændelserne er vist i figur 3.4 og 3.6. I tabel 3.7 er vist årsopgørelserne af afstrømningen af jord og fosfor fra de enkelte felter.

Meget milde vintre i måleperioden

Måleperiodens klima afveg betydeligt fra normalen. Der forekom, pga. 3 meget milde vintre nærmest uden frost og snedække, ingen væsentlige tøbrudshændelser i måleperioden. Tøbrud formodes at give overfladeafstrømning.

Største afstrømning fra Langvad (lerjord)

Overfladeafstrømningen i måleperioden var generelt meget lille, dog var den meget varierende gennem måleperioden med enkelte større hændelser. Den største afstrømning forekom i 1987/88. De største hændelser blev ikke overraskende målt fra markfelterne i Langvad området (lerjord).

Som beskrevet i Hansen & Hasholt (1989) vurderes målesikkerheden på afstrømningsmålingerne af de større hændelser til at være +/- 10%. På de mindre hændelser vurderes usikkerheden at være større. Mængden af de målte totalfosforafstrømninger i 1987/88 (10-51 g/ha) er på samme niveau som målt i Skåne (Ahlström & Bergman, 1988).

12% stejl hældning gav største afstrømningshændelser

De tre største afstrømningshændelser blev målt i 1987/88 på lerjordsfeltet Langvad 1 med 12% stejl skråning. Gennem disse tre hændelser afstrømmede ialt ca. 33% af årsafstrømningen 87/88.

Pløjet jord gav partikler i vand

Den største partikulære fosforafstrømning (73% af total-P afstrømningen) fandt sted, mens overfladejorden lå pløjet (d. 06.02.88). Nedbøren og intensiteten var meget moderate hhv. 12 mm og 0.7 mm/ 2 min. Afstrømningen var ialt 0.5 mm. Fosfor-

Tabel 3.9. Erosionsbidrag fra de 4 markfelter 1987/88 - 1989/90.

Station	1987/88				1988/89				1989/90			
	Rabis 1	Rabis 2	Længvad 1	Længvad 2	Rabis 1	Rabis 2	Længvad 1	Længvad 2	Rabis 1	Rabis 2	Længvad 1	Længvad 2
Periode	15.10.87- 30.09.88	15.12.87- 30.09.88	03.12.87- 30.09.88	03.12.87- 30.09.87	01.10.88- 11.10.89	01.10.88- 30.09.89	01.10.88- 30.09.89	01.10.88- 30.09.89	01.10.89- 02.05.90	01.10.89- 30.06.90	01.10.89- 30.06.87	01.10.89- 30.04.87
Afgrøde	bar jord våbyg	græs græs	bar jord våbyg	vinterbyg vinterbyg	bar jord kartofler	græs græs	bar jord våbyg	vinterbyg vinterbyg	bar jord våbyg	bar jord vårraps	vinterraps vinterraps	
Hældning	4 %	4 %	12 %	2 %	4 %	4 %	12 %	2 %	4 %	12 %	2 %	2 %
Nedbar mm	752.9	669.9	497.4	497.4	642.5	620.5	582.3	582.3	497.2	363.8	363.8	363.8
Afstr. mm	4.3	3.7	7.5	2.4	0.7	0.6	0.8	1.7	0.7	0.6	1.0	1.0
Jordafstr. Suspension Sediment	0.2	0.3	8.5	0.1	0	0.1	1.9	0.3	0.3	0.5	0.2	0.2
Total g/ha	0.22	0.3	729.5	1342.1*	0	62	17830	1644	1703	960	683	683.2
Fosforafstr. Suspension P Uorganisk P Organisk P Partikul. P Total P g/ha	7.2	13.7	25.0	11.5	1.7	3.7	2.5	22.4	2.9	1.1	5.2	5.2
Sediment Total P g/ha	0.7	1.4	5.6	0.4	0.2	0.1	0.2	1.2	0.4	0.1	0.2	0.2
Total P-tab g/ha	2.9	2.2	19.3	2.8	1.2	0.1	3.2	1.1	1.6	0.4	0.1	0.1
	10.8	17.3	49.9	14.7	3.1	3.9	5.9	24.7	4.9	1.6	5.5	5.5
	10.8	17.3	1.0	2.3 *	3.1	0.2	11.3	1.8	4.1	1.6	1.2	1.2
			50.9	17.0		4.1	17.2	26.5	9.0	3.2	6.7	6.7

* Stor værdi på grund af lækage i opsamlingsystemet (02/88)

afstrømningen var ialt 11% af 1987/88 afstrømningen.

Kraftig regn udvaskede uorganisk P

Største afstrømning af uorganisk fosfor (83% af total-P) blev målt den 05. og 06.07.88, mens jorden var dækket af vårbyg. Afstrømningen fandt sted under en stor nedbørshændelse med ialt 28 mm og en maksimal nedbørsintensitet på 2.3 mm/2 min. Ialt afstrømmede 0.9 mm. I denne episode afstrømmede 5% af den totale 1987/88 fosforafstrømning.

Største P-tab i efteråret under milde vintre

Den største total-fosfor afstrømning fandt sted fra stubjord (d.13.09.88). Ialt afstrømmede 0.7 mm og 13% af fosforafstrømningen i 87/88. Nedbøren og den maksimalt målte nedbørsintensitet var moderate med hhv. 16 mm og 0.9 mm/2min. Af fosforafstrømningen var 58% uorganisk fosfor og 36% partikulært fosfor.

Ofte kun afstrømning ved tøbrud

Overfladeafstrømningerne målt på sandjordsarealer og lerjord med lille hældning var meget små. På sådanne arealer vil der normalt kun være overfladisk afstrømning af betydning, når jorden er frosen.

Afstrømmet jord havde høje fosforkoncentrationer

Afstrømningen af jord var i hele måleperioden meget lille. Det afstrømmende sediment indeholder ca. 100% mere ler og silt end overfladejorden og fosforkoncentrationen i sedimentet var en faktor 2-5 højere end i overfladejorden.

Afstrømmet vand havde betydeligt højere fosforkoncentrationer end dræn og vandløb

De gennemsnitlige fosforkoncentrationer i afstrømningsvandet lå generelt betydeligt højere og over gennemsnitskoncentrationerne målt gennem samme periode fra drænudløb og vandløb i de to værkstedsområder.

KAPITEL 4

EROSIONSRIKIG OG FOSFORTRANSPORT I DANMARK

1. INDLEDNING

Kapitlet beskriver det arbejde, der er udført af Statens Planteavlsvforsøg, Afdelingen for Arealdata og Kortlægning (ADK) og Geografisk Institut, Københavns Universitet.

Formål

Formålet med arbejdet er:

- At sætte målinger og registrering af erosion i tre områder (Rabis, Gelbæk og Langvad) i et landsdækkende perspektiv og vurdere deres repræsentativitet og mulighederne for at ekstrapolere resultaterne.
- At vurdere risiko for erosion forårsaget af rindende vand på landsplan.
- At angive en metode til en mere detaljeret vurdering af risikoen for tilførsel af sediment og fosfor til vandløb.

Målingerne i de tre områder blev påbegyndt i oktober 1987, og feltarbejdet blev afsluttet i marts 1990. Der haves således oplysninger om erosionsforholdene i tre vintersæsoner og to sommersæsoner.

2. PROBLEMSTILLING OG VALG AF METODIK

Erosion forårsaget af vand er resultatet af en række processer, hvori vand indgår, og som alle bevirker, at jord bevæger sig "ned ad bakke". Erosionens størrelse, eller intensitet, er en funktion af mange faktorer, som indgår i følgende forenkede udtryk:

$$E = f (R, K, LS, C, P),$$

hvor

- E = jordtab pr. areal pr. tidsenhed
- R = nedbørens evne til at erodere (erosivitet)
- K = jordens evne til at eroderes (erodibilitet)
- LS = terrænfaktor, en funktion af hældning (S) og skråningslængde (L)
- C = vegetationens indflydelse
- P = indflydelsen af jordbearbejdning og andre kulturtekniske indgreb.

I faktoren R indgår i Danmark effekten af klimaet: nedbørsintensitet, frost, snesmeltning og vindhastighed i forbindelse med nedbøren.

I K indgår jordens egenskaber: tekstur, aggregatstørrelse og -stabilitet, organisk indhold, vandforhold, infiltrationskapacitet, forskydningsstyrke, skorpedannelse og ruhed.

Terrænforhold indgår i LS-faktoren; i Danmark influeres denne af landskabets varierende oprindelse, fx hedeslette eller ungt morænelandskab. Konkavitet, eller konveksitet, spiller en afgørende rolle for en skrånings evne til at fordele nedbøren. Skråningslængden er også en funktion af markstørrelsen og dermed dyrkningshistorien.

Afgrødefaktoren C varierer med omdriften, væsentligt er det, hvornår på året afgrøden beskytter jorden mod vandets erosivitet.

Med faktoren P beskrives effekten af jordbearbejdningen. Pløjning eller harvning forårsager store forskelle i overfladeruheden, som influerer på opmagasineringen af vand og hastigheden af det rindende vand. Pløjeretningen kan ændre LS-forholdene og kørsel med tunge

redskaber kan medføre traktose, som formindsker infiltrationskapaciteten.

I relation til vand bestemmes erosionen også af faktorer, som ikke umiddelbart kan tilskrives en enkelt af de ovenfor nævnte. Måttet hydraulisk ledningsevne, frostdybde, dræningstilstand og dybde til grundvandet er afgørende for forekomsten af måttet overfladeafstrømning, som nok er den væsentligste årsag til vanderosion i vort klima.

Erosion i vandløbene og deres umiddelbare nærhed bestemmes af dræningstæthed, rørlægning og regulering, som influerer på fald og skråningslængde.

Som det fremgår af ovenstående meget kortfattede beskrivelse af de forhold, der øver indflydelse på erosion i Danmark, er der tale om komplicerede processer med et næsten uendeligt antal kombinationsmuligheder. Emnets karakter er derfor også tydeligt tværvideenskabelig.

Det forekom oplagt at inddrage matematiske modeller som fx SHE, SEM (Nielsen & Styczen, 1986) og WEPP (Foster & Lane, 1987) i vurderingen af erosions betydning. Desværre var ingen af disse modeller i stand til inden for NPO-projektets tidsramme at behandle effekten af frost og rilledannelse, som har væsentlig betydning i Danmark. Det må imidlertid påregnes, at der i nær fremtid fremkommer modeller uden disse mangler.

Det blev derfor besluttet at foretage en vurdering udfra en tillempning af USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier & Smith, 1978), som i sin opbygning ligger tæt op ad det oven-

for behandlede funktionsudtryk:

$$E = R * K * LS * C * P$$

Til trods for de indvendinger, der er rejst mod USLE i de senere år, mener vi, at det er rimeligt at anvende den for at opnå en oversigt over erosionspotentialet i Danmark. I den oversigtsmæssige behandling er det valgt kun at lade de "permanente" faktorer K og LS indgå. Valget er dels begrundet i, at ADK råder over landsdækkende digitaliserede data for disse faktorer og dels i fordelene ved at kunne sammenligne danske resultater med resultater fra andre lande, hvor USLE har været anvendt.

USLE giver et estimat af det gennemsnitlige årlige jordtab fra de mest almindelige former for erosion. Ligningen fortæller imidlertid intet om, hvor stor en del af det tabte materiale der når frem til vandløbene. En vurdering heraf kræver enten anvendelse af en hydrologisk model eller, som det er valgt her, at inddrage simple relationer, hvori afstanden til vandløb indgår. De teoretiske beregninger af erosionen må afprøves i forhold til faktiske iagttagelser og målinger af denne, før de kan bruges til en kvantitativ vurdering.

De feltmålinger af erosionen, som er beskrevet i kapitel 2, og målinger i erosionsfelter, som er behandlet i kapitel 3, er derfor vigtige elementer i en kontrol af dette kapitels udsagn om erosionens betydning.

3. METODIK

3.1 Kort over erosionsrisiko

Til beregning og konstruktion af landsdækkende

og regionale erosionsrisikokort anvendes Universal Soil Loss Equation (USLE) i kombination med den landsdækkende jordbundsdatabase ved Statens Planteavlsvforsøg, Afd. for Arealdata (ADK).

Modificeret USLE

USLE er udviklet i USA og beskriver vanderosion p.g.a. nedbør. Den medtager ikke vanderosion forårsaget af snesmeltning på frossen jord. Det er nødvendigt ud fra den nuværende viden og datagrundlaget at foretage en række antagelser, der gør USLE mere simpel og dermed operationel, således at ADK's jordbundskort og analysedata kan transformeres til et erosionsrisikokort. Følgende overordnede antagelser er gjort:

- nedbørens erosivitet er den samme på landsplan,
- markerne er vegetationsfrie,
- ved jordbearbejdning pløjes vinkelret på højdekurverne.

Hermed kan USLE forkortes til $K * L * S$, dvs. en funktion af jordens erodibilitet (K), skråningslængde (L) og gradient (S).

Basisdata til beregning af erosionsrisiko

Basisdata til beregning og konstruktion af erosionsrisikokort er Den Danske Jordklassificerings basisdatakort i 1:50.000, geomorfologisk kort i 1:100.000 og kort over underjordens tekstur. Endvidere indgår ca. 40.000 teksturanalyser af pløjelaget og jordbundsfysiske og -kemiske data for ca. 1000 profiler. Alle data ligger i ADKs databasesystem og er beskrevet i ADK (1989). De anvendte data vil blive beskrevet nøjere i de efterfølgende afsnit om beregning af K, L og S-faktorerne.

FARVE- KODE	TEKSTURDEFINITION FOR JORDTYPE	Symbol	JB- nr.	Vægtprocent				
				Ler under 2 µm	Silt 2-20 µm	Finsand 20-200 µm	Sand, igll 20-2000 µm	Humus 58,7% C
1	Grovsandet jord	GR.S	1			0-50		
2	Finsandet jord	F.S.	2	0-5	0-20	50-100	75-100	
3	Grov lerblandet sandjord	GR.L.S	3			0-40		
	Fin lerblandet sandjord	F.L.S.	4	5-10	0-25	40-95	65-95	
4	Grov sandblandet lerjord	GR.S.L	5			0-40		
	Fin sandblandet lerjord	F.S.L	6	10-15	0-30	40-90	55-90	Under 10
5	Lerjord	L.	7	15-25	0-35		40-85	
6	Svær lerjord	SV.L	8	25-45	0-45		10-75	
	Meget svær lerjord	M.SV.L	9	45-100	0-50		0-55	
7	Siltjord	St.	10	0-50	20-100		0-80	
8	Humus	HU.	11					Over 10
	Speciel jordtype	SPEC.	12					

Tabel 4.1

Definition af farvekoder og jordtyper efter Den Danske Jordklassificering.

Beregning af jord-
erodibilitet
(K-faktor)

Der anvendes to metoder til beregning af jordens erodibilitet, Wischmeier et al. (1971) og Vogl & Becher (1985).

Førstnævnte udviklede på basis af eksperimentelle serier på 55 forskellige jorde i USA det på fig. 4.1 viste nomogram. Dette er blevet testet på jorde med kendt K-værdi, og det er fundet anvendeligt på normal landbrugsjord og på blottet underjord. De fem parametre, der er nødvendige for beregning af K, er % silt + meget fint sand (2-100 µm), sand (100-2000 µm), % organisk stof samt jordens struktur og permeabilitet. De tre første parametre kan normalt fås ved standard laboratorieanalyser, mens de to sidste fås fra profilstudier.

I det aktuelle tilfælde beregnes K-faktoren på de 40.000 lokaliteter, hvor der er udtaget prøver af pløjelaget til Den Danske Jordklassificering. Information om tekstur og organisk stof fås direkte, mens information om struktur og permeabilitet fås fra jordprofil-databasen. Jorde med mere end 5 % organisk stof udelades af beregningerne, jvf. fig. 4.1. For nærmere beskrivelse af metoden henvises til Madsen et al. (1986).

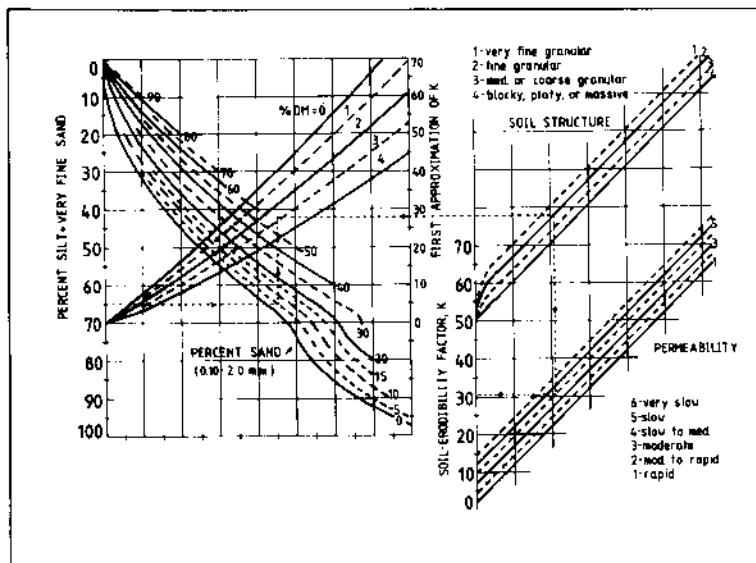


Fig. 4.1
Nomogram til beregning af jordens erodibilitet. (Efter Wischmeier et al., 1971)

Tekstur <10 μm %	Organisk stof %							
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
0-10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07
10-13	0.22	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15
14-18	0.32	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22
19-23	0.38	0.36	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25
24-29	0.45	0.43	0.41	0.38	0.36	0.34	0.31	0.29
30-44	0.53	0.50	0.48	0.45	0.43	0.40	0.38	0.35
45-60	0.39	0.37	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26
60-	0.22	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15

Tabel 4.2

Jordens erodibilitet i relation til tekstur og indhold af organisk stof (efter Vogl & Becher, 1985). K-værdierne for over 3.0 % organisk stof er ekstrapolerede.

Vogl & Becher (1985) har på basis af erosionsundersøgelser på forskellige jordtyper i Bayern opstillet de i tabel 4.2 viste K-værdier for tyske jorde. K-faktoren beregnes ud fra, hvor mange % af den mineralske fraktion der er under 10 μm og indholdet af organisk stof. De angivne K-værdier kan justeres op eller ned, såfremt struktur og permeabilitet afviger fra det normale. Grunden til, at tyskerne selv har udar-

bejdet en K-værdi tabel, er, at Wischmeiers nomogram synes at underestimere K-værdien på lerede jorde.

I det aktuelle tilfælde beregnes K-faktoren på de samme ca. 40.000 lokaliteter, som er anvendt på nomogrammet. På alle lokaliteter beregnes fraktionen under 10 µm ved interpolation mellem 2 µm og 20 µm. Da Vogl & Becher (1985) kun angiver K-værdier op til 3 % organisk stof, har det været nødvendigt at ekstrapolere K-værdier op til 4.5 % organisk stof. Der er endvidere ved beregningerne ikke taget hensyn til afvigende struktur- og permeabilitetsforhold, der kan give anledning til justeringer i K-værdien med op til ±0.15.

Terrænfaktoren LS

Jorderosionen afhænger af både skråningslængden og af gradienten. Morgan (1980) beskriver LS-faktorens indflydelse på erosionen på følgende måde:

$$LS = \sqrt{\frac{L}{100}} (0.136 + 0.097 * S + 0.0139 * S^2),$$

hvor

L = længden i meter og S = gradienten i %.

Formlen viser, at erosionen bliver større, såfremt skråningen bliver længere eller stejlere. Det fremgår endvidere, at især en ændring i gradienten påvirker LS-faktoren.

Ved kortlægning af erosionsrisikoen på landbrugsjord anvendes Morgans LS-faktor. Den udregnes for hvert punkt, til hvilket der er udregnet en K-værdi. Beregningerne foretages ud fra følgende forudsætninger:

- L-faktoren sættes i alle forhold til 100 meter, idet det ikke på nuværende tidspunkt er muligt at angive individuelle skråningslængder ved landsdækkende undersøgelser. Ud fra studier af topografiske kort er de 100 meter

fundet som værende en realistisk værdi.

- Gradienten S ved de undersøgte punkter findes efter nedenstående retningslinier, afhængig af hældningen angivet på Den Danske Jordklassificerings basisdatakort og landskabstype.
- Alle punkter, der ligger i områder med hældning over 12° , tildeles en hældning på 27 %, altså $S = 27$.
- Alle punkter, der ligger i områder med hældning mellem 6° og 12° , tildeles en hældning på 14 %, altså $S = 14$.
- Alle punkter, der er i områder med hældning under 6° , tildeles en hældning, alt efter hvilket landskabselement de tilhører. Følgende værdier er anvendt: ung moræne 3 %, bakkeø 1 %, hedeslette 0.1 %, klit 0.1 %, yoldia 0.05 %, littorina 0.05 %, marsk 0.05 %, inddæmnet 0.05 %.

Konstruktion af
erosionsrisikokort

For hvert enkelt punkt ganges K -værdien med LS -værdien, hvorved hvert punkt får en KLS -værdi, eller en erosionsrisikoværdi. Kort visende de enkelte punkters KLS -værdi kan derefter umiddelbart udtegnes.

Et fladedækkende kort kan derefter konstrueres ved, at de klassificerede punkter grupperes efter farvekode (se tabel 4.1) for landskabselement, leret/sandet underjord, samt om de ligger i hældningsklasse $> 12^\circ$, $6-12^\circ$ eller $< 6^\circ$. Derefter udregnes for hver gruppe den gennemsnitlige KLS -værdi, fx 0.32 for $FK1$, bakkeø, sandet underjord, hældningsklasse $6-12^\circ$. Skove, andre naturarealer og byzoner udtegnes i laveste KLS -klasse, da de aldrig vil ligge hen som bar jord, og $FK7$ og $FK8$ -arealer udtegnes som ikke klassificeret, da det ikke er muligt at beregne K -værdien for disse jorde.

3.2 Risiko for sedimenttilførsel til vandløb

Det er rimeligt at antage, at risikoen for erosion fra et areal er proportional med det rindende vands energi, udtrykt som $q * S$, hvor q er vandmængden, som indenfor et tidsrum passerer hen over arealet, og S er arealets hældning (fald) (Engelund & Hansen, 1972). Vandmængden kan ikke måles, men skråningslængden (opsamlingsareal pr. enhed skråningsbredde) kan anvendes som en tilnærmelse til q , hældningen udtrykker faldhøjden fra én flade til en nabo-flade. Erodibiliteten K kan opfattes som et mål for, hvor effektivt energien udnyttes til erosion for en given jords vedkommende, jo højere K jo større effektivitet og jo mere erosion.

Ovenstående leder til et udtryk for erosionsrisiko af følgende form: $K * L^a * S^b$, hvor a og b er konstanter. På grund af ligheden med USLE benyttes samme bogstaver. Eksponenterne kendes ikke, men hvis mulighed for sammenligning ønskes, kan LS-faktoren fra USLE benyttes. K -værdien fra USLE, som er større end 0 og mindre end 1, kan også anvendes, men i denne sammenhæng opfattes den som dimensionsløs.

Risikoen for, at erosionsmaterialet fra et areal når frem til et vandløb, antages at variere omvendt proportionalt med afstanden D til vandløbet målt i faldlinien. Risikoen for vandløbet kan udtrykkes generelt som angivet nedenfor:

Risikotal
ER

$$ER = \frac{K * L^c * S^d}{D^e}$$

hvor K , L og S er nævnt ovenfor og c , d og e er konstanter. Det er her forsøgsvis antaget, at e

= 2, d = 1 og c = 2, hvorved udtrykket bliver dimensionsløst (Hasholt et al., 1989). Et alternativ til dette vil være at anvende det udtryk for LS-faktoren, som foreslået af Morgan (1980), og som er anvendt ved den landsdækkende kortlægning af erosionsrisikoen.

4. RESULTATER

4.1 Erosionsrisiko

Af de næsten 40.000 lokaliteter, hvor information om tekstur findes i ADKs database, kan de ca. 35.000 klassificeres med hensyn til erodibilitet efter Wischmeier et al. (1971) og Vogl & Becher (1985). Tabel 4.3 viser maksimum-, middel- samt minimumsværdierne for K i relation til farvekoden (se tabel 4.1). Det generelle billede er, at sandjorde har en lav erodibilitet. Erodibiliteten stiger til et maksimum ved et lerindhold på ca. 15 %, hvorefter der er en tendens til faldende erodibilitet.

Det bemærkes, at for jorde med over 10 % ler (FK4-6) giver Vogl & Becher en højere erodibilitet end Wischmeier, mens den generelt er den samme for jorde med under 10 % ler, bortset fra de finsandede jorde, hvor der er meget stor forskel mellem de to metoder. Efter Vogl & Becher er erodibiliteten den samme for finsandede og grovsandede jorde, mens den efter Wischmeier er 3 gange så stor for de finsandede. I relation til teksturinddelingen efter Den Danske Jordklassificering har erodibiliteten efter Vogl & Becher et mere jævnt forløb end efter Wischmeier.

Tabel 4.4 viser KLS-værdierne for de ca. 35.000

		Wisch- meier	Vogl & Becher
FK1	Min	0.05	0.07
	Mid	0.08	0.08
	Max	0.33	0.22
	S	0.03	0.01
	N	7333	7333
FK2	Min	0.08	0.07
	Mid	0.25	0.09
	Max	0.62	0.26
	S	0.08	0.02
	N	4330	4330
FK3	Min	0.05	0.07
	Mid	0.21	0.20
	Max	0.52	0.41
	S	0.07	0.07
	N	10619	10619
FK4	Min	0.08	0.18
	Mid	0.29	0.32
	Max	0.63	0.48
	S	0.05	0.04
	N	9013	9013
FK5	Min	0.10	0.25
	Mid	0.28	0.39
	Max	0.46	0.53
	S	0.04	0.05
	N	3051	3051
FK6	Min	0.11	0.15
	Mid	0.23	0.34
	Max	0.49	0.50
	S	0.06	0.08
	N	191	191

Tabel 4.3

Gennemsnitlig K-værdi for forskellige FK-værdier udregnet efter Wischmeier et al. (1971) og efter Vogl & Becher (1985). N = antal observationer. S = standardafvigelse.

KLS-værdi	Antal prøver	%	Akk.%
0.01 - 0.10	15823	45.8	45.8
0.11 - 0.20	17597	51.0	96.8
0.21 - 0.50	495	1.4	98.3
0.51 - 1.00	177	0.5	98.8
1.01 - 1.50	321	0.9	99.7
1.51 - 3.00	57	0.2	99.9
3.01 - 5.00	49	0.1	100.0

Tabel 4.4

Den kumulative fordeling af KLS-værdier. K-værdier udregnet efter Wischmeier et al. (1971).

Hældning	Min	Mid	Max	N	S
0 - 6°	0.01	0.10	0.33	33838	0.06
6° - 12°	0.23	1.00	1.98	588	0.35
12° -	0.72	2.97	4.90	93	1.05

Tabel 4.5

Minimum-, middel- og maksimumværdier for KLS i de forskellige hældningsklasser. N = antal prøver. S = standardafvigelse.

lokaliteter, på hvilke K-værdien blev udregnet efter Wischmeier et al. (1971).

Langt hovedparten af lokaliteterne har en lav KLS-værdi, ca. 97 % under 0.2. I kortlommen bag i rapporten er der et landsdækkende kort, der viser KLS-værdien for de ca. 35.000 undersøgte punkter. Det bemærkes, at det unge morænelandskab generelt har lidt højere KLS-værdi end de øvrige landskabsformer, og at de høje KLS-værdier næsten udelukkende er knyttet til denne landskabsform. Den højeste KLS-værdi, der er fundet, er beliggende i denne landskabstype og er på 4.90.

Som det fremgår af tabel 4.5, er de høje KLS-værdier udelukkende knyttet til arealer, der er stærkt hældende. Det er derfor muligt at få et groft overblik over de erosionstruede områder ved at udtegne de stærkt hældende landbrugsområder, dvs. over 6° hældning.

På Fig. 4.2 ses et kort over Fyn, hvor landbrugsjorder med hældning på over 6° er udtegnede. På landsplan hælder ca. 3 % af landbrugsjorden mere end 6°, og lidt under 1 % hælder over 12° (Madsen et al., 1987). Det vil især være vegetationsløse marker inden for dette areal, som er erosionstruede.

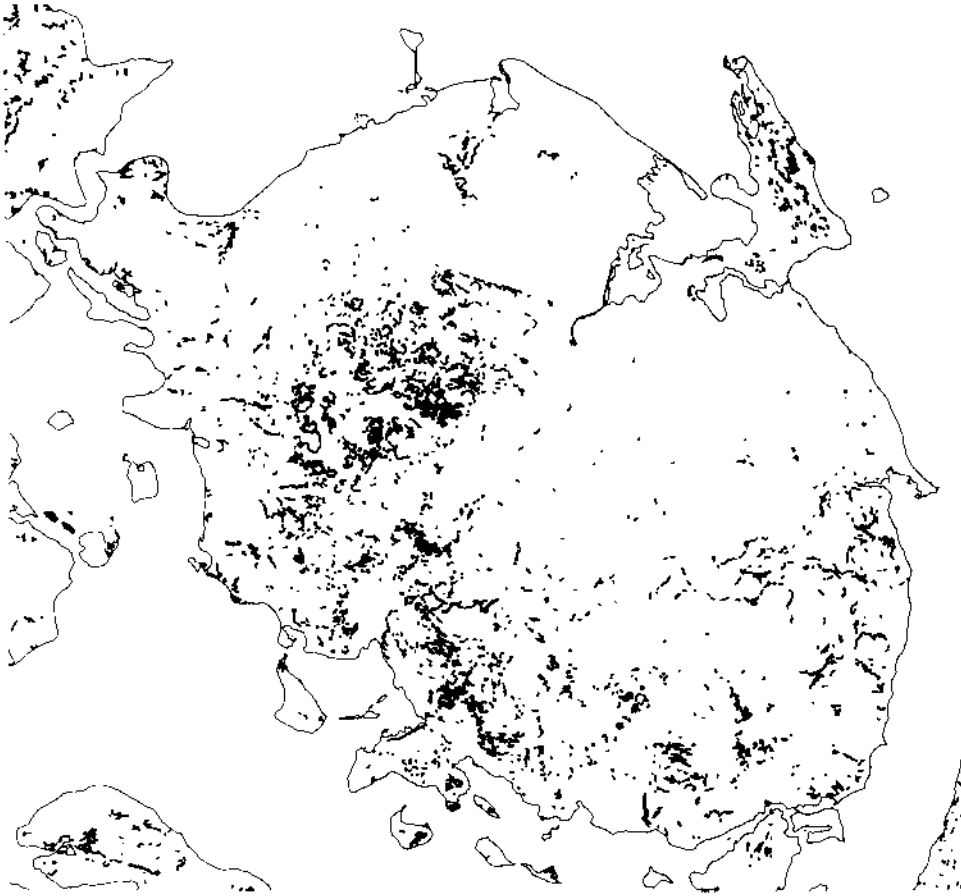


Fig. 4.2
Landbrugsjorder på Fyn med over 6° hældning. (Efter
Madsen et al., 1987).

Tabel 4.6 viser den gennemsnitlige KLS-faktor for det unge morænelandskab og de øvrige landskabstyper i relation til farvekode, underjordens tekstur og hældningsklassen. Kun grupper med over 5 observationer er medtaget.

Tabel 4.6 viser, at erosionsrisikoen er større på jorde med leret underbund end sandet - alt andet lige - og at den største erosionsrisiko findes i jorde med ca. 15 % ler i topjorden. I det unge morænelandskab er erosionsrisikoen ca. 20-25 gange større i hældningsklassen > 12° end

Hældning	FK1		FK2		FK3		FK4		FK5		FK6		
	Sand	Ler	Sand	Ler	Sand	Ler	Sand	Ler	Sand	Ler	Sand	Ler	
A													
0-6°	M	0.05	0.07	0.12	0.15	0.10	0.14	0.14	0.16	0.13	0.16	0.12	0.13
	S	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03
	N	1697	394	1654	236	2891	4450	710	7596	134	2670	19	138
6-12°	M	0.46	0.56	1.05	-	0.74	1.07	1.12	1.27	-	1.19	-	0.82
	S	0.15	0.12	0.34	-	0.27	0.22	0.25	0.17	-	0.16	-	0.18
	N	53	11	35	-	97	124	27	154	-	45	-	6
12°-	M	1.13	-	2.93	-	2.68	3.24	-	3.71	-	3.82	-	-
	S	0.26	-	0.83	-	0.61	0.51	-	0.69	-	0.39	-	-
	N	7	-	9	-	12	19	-	25	-	9	-	-
B													
0-6°	M	0.01	0.02	0.04	0.06	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.05	0.03	-
	S	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-
	N	4363	272	1021	26	1808	495	257	103	102	7	8	-

Tabel 4.6

Den gennemsnitlige KLS-faktor i det unge morænelandskab (A) og øvrige land- skabstyper (B) i relation til hældning. Sand = sandet underjord. Ler = leret underjord. M = middelværdi for KLS. S = standardafvigelse. N = antal prøver.

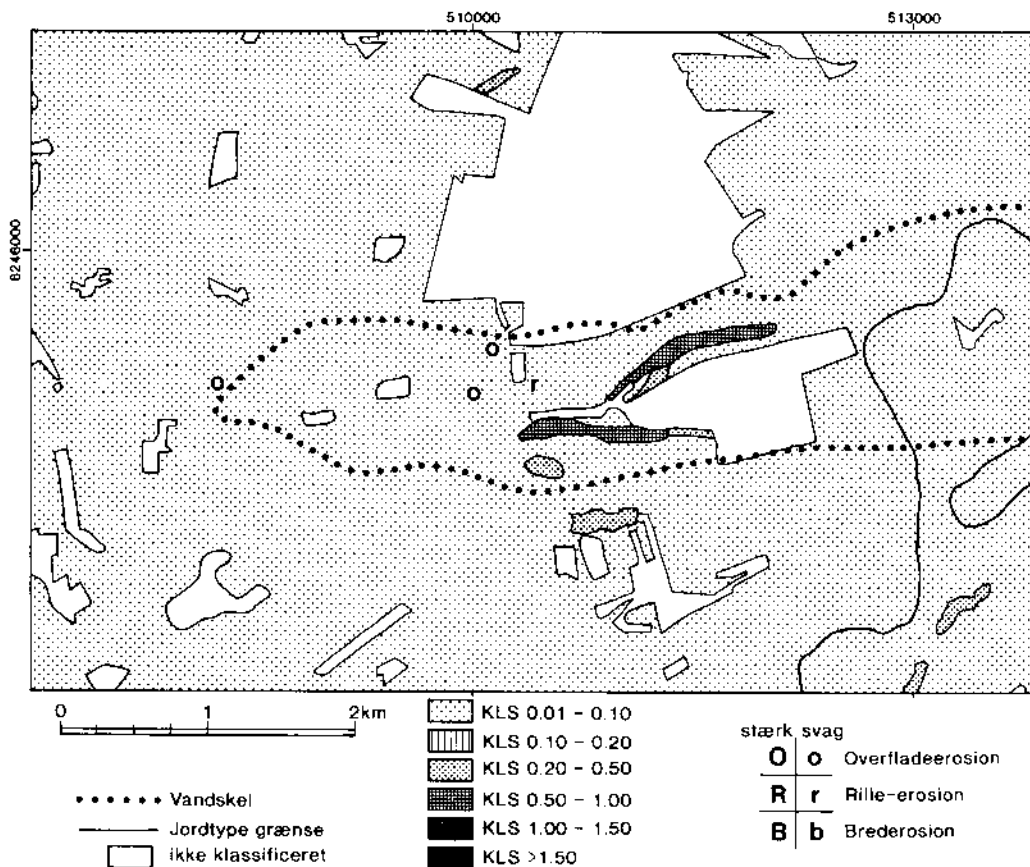


Fig. 4.3

KLS-værdier og forekomst af erosion ved Rabis.

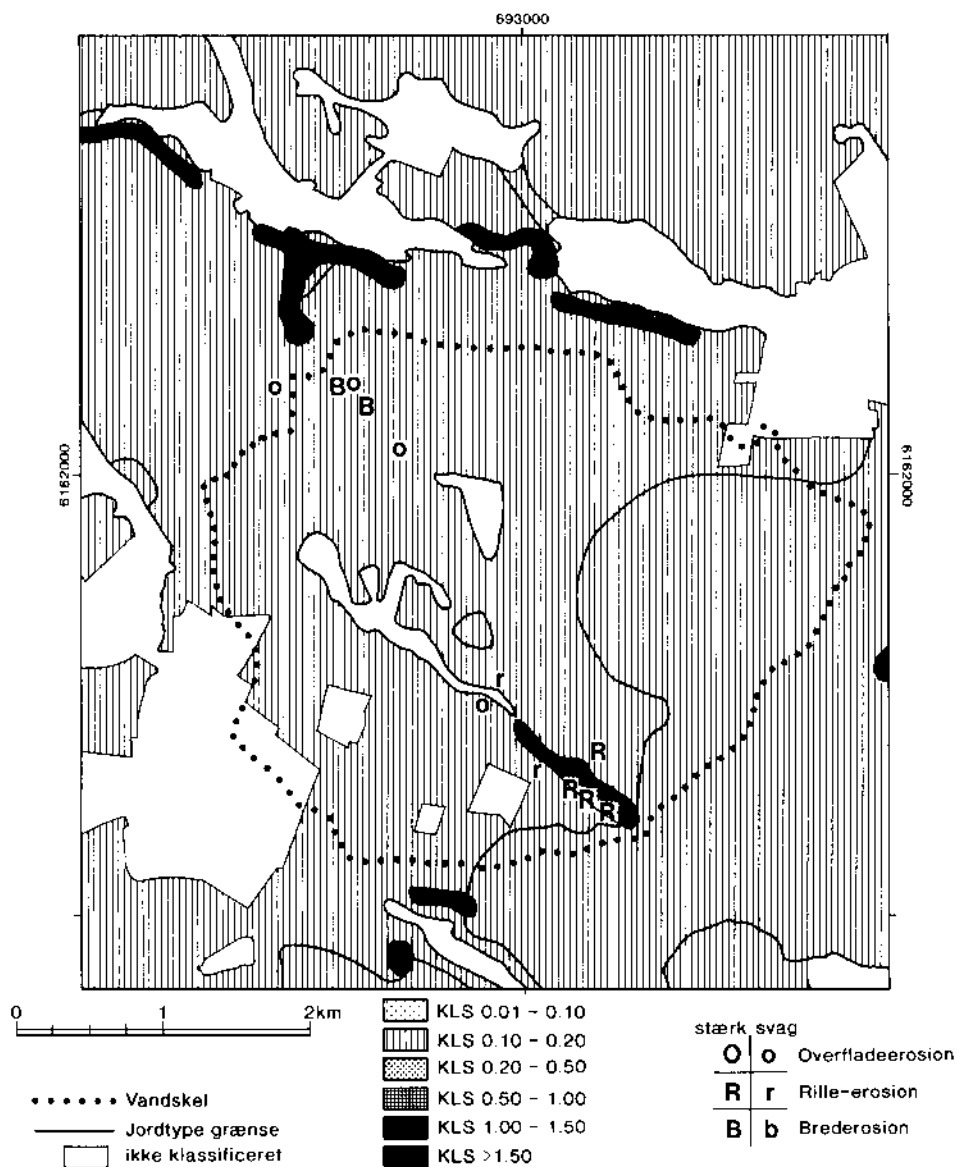


Fig. 4.4
KLS-værdier og forekomst af erosion ved Langvad.

for 0-6°, og den er 50-100 gange større end hældningsklassen 0-6° for de øvrige landskabstyper.

4.2 Erosionsrisikokort over detailområder

På fig. 4.3 og 4.4 er erosionsrisikokort udtegnet for de to værkstedsområder, Rabis og Lang-

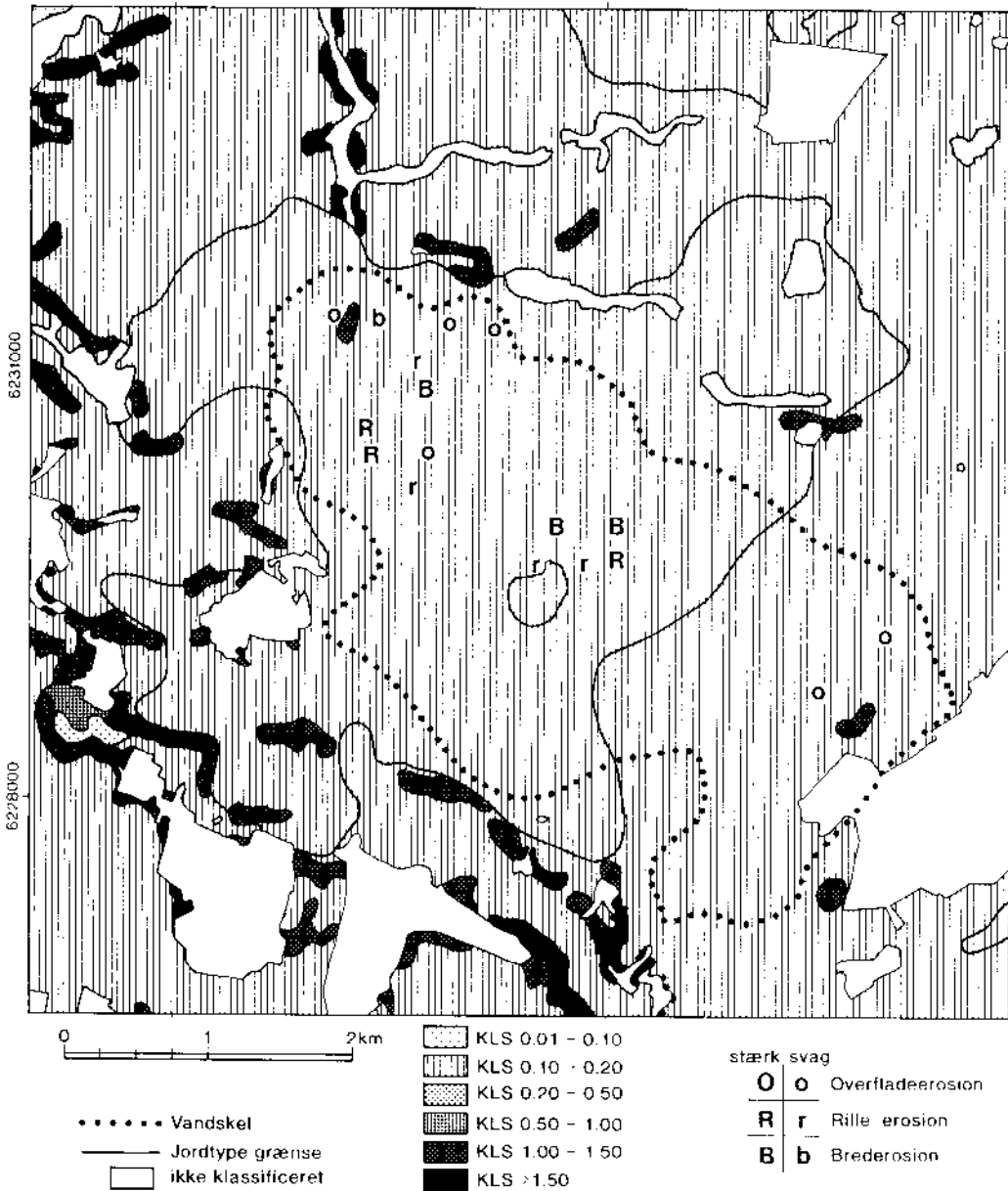


Fig. 4.5
 KLS-værdier og forekomst af erosion ved Gelbæk.

vad, samt for Gelbæk på fig. 4.5. I modsætning til det landsdækkende kort er disse fuldtegnede kort, hovedsageligt konstrueret på basis af tabel 4.6. Der er på kortene endvidere indtegnet, hvor diffus overfladeerosion og rilleerosion er blevet observeret.

4.3 Feltobservationer af erosion

I de to foregående afsnit er resultaterne af de teoretiske overvejelser om erosionsrisiko vist. I dette afsnit behandles faktiske observationer af erosion med henblik på en vurdering af de teoretiske overvejjelsers anvendelighed. Observationerne er som nævnt i kapitel 2 fremkommet i forbindelse med de ugentlige tilsyn og kampanjerne i vinterhalvåret. Erosionens forekomst er vurderet efter sværhedsgrad: Vand på overflader, tydelig flytning af sediment, diffus overfladeerosion (sheet erosion), rilledannelse og kraftig rilledannelse (rill erosion).

Diffus overfladeerosion er iagttaget mange steder alle år i alle 3 områder. Rilledannelse er iagttaget i 1987/88 i alle områder og i 1989/90 kun i Gelbæk og Langvad. På kortene over de tre områder fig. 4.3 - 4.5 er vist et udvalg af de steder, hvor diffus overfladeerosion er set, og samtlige steder hvor rilledannelse er konstateret. Da kun rilleerosionen kan kvantificeres ved opmålinger, er der kun ganske få steder, hvor erosionens størrelse kan beregnes.

Overfladeerosion

En indirekte vurdering af effekten af diffus overfladeerosion kan fås ved en betragtning af fosforindholdet i overfladejorden. Såfremt der er sket erosion på en skråning, må det forventes, at fosforindholdet midt på skråningen er mindre end ved foden og på toppen. Dette skyldes, at erosionen er kraftigst midt på skråningen, hvorfra den borteroderer den fosforrige finfraktion, som aflejres for foden af skråningen. Der er derfor indsamlet prøver i faldlinien på skråninger ned mod vandløb, se fig. 4.6. På fig. 4.7 - 4.9 ses fosforindholdet øverst på skråningen og ved dennes fod afbildet

Fig. 4.6
Princip for prøve-
tagning.

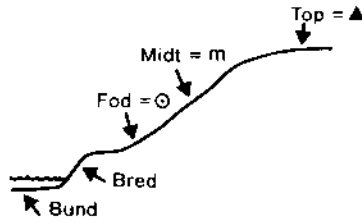


Fig. 4.7
Rabis, fosforind-
hold i forhold til
morfologi.

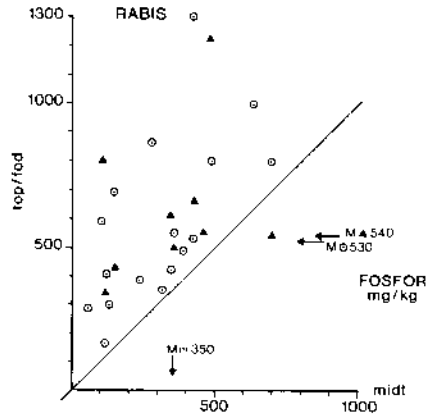


Fig. 4.8
Gelbæk, fosforind-
hold i forhold til
morfologi.

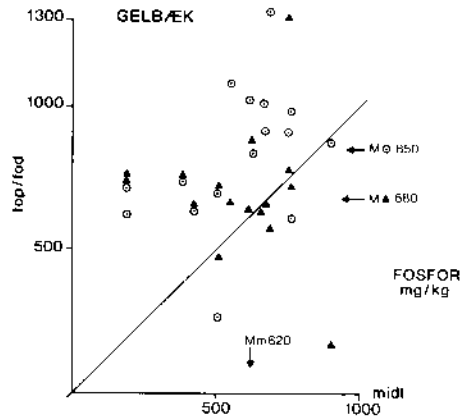
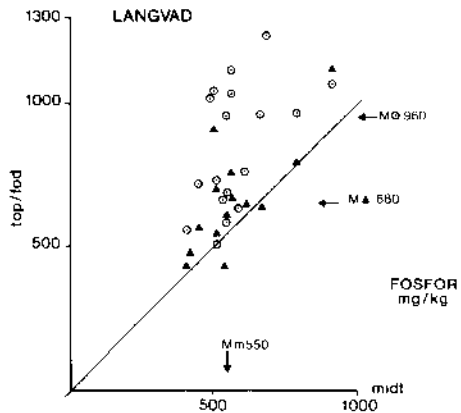


Fig. 4.9
Langvad, fosforind-
hold i forhold til
morfologi.



Loka- litet	K	KLS	ER	ERM t	ERMA t/km ²	ERMV t	Lf' %	P kg
<u>1987/88</u>								
Rabis	0.08	0.08	~ 0	0.5	35	0	0	0
Gelbæk	0.3	0.22	37.6	47	1860	6.3	13	3.5
Langvad	0.3	1.57	3.1	6.6	228	<0.7	10	0.4
<u>1989/90</u>								
Gelbæk	0.3	0.29	0.06	28	303	~ 0	0	0
Langvad	0.3	1.57	3.1	5.4	182	0.8	15	0.4
Holtum	0.3	0.75	18.8	55	1410	2.3	4	0.8

Tabel 4.7

Kvantificerede større erosionshændelser (riller). K = erodibilitet. KLS = risiko for erosion på mark. ER = risiko for tilførsel til vandløb. ERM = borteroederet jord. ERMA = borteroederet jord pr. arealenhed. ERMV = jord til vandløb. Lf' = leveringsforholdet ERMV/ERM. P = fosfor til vandløb.

i forhold til indholdet midt på skråningen. Det ses tydeligt, at fosforindholdet er mindst midt på skråningen. Trods gødskning ses samme mønster alle tre år. Dette bekræfter tilstedeværelsen af erosion på midten af skråningen og aflejring ved foden.

En anden metode til vurdering af erosionen er at måle muldlagets tykkelse, der ved erosion vil blive tykkere for foden af en skråning end på midten. Sådanne undersøgelser er dog ikke foretaget.

En kvantificering af diffus overfladeerosion findes i kapitel 3, som behandler undersøgelser i erosionsfelter i Rabis og Langvad. Der er rimelig overensstemmelse mellem KLS-faktorens variation og variationen i målte værdier fra felt til felt i 1987/88, hvor der har været erosion.

Rille-erosion

Resultater af rillemålingerne er vist i tabel 4.7. Med undtagelse af rillerne ved Holtum Å, som er medtaget for at udvide det sparsomme antal observationer, kan rillerne lokaliseres på kortene i afsnit 4.2. Volumet af sediment, som er borteroederet ved dannelsen af rillerne, er målt og omregnet til vægt ved multiplikation med en rumvægt på 1.5 t/m³. Dannelsen af en en-

kelt rille har medført flytning af ca. 6 t jord ved Holtum Å.

Rilleerosionen har været mindst i Rabis og størst ved Gelbæk. Erosion pr. arealenhed er fundet ved at dividere den pågældende marks eller skrånings areal op i vægten af bortroderet jord. Den største værdi fås i Gelbæk med ca. 2.000 t/km². Mængden af jord (vægt), som når frem til selve vandløbet, er fundet som en differens mellem den mængde jord, som er fjernet på skråningen ved rilledannelsen, og den mængde sediment, som er aflejret ved foden. Tallet er derfor behæftet med en betydelig usikkerhed. Størst er mængden ved Gelbæk, hvor den udgør ca. 13 % af rilleerosionen og mindst i Rabis, hvor den er 0. Fosfortilførslen til vandløbet er fundet ved at multiplicere vægten af jord, som når vandløbet, med jordens fosforindhold, mg/kg. I tabel 4.7 er også angivet erodibiliteten og de teoretiske risikoparametre for markerne med rilledannelse. Det ses, at rilledannelse har fundet sted på jorde med en K faktor fra 0.08 - 0.30 og med en KLS faktor fra 0.08 - 1.57. De fundne risikofaktorer for erosion på marken korrelerer dårligt med den faktiske erosion. En lidt bedre sammenhæng ses mellem ER-tallet og mængden af jord og fosfor, som når vandløbet. Der er dog for få observationer til at foretage en statistisk vurdering.

5. DISKUSSION

5.1 Forekomst af erosion

Det landsdækkende kort, se kortlommen, viser variationen af KLS baseret på de indsamlede

jordprofildata. Hvis der derfor ikke er profildata fra et område med stor hældning, vil dette ikke fremtræde som erosionstruet. For at få et mere detaljeret indtryk af lokaliseringen af erosionstruede områder i Danmark må detaljerede kort i fx 1:25.000 udarbejdes efter de retningslinier, der er anvendt for detailkort over værkstedsområderne. Det landsdækkende korts udpeging af det unge morænelandskab som det mest erosionstruede og de vestjyske hedesletter som de mindst truede områder virker realistisk og i overensstemmelse med de erfaringer, som er opnået i forbindelse med projektets gennemførelse. På grund af det store datamateriale vil de udsagn, som er fremkommet om de forskellige jordbundstypers sårbarhed over for erosion, gives et korrekt billede af disses forholdsmæssige betydning for erosionen i Danmark på arealbasis.

Forsøgsområderne er moderat eller svagt erosions-truede

Kortene over de tre udvalgte områder fig. 4.3 - 4.5 viser, at ingen af de tre områder er særligt erosionstruede sammenlignet med fx de øvre dele af Susåens opland (Hasholt, 1989). Det mest erosionstruede område findes i den øvre del af Langvad området; feltundersøgelserne viser da også tilstedeværelsen af erosion her. Rillerne i Gelbæk, som er konstateret ved kam-pagnerne, findes ikke på særligt truede områder; men en nøjere gennemgang af kurvebilledet på et topografisk kort viser, at de findes på små partier med større hældning, som er for små til at komme med på ADK's basiskort. Feltobservationerne viser, at erosion kan forekomme på skråninger, som hælder 0-6° den laveste klasse på ADK's kort. En differentiering af denne klasse ville være ønskelig, idet man i hvert fald må påregne, at rilleerosion kan foregå på skråninger, der hælder 3°. De få observationer

af erosion, som det har været muligt at foretage, bekræfter, at de teoretisk opstillede risikoværdier i grove træk udpeger erosionstruede arealer. Lignende parametre har været anvendt i Suså-området (Hasholt, 1989; Bojsen, 1987), hvor de viste sig egnede til at udpege områder med rilledannelse.

Selv om et område udpeges som erosionstruet, er det ikke sikkert, at der forekommer erosion. Det kan skyldes, at området er dækket af vegetation og dermed beskyttet mod regndråbernes og det rindende vands energi. Overfladens form, ruhed og retningen af kørespor og pløjning er også af stor betydning for forekomsten af erosion. Erfaringen fra feltmålingerne viser, at erosion hyppigere forekommer i konkave dele af skråningerne og på nedre dele af skråninger, hvor grundvandet står så højt, at mættet overfladeafløb forekommer. Rilledannelse er iagttaget i kørespor og andre steder, hvor overfladen er kompakt som følge af færdsel. Pløjning synes p.g.a. stor ruhed ikke umiddelbart at give anledning til erosion bortset fra de tilfælde, hvor pløjeretningen er uhensigtsmæssig. De overflader, som er mest erosionstruede, synes at være harvede, evt. tromlede såbæde med lille ruhed, enten bare eller med vinterafgrøde af hvede eller byg.

5.2 Retningslinier for vurdering af erosionsrisiko

Der findes talrige eksempler på metoder til vurdering af risiko for jorderosion, en gennemgang findes fx i Morgan (1980). I herværende undersøgelse er der lagt vægt på at tillemppe en kendt metode, USLE, til danske forhold. Ved tillem্পningen er den store mængde jordbundsdata

og topografiske oplysninger, som findes i ADK's database, søgt inddraget for at opnå en landsdækkende vurdering. På grund af de meget få erfaringer med vurdering af risiko for erosion, der haves i Danmark, er det fordelagtigt at kunne sammenligne de fundne danske tal med kendte værdier, selv om der kun kan blive tale om en relativ vurdering.

Erosionstrussel og marginalisering

Undersøgelsen udpeger arealer, som uden et passende vegetationsdække og en passende jordbearbejdning vil være udsatte for erosion. I forbindelse med debatten om marginalisering af landbrugsjord og etablering af beskyttelsesbrømmer langs vandløb indgår udpegningen af erosionstruede arealer som et væsentligt element. Erfaringerne fra undersøgelsen viser, at langt fra alle områder, som er truede, har betydning for vandløbene.

I det følgende gives derfor retningslinier for, hvorledes undersøgelsens resultater bedst udnyttes, og hvordan de kan nyttiggøres ved fremtidige vurderinger af erosion.

De landsdækkende kort over K, S og KLS, som kan fremstilles af ADK, kan give en grov oversigt over risikoen, når de kombineres med kort over vandløbssystemet.

Udpegning af truede arealer

Til en detaljeret udpegning af truede arealer kræves kort som de, der er vist eksempel på fra de tre forsøgsområder, kombineret med topografiske kort i skala 1:25.000. Til hjælp kan evt. yderligere inddrages jordbundskort, drænkort og hydrogeologiske kort. Et eksempel på kortlægning af erosionspotentielle områder findes i Bojsen (1989).

Risikoen, som arealer langs et vandløb udgør for vandløbet, kan findes på samme måde som ER-værdierne i tabel 4.7: På kortet afsættes punkter langs vandløbet med fx 100 m afstand. Fra disse punkter tegnes faldlinier til nærmeste lokale vandskel på begge sider af vandløbet. Afstanden langs faldlinien fra vandløbet til nærmeste skråning (D) bestemmes, skråningens fald (S) måles, og dennes afstand til vandskellet langs faldlinien (L) måles. Det er vigtigt at udnytte det topografiske kort til at se, om vejgrøfter, hegn el. lign. i faldlinien forkorter L og D. Når K-faktoren er bestemt ud fra ADK's kort eller jordbundsoplysninger, kan risikotallet ER beregnes.

Efterhånden som de topografiske kort foreligger i digitaliseret form, vil ovennævnte manuelle metode kunne erstattes af beregninger i digitaliserede terrænmodeller evt. sammenkoblet med egentlige erosionsmodeller fx SEM (Nielsen og Styczen, 1986). Da datakravene til sådanne modeller er meget store, vil det landsdækkende kort være nyttigt til udpegning af områder, hvor sådanne modeller med fordel kan bruges og til vurdering af modelberegningernes repræsentativitet på landsbasis.

5.3 Erosionsrisiko og vandløbstransport

En af ankerne mod USLE og andre simple modeller, som giver tal for jordtabet fra et areal som følge af erosion er, at det ikke kan forudsiges, hvor meget af det borteroderede materiale, der når frem til vandløb. Der foregår derfor et stort arbejde både i USA og Europa med at udvikle modeller, som er i stand til dette (Chisci & Morgan, 1988; Cooley, 1990).

Hensigten med feltmålingerne i herværende undersøgelse var at bestemme erosionens størrelse og bidrag til vandløbene og forbinde den faktisk målte erosion med de teoretisk beregnede risikotal. Derefter var det hensigten at beregne tilførslen til vandløb på grundlag af de enkelte risikoklassers andel af det samlede areal. Antallet af indtrufne målelige erosions-tilfælde ses i tabel 4.7. Det fremgår klart, at de få observationer ikke muliggør en beregning af tilførsel af sediment og fosfor på landsbasis.

Kun arealer tæt på vandløb har påvirket transporten

Undersøgelserne viser, at kun arealer med få hundrede meters afstand til vandløbene i Gelbæk og Langvad har kunnet bidrage med erosionsmateriale til transporten i vandløbene. Erosionsbidraget i undersøgelsesperioden er, bortset fra de tilfælde med rilledannelse, som er vist i tabel 4.7, kommet fra diffus overfladeerosion, som beskrives talmæssigt i Kapitel 3. I Rabis kan kun erosionsmateriale fra områder med mættet overfladeafløb i selve dalsbunden og fra de få arealer på dalsiderne, som ikke er dækket af permanent vegetation, nå frem til vandløbet.

Resultaterne viser, at der kan forekomme et betydeligt jordtab fra marker, der udsættes for rilleerosion. Samtidig ses det, at kun en begrænset del, mindre end 15 %, når frem til vandløbene. Undersøgelser i sammenlignelige områder i USA (Logan, 1979) viser, at 4-15 % på årsbasis af bruttoerosionen (dvs. det ud fra USLE beregnede jordtab fra markerne) når vandløbene. Procentandelen kaldes "leveringsforholdet" (efter engelsk: sediment delivery ratio). Det ses, at leveringsforholdet fundet ved herværende undersøgelse er af samme størrelsesorden.

Overlagsberegning af rilleerosionsbidrag

De ovenfor nævnte betragtninger kan anvendes til en meget grov overlagsberegning af tilførslen af sediment og fosfor til vandløb og søer i Danmark.

Beregningen af fosformængden tilført vandløbene ved rilleerosion i måleåret 1987-88:

1. Den gennemsnitlige dræningstæthed (km vandløb pr. km² opland, beregnet iflg. Miljøstyrelsen (1983) er 0.93.
2. Vanderosion vil kun forekomme indenfor landbrugsarealet (ca. 28.000 km²). Regnes med en reduktion på 50 % for "grønne marker", (den lave procentsats skyldes, at fx vinterhvedemarker kan have kraftig rilleerosion), vil det erosionstruede areal være 14.000 km².
3. Iflg. pkt. 1 findes heri 13.023 km vandløb.
4. Et areal på 100-300 m på hver side kan afgive erosionsmateriale. Det truede areal er da 2605-7814 km².
5. Der regnes med rilledannelse på 2 % af det truede areal, dvs. 52-156 km².
6. Områder med rilledannelse afgiver ca. 1000 t/km² (182-1860), og leveringsforholdet er 10 % (4-15 %) iflg. tabel 4.7.
7. Der regnes med ca. 500 mg P/kg jord, som når vandløb.
8. Der tilgår vandløb 2600-7800 kg P, dvs. 0.09-0.28 kg/km² landbrugsareal.

5.4 Måleperiodens repræsentativitet

Af de parametre, der indgår i de oven for viste overlagsberegninger, er det klart, at både det areal, der bidrager med erosionsmateriale, erosionstabet pr. arealenhed og leveringsforholdet vil afhænge af klimatiske og hydrologiske forhold. Der findes ingen undersøgelser af klimaet i Danmark med henblik på erosion. Erfar-

	87/88 P/N		88/89 P/N		89/90 P/N	
Nedbør, mm	875	1.32	571	0.86	391	1.25
Døgn m. nedbør over 10 mm	21	1.31	12	0.75	8	1.19
Frostdøgn	56	0.64	40	0.45	40	0.49
Isdøgn	7	0.30	3	0.13	5	0.22
Tordendøgn	20	1.82	8	0.73	2	2.25
Snedøgn	25	1.01	10	0.40	11	0.49
Snedækkedøgn	11	0.33	5	0.15	4	0.12

Tabel 4.8

Klimavariabel fra observationsperioden og deres forhold til normalværdier. P = periodens værdi. N = tilsvarende periodes normalværdi (1931-60).

ringerne fra litteraturen (Morgan, 1986) og fra feltundersøgelser viser, at stor nedbørsmængde, især med stor intensitet, regn på frossen jord og snesmeltning, kan forårsage erosion.

I tabel 4.8 er angivet udvalgte tilgængelige klimavariabel fra observationsperioden og tilsvarende normalværdier fra Danmark.

Unormalt varme
vintre

Det fremgår af tabellen, at hele undersøgelsesperioden har været karakteriseret ved et unormalt lavt antal frost- og isdøgn. Nedbørsmængden har i 1987/88 og 1989/90 været over normal, mens den i 1988/89 har været under normal. Antallet af dage med nedbør større end 10 mm er større end normalt i 1987/88 og 1989/90 og lavere end normalt i 1988/89.

Stor nedbør i
1987/88

Det må derfor antages, at den målte erosion i 1987/88 er i overkanten af normal, dog med forbehold for effekten af frost og sne. De tal, som er fundet for erosion i 1988/89 og 1989/90, ligger klart under normal og repræsenterer nærmest en minimumsværdi. Tidligere undersøgelser

(Bojsen, 1987; Ahlström & Bergman, 1988) viser, at erosionen er stor i forbindelse med regn på frossen jord og snesmeltning. Der må derfor advares mod at tolke de fundne lave værdier som repræsentative for Danmark, før der foreligger undersøgelser fra en periode med normale vinterforhold.

6. KONKLUSION

6.1 Erosion i Danmark

- De foretagne feltmålinger viser, at erosionen har været lille i undersøgelsesperioden okt. 1987 til marts 1990, begge måneder inkl. Den beskedne erosion tilskrives især et atypisk klima i perioden.
- Der er i alle år konstateret diffus overfladeerosion, men kun i 1987/88 og 1989/90 er der konstateret rilleerosion i forsøgsområderne.
- Ved rilleerosion er der på enkeltmarker konstateret flytninger på op til 2000 t/km², og det er vurderet, at op til 14 % af det flyttede materiale når frem til vandløbet.
- Der sker en selektiv transport af fosfor, idet den mere finkornede og fosforrige del af erosionsmaterialet transporteres længere end det grovkornede, og derfor lettere når frem til vandløbet.
- Undersøgelsesperioden er atypisk, idet der ikke har kunnet foretages observationer af erosion i forbindelse med tøbrud, snesmeltning og regn på frossen jord. De fundne erosionsværdier er derfor lavere, end man kan forvente under normale vintersituationer.

6.2 Risikoevaluering

- Der er udarbejdet en vurdering af risiko for jorderosion i Danmark (teoretisk jordtab pr. enhed erosiv regn under standardbetingelser), modificeret efter USLE, Universal Soil Loss Equation.
- Vurderingen viser, at mindst 3 % af arealet er potentielt erosionstruet. Områder, der hælder mere end 6°, vil næsten altid være erosionstruede; men også en del arealer med mindre hældning kan være truede. De erosionstruede områder er især beliggende på lerjorde i det unge morænelandskab, dvs. det østlige Danmark. Sandjorde i Vestjylland forventes ikke udsat for vanderosion i større omfang.
- Målinger viser, at erosion kan forekomme på arealer med mindre hældning end 6°; der er derfor et behov for at kunne differentiere områder med hældning mellem 0 - 6°.
- Der er vist eksempler fra forsøgsområderne på en mere detaljeret vurdering af risikoen for, at et givet areal eroderes og leverer materiale til vandløbene.
- Der er beskrevet en metode til vurdering af risiko for tilførsel af erosionsmateriale til vandløb. Det kan imidlertid anbefales at supplere med modelberegninger, efterhånden som der foreligger brugbare modeller, hvori indgår effekt af frysning, smeltning samt rilledannelse. Den landsdækkende oversigt kan anvendes til udpegning af, hvor modelberegning med fordel kan gennemføres.

KAPITEL 5

DISKUSSION AF JORDEROSIONENS BETYDNING

1. INDLEDNING

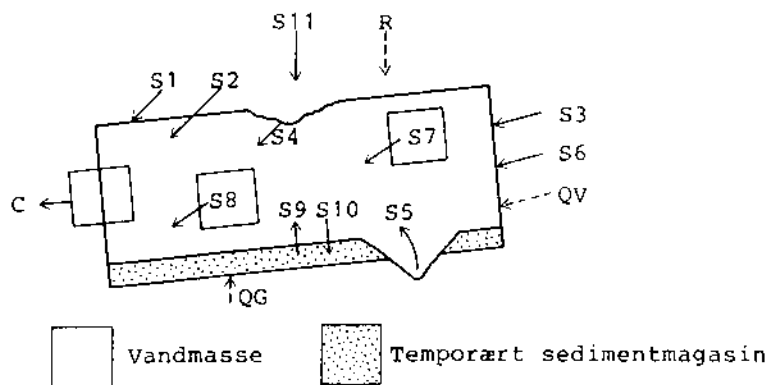
I dette kapitel vurderes resultaterne fra delundersøgelserne. Desuden inddrages data fra andre relevante undersøgelser, dels fra tidligere publikationer og dels fra publikationer som er fremkommet i undersøgelsesperioden.

2. DISKUSSION

2.1 Kildeopgørelser

Undersøgelsens hovedmål har været at vurdere jorderosionens betydning for transporten af sediment og fosfor i vandløb kvantitativt. For at kunne gøre dette må transportens kilder identificeres og om muligt alle kvantificeres. I fig. 5.1 (Hasholt, 1981) er vist de faktorer, som er bestemmende for koncentrationens størrelse. Den totale transport hidrører fra alle disse kilder, hvis bidrag varierer i tid og rum.

Kun S1 er det egentlige bidrag fra jorderosion, mens den samlede erosion omfatter S4 og S5 samt - i nogen grad - S2 og S3. Bemærk, at koncentrationen kan påvirkes af et temporært sedimentmagasin, S9 og S10. Et jorderosionsbidrag, S1, vil ikke forekomme alene, fordi vandmængden, der forårsager jorderosion, også vil øge S4, S5 og S9 samt evt. også S3 og S2. Den del af transporten, som ikke kan relateres til specifikke hændelser, kaldes basisbidraget. En helt skarp afgrænsning er ikke mulig; det omfatter S6, S7, S8 og S11 samt en del af S2, hvis spildevand indgår, og den langsomme ero-



Definitioner:

- Sediment fra:
- | | | | |
|----|-----------------------|-----|------------------------------|
| S1 | Overfladeafspuling | S8 | Biologisk Produktion |
| S2 | Dræn og grøfter | S9 | Bundsediment v. resuspension |
| S3 | Øvrige vandløbssystem | S10 | til bund v. sedimentation |
| S4 | Brederosion | S11 | fra luften |
| S5 | Bunderosion | R | Vand fra nedbør |
| S6 | Spildevand | QG | Vand fra overfladevand |
| S7 | Kemisk Udfældning | C | Vand fra grundvand |
| | | | Koncentration |

Fig. 5.1
Lodret snit af element i vandløbets længderetning.

sion (i geologisk tidsskala) fra S3. Totaltransporten minus basisbidraget giver et mål for det maksimale tilskud til transport fra jorderosion.

- | | |
|----------------------------|--|
| Metoder til kildeopgørelse | Kvantificeringen af kilderne, specielt erosionen, kan foretages på forskellige måder: |
| Enkelte processer | De enkelte erosionsprocessers bidrag kan måles direkte. Dette er meget arbejdskrævende, derfor foretages der - som her - oftest punktmålinger. Vanskeligheden består i at omsætte disse punktværdier til en værdi, der gælder for hele oplandet til transportmålestationen. |
| Transportberegning | Som nævnt ovenfor kan det samlede erosionsbidrag findes ved at sammenligne transporten som funktion af tid med samtidige registreringer af forekomst af erosion og erosionsrelevante klimaparametre. En detaljeret kildeopdeling er vanskelig, fordi de forskellige erosionspro- |

cesser ved større erosionshændelser forekommer samtidig.

Massebalance

Hvis alle øvrige kilder kendes, kan erosionsbidraget findes som en differens ved en massebalancebetragtning. Vurderingen af bidrag fra øvrige kilder indgår delvis i andre NPO-projekter. En væsentlig forudsætning for anvendelse af massebalancebetragtningen er, at sediment og fosfor når frem til målestationen i oplandet i løbet af undersøgelsesperioden.

I det følgende vurderes jorderosionens betydning i relation til ovenstående.

I tabel 5.1 er vist erosionsbidraget, fundet ud fra transportmålingerne i vandløbet. Det relative erosionsbidrag er ret konstant i Rabis,

	Rabis			Langvad		
	87/88	88/89	89/90*	87/88	88/89	89/90*
Total susp. t	96	42	15	96	18	18
Total susp. t/km ²	9.9	4.3	1.6	8.2	1.5	1.6
Org. susp. t	25	20	9	27	6	5
Org. susp. t/km ²	2.5	2.0	0.9	2.3	0.5	0.4
Erosion % af total susp.	24	29	17	76	45	82
Basis % af total susp.	76	71	83	24	55	18
Total P kg	584	413	188	853	405	219
Total P kg/km ²	60	43	19	73	35	19
Part. P kg	250	160	49	214	119	63
Part. P kg/km ²	26	16	10	18	10	5

*) Oktober-marts inkl.						

Tabel 5.1
Transportsummer.

men det absolutte er som forventet størst i 1987/88. De høje værdier i juni-juli 1989 (se fig. 2.1) er angivet som "erosion", men afvigelsen fra basisbidraget skyldes øget transport som følge af oprensning. I Langvad er både

	Rabis 87/88				Langvad 87/88				Reference
	Tot. susp. t/år	Tot. P kg/år	Tot. susp. t/år	Tot. P kg/år	Tot. susp. t/år	Tot. P kg/år	Tot. susp. t/år	Tot. P kg/år	
S11 Tør/våd deposition	1.6	1	1.6	1	0.8	0.5	0.8	0.5	Bojsen, 1987
S9 Oprensning etc.	2	1	9	6	4	2	2	1	NPO C12, del 1
S4, S5 Bred- og bunderosion	5-10	3-6	5-10	3-6	10	9	4	4	NPO C12, del 1
S1 Overfladeerosion	~0	~0.5-1	0	0.1-0.2	0.6-1.1	14-41	1.3-14	14-21	NPO C12, del 2
S1 Rilleerosion	0	0	0	0	<0.7	0.4	0	0	NPO C12, del 3
S2, S6 Drænbidrag inkl. spildevand	-	-	-	-	-	170-494	-	66-228	Hansen, NPO B9
S7 Kemisk udfældning	-	-	9.6	15-80	-	-	-	-	Brüsch, NPO C15
S8 Biologisk produktion	3	-	3	-	4	-	4	-	NPO C12, del 1
Sum	>12-17	>5.5-9	>28-33	>25-93	>20-21	>196-547	>12-25	>86-255	
Total	96	584	42	413	96	853	18	405	NPO, del 4, tabel 4.1.1
Residual	<84-79	<578-575	<14-9	<388-320	<76-75	<657-306	<6-+7	<319-150	

Tabel 5.2

Tilførsel fra forskellige kilder og residual i forhold til målt transport.

det relative og det absolutte årlige erosionsbidrag størst i 1987/88.

Resultat af kildeopgørelse

I tabel 5.2 er angivet en sammenstilling af tilførslen fra forskellige kilder, og erosionen beregnet som et residual. Ud for hvert kildebidrag er angivet betegnelser fra fig. 5.1. Tal er indsat i tabellen i det omfang, det har været muligt at fremskaffe dem - enten som direkte målte værdier eller som et begrundet skøn ud fra de anførte referencer. Summen af kildebidragene skulle, såfremt antagelsen - at alt sediment, der frigives, når frem til målestationen i vandløbet - holder, være lig med totaltransporten. Der ses - bortset fra Langvad, total susp. i 1988/89 - et betydeligt residual, som det er ønskeligt at kunne forklare.

Residual i Rabis I Rabis kan nogle mulige forklaringer være:

- Overfladeerosionsbidraget målt fra erosionsfelterne underestimerer overfladeerosionsbidraget fra dalbunden.
- Bund- og brederosion kan være underestimeret.
- Den kemiske udfældning er endnu større end angivet i 1988/89.

Residual i Langvad I Langvad kan forklaringer på residuallet være:

- Overfladeerosionsbidraget er underestimeret, fx fordi erosionsfelternes placering ikke er repræsentativ.
- Bund- og brederosionsbidraget er underestimeret, fordi målefelterne ikke er repræsentative.
- Manglende kendskab til stofomsætning i den øvre del af vandløbet.

2.2 Faktorer der har betydning for erosion

Erosionens størrelse er en funktion af mange faktorer, som indgår i det forenkede udtryk:

$$E = f(R, K, LS, C, P),$$

hvor:

E = jordtab pr. areal pr. tidsenhed

R = nedbørens evne til at erodere (erosivitet)

K = jordens evne til at eroderes (erodibilitet)

LS = terrænfaktor, en funktion af hældning (S) og skråningslængde (L)

C = vegetationens indflydelse

P = indflydelse af jordbearbejdning og andre kulturtekniske indgreb.

Udtrykket kan groft deles i klimabetingede faktorer, indeholdt i R, i områdebestemte naturgivne faktorer, indeholdt i K og LS, og endelig faktorer som kan reguleres ved menneskelige indgreb, C og P.

De få situationer med erosion, som er forekommet i undersøgelsesperioden, tillader ikke en statistisk vurdering af effekten af de enkelte faktorer; men de gjorte iagttagelser gør det dog muligt at vurdere den relative betydning af nogle af faktorerne og andre forhold, som synes at være af betydning for forekomsten af erosion.

Regnens betydning

De klimabetingede erosionsfaktorer i Danmark er: nedbør (som regn) - mængde, intensitet - sne, snesmeltning og forekomst af frost, som kan gøre jordoverfladen impermeabel, således at overfladisk afløb opstår. Der findes ingen egentlige undersøgelser af klimaet med henblik på erosion i Danmark. En beregning af et index for regnens erosivitet i Danmark (Olesen, 1988) tyder dog på, at regnens direkte eroderende evne i Danmark er beskeden. Forskellen i erosion i 1987/88 og i 1988/89 er betinget af forskel i nedbør, da begge vintre var praktisk taget uden frost.

Frostens betydning

En vurdering af frostens betydning kan fås ved at betragte en nedbørsrig periode i Langvad i december 1987 uden frost og en periode med frost og efterfølgende nedbør i december 1989. En nedbørsmængde på 21 mm forårsagede i 1987 en øgning i vandføringen på 88 liter/sek og en erosionsbetinget transport på 2300 kg suspenderet sediment og 14 kg fosfor. En nedbørsmængde på 43 mm i 1989 forårsagede en øgning på 379 liter/sek og en erosionsbetinget transport på 6100 kg sediment og 47 kg fosfor. Der ses en tydelig øgning i forbindelse med frosten i 1989.

Betydningen af terræn og erodibilitet	<p>Undersøgelserne af K og S i kapitel 4 viser, at der er betydelige forskelle fra område til område i Danmark. At forskellene har betydning for forekomsten af erosion, er bekræftet ved, at der i områder, som er udpeget som erosions-truede, forekommer erosion, fx rilledannelse. Der ses også korrelation mellem beregnet KLS faktor og erosion på DDH felter i 1987/88. Derudover synes erosion at forekomme på konkave skrånninger, og hvor afstanden til grundvandet er kort, især hvis undergrunden er leret. Undersøgelserne har også vist, at lange skrånninger, fx opstået ved sløjfning af markskel, kan føre til erosion på skrånninger med moderat hældning.</p>
Afgrødens betydning	<p>Afgrodefaktoren C varierer med omdriften. I sommerperioden, hvor nedbørsintensiteten er størst, vil overfladerne som regel være beskyttet af et plantedække; undtagelser kan være kartoffel- og roemarker, hvor der også er iagttaget erosion. I vinterperioden synes marker med vinterbyg eller -hvede at være særligt sårbare; der er ofte iagttaget rilledannelse på sådanne marker.</p>
Jordbehandling	<p>Jorde behandlet, så overfladen efterlades kompakt og jævn, synes mere udsatte end pløjede marker med stor ruhed. Der er ofte iagttaget erosion i kørespor, og retningen af markbearbejdningen har stor betydning for forekomsten af overfladisk afløb. Ofte kan bearbejdningsretningen dominere over den naturlige faldretning.</p>
Oprensning og andre tekniske foranstaltninger	<p>Behandlingen af terrænet omkring vandløbene har stor betydning for tilførslen af erosionsmateriale til vandløbene og erosionen i selve vandløbene. Der er ofte iagttaget jordbearbejdning tæt ved vandløbet. Oprensningen af vandløbene</p>

kan foretages på uhensigtsmæssige tidspunkter, fx sent efterår, eller foretages så hårdhændet, at bund og bredder efterlades uden vegetation. Udførelsen af hovedafvandinger, som sænker vandløbenes bund i forhold til det omgivende terræn, har været stærkt medvirkende til en øgning af bred- og bunderosionen - 98 % af den samlede vandløbslængde er reguleret (Brookes, 1984). Etableringen af grøfter øger også erosionen, mens dræning med rør og rørlægning af vandløb i teorien vil formindske den.

2.3 Sammenligning med andre undersøgelser

Da undersøgelsen blev iværksat i 1987, fandtes der ingen publicerede danske undersøgelser af jorderosionens størrelse og betydning for vandløbene. Resultater af udenlandske undersøgelser kunne ikke umiddelbart overføres på grund af forskelle i landudnyttelse og driftsformer. I den forløbne periode er der fremkommet resultater af flere undersøgelser, som kan anvendes til at udbygge og understøtte konklusionerne i herværende rapport.

Suså

De første danske undersøgelser af vanderosion er beskrevet i Bojsen (1987). En tabel med angivelse af bidrag til vandløbstransporten fra forskellige kilder er publiceret i Hasholt (1988a og 1988c). Målingerne er foretaget 1985/86. Transporten i vandløbet af total fosfor er 138 kg/km²/år og af partikulært fosfor 100 kg/km²/år; disse værdier er væsentligt større end dem, der er fundet i herværende undersøgelse. Ud fra massebalancebetragtninger konkluderes, at ca. 40 % af den totale suspenderede transport stammer fra brederosion og ca. 40 % fra jorderosion. Af den totale fosfortransport stammer ca. 60 % fra jorderosion, mens andelen

af den partikulære fosfortransport er ca. 80 %. Vinteren 1985/86 var kold (se afsnit 2.5) med lange perioder, hvor temperaturen var negativ og med et snedække på op til 15 cm. Forskellen mellem transporten i 1985/86 og i herværende undersøgelsesperiode må tilskrives effekten af frossen jord og snesmeltning.

Rabis og Gelbæk

Transporten af næringsstoffer, herunder total P, har tidligere været undersøgt i Gelbæk og Rabis (Kronvang et al., 1987). I Gelbæk var transporten af total P 51 kg/km² i 1983/84 og 70 kg/km² i 1984/85. De tilsvarende tal for Rabis var henholdsvis 36 og 68 kg/km². Det ses i afsnit 4.5, at vinteren i 84/85 var betydeligt koldere end i 83/84. I Gelbæk er transporten af total fosfor målt siden 1974 (Kronvang & Bruhn, 1990); transporten var i 1988 lidt under normalen (78 kg/km²), mens den i 1989 var ekstremt lav. Den højeste værdi, målt i 1979, var 234 kg/km². Det ses, at også 1979 var et koldt år, selv om der ikke findes observationer af erosion i 1979, indicerer resultatet, at erosion om vinteren har stor betydning for størrelsen af fosfortransporten.

Høje transportværdier af total P i koldt år

Odense Å

Detaljerede undersøgelser af transporten af fosfor i Odense Å (Pedersen, 1988) viser, at der i forbindelse med store afstrømningshændelser kan foregå en betydelig P-transport, som tilsyneladende kun kan henføres til jordbruget. I kalenderåret 1987 transporteredes 84 kg/km² total P, heraf 39 % diffus afstrømning især fra jordbruget. De tilsvarende tal for 1988 er henholdsvis 105 kg/km² og 49 %.

Skåne

Svenske undersøgelser i Skåne (Ahlström & Bergman, 1988) viser, at overflade- og rilleerosion

i forsøgsfelter varierede mellem 765 og 32.265 kg/ha i måleperioden 1986/87 (oktober-april) og i perioden 1987/88 (december-april) mellem 3 og 532 kg/ha. Sedimenttabet var fra januar til april 1988 mindre end 1/500 af tabet i samme periode 1987, til trods for at nedbøren i 1988 var dobbelt så stor. De største tab forekom i forbindelse med snesmeltning. Resultaterne bekræfter betydningen af vinterforholdene for erosionstilførslen og viser samtidig, at transporten, som er fundet, i herværende undersøgelse underestimerer erosionens betydning.

Lake Erie

Undersøgelser af tilførslen af næringsstoffer til Lake Erie (Yaksich, 1983; Logan, 1979) viser, at 51 % af tilførslen af fosfor i 1980 stammede fra jordbruget. Forholdet mellem erosionstabt fra plots og den mængde sediment, som når vandløbssystemet (leveringsforholdet), var i gennemsnit 12 %, dvs. af samme størrelsesorden som fundet i denne undersøgelse.

2.4 De undersøgte områders repræsentativitet

De områder, som indgår i NPO-programmet, er ikke udvalgt specielt med henblik på forekomst af erosion. Det er derfor rimeligt på baggrund af den indsamlede viden at vurdere deres repræsentativitet.

Rabis

Rabis-området er beliggende på de øvre dele af Karup hedeslette, hvor jorden er grovsandet. Bortset fra skrænterne langs ådalen er terrænet fladt. Jordbunds- og terrænmæssigt repræsenterer området nogle af de mindst truede arealer i Danmark. Størstedelen af skrænterne og store arealer øst for vandløbet er permanent vegetationsdækkede, hvilket også har været medvirkende til at mindske effekten af vinderosion.

Vandføringen i Rabis Bæk er ekstremt jævn, betinget af væld. Egentlig overfladisk afløb fås kun fra den vandmættede dalbund, hvor nedbør giver anledning til små vandføringsmaksima. Disse forhold betinger også en ringe forekomst af erosion.

De to erosionsfelter har relativt stor hældning i forhold til området som helhed. Undersøgelsen har vist, at der er stor afstand til grundvandet, således at mættet overfladisk afløb ikke er forekommet.

Dræningstætheden er kun ca. 0.3 km vandløb pr. km² opland. Større erosion kan forekomme på sandjorde på bakkeøer og i morænelandskaber.

Sammenfattende kan det konkluderes, at området er repræsentativt for hedesletter med den laveste erosionsrisiko. På landsplan udgør denne kategori ca. 10 % af arealet.

Gelbæk

Gelbæk-området er et morænelandskab med moderate hældninger. Skråningerne er forholdsvis lange, ofte mere end 100 m. Centralt i området ligger et udtørret vådområde. Vandløbssystemet er rørlagt i områdets øvre del og reguleret. En stejl strækning med erosion findes ovenfor vådområdet. Dræningstætheden er ca. 0.6 km/km². Markerne er - især i den øvre del - dyrket tæt på vandløbet. Sammenfattende kan det konkluderes, at området er repræsentativt for morænelandskaber omkring hovedvandskellet i Jylland med moderat erosion. Denne kategori findes på ca. 15 % af arealet på landsplan.

Langvad

Langvad-området er et relativt fladt morænelandskab, dog med større hældninger langs en dal i områdets sydlige del. I områdets centrale

og østlige del findes flere afløbsløse lavninger, som vil opfange erosionsmateriale. Den stejle del har afløb til et sø- og moseområde, som opfanger størsteparten af sedimentet, som tilføres på grund af erosion.

Hele vandløbssystemet er reguleret og delvis rørlagt. Dræningstætheden er ca. 0.7 km/km². Vandføringen varierer fra 0 til næsten 600 liter/sek i løbet af året, og vandløbet reagerer hurtigt på større nedbørshændelser.

Det største erosionsfelt er beliggende på en stejl skråning. Til trods herfor er der ikke konstateret rilledannelse, som på nærliggende skrænter med samme hældning. En mulig årsag hertil er, at afstanden til grundvandet er større ved feltet, således at mættet overfladisk afløb forekommer mindre hyppigt. Tilsvarende forhold gør sig gældende ved det nedre erosionsfelt, således at erosionen på de to felter må formodes at være mindre end på skråninger med en højere grundvandstand.

Sammenfattende kan det konkluderes, at området er repræsentativt for østdanske moræneområder med moderat erosion. På landsplan findes denne type på ca. 15 % af arealet.

2.5 Den undersøgte periodes repræsentativitet

Det er ønskeligt at kunne vurdere om de i perioden fundne erosionstal er repræsentative i tid; heri må indgå en vurdering af periodens klima. Der findes ingen danske undersøgelser, der relaterer klimatiske variable til erosion.

På baggrund af litteraturstudier og de erfaringer, som er opnået i forbindelse med undersø-

gelsen, er det muligt at udpege nogle klima-parametre, som indicerer mulighed for erosion. Af hensyn til omkostningerne ved fremskaffelse af meteorologiske data er der udvalgt parametre, som er forholdsvis lettilgængelige, og som er registreret igennem en længere periode:

- Årsnedbør: har betydning for jordfugtighed og forekomst af mættet overfladeafløb.
- Dage med nedbør større end 10 mm: indicerer forekomst af nedbør med høj intensitet.
- Dage med torden: som ovenfor.
- Frostdage, minimum temperatur $< 0^{\circ}$: indicerer mulighed for regn på frossen jord og opbygning af snedække.
- Isdage, maksimum temperatur $< 0^{\circ}$: som ovenfor, men siger mere om udviklingen af et impermeabelt lag.
- Snedage: mulighed for opbygning af snedække.
- Snedækkedage: indicerer mulig forekomst af tøbrud med snesmeltningbidrag.

Undersøgelsesperiodens repræsentativitet er behandlet i forhold til normalværdier af parametrene i kapitel 4. Det konkluderes, at perioden 1987/88 var usædvanligt regnrig, 875 mm, mens 1988/89 var tør, 571 mm. Alle vintre var usædvanligt milde.

På fig. 5.2 og 5.3 er variationen af ovennævnte parametre vist fra 1970 til 1989. Det ses tydeligt, at undersøgelsesperioden er usædvanlig. En fordel er det dog, at der i erosionsmæssig henseende er tale om "rene" tilfælde. Perioden 1987/88 viser erosion betinget af nedbør uden frost, mens 1988/89 giver et mål for minimumstransporten uden klimabetinget erosion. Det ses, at stor erosion må have fundet sted i 1970, 1980, 1985, 1986 og 1987, mens årene 1972, 1973 og 1974 har haft minimal ero-

Fig. 5.2
Nedbørsparametre
for Danmark. 3.
Årsnedbør x 10⁻¹
mm. 4. Døgn med
nedbør > 10 mm.
7. Døgn med tor-
den. (Kilde: Me-
teorologisk In-
stitut)

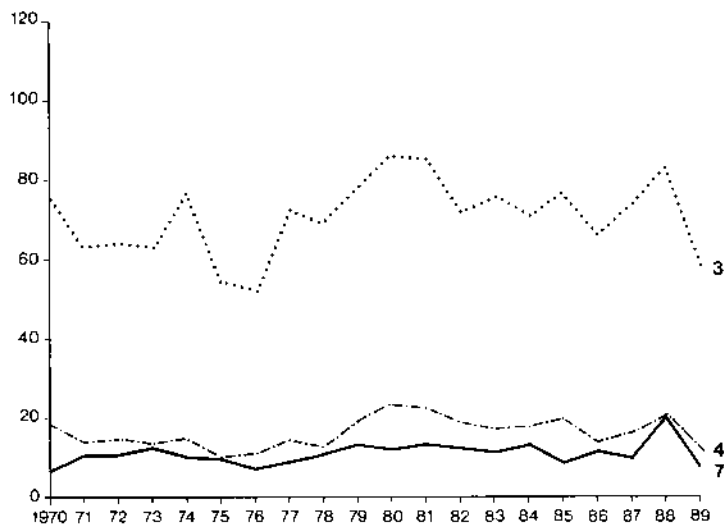
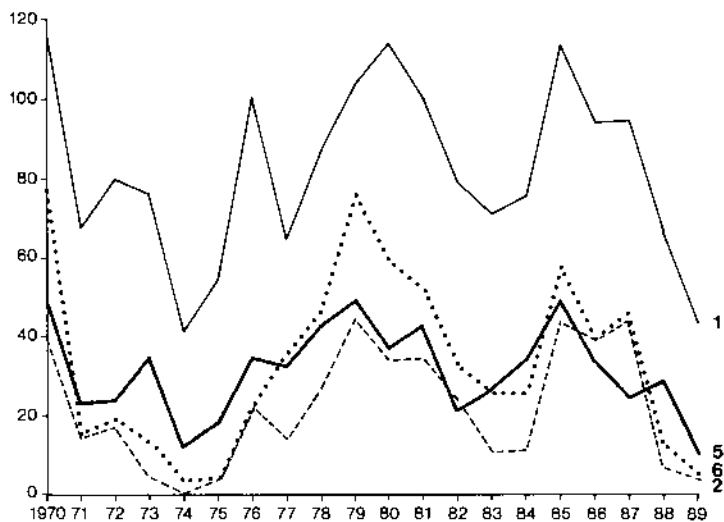


Fig. 5.3
Vinterparametre.
for Danmark. 1.
Frostdøgn. 2. Is-
døgn. 5. Snedøgn.
6. Døgn med sne-
dække. (Kilde: Me-
teorologisk In-
stitut)



sion. Sandsynligheden (Weibull) for en periode med regn som i 1987/88 er ca. 0.05, og sandsynligheden for tilsvarende milde vintre ca. 0.20. Det kan konkluderes ud fra undersøgelsen af klimaparametre, at erosionen i perioden har været mindre end normalt, og at der mangler observationer af erosionen under normale vinterforhold.

2.6. Praktiske konsekvenser og opfølgende undersøgelser

I det følgende søges uddraget nogle af de praktiske konsekvenser af undersøgelsens resultater.

Vanskeligt at stoppe finkornet materiale

Det finkornede, fosforholdige jordmateriale transporteres opslemmet i vand over længere afstande. Der er således konstateret finkornet sediment i søvand i Langvad, selv om der ikke er tegn på større overfladeerosion nær søen. På grund af den lange tid, der kræves til bundfældning, vil det være svært at stoppe denne transport uden at bruge meget brede og tætte brømmer og/eller sedimentationsbassiner. Det vil være mere hensigtsmæssigt med en erosionsbegrænsende dyrkningspraksis på markerne.

Erfaringer fra feltarbejdet viser, at det grove erosionsmateriale opfanges i vegetationsbrømmer af begrænset bredde. Dette bekræftes af amerikanske undersøgelser (Dillaha et al., 1989), som viser, at 70 % af suspenderet materiale og 61 % fosfor kan opfanges i en 4.6 m bred brømme. Etablering af brømmer med en minimumsbredde på fx 2 m langs vandløb vil derfor medføre en mindsket tilførsel af det grove erosionsmateriale.

Udpeg erosions-truede arealer

Fordi de erosionstruede arealer har en begrænset udstrækning og en stabil forekomst, vil det være hensigtsmæssigt at udpege sådanne arealer og kun gøre brømmerne brede neden for disse frem for at etablere bredere brømmer overalt. Forud for en dimensionering af brømmer bør der udarbejdes et dimensioneringsgrundlag, som gælder for danske forhold.

Begræns uhensigtsmæssig dyrkningspraksis

Det er endvidere påvist, at uhensigtsmæssig dyrkningspraksis kan give anledning til erosion. Jordbearbejdning på tværs af højdekurverne bør undgås. Især synes dyrkning af vinterhvede med såretning "op-ned" at medføre erosion. Det vil være uhensigtsmæssigt at sløjfe markskel, således at der opstår meget lange skråninger ned mod vandløb.

Begræns hårdhændet oprensning

Erosion i vandløbenes bredder forøges ved dyrkning og færdsel med tunge arbejdsredskaber tæt på bredden. Ligeledes er det iagttaget, at hårdhændet oprensning af grøfter og vandløb, fx med skraberblad, fjerner beskyttende vegetation og medfører betydelig erosion. Sådanne praksis bør begrænses mest muligt.

På grund af de særlige klimaforhold i undersøgelsesperioden har det ikke været muligt at observere erosionshændelser på frossen jord. Da netop sådanne omstændigheder giver anledning til kraftig erosion, er der behov for opfølgende undersøgelser.

Behov for opfølgende undersøgelser

Der er behov for processtudier under normale vinterforhold, som gør det muligt at kvantificere erosionen under sådanne forhold og forbinde dem med relevante klimaparametre. Sådanne undersøgelser er også vigtige for udviklingen af jorderosionsmodeller, som kan anvendes ved planlægning af eventuelle beskyttelsesforanstaltninger.

Der er behov for undersøgelser af betingelserne for forekomst og udvikling af riller i terrænet, fordi rilleudvikling medfører en særlig kraftig tilførsel af erosionsmateriale.

Endelig er der behov for en statistisk bearbejdning af klimadata med henblik på en vurde-

ring af hyppigheden af hændelser, som forårsager erosion.

3. KONKLUSION

- Transporten af fosfor er lav i undersøgelsesperioden: 35-73 kg total P/km²/år i Langvad og 43-60 kg/km²/år i Rabis. Erosionsbidraget varierer fra 45 til 76 % af den totale suspenderede sedimenttransport i Langvad og fra 24 til 29 % i Rabis. Vinderosionens bidrag til transporten af fosfor har været minimal.
- Regn på frossen jord og snesmeltning forårsager mere erosion end intensiv regn. Terræn og jordbund har betydning for den arealmæssige variation - sandjord (Rabis) har mindre erosion end lerjord (Gelbæk, Langvad).
- Afgrødevalg og jordbearbejdning har stor betydning. Marker med vinterhvede sået "opned" har været særligt udsatte for erosion.
- Erosionen i undersøgelsesperioden har haft mindre betydning for transporten i vandløb end i de to umiddelbart foregående år. Variationen i transporten skyldes variation i erosionsbidraget; i en længere tidsserie fra Gelbæk var transporten af total P i 1979 oppe på 234 kg/km²/år.
- Resultater fra Rabis er repræsentative for områder med den laveste forekomst af erosion i Danmark. Områderne Gelbæk og Langvad repræsenterer østdanske moræneområder med moderat erosion. De valgte erosionsfelt-lokaliteter synes at give relativt lave værdier;

en mulig årsag er, at afstanden til grundvand er stor og skråningslængden kort.

- Klimaforholdene i perioden er vurderet i forhold til en længere tidsserie. Unormalt lave erosionsværdier må forventes på grund af de varme vintre i perioden. Det ses, at en 3-årig måleperiode er meget kort i forhold til klimaparametrenes variationsbredde.
- Generelle praktiske konsekvenser er angivet. En eventuel indsats bør koncentrerer om at identificere særligt erosionstruede arealer og iværksætte erosionsbegrænsende foranstaltninger her. En begrænset justering af dyrkningspraksis med henblik på at undgå erosion vil være hensigtsmæssig. Hårdhændet oprensning af grøfter og vandløb bør undgås.
- De fundne erosions- og transportværdier kan ikke bruges til en "her og nu" talmæssig vurdering af erosionens betydning - hertil kræves observationer, som dækker normale vinterforhold og en statistisk bearbejdning af klimadata, som er relevante for forekomst af erosion. Sådanne undersøgelser kunne fx etableres i landovervågningsområderne.

LITTERATUR

- ADK (1989):
Datasamlinger, pp 57. Landbrugsministeriet, Arealdatakontoret, Vejle.
- Ahlström, K., & Bergman, A. (1988):
Sediment and Nutrient Losses by Water Erosion From Arable Land in South Sweden. A Problem with Nonpoint Pollution? VATTEN 44: 193-204. Lund.
- Bojsen, T.S. (1987):
Overfladeafspulingens Bidrag til et Vandløbs Sediment- og Fosforbelastning. Upubl. Specialrap. Geogr. Inst., Kbh. Univ.
- Bojsen, T.S. (1989):
Nedbringelse af Fosforbelastningen fra Landbrugsområder til Gundsømagle Sø. DDH. Hovedstadsrådet.
- Breuning Madsen, H., Holst, K.Aa. & Nørr, A.H. (1987):
Slope Classes of Agricultural Land in Denmark. Geogr. Tidsskr., vol. 87 (in Danish). København.
- Brookes, A. (1984):
Recommendations Bearing on the Sinuosity of Danish Stream Channels. Miljøstyrelsens Ferskvandslab. Publ. Nr. 20.
- Brüsch, W. (1990):
NPO-Rapport C 15, pers.komm.
- Chisci, G. & Morgan, R.P.C. (1988):
Modelling Soil Erosion by Water: Why and How. Agriculture, Erosion Assessment and Modelling. Report EUR 10860 EN.
- Cooley, K.R. ed. (1990):
Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range and Forest Lands. CRREL Special Report 90-1.
- Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mostaghimi, S. & Lee, D. (1989):
Vegetative Filter Strips for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control. American Society of Agricultural Engineers, Vol. 32:2.
- Engelund, F. & Hansen, E. (1972):
A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag. Kbh.
- Forster, G.R. & Lane, J.L. (1987):
User Requirements USDA-Water Prediction Project (WEPP). Draft G.J. NSERL, Report No. 1, Lafayette Indiana.
- Hansen, A.C. (1990):
Jorderosion og fosfortransport fra erosionsfelter. Rapport C12, delrapport 2. DDH.
- Hansen, A.C. & Hasholt, B. (1989):
Overfladeerosion af fosfor til vandløb og søer. Vand og Miljø 8.
- Hansen, A.C., Hasholt, B., Kuhlman, H., Madsen, H.B. & Platou, S.W. (1990):
Jorderosionens betydning for transporten af fosfor til vandløb og søer. Rapport C12, delrapport 4. DDH, GI & ADK.

- Hansen, B. (1985):
Tilførsel af kvælstof, fosfor og organisk stof til vandløb fra landbrugsområder. Rapport til Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium.
- Hansen, B. (1990):
Afstrømning og stoftransport i Rabis og Syvbæk. NPO-Rapport, B 9, pers.komm.
- Hansen, L. (1983):
Soil Erosion in Denmark. Soil Erosion, Report EUR 8427 EN.
- Hasholt, B. (1981):
Koncentration og Transport af Suspenderet Materiale i Susåens Opland. Rapport Suså-H 14/15. Dansk Komité for Hydrologi.
- Hasholt, B. (1983):
Origin of Suspended Load and Its Role in the Dry Matter Balance, 43-52. 11th Nordic Symp. on Sediments. Norsk Limnologforening.
- Hasholt, B. (1984):
Jernforbindelsers Indflydelse på Transport af Suspenderet Stof, 28-40. 12th Nordic Symp. on Sediment. Reports from the Botanical Inst., Univ. of Aarhus, No. 8, 1984.
- Hasholt, B. (1988a):
On Identification of Sources of Sediment Transport in Small Basins with special Reference to Particulate Phosphorus. Sediment Budgets. IAHS Publ. No. 174, 1988, 241-250.
- Hasholt, B. (1988b):
Methods for Measuring Soil Erosion Applied in the Danish NPO-Project. MAB. Proceedings of the International Symposium on Water Erosion, UNESCO. Sofia.
- Hasholt, B. (1988c):
Transport af partikulært fosfor i Danske Vandløb. Nordisk Hydrologisk Program. NHP-Rapport nr. 22. 243-251. KOHYNO.
- Hasholt, B., Breuning Madsen, H. & Platou, S.W. (1989):
On Evaluation of Soil Erosion Risk and Sources of Suspended Load in Denmark. Proc. Int. Symp. on Erosion and Volcanic Debris Flow Technology. Yogyakarta, Indonesia 1989.
- Hasholt, B. & Kuhlman, H. (1990):
Jorderosion og transport af suspenderet sediment og fosfor i udvalgte nedbørsområder. Rapport C12, delrapport 1. GI.
- Jackson, M.L. (1958):
Soil Chemical Analyses. London W.C.2, 166-68.
- Krogstad, T. (1986):
Fosfor i Erosionsmateriale fra Leir- og Silt-rike Jordarter. NHP-Rapport nr. 14, 159-167. KOHYNO.
- Kronvang, B., Thyssen, N. & Mortensen, E. (1987):
The Transport of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in two Small Streams Draining

- Farmed Catchment. Publication No. 69 from the Freshwater Laboratory.
- Kronvang, B. & Bruhn, A.J. (1990):
 Overvågningsprogram, Metoder til Bestemmelse af Stoftransport i Vandløb. Miljømin. Danmarks Miljøundersøgelser.
- Kuhlman, H. (1960):
 Den Potentielle Jordfygning på Danske Marker. Geogr. Tidsskrift 59. København.
- Kuhlman, H. (1986):
 Vinden og Landbruget. Landbrugsatlas Danmark, Atlas over Danmark, Ser.II, bd.4. København.
- LIK (1987):
 Håndbog for Plantedyrkning. Landbrugets Informationskontor.
- Logan, T.J. (1979):
 The Maumee River Basin Pilot Watershed Study, vol. I og II, EPA-905/9-79-005 A og B.
- Madsen, H. B., Hasholt, B. & Platou, S. W. (1986):
 The Development of a Computerized Erodibility Map Covering Denmark. Soil Erosion in the European Community. Eds.: Chisci and Morgan Balkema.
- Miljøstyrelsen (1983):
 På Vej mod Gode Vandløb. Miljøstyrelsen, Sept. 1983.
- Morgan, R.P.C. (1980):
 Soil Erosion and Conservation. Longman 1986.
- Morgan, R.P.C. (1986):
 Soil Degradation and Soil Erosion in the Loamy Belt of Northern Europe. Soil Erosion in the European Community, 165-172. Eds.: Chisci & Morgan. Balkema 1986.
- Nielsen, S.A., Storm, B. & Styczen, M. (1986):
 Development of Distributed Soil Erosion Component For the SHE Hydrological Modelling System. Intern. Conf. on Water Quality Modelling in the Inland Natural Environment, Bournemouth, England 1986.
- Nilsson, B. (1969):
 Development of a Depth-Integrating Water Sampler. UNGI Rapport 2, Uppsala.
- Olesen, J.E. (1988):
 Beregning af Nedbørserosivitetsindex ved Foulum. Notat af 21.04.1988 fra Jordbrugsmeteorologisk Tjeneste, Statens Planteavlsvforsøg. Upubl.
- Pedersen, S. (1988):
 Stoftransportmonitoring i Danske Vandløb. Forsøg med Intensiv Monitorering. Sammenligning af Beregningsmetoder. Vurdering af Nødvendig Prøvetagningsfrekvens. Fyns Amt, Forvaltningen for Teknik og Miljø, Vandmiljøafdelingen.
- Platou, S.W. & Hasholt, B. (1990):
 Erosionsrisiko og fosfortransport i Danmark. Rapport C12, delrapport 3. ADK & GI.

- Rebsdorf, Aa. & Thyssen, N. (1987):
Vandkvalitet i kilder og bække. Ferskvands-
laboratoriet.
- Ulén, B. (1982):
Erosion av Fosfor från Åker. Ekohydrologi,
nr. 11.
- Vogl, W. & Becher, H.H. (1985):
Schätzung der Erodibilität des Bodens (K-Fak-
tor) aus der Kornungsansprache nach der
Reichbodenschätzung. Zeitschrift f.
Kulturtechn. un Flurber. 26, 179-183.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1981):
The Reliability of Suspended Sediment Load
Data, 177-195. IAHS-AISH Publication No. 133.
- Walling, D.E. & Webb, B. (1985):
Estimating the Discharge of Contaminants to
Coastal Waters by Rivers: Some Cautionary
Comments. Marine Pollution Bulletin, vol. 16,
No. 12, 488-492.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. & Cross, B.V.
(1971):
A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and
Construction Sites. Journal of Soil and Water
Conservation, Sept.-Oct. 1971, 189-192.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978):
Predicting Rainfall Erosion Losses. USDA Agr.
Res. Serv. Handbook 537.
- Yaksich, S.M. (1983):
Summary Report of the Lake Eric Wastewater
Management Study. U.S. Army Corps of Engi-
neers, Buffalo District.



Registreringsblad

Udgiver: Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K.

Serietitel, nr.: NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, C12

Udgivelsesår: 1990

Titel:

Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer

Undertitel:

Forfatter(e):

Hasholt, Bent; Kuhlman, Hans; Hansen, Anders C.;
Platou, Steen W.; Madsen, Henrik Breuning

Udførende institution(er):

Københavns Universitet. Geografisk Institut;
Det Danske Hedeselskab. Forsøgsvirksomheden;
Statens Planteavlsvforsøg.

Resumé:

Der er udført samtidige målinger af erosion i oplandet og transport af suspenderet sediment og fosfor i afløbet fra to forsøgsområder. Jorderosionen var beskedent i undersøgelsesperioden. Trods stor nedbør det ene år var erosionen mindre end i den umiddelbart foregående periode, hvor jorden var frossen om vinteren. Erosionstruede arealer, som udgør mindst 3% af Danmarks areal, udpeges.

Emneord:

transport; jord; erosion; sediment; nedbør; vandløb;
fosfor CAS 7723-14-0

ISBN: 87-503-8828-2

ISSN:

Pris: 110,- (inkl. 22 % moms)

Format: AS5

Sideantal: 120 s. + 1 kort

Md./år for redaktionens afslutning: november 1990

Oplag: 500

Andre oplysninger:

Rapport fra koordinationsgruppe C for vandløb, søer og marine områder

Tryk: Luna-Tryk ApS, København



NPo-forskning fra Miljøstyrelsen

Rapporter fra koordinationsgruppe C for vandløb, søer og marine områder

- Nr. C1 : Denitrifikation og N-mineralisering i den kystnære havbund
- Nr. C2 : Denitrifikation og iltomsætning i vandløbssedimenter
- Nr. C3 : Eutrofiering – effekter på marine primærproducenter
- Nr. C4 : Fosforbelastning i lavvandede eutrofe søer
- Nr. C5 : Carbon Dynamics in Coastal Marine Environments
- Nr. C6 : Jyllandsstrømmen
- Nr. C7 : Biologisk struktur i små vandløb
- Nr. C8 : Kvælstof og fosfor i havet
- Nr. C9 : Eutrofieringsmodeller for søer
- Nr. C10 : Vandløbsmodeller – biologisk struktur og stofomsætning
- * Nr. C11 : Transportmodel for næringssalte i ferskvandssystemer
- Nr. C12 : Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer
- Nr. C13 : Kvælstofomsætning og stofbalance i ånære områder
- Nr. C14 : Vand- og stofbalance på lavbundsjord
- Nr. C15 : Nitratomsætning og vandbevægelse i et vådområde

De med * mærkede titler er ikke trykt på udgivelsesdagen for denne rapport, men forventes trykt i løbet af 1990.

Nr. C7 er tidligere annonceret med titlen:
Bundlevende algers regulering i små vandløb

Erosion og transport af fosfor til vandløb og søer

Der er udført samtidige målinger af erosion i oplandet og transport af suspenderet sediment og fosfor i afløbet fra to forsøgsområder. Jorderosionen var beskeden i undersøgelsesperioden. Trods stor nedbør det ene år var erosionen mindre end i den umiddelbart foregående periode, hvor jorden var frossen om vinteren. Erosions-truede arealer, som udgør mindst 3% af Danmarks areal, udpeges.



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

Pris kr. 110.- inkl. 22% moms

ISBN nr. 87-503-8828-2