

VANDLØB OG KLIMAÆNDRINGER

En snoet (mæandre-
rende) strækning af
Skjern Å.

Foto: Colourbox.

Et vandløbs tværsnit og strømhastighed kan beskrives som matematiske funktioner af den mængde vand, der strømmer i det. Det kan man udnytte til at forudsige, hvor meget formen på et vandløb og sedimenttransporten i det vil ændre sig som følge af klimaændringer.

Forfatterne



Bent Hasholt er lektor emeritus, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.



Sebastian H. Mernild, ph.d. & dr. scient, er professor i klimaforandringer og leder af SDU Climate Cluster, Syddansk Universitet. Lead Author ved FN's Klimapanel (IPCC), AR6.

Klimaet er under forandring. Danmark er over tid blevet varmere og ikke mindst vådere. Siden 1880'erne er årsmiddeltemperaturen i gennemsnit blevet 1,5 grader højere og samtidig ses en stigning af årsnedbøren på omkring 140 millimeter. Stigende nedbør medfører ændringer i det hydrologiske kredsløb og dermed ændringer i vandføringen i vandløbene og i transporten af sedimenter og næringsstoffer til havet.

De ændrede hydrologiske forhold formodes også at medføre ændringer i selve formen af vandløbene. Vandløbenes dimensioner er nemlig et resultat af vandets kredsløb, hvor vandet på sin vej nedbryder terrænoverfladen og transporterer løsnede partikler og opløste stoffer til oceanerne. Vandløbssystemet består af nedskæringer og afgrænsede fordybninger med næsten parallelle sider i terrænet, hvori van-

det bevæger sig, såkaldte strømrender. Set fra luften kan man iagttage strømrenderne som et forgrenet mønster, hvor mindre strømrender løber sammen til større og vokser til floder på vej mod havet.

Naturlige vandløbssystemer består af vandløb, hvis strømlejer ikke er ændret som følge af menneskelige indgreb. Tilbage i 1953 kunne Leopold og Maddock vise, at de tre vandløbsparametre bredde, dybde og strømhastighed (tilsammen kaldet vandløbets hydrauliske geometri) kan beskrives som potensfunktioner af vandføringen i naturlige vandløb. De påviste, at vandløbene var i dynamisk ligevægt, og de beholdt forholdet mellem dimensionerne, selvom der løbende foregik erosion og sedimenttransport i dem. Leopold og Maddock påviste også, at strømlejernes form og nedskæring i terrænet var i ligevægt med de omgivende bredders niveau, således at oversvømmelses-

hyppigheden var ret konstant – dvs. en oversvømmelse af bredderne sker med et gentagelsesinterval på 1 til 1½ år.

I denne artikel vil vi beskrive resultatet af målinger af den hydrauliske geometri i naturlige danske vandløb og undersøge, om de fundne potensfunktioner kan anvendes til at vurdere effekten af klimaændringer i danske vandløb.

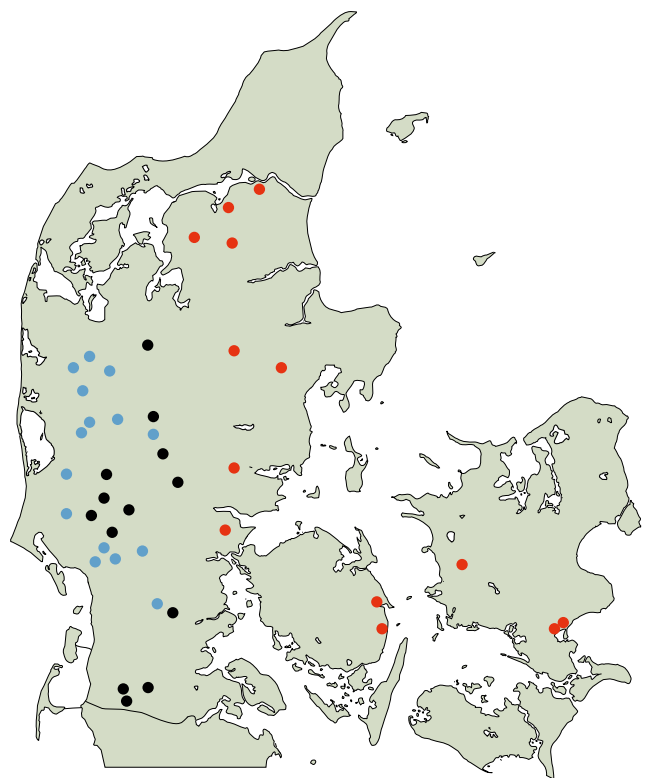
Vandløbssystemets historie i Danmark

I modsætning til de fleste andre lande består terrænoverfladen i Danmark, bortset fra Bornholm, af løse sedimenter transporteret og afsat under isen eller transporteret af smeltevand og aflejret foran isen. Vandløbssystemet i Danmark har ændret sig markant gennem tiden. Under de seneste istider, Saale- og Weichel-istiderne, var vandmængden meget større og fordelt anderledes på grund af tilførslen af

smeltevand. Sedimenttransporten i vandløbene var også meget større på grund af isens erosion i jordoverfladen. Vandløbssystemerne bestod af strømrrender, som adskiltes og løb sammen igen, såkaldte braiderende løb, efter det engelske ord "braid", som betyder fletning. Sådanne vandløbssystemer kan ses både i Island og Grønland i dag. Efter istiderne blev Danmark skovklædt, og vandløbssystemet mistede tilførslen af smeltevand og sedimenttransport betinget af isens erosion. Resultatet var udviklingen af et anderledes vandløbssystem med regelmæssige slyngninger, som vi kalder mæandrerende opkaldt efter floden Mæandros i Tyrkiet.

Med menneskets indvandring blev vandløbssystemet udnyttet til fiskeri og transport. Fra omkring 1100-tallet begyndte mennesker at bygge vandmøller, som betød, at der blev lavet opstemninger af vandet for at opnå en passende faldhøjde. Med udviklingen af landbruget blev skoven ryddet, og jorden pløjet og tilplantet med afgrøder. Det medførte en øget sedimenttransport i vandløbssystemet, som kan aflæses i for eksempel borekerner fra bunden af søer. En vis afledning af vandet fandt sted gennem grøfter, som blev gravet til formålet.

I slutningen af 1800-tallet tog udviklingen fart med udvidet grøftegravning både på mark og i skov for at øge land- og skovbrugsproduktionen. Senere i perioden begyndte man også at anvende nedgravede teglrør til afvanding. Ved afvanding og dræning opnåede man en udvidelse af det brugbare dyrkningsareal, som samtidig gav gunstigere vækstforhold for nytteplanterne og for jordbearbejdningen. Det var et politisk mål som kompensation for tabet af Sønderjylland efter 1864. Nogle steder blev især mindre vandløb lagt i underjordiske rør for blandt andet at forbedre trafikforhold og jordbearbejdning. Også byudviklingen medførte behov for afvanding i form af kloakering for at lede vand væk fra kældere og gader.



● Vandløb i bakkeølandskabet ● Vandløb i hedeslettelandskabet ● Vandløb i morænelandskabet

Placeringen af de undersøgte naturlige strækninger i danske vandløb i et udvalg af landskabstyper. Strækningerne var fordelt på tre forskellige landskabstyper: Bakkeølandskabet, som er morænelandskaber fra Saale-istiden; Morænelandskabet fra Weichsel-istiden og Hedesletter fra Weichsel-istiden.

Opfattelsen var, at vandløbssystemets primære funktion var at aflede vand fra dyrkningsområder og spildevand fra byer og industriområder. Funktionen var sikret i lovgivningen, og vandløbene blev regulerede og rettet ud, ofte med statsstøtte. Det største afvandsingsprojekt i Skjern Å blev iværksat så sent som i 1962.

I dag nedlægger man tidligere afvandsingsprojekter og gensnor regulerede (udrettede) vandløb. Kort sagt har man over tid ændret både anvendelsen og brugen af det åbne land og selve vandløbets form – begge dele med konsekvenser for vandets kredsløb.

Undersøgelser af de naturlige vandløb

I 1984 undersøgte vandløbsforskeren Andrew Brookes med basis hos Ferskvandslaboratoriet i Silkeborg Danmarks vandløbssystem ud fra kort med målestoksforhold 1:20.000. Han fandt, at der dengang var cirka 880 kilometer vandløb tilbage i naturlig mæandrerende tilstand ud af en samlet vandløb-

slængde på cirka 64.000 kilometer. Det vakte bekymring for tabet af landskabsmæssige værdier og for vandløbenes biologiske tilstand.

Siden er der foretaget en række tiltag for at forbedre tilstanden: Vandløb er blevet "gensnoet" dvs. i muligt omfang lagt tilbage i deres gamle, mæandrerende forløb. Det er foregået med maskiner, da det har vist sig, at det tager lang tid for et vandløb at genskabe sine naturlige snoninger. Grødeskæring foregår skånsomt for at sikre levesteder for dyr og planter. Og for at fremme fiskebestanden udlægges der gydegrus på bunden i en række vandløb, og der bygges fisketrapper eller omløb, hvor dæmninger eller opstemninger forhindrer fiskenes vandring. Selvom mange vandløb på den måde fremstår mere naturlige i dag, er deres form dog stadig i høj grad menneskeskabt.

For cirka 25 år siden undersøgte vi den hydrauliske geometri i 43 naturlige strækninger i danske vandløb i et repræsentativt udvalg

Hydraulisk geometri

Tværsnitsarealet af et vandløb varierer. Når arealet er lille, må vandet løbe hurtigere, hvis der skal den samme mængde vand igennem på den samme tid, og omvendt, hvis arealet er stort. Vandføringen kaldes Q og er en funktion af tværsnitsarealet og strømhastigheden. Og enheden er normalt (m^3/s).

På baggrund af opmålinger i mange forskellige floder verden rundt, er det påvist, at vandløbsparametrene bredde (m), dybde (m) og strømhastighed (m/s) kan beskrives som steds-specifikke potensfunktioner af vandføringen Q (m^3/s). Funktionerne kaldes *hydraulisk geometri*:

$$w \text{ (bredde)} = a \cdot Q^b$$

$$d \text{ (dybde)} = c \cdot Q^f$$

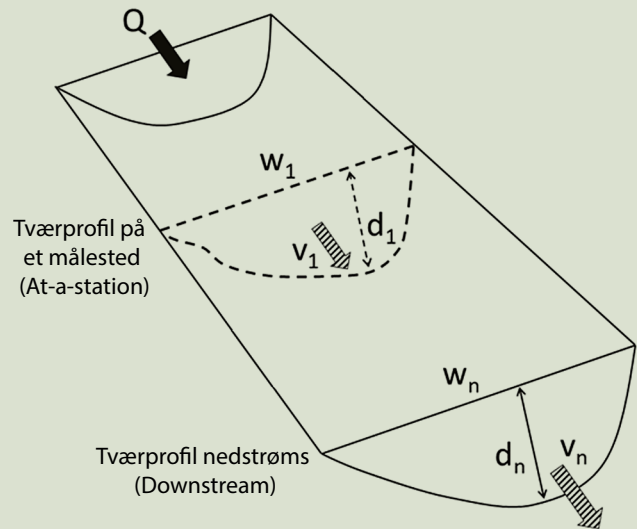
$$v \text{ (strømhastighed)} = k \cdot Q^m$$

hvor a , b , c , f , k og m er konstanter.

Da vandføringen Q er lig med $w \cdot d \cdot v$ betyder regnereglerne, at $b + f + m = 1$ og $a \cdot c \cdot k = 1$.

Formlerne gælder både for tværsnit (at-a-station) og nedstrøms i vandløbet (downstream).

I tabellen er angivet værdier for b , f og m fundet ud fra målinger af naturligt mæandreende vandløb i Danmark.



Landskabstyper	At-a-station	Downstream
Saale-landskab	$b=0,23$	$b=0,61$
Gennemsnit af 15 vandløb i Vestjylland	$f=0,46$	$f=0,47$
	$m=0,31$	$m=-0,08$
Weichsel-landskab (moræne)	$b=0,25$	$b=0,57$
Gennemsnit af 15 vandløb fra Østjylland, Fyn og Sjælland.	$f=0,45$	$f=0,53$
	$m=0,30$	$m=-0,11$
Weichsel-landskab (hedesletter)	$b=0,20$	$b=0,50$
Gennemsnit af 13 vandløb i Vestjylland.	$f=0,48$	$f=0,39$
	$m=0,32$	$m=0,12$
USA, Great Plains	$b=0,26$	$b=0,50$
Gennemsnit af tal fra Leopold og maddock (1953)	$f=0,40$	$f=0,40$
	$m=0,34$	$m=0,10$

af landskabstyper. Strækningerne var fordelt på tre forskellige landskabstyper, nemlig 15 i bakkeølandskaber, som er morænelandskaber fra Saale-istiden, 15 i morænelandskab fra Weichsel-istiden og 13 i hedesletter fra Weichsel-istiden (se kort).

Vi fandt, at den hydrauliske geometri (udtrykt ved potensværdierne) er ens – dvs. ikke statistisk signifikant forskellig – for de to morænelandskaber fra henholdsvis Saale og Weichsel trods en aldersforskel i landskabsdannelsen på cirka 100.000 år. Det tyder på, at et vandløbssystem dannet i morænelandskaber fra Weichsel-istiden opnår samme hydrauliske geometri som vandløbssystemer dannet i morænelandskaber fra Saale-istiden. Og det antyder, at den hydrauliske geometri dannet efter Weichsel-istiden er stabil over en periode på mindst 100.000 år.

Vi ved dog ikke, hvor hurtigt denne stabile tilstand er opstået.

En tilsvarende sammenligning af vandløb fra hedeslette-landskaber fra de to istider, kunne vi ikke lave, da vi ikke kunne finde naturlige vandløb, der kunne bruges til sammenligning med vandløb i hedesletterne dannet under Weichsel-istiden. Men det viste sig, at potensværdierne for vandløbene i det danske hedeslette-landskab var magen til potensværdierne for amerikanske vandløb, der løber gennem landskaber uden istids-aflejringer. Det bekræfter, at de naturlige danske hedeslette-vandløb over tid også opnår ligevægt.

Den eneste forskel, vi i øvrigt fandt på potensværdierne for vandløb i de danske morænelandskaber og hedeslette-landskaberne, knyttede sig til strømhastigheden. Den aftager nedstrøms i morænelandska-

berne, hvilket vi tolker som resultat af, at sten fra morænen udvaskes og aflejres på bunden af vandløbene, hvor de bidrager til at gøre bunden mere ru.

Mere nedbør giver mere erosion

Vores undersøgelser viste, at også naturlige danske vandløb har en hydraulisk geometri, der følger potensformler. Formler, der er specifikke for naturlige vandløb i forskellige danske landskabstyper og som er stabile over meget lang tid.

Disse formler kan derfor bruges til at beregne, hvordan vandløbets tværsnit vil ændre sig, når vandføringen i vandløbene øges på grund af de forventede større mængder nedbør i fremtiden. De nye tværsnit vil blive større end de gamle. Og denne tilpasning vil betyde, at der per meter vandløbslængde vil blive eroderet i bund og



bredder, som øger den samlede sedimenttransport i vandløbet. Øget sedimenttransport i vandløbene er dermed en konkret effekt af klimaændringer. Det kan være et problem, da det øger transporten af næringsstoffer til havet, hvor det fx kan bidrage til algeopblomstringer og iltsvind.

Det sediment, der transporteres i vandløbene, stammer primært fra erosion af terrænoverflader i oplandet til vandløbet. I et klima med mere nedbør og dermed større vandføring i vandløbene, vil der komme mere sediment til vandløbene fra denne overfladeerosion, men altså også fra øget erosion fra selve vandløbets bund og bredder.

Thodsen og kolleger undersøgte i 2008, hvordan klimaændringer vil påvirke sedimenttransporten i danske vandløb i forbindelse med forskningsprojektet CONVOY. De nå-

ede frem til, at de forventede klimaændringer ville betyde en forøgelse af middel års-vandføringen på 11 til 14 % fra perioden 1961-1990 til 2071-2100, men også en stigende sedimenttransport på mellem 9 til 36 %. Deres undersøgelse var baseret på målte sammenhænge mellem sedimentkoncentrationen i vandløbene og nedbør og vandføring.

Man kan ikke med simple målinger af sedimentkoncentrationen i et vandløb afgøre, om sedimentet stammer fra overfladeerosion eller fra vandløbets bredder og bund. Og klimaændringer vil ikke nødvendigvis medføre den samme forholdsvis stigning i mængden fra de to kilder. For mens mængden af sediment fra erosion fra vandløbets bredder og bund udelukkende vil være betinget af den klimabetingede forøgelse af vandføringen, vil mængden af sediment fra

overfladeerosion kunne påvirkes af ændringer i vegetationen i oplandet – for eksempel hvilke afgrøder der dyrkes på en mark. Derfor blev transporten af erosionsmateriale for vandløbenes opland i CONVOY-projektet da også beregnet ud fra modeller, der blandt andet inddrog anvendte afgrøder og dyrkningsmetoder.

I denne forbindelse kan regimeformlerne komme os til hjælp. Vi kan nemlig bruge dem til at beregne, hvor meget vandløbenes tværsnit vil ændre sig alene på grund af den klimabetingede øgede vandføring, og dermed hvor meget sediment der potentielt vil blive fjernet fra vandløbenes bund og sider.

Herredsbækken som eksempel

Vi har som et eksempel anvendt metoden på en af de vandløbsstrækninger, vi opmålte for 25 år siden, nemlig Herredsbækken nær

Mange har sikkert oplevet oversvømmede veje i vinterhalvåret 2023 til 2024 pga. en rekordstor nedbørmængde, som satte vandløbene under pres – især i Jylland.
Foto: Shutterstock



Herredsbækken.
Foto: Lis Hasholt

Kilder samt forslag til videre læsning:

Brookes, A. (1984): Recommendations Bearing on the Sinuosity of Danish Stream Channels. National Agency of Environmental Protection, Freshwater Laboratory, Silkeborg, Denmark. ISBN 87-503-5327-6

Leopold, L. B. & Maddock, T. (1953): The Hydraulic Geometry of Stream Channels and some Physiographic implications. US Geol. Survey Prof. Paper 252.

Mernild, S. H. & Hasholt, B. (2001): Vandløbsdimensioner og regimeformler. Vand og Jord nr.3.

Mernild, S. H. & Hasholt, B. (2004): Naturlig vandløbsudvikling i tre geomorfologiske landskabstyper. Vand og Jord nr. 4.

Thodsen, H., Hasholt, B. and Kjærsgaard, J.H. (2008): The influence of climate change on suspended sediment transport in Danish rivers. Hydrol. Process. 22, 764-774.

Præstø på Sjælland, som ligger i et morænelandskab fra Weichsel-istiden. I beregningerne antager vi, at vandløbet har opnået stabil tilstand og beregner ved hjælp af potensformlerne, hvordan vandløbets strømleje vil ændres som følge af en klimabetinget forøgelse af vandføringen på 13 %.

Resultaterne viser, at strømlejets tværsnitsareal bliver 11 % større. Udvidelsen vil medføre, at der per kilometer vandløbslængde vil blive fjernet 70 m³ sediment fra bund og sider som svarer til 105 tons (se også ekstramaterialet på web). Dette sediment vil blive transporteret nedstrøms og ende i havet. Her vil det bidrage til næringsstoffertilførslen og dermed til eutrofiering af havområderne. Hvor meget dette bidrag udgør af den samlede årlige tilførsel afhænger af, hvor lang tid vandløbet vil være om at tilpasse sig til den nye klimatilstand.

Det vil vi kunne få en ide om ved at genopmåle de samme strækninger i Herredsbækken, som vi målte for 25 år siden. Det vil kunne hjælpe

med at afgøre, om vandløbets dimensioner allerede efter 25 år har tilpasset sig de klimaændringer, der faktisk er observeret i perioden, eller hvor langt vi i modsat fald er fra en ligevægtstilstand. Vi planlægger derfor som et pilotprojekt at gentage målingerne i Herredsbækken.

Et værktøj til valg af fremtidens arealudnyttelse

Vores resultater er principielt kun gyldige for de 880 kilometer naturlige vandløb, som udgør en meget lille del af det samlede vandløbssystem i Danmark. Men de samme grundlæggende tilpasningsprocesser vil også virke i alle de menneskepåvirkede vandløb. Målinger af den hydrauliske geometri i alle typer af vandløb vil derfor kunne sammenlignes med de naturlige og indikere, om den pågældende strækning er i ligevægt eller udsat for store ændringer.

For planlægningen af den fremtidige arealudnyttelse (for eksempel i forbindelse med udmøntningen af den nyligt indgåede "treparts-aftale") vil det være vigtigt at kende

vandløbenes tilstand og forventede reaktion på klimaændringer. Vores undersøgelser har overordnet vist, at klimaændringer vil påvirke vandløbenes form og sedimenttransport, og at man kan anvende de fundne potensfunktioner til at kvantificere denne påvirkning i de naturlige vandløb.

De hyppige og ekstreme oversvømmelser, vi for eksempel oplevede i vinteren 2023/2024, kan være et symptom på, at vores vandløbssystemer endnu ikke har tilpasset sig de øgede nedbørsmængder og efterfølgende vandføringer, der kommer af klimaforandringerne. Sådanne begivenheder medfører typisk krav om mere regulering af allerede regulerede vandløb for at sikre mod oversvømmelser. I den proces kan man anvende vores studier af de naturlige vandløb til et bedre design af de nødvendige ændringer af vandløbssystemerne, så det sker på den mest skånsomme måde. Det gælder også i situationer, hvor man i forbindelse med naturgenopretning vil lægge regulerede vandløb om i nye løb. ■

Ekstra materiale til artiklen: Vandløb og klimaændringer:

Eksempler på anvendelse af potensformler til beregning af vandløbsdimensioner

Den såkaldte Manning formel er et eksempel på en potensformel, som har været anvendt til konstruktion af kanaler fx til afvanding. Formlen kan beregne gennemsnits-hastigheden af vandet i en åben kanal.

$V = M \cdot D^{0,67} \cdot I^{0,5}$, hvor V er vandets hastighed (m/sek), D er et mål for vanddybden (m) her kaldet "hydraulisk radius" defineret som tværsnitsarealet divideret med længden af den våde bund (m^2/m) og I (m/m) er vandløbets/kanalens fald, defineret som ændringen i vandspejlets højde (m) per enhed vandløbslængde (m). M er en stedsbestemt konstant, som beskriver vandløbets ruhed (fx afhængig af bundmaterialets kornstørrelse), større ruhed giver mindre M og dermed mindre V. M får derfor dimensionen ($m^{0,33}/sek$).

Anvendt på et typisk hedeslettevandløb vælges $M = 33$, $D = 1$ m og $I = 0,001$ m/m. Herved fås $V = 33 \cdot 1^{0,67} \cdot 0,001^{0,5} = 1,04$ m/sek.

Som eksempel på anvendelsen af hydraulisk geometri (regime formler) beregner vi ændringen af et tværprofil i Herredsbækken som følge af en forøgelse af vandføringen. I Vand og Jord (2001) finder vi At-a-station relationerne $w = a \cdot Q^{0,15}$ og $d = c \cdot Q^{0,46}$, hvor w er bredde (m) og d er dybde (m) her defineret som tværsnitsareal divideret med vandoverfladens bredde, a og c er konstanter. Konstanterne a og c findes ved at ind-sætte samtidige målinger af dimensioner og vandføring i potensformlerne: fx $w = 2,1$ m og $Q = 0,032$ m³/sek: $2,1 = a \cdot 0,032^{0,15}$ giver $a = 3,52$, tilsvarende giver $d = 0,075$ m og $Q = 0,032$ m³/sek et $c = 0,37$.

Vi antager at median-maksimum afstrømningen fra den nærliggende Tryggevælde Å (60 l/sek/km²) også gælder for Herredsbækken (5,07 km opland) og beregner median-maksimum vandføringen til 0,304 m³/sek.

Indsat i formlerne: $w = 3,52 \cdot 0,304^{0,15}$ og $d = 0,37 \cdot 0,304^{0,46}$ fås $w = 2,94$ m og $d = 0,21$ m. Tværsnitsarealet $w \cdot d = 0,62$ m².

Vi antager at median-maksimum afstrømningen forøges med 13 %, som følge af en øget nedbørsmængde, således at vandføringen nu bliver 0,344 m³/sek. Indsat i formlerne fås $w = 3,00$ m, $d = 0,23$ m og tværsnitsarealet 0,69 m². Arealforøgelsen på 0,07 m² sker ved erosion i bund og bredder. Antager vi nu, at tværprofiler 0,5 m opstrøms og nedstrøms for beregningsprofilen er lig med dette, kan ændringen udtrykkes som volumenændring per meters vandløbslængde, 1 (m) \cdot $0,07$ (m²) = 0,07 m³. Antager vi, at rumvægten (t/m³) af bund- og bredmaterialet er 1,5, bliver vægten lig med 0,105 t per meters vandløbslængde.

For at bestemme erosionen fra hele vandløbet skulle tilsvarende beregninger udføres for alle målte tværprofiler, eller et repræsentativt antal. Her antager vi at profilet er repræsentativt for de nederste 3 km af Herredsbækken. Vægten af eroderet materiale fra de 3 km bliver: $0,105$ (t/m) \cdot 3000 m = 315 t som skal transporteres med strømmen til havet.

Til sammenligning kan man beregne den årlige transport fra Herredsbækken til havet. Sedimenttransporten i Herredsbækken er ikke målt, men vi antager at den er af samme størrelse som målt i den nærliggende Suså, 5,6 t/km²/år. For Herredsbækkens opland på 5,07 km² fås derfor 28,4 t/år.

Udvidelsen af tværsnitsarealet foregår jo ikke i løbet af et år, men vi kender ikke erosionshastigheden. Hvis udvidelsen foregik i løbet af 25 år ville 315/25 t/år udgøre 44 % af den normale årstransport på 28,4 t/år. På 100 år ville den udgøre 11 %.



Herredsbækken.
Foto: Lis Hasholt